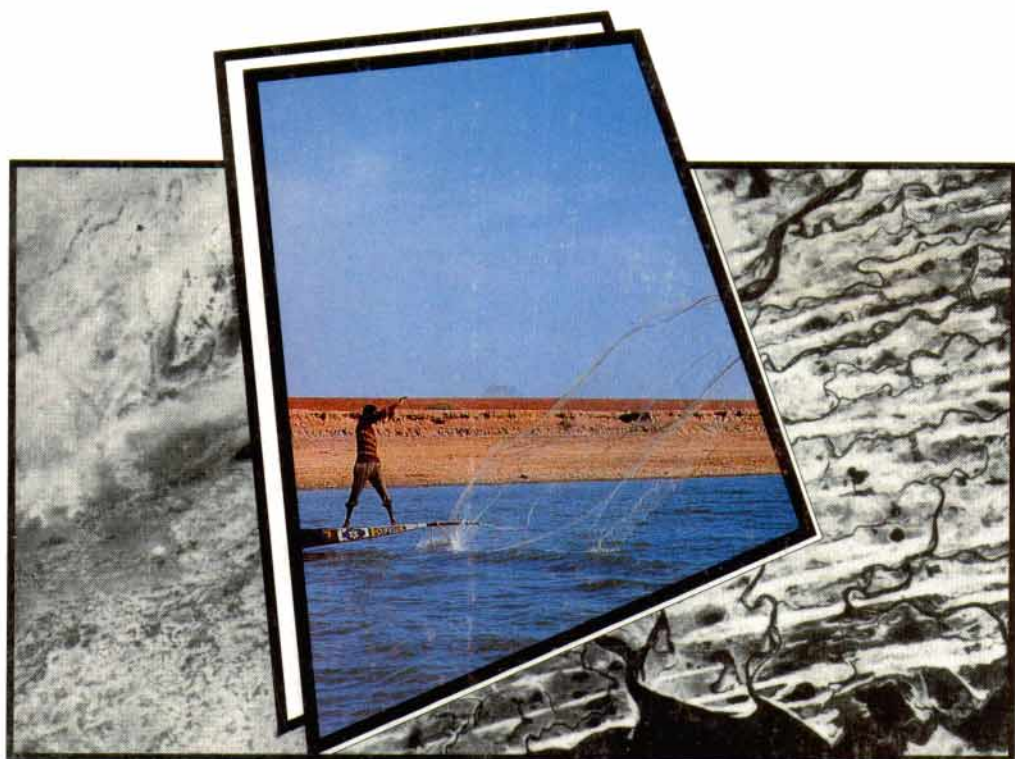


SÉMINFOR 4

Le transfert d'échelle

Textes réunis et présentés par
Christian MULLON



Quatrième séminaire informatique
de l'ORSTOM
Centre de Brest, du 11 au 13 septembre 1990

SÉMINFOR 4

Le transfert d'échelle

**Quatrième séminaire informatique
de l'ORSTOM
Centre de Brest, du 11 au 13 septembre 1990**

**Textes réunis et présentés par
Christian MULLON**

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection **COLLOQUES** et **SÉMINAIRES**

PARIS 1991

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

ORSTOM

CENTRE DE BREST

11, 12, 13 septembre 1990

**Quatrième séminaire informatique de
l'ORSTOM**

SEMINFOR 4

" LE TRANSFERT D'ECHELLE "



Laboratoire d'Informatique Appliquée

**72, Route d'Euclay - 93143 Bondy Cedex
Tél. 48 47 31 95 - Télécopie 48 47 30 88**

AVANT PROPOS

L'objectif du quatrième séminaire informatique de l'ORSTOM est de réunir les chercheurs de l'Institut confrontés, notamment à l'occasion de programmes multi-disciplinaires, au problème du changement d'échelle. On peut considérer que le changement d'échelle est le point clé de toute approche multi-disciplinaire; en effet ce qui différencie deux disciplines qui traitent du même objet, c'est de l'appréhender à des échelles différentes.

La difficulté du problème du changement d'échelle est encore plus marquée lorsque l'on doit prendre en compte des aspects dynamiques des phénomènes étudiés (ce qui est le plus courant dans une étude multi-disciplinaire) et que l'on cherche à caractériser un objet selon son fonctionnement, et non pas par une batterie de paramètres descriptifs : s'il est déjà délicat, à partir d'observations ponctuelles, de calculer un indice global ou de dresser une cartographie, il est bien plus ardu d'extrapoler le fonctionnement d'un ensemble à partir de la description du fonctionnement de certaines de ses parties, chacune sujette à une description fixée au sein d'une discipline.

A partir du constat que pour ce délicat problème, il n'existe actuellement que des solutions parcellaires, rarement satisfaisantes, ce séminaire prendra la forme d'un atelier où les intervenants sont invités à présenter, sous une forme adaptée à la variété du public,

- comment se pose le problème du transfert d'échelle au sein de leur problématique de recherche.
- quels sont les potentialités et les limites des outils qu'ils emploient,
- quelles sont les méthodologies qui leur semblent adaptées,
- quelles sont les conséquences épistémologiques d'une opération de changement d'échelle ?

Les intervenants sont des chercheurs ORSTOM et de l'IFREMER provenant de disciplines variées (pédologie, hydrologie, écologie, géographie, ethnologie, économie, etc...) qui présentent leurs expériences, en cours et achevées, ainsi que des chercheurs en informatique qui présentent des perspectives ouvertes actuellement par diverses voies de recherche en informatique.

Ce Séminaire a été financé par la Commission Scientifique des Sciences de l'Ingénieur et de la Communication, par la Mission Technique Informatique, par la Mission Technique de la Formation. Il a été organisé par le Laboratoire d'Informatique Appliquée et l'Atelier Informatique de Brest.

COMITE D'ORGANISATION

**Christian MULLON, Jean-Jacques LECHAUVE, Thierry LEBEL,
Philippe COUTY, Jean-Yves MARCHAL, Edith PERRIER,
Pascal RENAUD.**

ADMINISTRATION

**Jean-Jacques LECHAUVE
Nicole DELARBRE**

EDITION DES DOCUMENTS

Liliane ZURETTI

INTERVENANTS

ALBERGEL Jean	Centre ORSTOM IBP1386 DAKAR
AUDRY Pierre	Antenne ORSTOM auprès du TSA-CNPQ Boe Viagem, CP4010 50000 RECIFE PE BRESIL
BAUDRY Jacques	INRA Systèmes Agraires et Développement, Le Robillard 14170 SAINT-PIERRE-SUR-DIVES
BOIVIN Pascal	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
BONNEMAISON Joël	ORSTOM PARIS 213 rue La Fayette 75480 PARIS Cedex 10
BOURGINE Paul	CEMAGREF Groupement d'Antony BP 121 92164 ANTONY
BOUSQUET François	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
CAMBIER Christophe	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
CAMBREZY Luc	Centre ORSTOM Apartado Postal 544 91000 XALAPA (Ver) MEXIQUE
COURET Dominique	Département ORSTOM S.U.D. 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
COUTY Philippe	Commission Scientifique 6 ORSTOM PARIS 213 rue La Fayette 75480 PARIS Cedex 10
DAGORNE Dominique	Antenne ORSTOM BP 147 22302 LANNION

IV

DELAUNAY Daniel Calle Alfonso Alarcon, 2525
col. Bella vista
Puebla (Pue° MEXIQUE)

DUPRE Georges ORSTOM PARIS
213 rue La Fayette
75480 PARIS Cedex 10

FAUROUX Emmanuel Centre ORSTOM
BP 434 ANTANANARIVO
MADAGASCAR

FERBER Jacques LAFORIA
Université Paris VI
Place Jussieu
75252 PARIS

FREON Pierre Centre ORSTOM
BP 81
97201 FORT DE FRANCE

GOHIN Francis Centre ORSTOM
IFREMER BP70
29270 BREST

GONDARD Pierre Centre ORSTOM
2051 Avenue du Val de Montferrand
BP5045
34032 MONTPELLIER Cedex

HOEPPFNER Michel Centre ORSTOM
2051 Avenue du Val de Montferrand
BP5045
34032 MONTPELLIER Cedex

JEANSOULIN Robert IRP-Tour 66
4 Place Jussieu
75252 PARIS

JOB Olivier Centre ORSTOM
2051 Avenue du Val de Montferrand
BP 5045
34032 MONTPELLIER Cedex

LALOE Francis Centre ORSTOM
2051 Avenue du Val de Montferrand
BP 5045
34032 MONTPELLIER Cedex

LAUREC Alain IFREMER
66 avenue Iéna
75016 PARIS

LEBEL Thierry Centre ORSTOM
BP 11416
NIAMEY
NIGER

LEPRUN Jean-Claude	ORSTOM/CIRAD/INRA Ambassade de FRANCE CP 665 70359 BRASILIA DF BRESIL
LEVEQUE Christian	ORSTOM PARIS 213 rue La Fayette 75480 PARIS Cedex 10
MARTIN Jean Yves	ORSTOM 213 rue La Fayette 75480 PARIS Cedex 10
MENAUT Jean Claude	Laboratoire d'Ecologie, E.N.S. 46 rue d'Ulm 75230 PARIS Cedex 05
MERING Catherine	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
MOLINIER Michel	Missao ORSTOM CP 02.0247 70001 BRASILLIA DF BRESIL
MORAND Pierre	Centre ORSTOM BP 2528 BAMAKO MALI
MULLON Christian	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
PELTRE Pierre	ORSTOM 213 rue La Fayette 75480 PARIS Cedex 10
PERRIER Edith	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
PIRON Marie	Centre ORSTOM 70-74 route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex
PLANCHON Olivier	Centre ORSTOM 2051 Avenue du Val de Montferrand BP 5045 34032 MONTPELLIER Cedex
PODAIRE Alain	LERTS-CNES 18 Avenue Edouard Belin 31055 TOULOUSE Cedex

VI

- POUGET Marcel** Centre ORSTOM
70-74 route d'Aulnay
93143 BONDY Cedex
- QUENSIERE Jacques** Centre ORSTOM
BP 2528
BAMAKO MALI
- RIEU Michel** Centre ORSTOM
70-74 route d'Aulnay
93143 BONDY Cedex
- SEYLER Frédérique** Centre ORSTOM
BP 1857
YAOUNDE
CAMEROUN
- SOURIS Marc** Mission en Equateur
Apartado Postal 6596 CCI
QUITO-EQUATEUR
- VAUGELADE Jean** Centre ORSTOM
BP 182
BURKINA FASO
OUAGADOUGOU
- VOLKOFF Boris** Centre ORSTOM
BP 1857
YAOUNDE
CAMEROUN
- WACKERNAGEL Hans** Ecole Nationale Supérieure
des Mines de Paris
Centre de Géostatistique
35 rue Saint Honoré
77305 Fontainebleau

SOMMAIRE**LE CHANGEMENT D'ECHELLE DANS LE TRAITEMENT D'IMAGE****MERING C.**

QUELQUES REMARQUES A PROPOS DES TRANSFERTS
D'ECHELLE LORS DE L'INTERPRETATION DES IMAGES DE
TELEDETECTION **3**

GOHIN F.

DE L'USAGE DES OBSERVATIONS DE LA TEMPERATURE DE
SURFACE DE LA MER MESUREE PAR TELEDETECTION OU
DIRECTEMENT EN MER..... **3 9**

DAGORNE D.

OUTILS DU CHANGEMENT D'ECHELLES EN TELEDETECTION
ASPECT RADIOMETRIQUES ET SPATIAUX **5 1**

LE SYSTEME EAU/SOL

**BOIVIN P., BRAUDEAU E., COLLEUILLE H.,
EISENLOHR L., MONTOROI J.P., TOUMA J.,
ZANTE P.**

EVALUATION DES CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DE SOLS
A DIFFERENTES ECHELLES. CAS DES SOLS SULFATES
ACIDES SABLEUX DE LA VALLEE DE KATOURE (BASSE
CASAMANCE, SENEGAL)..... 6 5

PLANCHON O.

TRANSFERTS D'ECHELLE ET ETUDE DES ECOULEMENTS DE
SURFACE SUR UNE PENTE..... 7 9

MOLINIER M., LEPRUN J.C., AUDRY P.

EFFET D'ECHELLE OBSERVE SUR LE RUISSELLEMENT DANS
LE NORDESTE BRESILIEN..... 9 5

JOB J.O., HACHICHA M.

NOTION D'ECHELLE ET VARIABILITE SPATIALE DE LA
SALURE DANS LES SOLS..... 1 0 5

PERRIER E.

MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DES SOLS.
PASSAGE DE L'ECHELLE MICROSCOPIQUE A L'ECHELLE
MACROSCOPIQUE..... 1 1 3

RIEU M.

REPRESENTATION FRACTALE DU SOL ET DE SON
FONCTIONNEMENT HYDRIQUE..... 1 3 3

LEBEL T.

LE TRANSFERT D'ECHELLE EN HYDROLOGIE : CONCEPT OU
CONFUSION ? 1 4 7

PROBLEMES STATISTIQUES DU TRANSFERT D'ECHELLE

WACKERNAGEL H.

CHANGEMENT DE MAILLE ET CHANGEMENT DE SUPPORT

..... 159

LALOE F.

VARIABILITE ET SOURCE DE VARIABILITE A DIFFERENTES

ECHELLES ANALYSE DE VARIANCE DE MODELES A EFFETS

FIXES ALEATOIRES..... 173

MULLON CH., PICHON G

PROBLEMES STATISTIQUES DE LA TRES GRANDE

VARIABILITE..... 183

MORAND P., QUENSIERE J., HERRY C.

ENQUETE PLURIDISCIPLINAIRE AUPRES DES PECHEURS DU

DELTA CENTRAL DU NIGER: PLAN DE SONDAGE ET

ESTIMATEURS ASSOCIES..... 195

PIRON M.

METHODE POUR LE CROISEMENT DE VARIABLES

QUALITATIVES DANS LES ENQUETES A PLUSIEURS

NIVEAUX 213

COURET D.

APPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE D'UN SYSTEME

D'ECHELLES AU TRAITEMENT GEOGRAPHIQUE DES DONNEES

TRAITEMENT DES DONNEES SUR LE LOGEMENT DU

RECENSEMENT 1982 DE QUITO (EQUATEUR) AU NIVEAU DE

L'ILOT 235

VAUGELADE J.

L'EXPLOITATION CARTOGRAPHIQUE DES ENQUETES PAR

SONDAGE..... 249

DELAUNAY D.

DEMOGRAPHIE ET SYSTEMES AGRAIRES UN EXEMPLE

D'INFERENCE STATISTIQUE DANS UN SYSTEME

D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE 255

APPROCHE GEOGRAPHIQUE DE L'ESPACE**JEANSOULIN R.**

VERS UN LANGAGE DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

..... 267

CAMBREZY L.

TRANSFERT D'ECHELLE ET ORGANISATION SPATIALE..... 281

PELTRE P.ACCIDENTS MORPHOCLIMATIQUES A TRAVERS LA PRESSE
QUITO (EQUATEUR) 1900-1988. DE L'INFORMATION
QUALITATIVE A LA CARTOGRAPHIE DE FREQUENCES :
PROBLEMES D'ECHELLE.....

291

BONNEMAISON J.

LIEUX ET ROUTES EN MELANESIE..... 315

GONDARD P.DU 1/50000 AU 1/1000000, POINTS DE VUE SUR LES
PAYSAGES DE L'EQUATEUR.....

319

ECO-SYSTEMES ET SOCIETES

LEVEQUE C.
 PROBLEMATIQUES DES ECOSYSTEMES AQUATIQUES 3 3 3

FREON P., GERLOTTO F., MULLON CH.
 LES CHANGEMENTS D'ECHELLES EN HALIEUTIQUE:
 L'EXEMPLE DES PETITS PELAGIQUES COTIERS 3 4 3

FRONTIER S.
 TRANSFERTS D' ECHELLES EN OCEANOGRAPHIE. 3 6 5

FRONTIER S.
 LES OUTILS MATHEMATiques NOUVEAUX DU TRANSFERT
 D' ECHELLE.GEOMETRIE FRACTALE, RELATEURS
 ARITHMETIQUES, THEORIE DES CATASTROPHES,
 DYNAMIQUE CHAOTIQUE, ANALYSE NON STANDARD 3 7 9

BOUSQUET F., CAMBIER CH.
 TRANSFERT D'ECHELLE ET UNIVERS MULTI-AGENTS: LE
 CAS DU SYSEME DE LA PECHE DU DELTA CENTRAL DU
 NIGER 4 0 5

BAUDRY J.
 PHENOMENES DE DEPENDANCES D'ECHELLES DANS L'ETUDE
 DU CHANGEMENT D'UTILISATION DES TERRES 4 2 5

FAUROUX E.
 MACRO-DYNAMIQUES SOCIALES ET OBSERVATIONS MICRO-
 LOCALISEES: DES ECHELLES MULTIPLES POUR
 L'ANTHROPOLOGIE..... 4 3 9

COUTY PH.
 CHANGEMENT D'ECHELLE ET ECONOMICITE OU
 L'ENROULEMENT DES CHOSES 4 5 1

DELAYE C., FERBER J., JACOPIN E.
 APPROCHE INTER-ACTIVE DE LA RESOLUTION DE
 PROBLEMES: L'ECO-RESOLUTION..... 4 6 1

CONSTRUIRE DES PROGRAMMES MULTI-DISCIPLINAIRES**QUENSIERE J.**

SYSTEMIQUE ET PLURIDISCIPLINARITE : L'EXEMPLE DU
PROGRAMME D'ETUDE DE LA PECHE DANS LE DELTA
INTERIEUR DU NIGER..... 475

LEBEL T.

H COMME HAPEX : HYDROLOGIE HORS BASSIN VERSANT
..... 493

MENAUT J.C., PODAIRE A.

ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DES SAVANES D'AFRIQUE DE
L'OUEST : MECANISMES SOUS-JACENTS ET
SPACIALISATION DES PROCESSUS (PROJET SALT: LES
SAVANES A LONG TERME)..... 507

SEMINFOR 4. 11/9/90
INTERVENTION DE JEAN-YVES MARTIN,
PRESIDENT DE LA COMMISSION DES SCIENCES
DE L'INGENIEUR ET DE LA COMMUNICATION
(CS7)

En l'état actuel de la recherche, la grande question de la pluridisciplinarité est que l'on en parle plus que l'on n'en fait. Il y a deux raisons à cela :

- la première est que le besoin de conjuguer les disciplines se fait de plus en plus évident. Il faut pouvoir répondre à des questionnements issus du mouvement propre de la recherche elle-même, et répondre aussi à des interpellations venant de l'extérieur. Ainsi le réel est appréhendé dans sa plus grande complexité par les chercheurs, et la société attend davantage ou autre chose de la recherche.

- la deuxième raison est que l'on ne sait pas très bien faire de la pluridisciplinarité. Elle ne va pas de soi mais doit au contraire se construire en permanence. Il faut la préparer et l'accompagner.

La pluridisciplinarité, c'est-à-dire la mise en relation des objets de différentes disciplines, est facilitée par des recours à des outils communs, par exemple l'informatique et les modèles. Réfléchir ensemble sur des outils communs peut être ainsi une bonne propédeutique à la pratique pluridisciplinaire. c'est le sens de notre réunion.

L'objectif de ce quatrième Séminfor, co-organisé par la Mission Technique Informatique et la Commission des sciences de l'ingénieur de l'ORSTOM, est de réunir les chercheurs, ingénieurs et techniciens confrontés, notamment à l'occasion de programmes multidisciplinaires, au problème du "transfert d'échelle".

La référence à la multidisciplinarité est faite dès la départ, car les divers objets que construisent les différentes disciplines à partir d'une même chose, sont fréquemment observés et appréhendés à des échelles différentes d'une discipline à l'autre, sans que pour autant cette différence d'échelle soit la règle des différences entre disciplines.

Cependant le problème du transfert d'échelle est l'un de ceux qui doivent être résolus pour que des résultats ne soient pas réduits à de simples juxtapositions.

Le problème du transfert d'échelle est intimement associé à celui de l'identification du niveau auquel se situent des sources de variabilité qui s'expriment par des variations pouvant être observées à d'autres niveaux. Ceci conduit à la prise en compte des aspects dynamiques, à travers la description de systèmes dont les moteurs agissent à certaines échelles, et dont les qualités peuvent être critiquées à partir d'observations disponibles à d'autres échelles.

Les enjeux du problème sont ainsi très importants car ils portent sur la possibilité d'intégrer des résultats qui souvent ne le sont pas, et surtout sur la faculté, dans de nombreux cas, de passer de la recherche de la description des états à celle du fonctionnement d'un système qui les engendre.

Ainsi la question du transfert d'échelle n'est pas seulement instrumentale, elle est aussi épistémologique. Nous y trouvons donc bien les deux ingrédients de tout rapprochement entre disciplines.

OUVERTURE DE SEMINFOR 4

RENAUD P.

Le transfert d'échelle est un problème rencontré dans nombre de disciplines et particulièrement dans les recherches pluri-disciplinaires. Géographes, hydrologues, pédologues, etc .. sont confrontés depuis longtemps à ce problème.

Ce séminaire se situe dans la continuité du Séminfor 2 sur la modélisation organisé à Montpellier en septembre 1988. De nouvelles voies de recherche en informatique croisent les problèmes de la modélisation des phénomènes complexes que rencontrent quotidiennement les chercheurs de l'ORSTOM. Ces voies s'appellent : logiques non monotone, réseaux neuronnaires, éco-résolution, langages acteur ou de frame... Elles ne fournissent pas d'outils prêt à être utilisés, mais proposent des méthodes qu'il faut encore affiner, expérimenter, préciser.

Ce travail d'étude méthodologique: "*se saisir des résultats de la recherche en informatique pour en tirer parti dans les programmes de l'ORSTOM*" est la mission principale du L.I.A. En ce sens, ce colloque est aussi le résultat du travail du L.I.A et particulièrement de la collaboration qui s'est renforcée cette année entre le L.I.A de Bondy, le LAFORIA de l'Université de Pierre et Marie CURIE, le LRI de l'Université de Paris-Sud.

En développant la collaboration entre les laboratoires de recherche en informatique et les U.R "thématiques" de l'ORSTOM, nous apportons à nos programmes des compétences, des méthodes et des techniques qui leur permet d'emprunter des voies originales et nous apportons à nos partenaires informaticiens des applications et des thèmes de réflexions nouveaux.

L'informatique et le traitement de données, en général, peut jouer un rôle de catalyseur de la pluri-disciplinarité à l'ORSTOM. Il est aussi l'occasion d'un rapprochement de l'ORSTOM avec les sciences exactes.

Avant d'ouvrir ce séminaire, je voudrais insister sur le caractère "atelier" (work shop) de cette rencontre. C'est à dire que les discussions, les échanges de idées sont aussi, voir plus importants que les exposés. Je déclare ouvert le quatrième séminaire informatique de l'ORSTOM.

**LE CHANGEMENT D'ECHELLE
DANS LE TRAITEMENT D'IMAGE**

QUELQUES REMARQUES A PROPOS DES TRANSFERTS D'ECHELLE LORS DE L'INTERPRETATION DES IMAGES DE TELEDETECTION

MERING C.

RESUME

Dans les domaines scientifiques d'utilisation des images de télédétection terrestre, l'objectif est défini aussi souvent comme la délimitation et l'identification d'objets géographiques que comme la mesure d'un phénomène physique déterminé.

Une telle approche suppose que l'on a modélisé la scène satellitaire, en cherchant à associer aux entités iconiques délimitées visuellement ou par une procédure automatique, des entités géographiques.

Cette modélisation est inhérente à toute interprétation d'une scène satellitaire. Elle peut être explicitée en partant de l'exemple de la photo interprétation, bien que celle-ci ait été mise au point pour analyser des scènes d'échelle plus importante. Elle suppose en particulier la prise en compte des transferts d'échelle opérés souvent implicitement dans la mise en correspondance entre entités géographiques et entités iconiques en particulier à l'aide des classifications multispectrales. A l'aide de quelques exemples, nous proposons ici deux moyens d'aborder le problème de transfert d'échelle dans le traitement informatique des images de télédétection:

- 1) l'analyse d'entités iconiques d'un niveau supérieur à celui de la tâche élémentaire à l'aide de descripteurs des textures et des structures.
- 2) le traitement symbolique des taxonomies décrivant les entités géographiques afin de préciser formellement la nature du changement d'échelle effectuée lors de l'interprétation d'image.

1. LA TERRE OBSERVABLE A DE NOUVELLES ECHELLES SUR LES IMAGES DE TELEDETECTION

Rappelons que selon la terminologie officielle de la télédétection¹, l'image n'est qu'une "représentation plane obtenue à partir d'un enregistrement structuré des données saisies par télédétection spatiale électromagnétique".

Or, si l'on excepte les équipes de physiciens qui étudient le rayonnement émis par les corps terrestres, la plupart des autres disciplines concernées par l'observation de la terre présentent la télédétection comme un outil privilégié pour réaliser des objectifs, qui ne paraissent avoir de rapport étroit avec l'origine de ces données, tels que la *cartographie thématique*, l'étude des *paysages*, l'analyse des *milieux naturels* et de leur *évolution*., l'analyse du *milieu agricole*, l'analyse du *tissu urbain* la détection des *structures lithologiques* ou des *risques naturels*

Au sein de chacune de ces disciplines les objets sont appréhendés à des échelles parfois différentes (photographies aériennes, observation sur le terrain, mesures physiques ponctuelles ou au microscope) ou avec des outils descriptifs très variés (analyse visuelle des photographies, analyse statistique des mesures ponctuelles, descriptions verbales, graphiques, cartographiques). Les caractéristiques intrinsèques de la scène satellitaires tels que le pouvoir de *résolution* spatiale des capteurs (de 5km à 10m), dont l'élément de base est toujours le *pixel*, décrit par une série de mesures physiques n'ont pas été conçues en fonction d'un objet scientifique particulier mais pour fournir à l'ensemble de la communauté (scientifique ou non) des observations répétitives et exogènes de la surface du globe sous forme d'*images numériques*. La scène n'est pas le *milieu*, le *pixel* n'est ni l'*objet* ni le *paysage*.² On ne s'étonnera pas alors que, tout en soulignant l'intérêt de ces données dans le cadre de leur discipline³, les scientifiques habitués à manipuler des données d'une autre nature et à d'autres échelles, aient exprimé la difficulté qu'ils éprouvaient à intégrer un tel outil à leur recherche.⁴ Paradoxalement, les problèmes méthodologiques soulevés

¹Cette terminologie est contenue dans le "glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale" édité par la Société Française de photogrammétrie et de télédétection (Bulletin n°112/1988-4).

²"La télédétection par satellite innove sous deux aspects par rapport aux méthodes plus anciennes d'observation : le champ temporo-spatial de la perception et la nature même de cette perception" (J. Tricart in FRALIT (équipe) -1977- "Télédétection du littoral océanique de la France" Montrouge, ENSJF.)

³"Les géographes se trouvent maintenant dotés d'une vision multispectrale et multitemporelle des paysages numérisés, informatiquement manipulables et représentables par infographie sous forme d'images-cartes à tout moment du processus de traitement"(M.Bruneau et J.Kilian in [BRUNEAU 1984])

⁴"L'image n'étant pas sélective, les détails importants pour le sujet traité se trouvent mêlés à d'autres qui sont de second plan ou mêmes inutiles."(F.Joly, in La Cartographie, coll Que Sais-je, Ed P.U.F, Paris 1966)

n'ont fait que s'amplifier avec l'apparition des capteurs à haute résolution tant attendus et dont il est admis que l'échelle de restitution est de l'ordre du 1/50000ème.¹

Ces problèmes apparaissent liés de façon intrinsèque à la technique de télédétection et à son utilisation thématique. Tout d'abord, il n'y a pas de correspondance absolue et intemporelle entre un objet et sa signature spectrale en particulier parce que les mesures radiométriques sont fortement influencées par les conditions de prise de vues (climat, saison, heure, conditions atmosphériques). Mais surtout, l'objet détectable spectralement ne correspond pas forcément à un objet dont l'intérêt est reconnu pour une discipline donnée².

En effet, l'interprétation des images de télédétection suppose une prédétermination de la collection d'objets à reconnaître, ou bien une partition mentale de la scène en différentes entités "significatives". Nous ne parlerons pas ici du problème du transfert d'échelle du point de vue de la restitution cartographique mais uniquement de celui de l'analyse des images de télédétection et de leur interprétation thématique, étant entendu que celle-ci peut être matérialisée sous forme d'une carte [MERING 89]

Nous tenterons donc d'explicitier les changements d'échelle spatiale opérés dans les différentes phases de l'analyse et de l'interprétation des images. Dans la première partie on décrira comment, en partant de la définition d'entités géographiques constituées par les objets au sol, on analyse les entités iconiques que sont les pixels pour interpréter la scène entière, représentant le milieu à étudier, suivant une démarche désormais classique en télédétection. Dans la deuxième partie on adoptera un point de vue différent en montrant comment, en partant de concepts géographiques connus, on décompose l'image en entités iconiques de dimension spatiale décroissante correspondant à une analyse de plus en plus détaillée de la scène.

¹"Il apparaît donc que la quantité et la variété des informations disponibles croît très rapidement avec la multiplication des tranches de longueurs d'onde enregistrées, l'amélioration de la répétitivité et celle de la résolution. Il y a donc un très grand risque que les utilisateurs soient submergés sous l'abondance d'information" (J. Tricart in FRALIT (équipe) "Télédétection du littoral océanique de la France" Montrouge, ENSJF, 1980)

²"Si l'on peut définir d'une manière concomitante dans l'espace et dans le temps une unité qui a un comportement spécifique, détectable spectralement, alors il existe un objet auquel on peut faire correspondre cette unité. Cette unité ne correspond pas forcément à un thème particulier. Elle peut consister en une association de thèmes ou correspondre à une organisation spécifique d'objets; objets qui peuvent être définis fort différemment par les divers thématiciens." (M.C. Girard et C.M. Girard in [GIRARD 89], p86.)

2. DU PIXEL A L' ESPACE GEOGRAPHIQUE.

Dans le domaine de la *vision* par ordinateur, la démarche qui part de la donnée initiale, le pixel, pour atteindre un but qui peut être l'interprétation d'un ensemble d'entités iconiques ou bien de la scène entière, comme le suggère la figure 1, est dite *ascendante*.

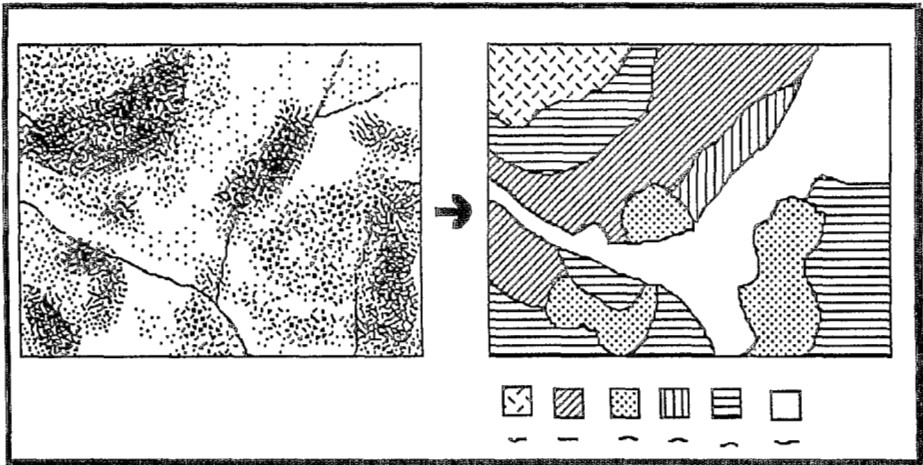


Figure 1: Démarche ascendante de l'interprétation d'image

Elle suppose que l'on interprète progressivement les données au cours des traitements successifs pour arriver à ce but. On y opère des changements de niveau dans l'analyse et l'interprétation par *composition* d'entités iconiques. C'est une manière de procéder au transfert d'échelle qui part du pixel pour interpréter la scène. Elle a été décrite par Nagao dans "Structural Analysis of Complex aerial Photographs", qui l'a matérialisée sous forme d'un programme informatique [NAGAO 1981]. Comme nous le verrons, Il semble qu'en télédétection les entités définies sur le terrain soient le plus souvent à l'origine de l'interprétation de la scène à travers une démarche dite "dirigée". Ces entités servent à déterminer les caractéristiques de l'image par "apprentissage". Le schéma n'est donc pas purement ascendant, puisque la généralisation spatiale est guidée par la réalité de terrain, et pas seulement par une connaissance thématique permettant d'attribuer une signification aux entités de l'image.

2.1 De l'état de surface à la scène satellitaire

Pour analyser les objets à la surface de la terre à l'aide de leurs propriétés spectrales, on délimite, sur le terrain et sur les images, des ensembles, ou *états de surface* définis par leur comportement

spectral qui dépend, comme on le sait, de multiples caractéristiques physiques et biologiques. Suivant les auteurs, et les objectifs scientifiques, il peut s'agir soit des caractéristiques de la surface du sol, indépendamment de toute mesure effectuée sur elle¹, soit de caractères physiques détectables à distance.² La première définition, privilégiant les caractéristiques mesurables au sol, a pu être utilisée dans les recherches dont la finalité était l'étude du sol, comme par exemple en pédologie. Dans ce cas, l'état de surface, bien que fugitif, est caractérisé sur le terrain par l'observation et la mesure in situ de plusieurs grandeurs caractéristiques de la surface (couverture végétale, humidité, rugosité de la surface, couleur, micro-relief...) susceptible d'expliquer la quantité énergie solaire réfléchie dans différentes longueurs d'onde. La dimension d'une unité ayant un état de surface donné est déterminée par le protocole de mesure in situ que l'on aura adopté. C'est ainsi que R.Escadafal définit des "états de surface élémentaires" comme étant "une plage d'un état de surface pouvant être individualisé et caractérisé au niveau macroscopique"[ESCADAFAL 89]. La détermination du niveau spatial d'analyse, et donc de l'échelle, est donc lié aux techniques utilisées pour délimiter des plages *homogènes*, sur le terrain. La définition de l'homogénéité étant elle-même liée au niveau d'observation, on ne peut que constater que ces états de surface sont non seulement fugitifs dans le temps, mais sans dimension spatiale fixe. Si l'on se réfère aux expériences conduites dans le cas des recherches thématiques, on constate que le premier élément analysé est une surface dont la dimension est souvent inférieure à celle de la *tachèle*.³ Les états de surface observés par télédétection correspondent dans ce cas à un assemblage de surfaces observées sur le terrain. L'interprétation de la scène dépend donc du contenu d'une tachèle en terme d'états de surface élémentaires. Elle suppose que l'opérateur fasse l'inventaire des modes d'assemblage rencontrés dans le paysage, dans le périmètre d'une tachèle⁴ de façon à mettre systématiquement en relation les relevés de terrain et la réponse radiométrique des pixels, comme l'illustre la figure 2

¹"Composition et organisation de la surface du sol à un instant donné" (R.Escadafal in [ESCADAFAL 89], p58)

²Ensemble des caractères propres à la surface de la terre susceptible d'être détectés depuis un satellite ou un avion" (M.Bruneau et J. Kilian in "SPOT1, premiers résultats en vol", 1986, cepadues-editions,Toulouse, pp197-202.)

³"Dans le cas d'un état de surface composé d'un seul ESE, quelques mètres carrés suffisent pour le décrire en un site" (R.Escadafal in [ESCADAFAL 89],p59).

⁴500m² pour SPOT, 900m² pour TM, 6,4km² pour MSS, 100 ha pour NOAA.

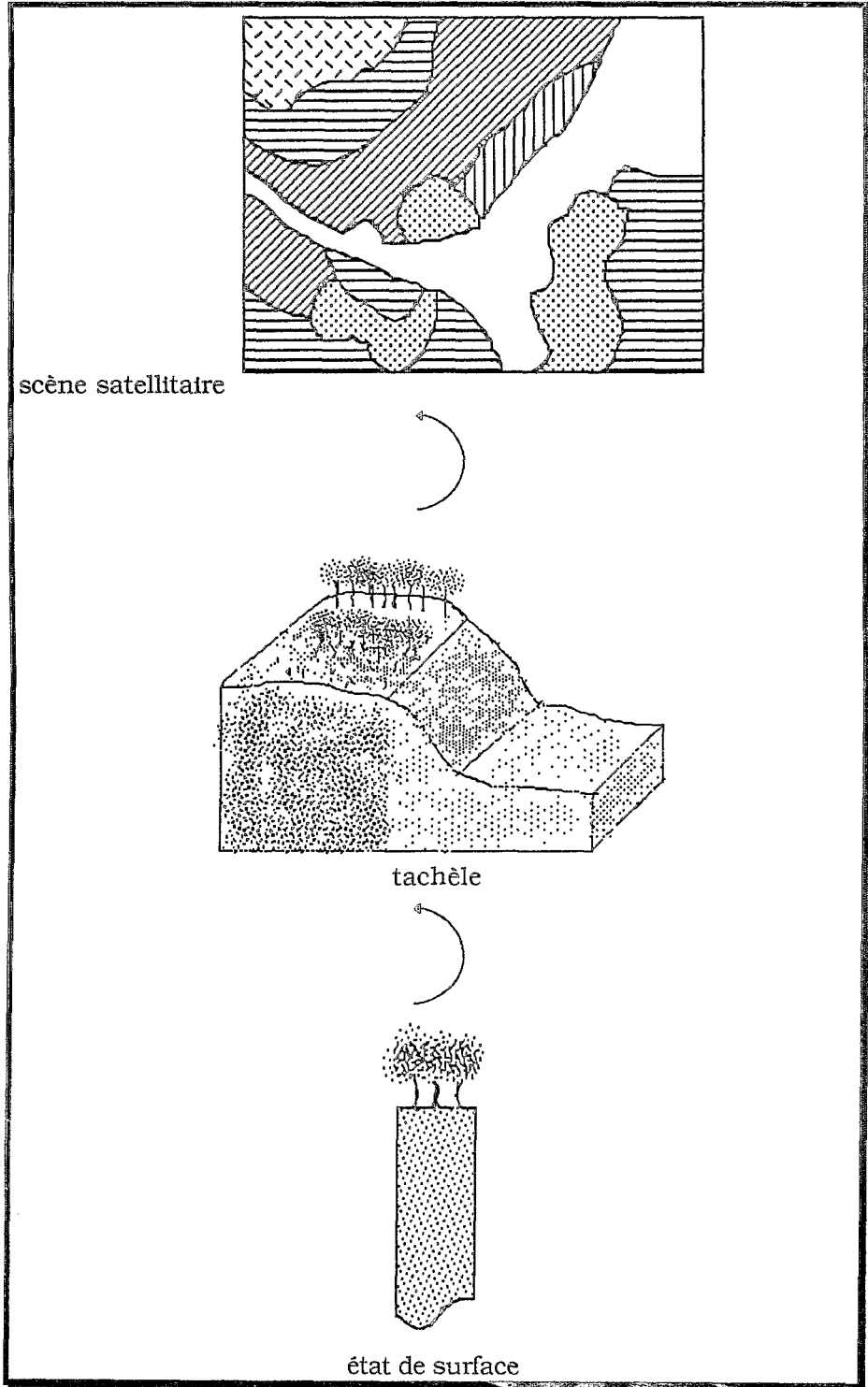


Figure 2 : De l'état de surface à l'interprétation de la scène

2.2 Du pixel à l'unité de paysage

La deuxième définition des états de surface, celle de la télédétection,¹ est plus pragmatique puisqu'elle se plie à la contrainte technologique que constitue le pouvoir de résolution du capteur. Elle implique que les états de surface observés correspondent aux tâches. Ainsi les télédétecteurs, en exploitant les images provenant d'un même capteur, accèdent à des mesures d'états de surface à un niveau spatial déterminé et répétitif, à travers les *pixels*, qu'il peuvent soumettre au traitement informatique et statistique. Dans ce cas, les méthodes de classification appliquées aux pixels permettent de d'élaborer automatiquement sur les images des entités constituées d'un ensemble connexe de pixels correspondant à des états de surface *similaires* à une échelle donnée, les zones connues sur le terrain et reconnues sur l'image, servant d'ensembles d'apprentissage aux classifications dirigées.

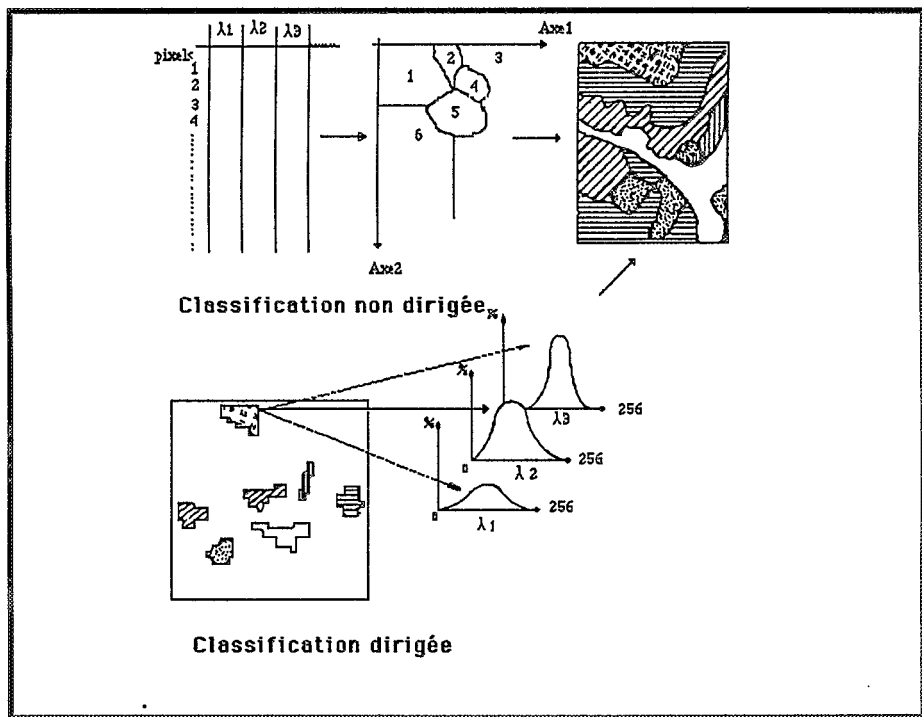


Figure 3: Les deux modes de classification des pixels²

¹ "L'ensemble des caractéristiques conditionnant l'interaction du rayonnement électro-magnétique avec la matière, nécessaires et suffisantes pour identifier une surface déterminée" (Glossaire des Termes officiels de la télédétection, Bull.SFPT, Saint Mandé 1984.)

² Ce graphique est largement inspiré du schéma des classifications statistiques, dans l'ouvrage [GIRARD 89], p57

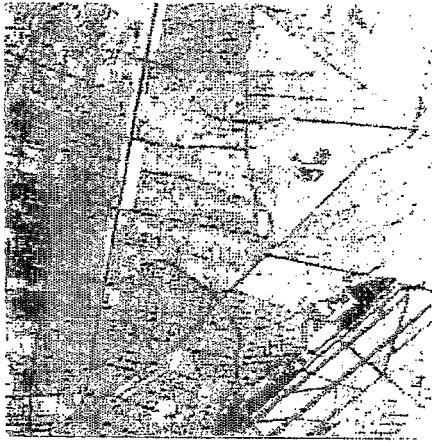


Figure 4

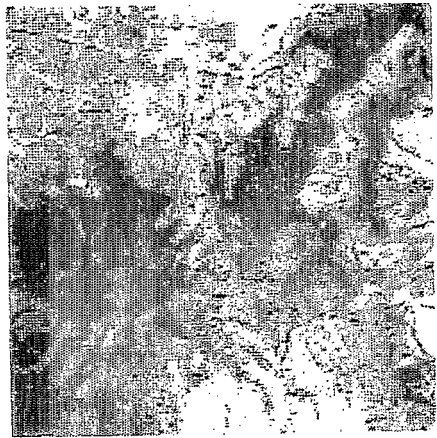


Figure 5

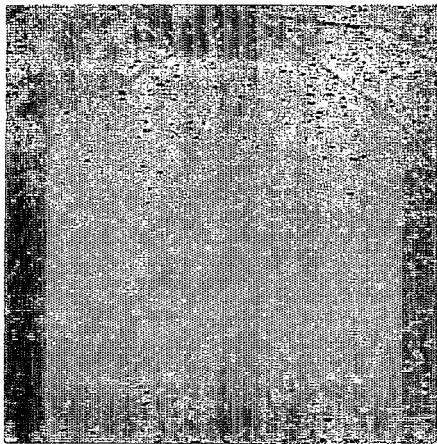


Figure 6



Figure 7

Sur la figure 3, nous avons illustré le processus d'interprétation de la scène au moyen des méthodes de classification, dirigée et non dirigée

La composition des éléments pour interpréter le tout est donc le mode d'association le plus couramment décrit en télédétection. Il reste encore à préciser quel est le degré de similarité spectrale considéré pour délimiter les classes d'états de surface: de ce choix découle la dimension spatiale des entités qui seront créés.

Les figures 4, 5, 6, 7 représentent quatre quadrats extraits de l'image XS3 d'une scène SPOT (Mars 86)¹ sur la ville de Mexico, correspondant respectivement au centre ville (figure4), à la végétation naturelle sur un volcan (fig5), à une zone en voie d'urbanisation (figure6), et à une zone de parcelle agricole (fig7). Par la suite on intitulera respectivement ces quadrats : MEXCENTRE, MEXVEG, MEXZONE, MEXPARCEL.

Sur les figures 8, 9, 10, et 11 nous avons représenté les quatre images correspondant à l'interprétation de la scène à l'aide d'une classification automatique en six classes d'états de surface établie à partir des trois canaux de SPOT. Le même niveau de gris correspond à une même classe d'état de surface. D'un quadrat à l'autre, un même niveau de gris correspond à un état de surface "similaire". Comme on peut le constater à travers ces images, les mêmes classes d'états de surface (sols nus, végétation dense, revêtement de la voirie, matériaux des toitures) sont présents dans tous les quadrats mais dans des proportions très variables et selon des organisations spatiales également très différentes.

Des notions qui précèdent, il ressort que l'état de surface minimal télédéteeté étant la tachèle, toute identification des états de surface à partir des images de télédétection revient à classer les pixels d'après leur valeurs radiométriques. Cette approche qui paraît cohérente et dont la mise en oeuvre informatique est désormais classique, se trouve être largement utilisée. Il ne resterait plus alors qu'à formaliser les transferts d'échelle opérés implicitement en passant de la mesure radiométrique de terrain à la donnée radiométrique de la télédétection, (cf fig. 2), ce que l'on peut envisager en particulier à l'aide des méthodes de la Géostatistique [WACKERNAGEL 86].

L'un des problèmes à résoudre demeure *l'identification*, en particulier parce qu'en toute rigueur, les états de surface devraient être connus sur le terrain au moment du passage du satellite ce qui s'est avéré très difficile à réaliser en pratique. Il est également admis que la tentative d'associer les états de surface et les images satellitaires se heurte à la difficulté de décrire de façon systématique des unités géographiques dont la dimension est

¹ Cette classification a été établie par J.M.Eberhard, géographe à l'ORSTOM, qui a entrepris une recherche sur le mode de croissance de la ville de Mexico à partir des images satellitaires à haute résolution



Figure 8



Figure 9

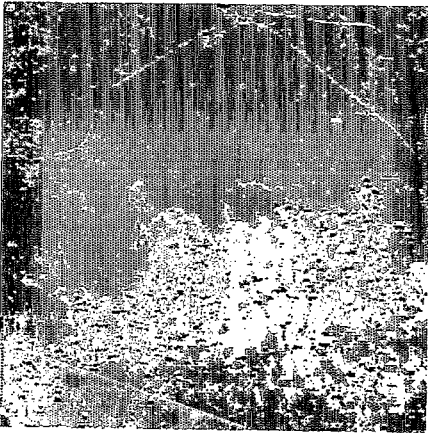


Figure 10



Figure 11

imposée par le pouvoir de résolution des différents capteurs¹. En effet, comment décrire un état de surface, lorsqu'à l'intérieur de la tachèle, la surface du sol est recouverte de végétation arborée, de lieux d'habitat? En effet, observée à cette échelle, la surface est le lieu d'une collection d'objets de nature hétérogènes et de dimension variable, qui composent le paysage. L'image satellitaire, en fonction du pouvoir de résolution, va donc être influencée par l'extension latérale et verticale de ces objets.

Cet agencement se traduit sur l'image par différents types de textures² que certains auteurs ont associé à des unités de paysage³.

C'est donc par la *composition* des pixels classés que l'on va définir sur l'image des textures et sur le terrain, des entités spatiales plus grandes que la tachèle. De ce fait, on a ajouté un intermédiaire spatial dans l'analyse de la scène, l'unité texturale.

2.3 Texture des images et échelle spatiale

Woodcock et Strahler [WOODOCK 86], à l'aide d'un seul paramètre, qu'ils intitulent "la variance locale" recherchent l'"échelle appropriée" pour analyser une scène. Ils font correspondre la limite de résolution thématique d'une image de télédétection en fonction d'un milieu donné, au maximum de cette fonction lorsque l'on fait varier le pas de résolution. L'algorithme permettant d'évaluer cette échelle est relativement simple: on diminue artificiellement la résolution de l'image en effectuant à chaque étape un lissage de l'image précédente puis une incrémentation de un pixel sur deux. On obtient ainsi des images de plus en plus petites correspondant à une même scène. La structure des données ainsi créées peut être représentée sous la forme d'une pyramide, où l'on associe chacun des niveaux à une résolution spatiale donnée (cf fig. 12).

¹On pourrait être évidemment beaucoup plus précis dans ces premières impressions de terrain. Il n'y a pas de limites, et l'on ne saurait d'ailleurs pas où s'arrêter. On pourrait poursuivre les comparaisons, on pourrait décrire et compter, mesurer et tester." (J.F.RICHARD in "le paysage, un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux" ed ORSTOM, Paris, 1989, p18)

²La texture est l'ensemble défini en extension des éléments texturaux. Un élément textural d'une image est la zone continue et répétée dans laquelle aucun changement de caractère n'est pas décelable avec les moyens dont on dispose. Ici l'élément textural est le pixel.

³"Une analyse visuelle permet de différencier plusieurs types de textures ou d'arrangements dans l'espace de ces pixels classés. L'interprète associe chacune de ces textures à un type de paysage. Il délimite ainsi des unités de paysage définies par une combinaison d'états de surface" (M.Bruneau, J.Kilian in [BRUNEAU 1984])

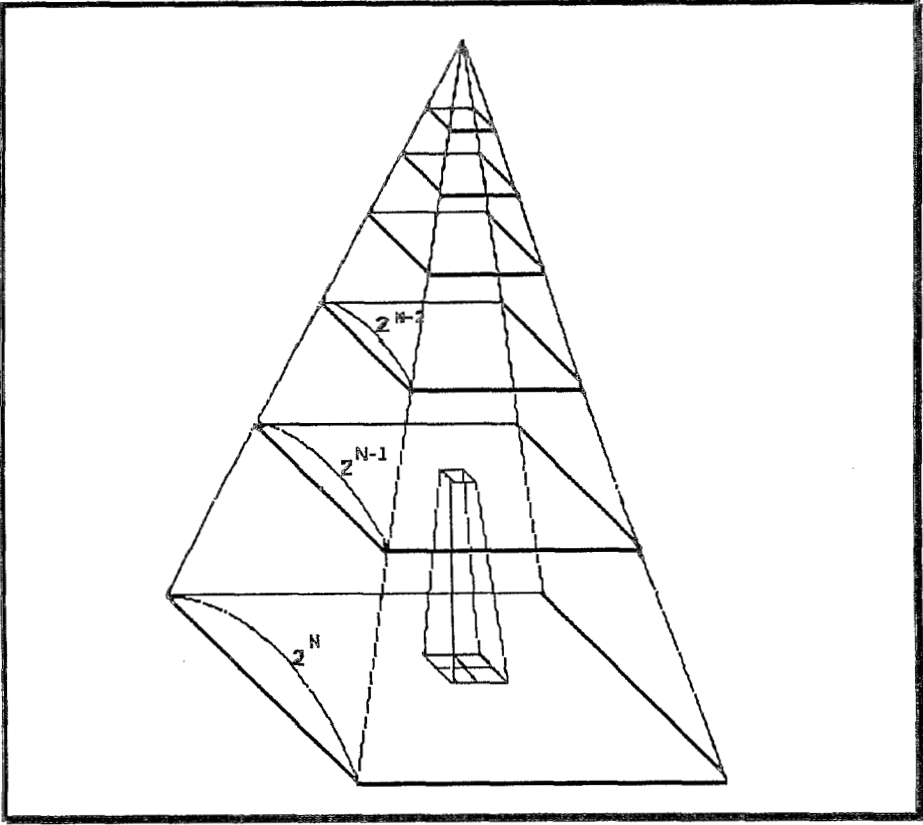


Figure 12 : Variation artificielle de la résolution de l'image

Pour chaque image, étage de la pyramide, on calcule l'écart type local (cf equation I, §3.1) , puis la moyenne des valeurs des pixels de l'image résultante. Plus cette moyenne est faible, plus l'image est "localement lisse". Plus elle est élevée, plus elle est "localement perturbée". En supposant que la taille des objets au sol, correspond exactement à la résolution de l'image et si ces objets ne sont pas jointifs, alors l'image sera localement perturbée et la valeur de la fonction sera élevée. Si la taille de ces objets est bien supérieure à la résolution, l'image sera localement lisse et la valeur de la fonction sera peu élevée. En diminuant progressivement la résolution de l'image, on analyse l'évolution de cette fonction. Les auteurs de la méthode considèrent que le maximum de la fonction indique l'échelle "thématique", c'est la résolution optimale pour analyser un thème, comme un motif composé d'objets au sol.

Ils ont appliqué cette procédure à des scènes où l'on observe une répétitivité texturale des états de surface correspondant à une homogénéité thématique (scène urbaine, forêt).

Pour notre part, nous avons renouvelé l'expérience sur les quatre quadrats de Mexico, en partant de la résolution de l'image originale. Nous n'avons pu effectuer que quatre réductions d'échelle pour que l'expérience demeure statistiquement valide. Les résultats sont synthétisés sur le graphique de la figure 13.

Comme on peut en juger d'après cette expérience, la résolution spatiale thématique de la zone du centre ville est inférieure à la résolution de XS (ie 20 mètres). La résolution thématique de la zone de parcellaire approche les 80 mètres de côté, et celle de la zone d'urbanisation récente est estimée à 50 mètres par cette méthode. Par contre, sur le quadrat correspondant à la végétation naturelle, on n'a pas pu mettre en évidence de résolution optimale en deçà de 160 mètres.

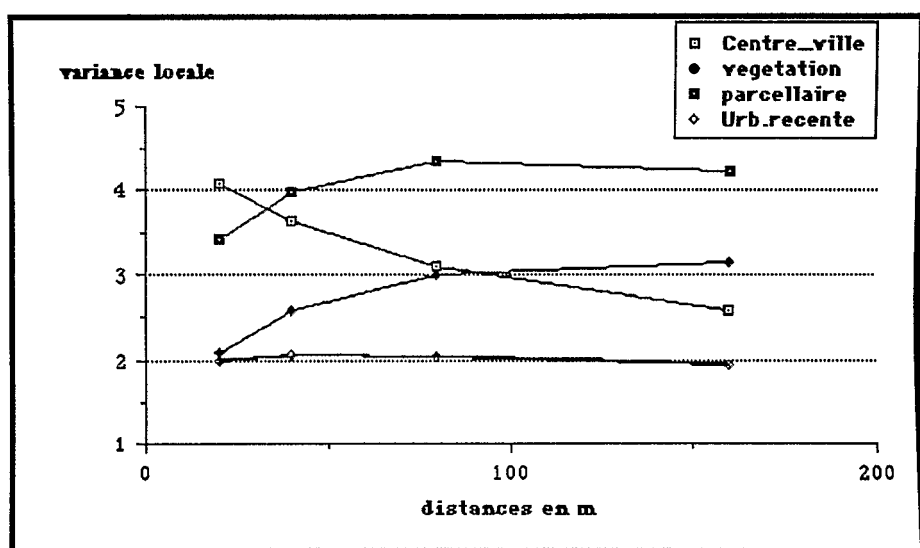


Figure 13: Application de la méthode de Woodcock et Stahler à quatre zones de Mexico sur une scène SPOT

Cette expérience, très simple à réaliser, a le mérite d'attirer l'attention sur la nécessité de déterminer la taille des entités géographiques que l'on désire analyser, ou le niveau d'observation à respecter pour détecter une texture. Elle souligne également qu'il faut éviter de confondre similarité thématique et similarité spectrale sans fixer le niveau d'observation d'un thème. Elle montre enfin que les pixels ne sont pas les seules primitives à prendre en compte dans l'analyse thématique de la scène et qu'il faut en particulier disposer de descripteurs construits à partir d'ensembles connexes de pixels rendant compte de l'organisation spatiale des valeurs radiométriques à l'intérieur de ces ensembles.

3. ANALYSE DE LA TEXTURE

A l'exception des disciplines qui ont pour objectif la caractérisation physique de la surface par l'étude du rayonnement réfléchi, l'ensemble des télédéTECTEURS a pour ambition d'utiliser les données satellitaires non seulement comme un ensemble cohérent de mesures physiques, mais comme une image contenant des textures et des formes colorées auxquelles il faut donner un sens, à la manière de la photointerprétation. Ce ne sont plus les états de surface, mais leur agencement dans l'espace qu'il s'agit alors d'analyser et de cartographier à l'aide de la télédéTECTION.

L'image de télédéTECTION est une **image numérique**, ce qu'il ne faut pas manquer de rappeler à ceux qui prônent le recours exclusif à l'analyse visuelle des restitutions photographiques des scènes satellitaires. L'analyse de l'image par des procédés formalisés et informatisés peut alors être reproduite dans son intégralité. Elle n'est plus empreinte de subjectivité, contrairement à la photointerprétation de l'aveu même de ceux qui la pratiquent¹ et la méthode utilisée correspondant le plus souvent à l'application d'une séquence d'algorithmes, est totalement reproductible. Ainsi la texture des images de télédéTECTION, liée comme on l'a vu, au rapport entre la dimension des objets au sol et le pouvoir de résolution du capteur, peut être analysée par une grande variété de procédures automatiques.

Contrairement aux classifications multispectrales effectuées à partir des pixels, ces procédures ne s'appliquent pas toutes à des unités de même taille. L'utilisateur peut ainsi maîtriser le niveau spatial de son analyse, en choisissant la taille des domaines analysés sur l'image

3.1 Le pixel et son voisinage immédiat.

Nous rangeons dans cette catégorie les méthodes permettant d'affecter à chaque pixel un indice numérique fonction d'un voisinage élémentaire V de taille et de forme donnée. Il s'agira en général d'une maille carrée de côté N , où N est un nombre entier choisi impair, afin de définir sans ambiguïté, la position du pixel central d'une telle maille. La méthode consiste à faire glisser cette maille le long de l'une des directions de l'image (l'axe horizontal par exemple) et à calculer à chaque pas, une grandeur que l'on affectera

¹"Le découpage en "zones d'égale apparence", vu son caractère d'appréciation visuelle compte beaucoup d'éléments subjectifs qu'il convient de justifier ou de modifier par l'analyse du contenu de ces zones ou par l'introduction systématique d'un contenu informatif". (D.Larcena in "Etude des formations végétales du vallon de Morlières à partir des photo aériennes", IRC, 1986, doc.multig. EHESS, Marseille.)

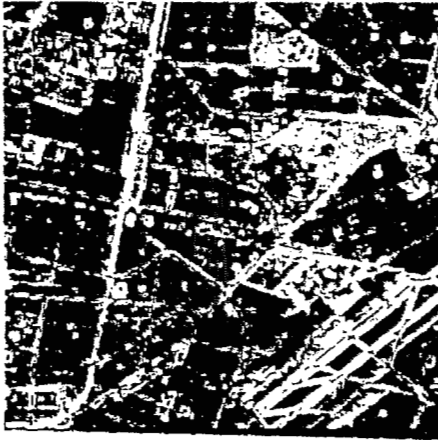


Figure 14

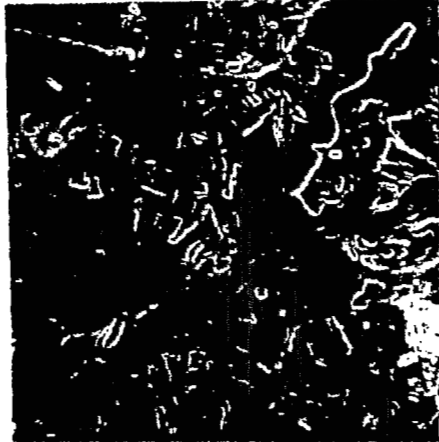


Figure 15



Figure 16



Figure 17

au pixel central. Dans les formules qui suivent, on adoptera les notations suivantes:

- (i,j) sont les coordonnées en lignes et colonnes du pixel;
- $f(i,j)$ est le niveau de gris du pixel de coordonnées (i,j) ;
- $V(N)$ est le voisinage de taille N c'est à dire l'ensemble des pixels contenus dans la fenêtre de taille N centrée sur le pixel courant de coordonnées (i,j) ;
- \sum symbolise la sommation sur les indices (i',j') décrivant les coordonnées des pixels à l'intérieur du voisinage $V(N)$.

L'un des indices de texture couramment utilisé est l'écart-type local qui mesure la variabilité locale des niveaux de gris à l'intérieur d'un voisinage $V(N)$. Il s'écrit:

$$ec(i,j) = 1/N * (\sum (f(i',j') - m(i,j))^2)^{1/2} \quad (I)$$

où

$m(i,j)$ est la moyenne des niveaux de gris à l'intérieur du voisinage $V(N)$;

Cet indice a été utilisé dans de nombreux travaux de télédétection pour caractériser localement la texture. Dans le cas des images de paysages à fort relief et par conséquent à éclaircissement variable, on préfère utiliser le coefficient de variation local $covi(i,j)$, obtenu en divisant l'écart-type local par la moyenne locale $m(i,j)$ [BLAMONT 84].

J.L.Laporte [LAPORTE1984] a montré dans sa thèse comment, sur des scènes satellitaires de régions agricoles en zone tempérées, il parvient à discriminer les grands types de paysages tels que le parcellaire agricole, l'habitat rural ou urbain, la forêt, à l'aide de ce seul indice calculé à partir de l'image d'un canal "haute résolution" du domaine Proche Infra Rouge tels que MSS6 ou XS3.

Pour notre part, nous avons calculé l'écart type local à l'aide d'une maille de 3 pixels de côté, à partir de l'image XS3 des quatre quadrats de la scène de Mexico présentées dans le même ordre que dans les paragraphes précédents sur les figures 14, 15, 16, 17, où la valeur de l'indice est étaloné du noir (valeur faible) au blanc (valeur élevée)¹.

¹Ces images avaient servi de première étape à l'expérience de Woodcock et Stahler décrite ci-dessus (cf §2.3).

On constate, en observant la forme et la dispersion des tâches claires sur les images que la texture est sensiblement plus hétérogène sur l'image du centre ville (fig 14), que sur les celle de la végétation naturelle (fig 15) ou de la zone en voie d'urbanisation (fig 16). Mais surtout, on observe sur l'ensemble des quadrats le dessin de linéaments formés par des pixels jointifs ayant des valeurs élevées de l'indice. Ces lignes correspondent la plupart du temps à des objets linéaires sur le terrain (voierie, réseau hydrographique) ou à des limites d'objets (limites de terrains cultivés). On notera que ces lignes sont sensiblement plus nombreuses sur les images du centre ville et du parcellaire (fig 14 et 17) que sur les images de la végétation naturelle ou de la zone d'urbanisation récente (fig 15 et 16). Dans ces deux derniers cas, on ne décèle pour ainsi dire pas de "droites" (linéaments rectilignes). On constate ici qu'un indice de la texture locale peut servir à caractériser quatre types de milieux sur la scène étudiée: le centre ville (présence importante de points et de lignes droites claires), le parcellaire (présence de lignes droites "claires"), la végétation naturelle (peu de points clairs, présence de linéaments clairs non rectilignes), la zone d'urbanisation récente (peu de points clairs et de linéaments). Ces images contiennent, à notre avis des informations plus pertinentes pour discriminer ces milieux que celles résultant de la partition de la scène en 6 classes d'états de surface (fig 8, 9, 10 et 11 du paragraphe 2.2).

La texture peut également être appréhendée à partir d'images déjà classées, où la valeur du pixel n'est pas une mesure d'énergie, mais un code arbitraire ¹ Dans ce cas, on ne peut plus utiliser les statistiques habituelles telles que la moyenne ou la variance ou les moments d'ordre n pour caractériser la texture. On peut par contre calculer la distribution des classes à l'intérieur d'un voisinage V(N) [ROGALA 84], ou, plus simplement, la fréquence de la classe majoritaire, ou encore le "désordre" lié à la variété des classes présentes dans V(N). Les deux dernières méthodes permettent de produire le résultat sous forme d'une image unique, que nous montrons plus loin.

L'occurrence locale, notée $occ(i,j)$, consiste à calculer le nombre de fois où l'on rencontre la classe majoritaire à l'intérieur du voisinage V(N):

$$occ(i,j) = 1/N^2 * \sum \delta_m^k$$

où:

- δ est le symbole de Kronecker
- k est la classe du pixel de coordonnée (i,j).
- m est la classe majoritaire à l'intérieur de V(N)

¹ Tel que celui résultant d'une classification automatique

On a calculé l'occurrence locale de la classe majoritaire à l'intérieur d'une maille 5 pixels de côté à partir des images classées en 6 classes d'état de surface telles qu'elles ont été obtenues précédemment (cf §2.2): Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 18, 19, 20 et 21 correspondant respectivement au traitement des quadrats MEXCENTRE, MEXVEG, MEXZONE et MEXPARCEL. L'interprétation des images doit se faire en sachant que les valeurs d'occurrence sont représentées sur une échelle de gris allant du blanc (valeurs les plus élevées) au noir (valeurs les plus faibles). Les pixels blancs sont ceux dans le voisinage desquels une seule classe est présente. Ils traduisent une homogénéité locale maximale. Les pixels noirs sont ceux dans le voisinage desquels on trouve à la fois les six classes d'état de surface. Ils traduisent une hétérogénéité locale maximale. On constate que l'image du centre ville est "la plus sombre": elle se caractérise par un grand nombre de points et de lignes noirs (fig 18). L'image du parcellaire (fig 21) est également sombre, excepté certaines parcelles qui figurent comme des polygones blancs de taille relativement importante. Enfin, une plus grande dispersion de points et de lignes sombres caractérisent les images de la végétation naturelle (fig 19) et celle de la zone en voie d'urbanisation (fig 20), qui apparaissent globalement plus claires que les deux précédentes. Les grandes plages blanches correspondent à des entités dont l'état de surface est relativement uniforme (végétation ou sol nu); elles ont des contours nets dans le cas où elles correspondent à des ensembles de végétation naturelle (fig 19).

L'occurrence locale permet donc d'évaluer l'homogénéité spatiale d'un état de surface, dans un voisinage spatial donné. On voit ici que dans un milieu typiquement urbain, représenté par le quadrat MEXCENTRE, les états de surface détectés par les capteurs XS de SPOT ont une grande variabilité dans un rayon de 100 mètres.¹ Dans un milieu en voie d'urbanisation, comme celui représenté par le quadrat MEXZONE, cette variabilité spatiale est nettement moins sensible. Ce critère peut également servir à discriminer ces deux types de milieu à partir d'une scène SPOT.

On notera que l'occurrence locale peut également être calculée à partir d'une image à niveau de gris. C'est aussi le cas de l'entropie locale qui rend compte du désordre apparent des niveaux de gris ou des codes selon la formule de Shannon:

$$ent(i,j) = \sum -2 p_i \log(p_i)$$

où:

- p_i est la fréquence de la classe i à l'intérieur du voisinage $V(N)$

¹Distance au sol correspondant approximativement à la taille de la maille utilisée

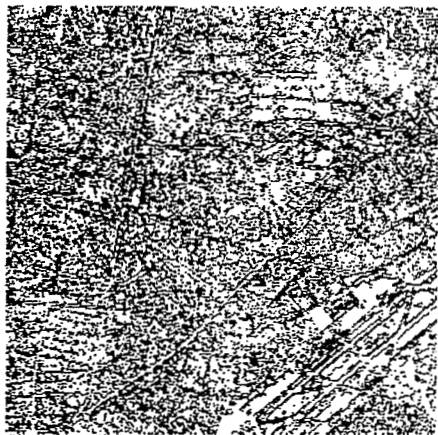


Figure 18

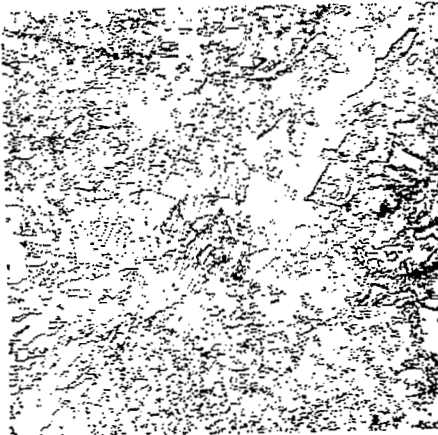


Figure 19



Figure 20



Figure 21

L'entropie locale a été calculée à l'intérieur d'une maille de taille 5 à partir des images classées en 6 classes d'état de surface. La valeur plus ou moins élevée d'un pixel représente le niveau de "désordre" de l'image classée dans un voisinage de 5 pixels. Les figures 22, 23, 24, 25 correspondant respectivement au traitement des quadrats MEXCENTRE, MEXVEG, MEXZONE et MEXPARCEL. L'entropie locale est codée selon une échelle de gris allant du blanc (valeurs maximales) au noir (valeurs minimales) : les points blancs sont le centre d'un voisinage où le désordre est maximal : on y rencontre tous les états de surface possibles . Les points noirs sont au centre d'un voisinage où l'homogénéité est maximale: on y trouve une seule catégorie d'état de surface.

Ce sont les images du centre ville (fig. 22) et du parcellaire¹ (fig. 26) qui contiennent le plus de points blancs. Les images de la zone en voie d'urbanisation (fig 24) et de celle du milieu naturel (fig 23) sont globalement plus sombres². D'après ces images on voit la pertinence de ce dernier critère pour caractériser texture dont l'hétérogénéité est due à la présence de plusieurs des états de surface différents détectés dans un rayon d'une centaine de mètres. Il permet de mettre en évidence, au sein d'une même scène différents types d'organisation du paysage, sans se référer obligatoirement à la nature des états de surface détectés.

L'ensemble des méthodes qui viennent d'être décrites permettent d'analyser la scène satellitaire en fonction d'une texture décrite à un niveau spatial très voisin du capteur utilisé. Les images qu'elles fournissent nous permettent d'appréhender non plus les états de surface, mais leur agencement local. Elles peuvent elles-même servir à opérer des classifications à l'aide des méthodes statistiques.

Dans l'analyse de certains milieux où l'on observe des changements rapides des états de surface détectés par les capteurs à haute résolution, ces méthodes sont d'une grande utilité pour interpréter la scène et pour mettre en évidence les caractéristiques locales de différents types de paysage.

3.2 Organisation des niveaux de gris à l'intérieur d'un domaine

L'autre orientation de l'analyse de texture consiste à décrire un domaine de l'image de taille et de forme arbitraire, par un ou plusieurs paramètres scalaires ou par une fonction des niveaux de gris intégrant l'information spatiale. L'analyse par Transformée de Fourier sert essentiellement à débruiter une image ou à isoler une structure par filtrage. L'analyse par les Matrices de Cooccurrences permet la quantification de la texture sur un domaine spatial de

¹En dehors des entités sombres correspondants à de grandes parcelles

²En dehors des limites entre les unités de paysage qui sont soulignées par des "chaines" de points blancs.

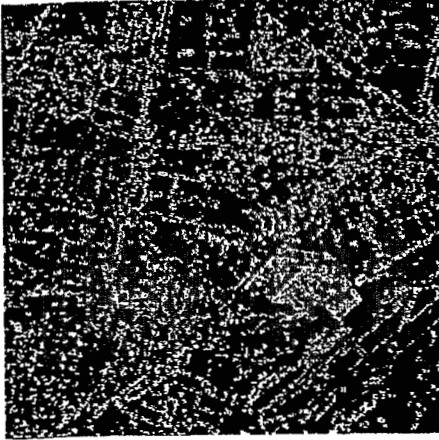


Figure 22

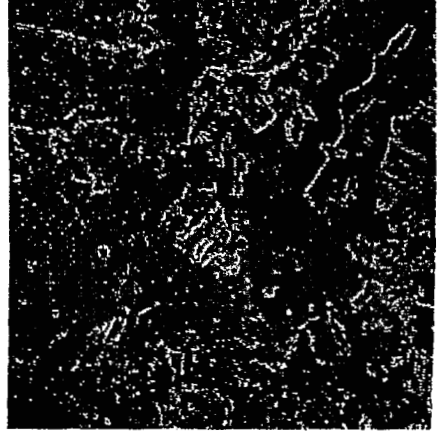


Figure 23

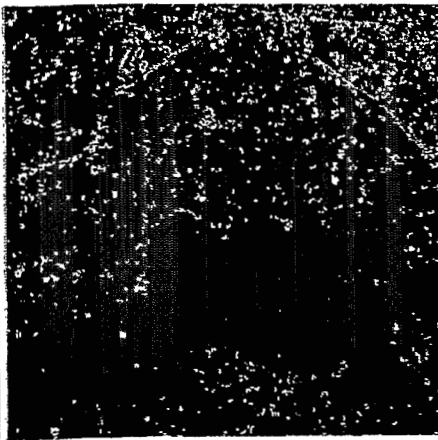


Figure 24

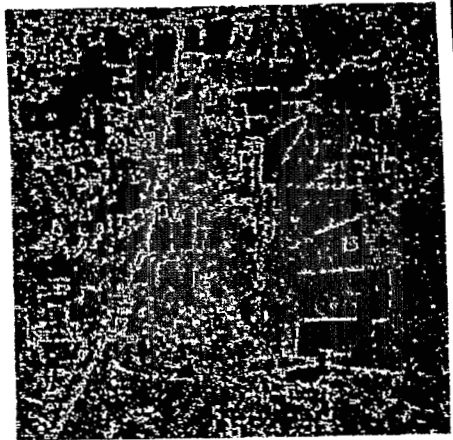


Figure 25

taille quelconque par l'analyse des relations spatiales entre niveaux de gris. On compte pour chaque i et j fixés, les couples de pixels ayant respectivement les niveaux de gris i et j et obéissant à une configuration spatiale déterminée (ex : les deux pixels sont à une distance d et le segment qui les relie fait un angle α avec l'horizontale). Pour domaine D , on calcule une matrice carrée M qui a pour dimension le niveau de gris le plus élevé rencontré à l'intérieur de la région.

$$\begin{aligned} M(k,k') &= \text{card}(\{(x,y),(x',y') \mid R((x,y),(x',y'))\}, \\ I(x,y) &= k-1, I(x',y') = k'-1 \end{aligned} \quad (IV)$$

où

R est la relation spatiale entre les couples (x,y) et (x',y') .

On calculera autant de matrices qu'il y a de directions et de distances étudiées. Dans la pratique, les paramètres dérivés du calcul des matrices permettent de synthétiser l'information texturale sous forme d'un vecteur dont la taille correspond au nombre de paramètres retenus. C'est pourquoi, par analogie avec la signature spectrale, on parle de la signature texturale d'un domaine ou d'une région [DESACHY 80]. Harralick [HARRALICK 78] a imaginé quatorze paramètres permettant de définir la texture à partir des cooccurrences, parmi lesquels nous n'avons retenu ici que les quatre suivants:

le second moment angulaire : $\sum \sum [M(k,k')/N]^2$

l'entropie : $-\sum \sum [M(k,k')/N] \log [M(k,k')/N]$

l'homogénéité : $\sum \sum [M(k,k')/N] / (1+(k'-k))^2$

l'inertie : $\sum \sum [M(k,k')/N]^* (k'-k)$

Nous avons calculé ces quatre paramètres sur chacun des quadrats types de Mexico, qui nous ont servi d'exemple jusqu'ici. On retrouvera sur les graphiques des figures 26, 27, 28, 29 les résultats de ces calculs .

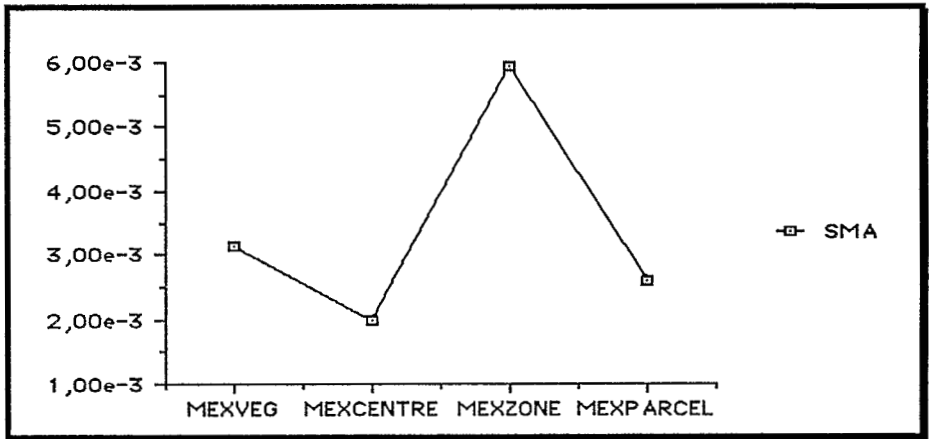


Figure 26 : Variation du second moment angulaire

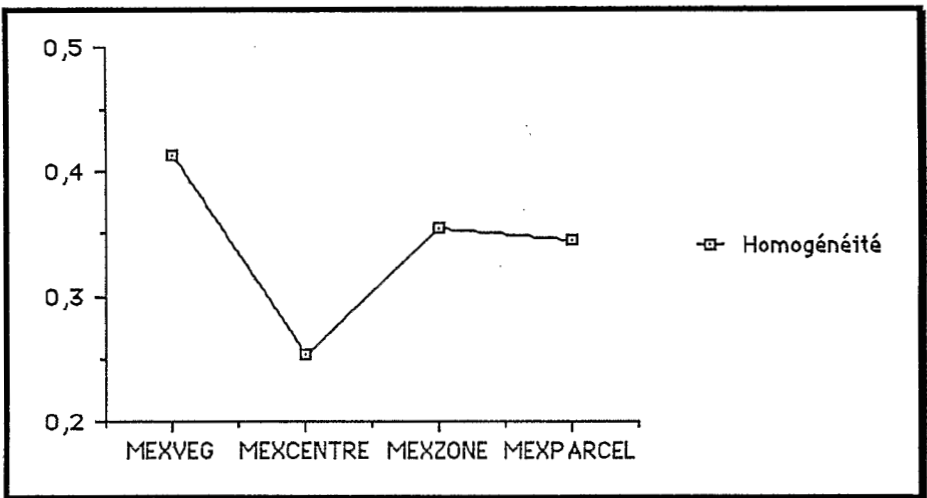


Figure 27 : Variation de l'homogénéité

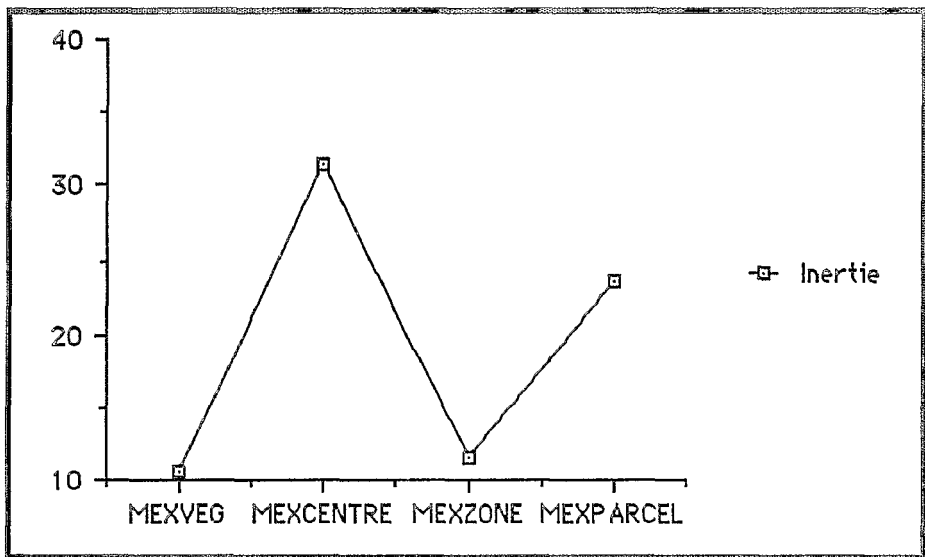


Figure 28 : Variation de l'inertie

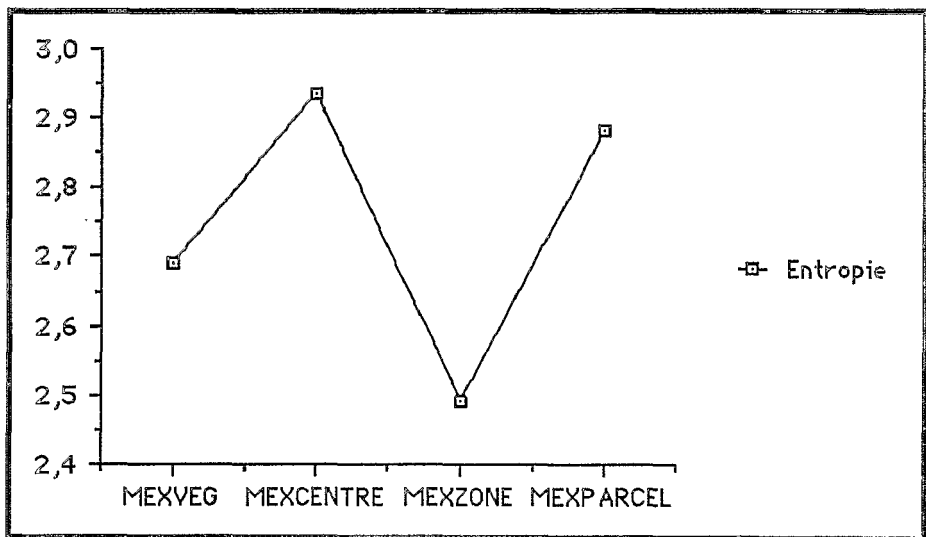


Figure 29 : Variation de l'entropie

De ces calculs il ressort qu'à l'aide de quatre paramètres, caractérisant chacun un aspect de la texture d'une zone de l'image¹, il est possible de discriminer les quatre types de paysage analysés: En effet, on notera que le quadrat de végétation naturelle se distingue des trois autres par une *homogénéité* nettement supérieure (fig. 27); le quadrat du centre ville se distingue soit par une *homogénéité* inférieure ou encore par une *inertie* supérieure; le quadrat de la zone en voie d'urbanisation a un *second moment angulaire* maximal (fig. 26) et une *entropie* minimale. Enfin, le quadrat correspondant au parcellaire ne peut être discriminé à l'aide d'un seul paramètre mais il se différencie des trois autres parce qu'il a à la fois une *entropie* élevée (fig 29) comme le centre ville mais il se distingue de celui-ci par une plus grande *homogénéité* (fig 27).

L'expérience décrite ici nous fait penser que d'une façon très générale, Les paramètres de texture issus du calcul des matrices de cooccurrences pourraient être utilisés comme descripteurs quantitatifs en entrée d'une méthode de Reconnaissance des Formes, pour classer les différentes zones de l'image en fonction de paysages *prototypes*. Une telle démarche permettrait de classer les paysages, en fonction de leur aspect textural, d'après une référence explicite. On peut également imaginer d'élaborer une typologie des paysages à l'aide de ces mêmes descripteurs. On voit donc qu'en utilisant des méthodes radicalement différentes de celles des photointerprètes, on peut envisager comme eux de classer les paysages, définis sur l'image comme "motifs" ou "mosaïques" et au sol comme agencements d'états de surface. Il faut noter cependant que si la taille des entités analysées est arbitraire, l'élément textural dépend toujours du pouvoir de résolution du capteur.

3.3 Analyse de la structure d'un thème

L'image une fois classée², on s'intéresse à l'organisation spatiale d'une classe désormais assimilable à un ensemble de \mathbf{R}^2 auquel on appliquera les opérations ensemblistes telles que l'*union* ou l'*intersection*. Les objets iconiques élémentaires formant cette texture sont les composantes connexes de l'image. Ils sont de taille et de forme quelconque. L'élément textural n'est plus ici le pixel décrit par un niveau de gris. C'est pourquoi, on parlera dans ce cas d'analyse structurale. Comme dans le cas de l'analyse par matrice de cooccurrences, la taille du domaine analysé est arbitraire. On peut évidemment analyser individuellement chaque composante connexe à l'aide d'un ensemble de mesures géométriques (diamètres de Ferret, diamètre géodésique). Pour analyser la structure d'un thème ayant de multiples composantes spatiales, on mesurera statistiquement le degré de finesse de ses éléments par une *analyse*

¹ Qui correspond ici à un quadrat d'environ 6 kilomètres au sol

² Par les méthodes évoquées au paragraphe 2.2

granulométrie [MERING 90]. On a représenté sur la figure 30 un ensemble correspondant à l'une des 6 classes d'états de surface du quadrat MEXPARCEL. Cette classe coïncide spatialement avec un sous ensemble du parcellaire (sols non cultivés). Sur cette structure on effectue l'analyse granulométrique par *ouverture bidimensionnelle*.¹ Les résultats de l'analyse en *mesure*² et en *nombre*³ sont présentés respectivement sur les figures 31 et 32 : En abscisse est représentée le rayon d'ouverture λ (la taille du tamisage) et en ordonnée la proportion des éléments qui ont été éliminés par le tamisage. Dans le cas étudié, il ressort, si l'on se réfère au graphique de la figure 31, que la surface de la structure s'explique par la présence d'éléments de grande taille (ie entre 6 et 8 pixels de diamètre et entre 8 et 10 pixels de diamètre) bien qu'elle soit composée majoritairement d'éléments de petite taille (ie de 1 pixel de diamètre), si l'on se réfère à l'analyse granulométrique en nombre de la figure 32

L'utilisation cet outil nous apparaît pertinente lorsque la structure analysée est composée d'éléments ayant une forme presque convexe⁴ ainsi, les ensembles de linéaments n'ont aucune raison d'être analysés par tamisage.

¹Ouverture à l'aide d'un élément structurant bidimensionnel convexe tel qu'un hexagone

²La granulométrie en mesure correspond au calcul de la diminution de la surface de la structure entre deux tamisages successifs, relativement à la surface totale.

³La granulométrie en nombre suppose le calcul de la diminution du nombre de particules (ie ensembles connexes) entre deux tamisages successifs, relativement au nombre total de particules

⁴Nous avons quant à nous utilisé ces méthodes pour caractériser l'organisation spatiale du couvert ligneux au Sahel à partir d'images SPOT.[MERING 88]



Figure 30 : thème A : une structure du quadrat MEXPARCEL

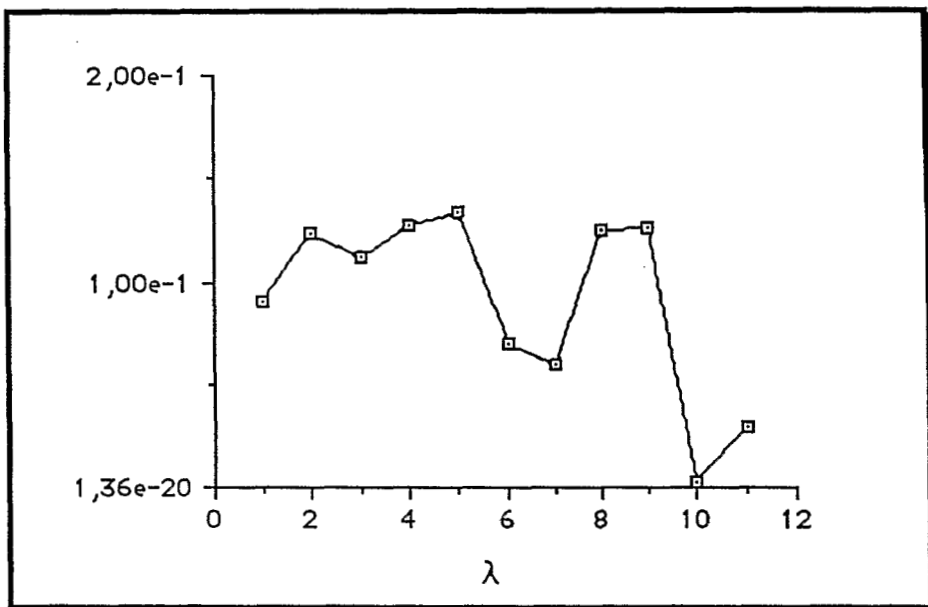


Figure 31 : Granulométrie en mesure du thème A

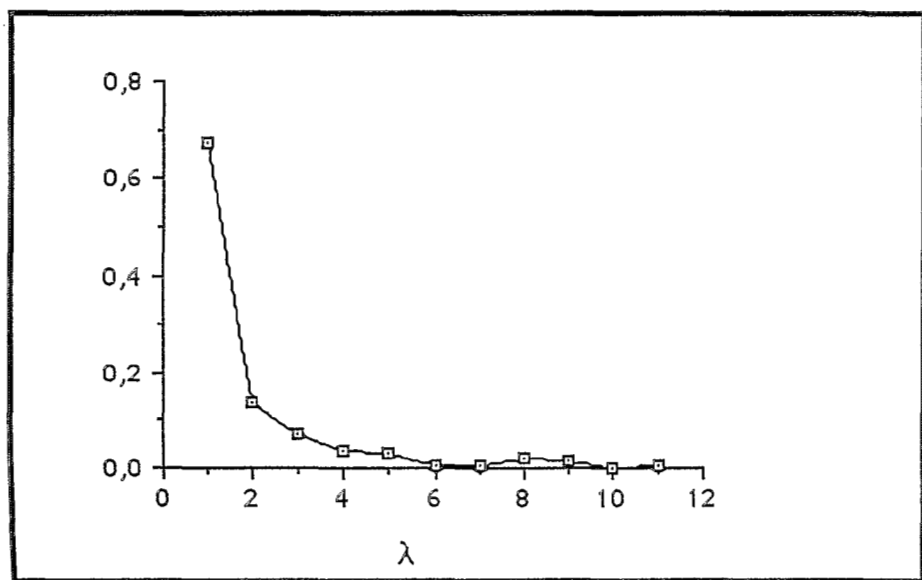


Figure 32 : Granulométrie en nombre du thème A

Pour analyser l'organisation spatiale des éléments composant le thème, on utilisera la *fonction covariance* qui permet de détecter la dispersion des phases dans une direction donnée. On a représenté sur la figure 33 une structure correspondant à l'une des six classes d'états de surface obtenues sur le quadrat MEXCENTRE. Cette classe correspond à une partie du réseau de voirie. On a calculé la covariance de cette structure sur l'intégralité du masque de mesure¹, selon la direction horizontale, qui est à peu près perpendiculaire aux éléments les plus épais du réseau. L'analyse du covariogramme, représenté sur la figure 34, fait ressortir des oscillations qui révèle la pseudo-périodicité de la structure. On observe deux oscillations principales, correspondant aux éléments majeurs (maximas absolus du covariogramme) et des oscillations secondaires (maximas régionaux de la fonction), qui révèlent une structure emboîtée (réseau plus fin contenu dans le réseau principal). On pourra utilement comparer les covariogrammes des quadrats du centre urbain qui nous renseignera sur la densité du réseau et son degré de complexité (en terme de nombre d'oscillations majeures et secondaires).

¹Il s'agit de la fenêtre d'étude, c'est à dire ici, le quadrat MEXCENTRE



Figure : 33

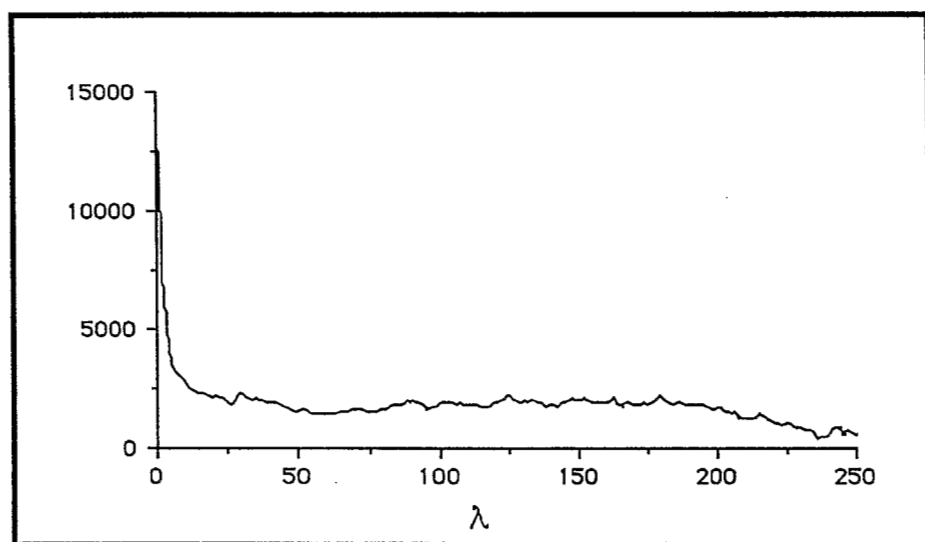


Figure 34 : covariogramme du quadrat mexcentre

L'une des utilisations des méthodes présentées ci-dessus pourrait être la mise en correspondance entre les pixels d'un capteur à faible pouvoir de résolution spatiale, tels que NOAA, à l'aide de l'analyse structurale à l'intérieur de la zone correspondante sur une image à haute résolution, tels que SPOT.

3.4 La texture: plusieurs outils d'analyse, plusieurs niveaux de description

L'analyse texturale est encore peu utilisée en télédétection où l'on fait encore coïncider, parfois à tort, analyse d'image et analyse radiométrique, "thème" et état de surface. Le manque de pratique de l'analyse texturale a plusieurs conséquences négatives pour une interprétation objective des images de télédétection:

- L'apprentissage par les thématiciens des caractéristiques texturales et structurales des objets étudiés sur les images au moyen de l'analyse quantitative est encore quasi inexistant¹
- l'élaboration de critères robustes pour interpréter les objets de la scène en terme de texture et de structure bénéficie peu de l'expertise thématique.
- Les nomenclatures permettant de désigner les objets sur l'image, quelle que soit la résolution de celle-ci se confondent souvent avec le référentiel thématique utilisé sur le terrain, malgré la probable inadéquation des échelles²

Ainsi que nous avons tenté de le montrer, il existe un grand nombre de descripteurs texturaux ou structuraux qui peuvent s'appliquer à des entités iconiques de taille variées. A partir de ces descripteurs, il est possible de construire des critères permettant d'identifier sur l'image des entités géographiques de dimension déterminée.

Ainsi parce qu'elle nécessite la définition explicite d'un domaine spatial, l'analyse texturale de l'image permet-elle de maîtriser de façon plus rigoureuse le rapport d'échelle entre l'objet de terrain et l'objet sur l'image. Elle peut également servir à la comparaison d'images provenant de capteurs ayant des pouvoirs de résolution différents.

¹ Contrairement à ce qui s'est passé pour les caractéristiques spectrales

² Je ne puis valablement désigner les objets de l'image qu'au moyen de nomenclatures adéquates à ces échelles. Or le référentiel thématique dont je dispose pour leur donner un nom en correspondance avec le terrain est très hétérogène et parfois imprécis" (Y.Poncet in "Journées de Télédétection de Bondy", ed ORSTOM, coll"Colloques et Séminaires", 1988, pp159-165.)

4. DE LA CONNAISSANCE THEMATIQUE A L'ANALYSE DE LA SCENE

Dans la littérature relative à l'utilisation thématique de la télédétection, les auteurs présentent leur démarche comme ascendante: ils commencent par analyser les données pour finir par l'interprétation de la scène. En réalité, la démarche interprétative des scènes satellitaires est beaucoup plus complexe: elle suppose une connaissance thématique préalable à l'analyse de la scène. Elle suppose également un certain "entraînement", que ne renieront pas les photointerprètes¹.

L'interprétation suppose l'élaboration et la description des concepts à délimiter sur l'image (ex: le réseau routier), puis la mise en oeuvre d'un plan d'exploration de l'image (recherche des linéaments) qui permettra de définir les entités iconiques correspondantes. Ce plan peut n'aboutir qu'à obtenir des entités correspondant à un concept plus général (ex: les réseaux) qu'il faudra décomposer en concepts particuliers (réseau hydrographique, réseau routier) susceptibles d'être distingués sur l'image par certains attributs (couleur, forme). Il faudra une nouvelle exploration de l'image pour parvenir à la solution. L'interprétation d'image, dans le cas de problèmes complexes, comme ceux que l'on rencontre en télédétection nécessite la mise en oeuvre d'un plan d'exploration aussi bien des concepts thématiques que des entités de l'image, comme le suggère le schéma de la figure 35: il existe une alternance entre la focalisation perceptuelle (délimitation des entités) et la focalisation conceptuelle (délimitation du concept associé parmi l'ensemble des concepts mis en place pour interpréter la scène)

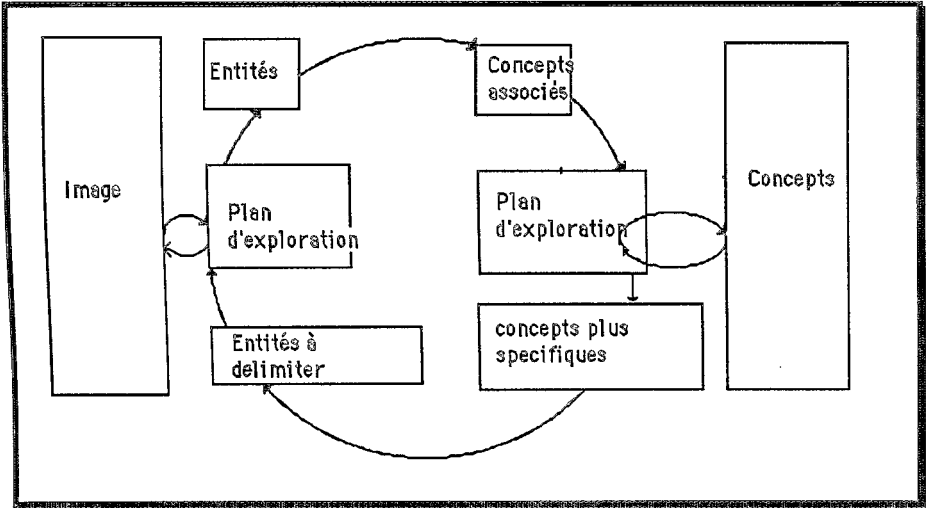
La formalisation de l'interprétation de l'image de télédétection que nous avons déjà esquissée dans le but de développer des systèmes de cartographie "intelligents" [MERING, 89] suppose donc non seulement de disposer d'outils de traitement d'image et de critères robustes² permettant de délimiter des entités iconiques significatives (partie gauche du schéma de la figure 35) mais également de maîtriser l'ensemble des concepts associés à l'image (partie droite du schéma). Ces concepts³ sont issus d'un ensemble structuré de connaissances thématiques. Si la liste des concepts est

¹En effet, l'interprétation d'une image est une tâche complexe dans l'accomplissement de laquelle l'observateur entraîné se distingue du novice par sa capacité à focaliser d'emblée son attention sur des hypothèses qui, dans l'espace des solutions possibles apparaissent remarquablement proches de la bonne solution: il possède plus précisément la capacité à extraire rapidement, en un premier coup d'oeil, les items prévalant à l'émergence de ces hypothèses

²Nous avons dénommé ce premier type de connaissance, les *connaissances prototypiques* [MERING 89]

³L'image, sujet de l'analyse, constitue pour l'observateur une réalisation particulière et spécifique d'une situation dont il possède a priori une représentation sous la forme d'un concept plus ou moins vague. L'exploitation des données image permet l'émergence du concept qui la caractérise, eu égard au but poursuivi.

explicitée en amont (classification dirigée) ou en aval (classification non dirigée), elle se présente le plus souvent comme une nomenclature à un seul niveau (les taxons) sans organisation hiérarchique particulière. Or nous venons de voir que sans organisation des concepts, on ne peut pas véritablement mettre en place de stratégie d'interprétation. On doit alors renoncer à trouver une solution aux problèmes complexes d'interprétation d'image, qui sont ceux qu'une simple exploration de l'image par une démarche ascendante n'a pas résolu.



**Figure 35 : L'analyse et l'interprétation de l'image:
une tâche complexe**

L'une des tâches réalisées par le spécialiste qui interprète l'image est de vérifier les formes iconiques de la réalisation du concept qu'il a émis: Les méthodes d'analyse d'image fournissent des outils permettant de le suppléer, voire de le remplacer dans cette tâche en produisant des descripteurs radiométriques, texturaux ou structuraux permettant de qualifier les entités iconiques à reconnaître, sous forme d'attributs. L'autre tâche consiste à parcourir la hiérarchie des concepts de façon à trouver le concept plus spécialisé lui permettant de s'approcher de la solution : pour cela il doit extraire des attributs plus "précis" lui permettant de délimiter des formes plus élémentaires d'organisation (centre du schéma de la figure 35)

La hiérarchie des concepts utilisés par l'interprète est rarement explicitée: il existe souvent une confusion entre deux types de hiérarchies :

- la hiérarchie structurelle, directement liée aux changements de niveau (et donc d'échelle spatiale) dans l'observation.

- la hiérarchie que nous appelons conceptuelle, parce qu'elle ne concerne pas directement l'image ni même l'espace concret, mais plutôt l'organisation des connaissances du spécialiste qui lui permet d'aller du général au particulier, dans sa propre discipline.

La légende des cartes topographiques est souvent le reflet de la première hiérarchie, celle des cartes thématiques, celui de la deuxième.

4.1 Hiérarchie structurelle

Sur la figure 36, nous avons représenté un exemple de hiérarchie structurelle : Les objets sont ici bien situés dans l'espace: les concepts "pères" (sommet de la hiérarchie) représentent chacun un tout composé de parties que sont les concepts "fils". On parcourt cette hiérarchie par composition ou décomposition structurelle. En général, le parcours de cette hiérarchie correspond à un changement d'échelle, car le tout occupe un espace plus important que les parties. En terme d'analyse d'image, la donnée de cette hiérarchie permet bien souvent d'interpréter l'image, en particulier lorsque les parties sont plus aisées à délimiter que le tout, ce qui est souvent le cas. C'est ce qui explique le recours à de telles hiérarchies dans les systèmes d'analyse automatique de scènes. De plus, l'explicitation de ces hiérarchies fournit au moins partiellement des informations sur l'organisation spatiale des concepts.¹ Pour toutes les raisons évoquées ici, il paraît souhaitable, et ceci afin de maîtriser les changements d'échelle opérés dans l'interprétation, ces hiérarchies soient considérées comme une donnée du problème à résoudre, et donc explicitées en début d'analyse.

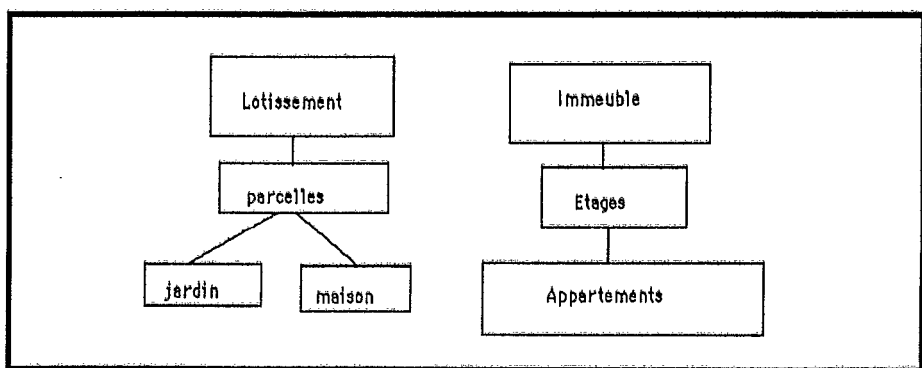


Figure 36 : Un exemple de hiérarchie structurelle

¹ Il manque en particulier à cette description de l'organisation spatiale les notions de relation spatiale entre objets: deux objets peuvent être voisins, adjacents, imbriqués ou éloignés indépendamment de leur appartenance à la même hiérarchie structurelle.

4.2 Hiérarchie conceptuelle

Les concepts émis par le thématicien analysant la scène s'organise suivant un axe allant du général au particulier. C'est souvent ce qui est désigné par le terme de "nomenclatures emboîtées". Il s'agit le plus souvent d'emboîtement de concepts et non pas d'emboîtement d'objet comme le montre l'exemple de la figure 37: ici on distingue habitat "privatif" et "locatif", qui sont des "sorte d'habitat" mais qui ne se distinguent pas par des critères spatiaux et encore moins par leurs représentation iconique. En général, on ne peut pas mettre faire correspondre une échelle spatiale à un niveau particulier d'une telle hiérarchie. Ces taxonomies sont pourtant celles qui sont le plus fréquemment utilisé, trop souvent de façon implicite, dans l'interprétation thématique des images de télédétection. En effet, le thématicien, faisant appel à ses connaissances de spécialiste d'une discipline, approfondit l'analyse de l'image en utilisant sa capacité à parcourir l'axe de spécialisation/généralisation en fonction des hypothèses qu'il émet lors d'une première exploration de l'image.

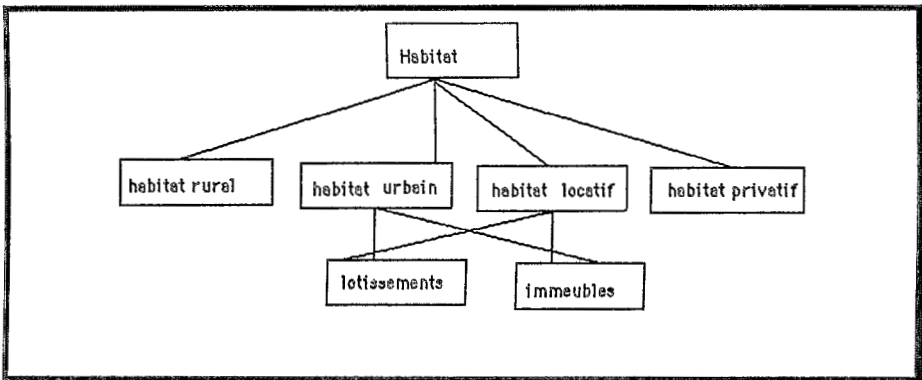


Figure 37: Un exemple de hiérarchie conceptuelle

Pour une plus grande maîtrise des rapports d'échelle dans l'analyse d'une scène satellitaire, il serait souhaitable que les concepts auxquels a recours le thématicien lors de l'interprétation puissent être transmis non pas comme une simple liste (taxonomie à un seul niveau), mais comme une organisation d'entités liées hiérarchiquement, et autant que possible être caractérisés par des attributs iconiques accessibles par l'analyse de l'image (radiométrie, texture, forme) [MERING 90]

CONCLUSION

Afin de mieux maîtriser les transferts d'échelle opérés dans l'interprétation thématique des images de télédétection nous

suggérons ici d'ajouter à l'analyse multispectrale des pixels, l'analyse d'entités iconiques dont la dimension spatiale est fonction du but poursuivi: on peut ainsi envisager de caractériser non seulement les états de surface mais des unités de paysage à l'aide de l'analyse texturale.

Nous proposons d'autre part de mieux exploiter dans les traitements, les connaissances thématiques, la réalité de terrain, et le savoir-faire de l'interprète d'image. A cette fin il faudrait disposer en entrée du traitement de la scène:

- d'une nomenclature à plusieurs niveaux permettant d'interpréter la scène avec la spécialisation requise (correspondant à la "connaissance thématique").
- d'une hiérarchie structurelle décrivant le contenu et si possible la forme des entités géographiques traitées
- de critères basés sur des descripteurs iconiques (radiométrie, texture, forme, taille), permettant une caractérisation intrinsèque au moins partielle des objets à identifier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [BRUNEAU 84] M.Bruneau, J.Kilian : *Inventaires agroécologiques, paysages et télédétection en milieu tropical* in l'Espace Géographique, n°3, 1984, pp215-224.
- [BLAMONT 84] D.Blamont, C.Mering, J.F.Parrot: *Essai de classification des unités de paysage en région montagneuse.* in l'Espace Géographique, n°3, 1984, pp225-232.
- [DESACHY 80] J.Desachy: *Contribution à l'étude de la texture en télédétection.* Thèse de docteur de spécialité. Université Paul Sabatier, Toulouse, 1980.
- [ESCADAFAL 89] R.Escadafal *Caractérisation des sols arides par observations de terrain et par télédétection* Ed ORSTOM, PARIS, 1989.
- [GIRARD 89] M.C.Girard et C.M.Girard in *Télédétection appliquée*, Masson Paris 1989,260p.
- [HARRALICK 78] R.M.Harralick: *Statistical and structural approaches to texture.* Dept of computer science. University of Kansas. Proceedings IEEE, 67, 1978. 786-804.
- [LAPORTE 84] J. Laporte : *Analyse de la texture sur les images de simulation SPOT.* Thèse de 3ème cycle. Université Paris. 6, 1984

- [MERING 88] C.Mering et C. Jacqueminet: *Use of SPOT satellite images for inventory and follow up of ligneous resources in the Sahel*. Proceedings of the 22th ERIM symposium for Remote Sensing of Environment, Abidjan, october 20-26, 1988, ERIM, Michigan.
- [MERING 89]. C.Mering: *Elaboration d'une carte thématique à partir des données satellitaires, un essai de modélisation*. In Séminfor2. La Modélisation: Aspects pratiques et méthodologie. Coll. Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris, 1989, pp342-368.
- [MERING 90] C.Mering: *Présentation de quelques méthodes de la Morphologie Mathématique permettant de caractériser une texture sur une image binaire*. In Journées de Télédétection. Images satellites et milieux terrestres en régions arides et tropicales. Coll. Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris 1990, pp193-211.
- [MERING 90] C.Mering *Développement de systèmes experys pour la cartographie par télédétection*. In Journées de Télédétection. Images satellites et milieux terrestres en régions arides et tropicales. Coll. Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris 1990, pp 301-320
- [NAGAO,1981] M.Nagao et T.Matsuyama: *A Structural Analysis of Complex Aerial Photographs*. Plenum Press, New York, 1981,199p.
- [ROGALA 82] J.P. Rogala: *Approche numérique de l'espace agricole*.Thèse de Docteur ingénieur, Institut national Agronomique. Paris Grignon, 1982
- [SERRA 82] J. Serra :*Image analysis and mathematical morphology* Academic Press, London, 1982.
- VERGER F. -1985- "Les satellites d'observation de la terre". P.U.F.
- [WACKERNAGEL 86] H. Wackernagel: : *Geostatistical techniques for interpreting multivariate spatial information*. Rapport multigr. Centre de Géostatistique, ENSMP, Fontainebleau, 1986.
- [WOODOCK 86] C.E. Woodock and A.H. Stahler *The factor scale in remote sensing*. In RSE, Vol3, pp267-290,1987.

DE L'USAGE DES OBSERVATIONS DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER MESUREE PAR TELEDETECTION OU DIRECTEMENT EN MER

GOHIN F.

RESUME

Si les techniques de la télédétection infra-rouge permettent d'obtenir des mesures instantanées de la température de surface de la mer d'une précision spatiale et d'une qualité sans égale, elles se révèlent être parfois difficilement exploitables pour un suivi permanent du milieu hydrologique. En effet, une présence abondante de brumes et nuages, à laquelle s'ajoutent en milieu tropical les effets perturbateurs d'une atmosphère humide, ne permettent pas de suivre régulièrement l'évolution des températures de surface. Dans un exemple traitant des relations existant entre la répartition des captures de sardines débarquées mensuellement dans les ports marocains et les fluctuations de l'environnement hydrologique, les mesures de télédétection ne suffisent pas, utilisées seules, à caractériser les évolutions du milieu. Les échelles d'observation ne sont pas adaptées. Si les techniques de la télédétection infra-rouge mettent en évidence, de façon remarquable, des configurations types des champs thermiques de surface sous certaines conditions de vents, elles n'assurent pas une continuité de l'observation suffisante. Dans ces zones dites d' "upwelling", de fortes remontées d'eaux froides induites par les alizés sont la cause de tourbillons dérivés s'étendant par endroit à d'importantes distances des côtes. Des lignes de navigation croisent ces structures dont l'importance est directement reliée au développement des upwellings côtiers. Bien que les mesures des bateaux soient entachées d'importantes erreurs, leur répartition dans l'espace et surtout dans le temps favorise une approche régulière du milieu, à l'échelle de la variabilité de la distribution mensuelle des captures de sardines.

INTRODUCTION

Bien qu'il soit possible de traiter conjointement des observations obtenues sur le terrain (*in situ*) et par télédétection en se basant sur les techniques géostatistiques pour obtenir une représentation fine

des champs thermiques de surface de la mer (Gohin 1987), il faut bien souvent se contenter d'une description plus sommaire. Dans l'exemple proposé, les images de télédétection sont utilisées pour caractériser les structures observables à certains instants et en certains endroits dans la mesure où les nuages, brumes, où parfois même les vents de sable, ne présentent pas un écran opaque au rayonnement infra-rouge de la mer. En effet, sur cette région, l'acquisition d'images de bonne qualité est largement soumise aux conditions atmosphériques. Il faut donc être en mesure de n'utiliser que des informations *in situ* pour caractériser les fluctuations du milieu sur des bases régulières comparables à celles des débarquements de sardine mesurés quotidiennement et intégrés sur un mois. La méthode proposée ici est basée sur les données de température provenant des navires marchands collaborant bénévolement au réseau météorologique mondial. Ces observations sont, avec les données de vent (aéroports) qui les complètent mais que nous ne traiterons pas ici, susceptibles de fournir une réponse relativement satisfaisante au problème posé. Pour cela, nous nous proposons d'utiliser les données des bateaux sélectionnées sur un secteur dont la sensibilité à l'état hydrologique du milieu est révélée par les images de thermographie infra-rouge provenant du satellite NOAA9.

1 RECHERCHE D'UNE BASE MINIMALE DE DESCRIPTION DU MILIEU

Les deux ports étudiés sont aux limites d'un secteur dit d' "upwelling" soumis à des remontées d'eaux froides intenses induites par le vent soufflant parallèlement à la côte. La productivité du milieu enrichi par les eaux froides est accrue durant la période de développement des alizés. Ainsi, une migration de sardine provenant du Sud est observée l'été lorsque l'anticyclone des Açores est en place (Furneston 1953, Belvêze 1984). Les captures de sardine augmentent alors fortement au printemps à Agadir puis à Essaouira et Safi en cours d'été. Un second pic de capture, associé au retour de la population en migration, est observé à Agadir en automne. Autour de ce schéma, la variabilité est grande. Il existe en fait de nombreuses échelles de variabilités du système conduisant du vent aux captures (Fréon et al 1990). Les fluctuations du vent génèrent des variations rapides de l'upwelling, de même que les sardines effectuent des déplacements verticaux selon un cycle nyctéméral ou à d'autres échelles de temps très fines. Si nous nous proposons de mettre en évidence certaines relations liant les évolutions hydro-climatiques observées sur plusieurs années à la répartition des captures de sardine le long des côtes, entre le Nord et le Sud d'une zone bornée par les ports de Safi et d'Agadir (figure 1), les échelles d'observation doivent se situer à un niveau plus large dans l'espace et le temps. En particulier nous faisons l'hypothèse qu'il existe une relation étroite entre la répartition saisonnière des captures et l'intensité moyenne de l'upwelling. Un upwelling faible favoriserait les captures de la région de Safi en restreignant le secteur enrichi à la proximité de la côte et au coeur des remontées d'eaux froides. Ceci se ferait au

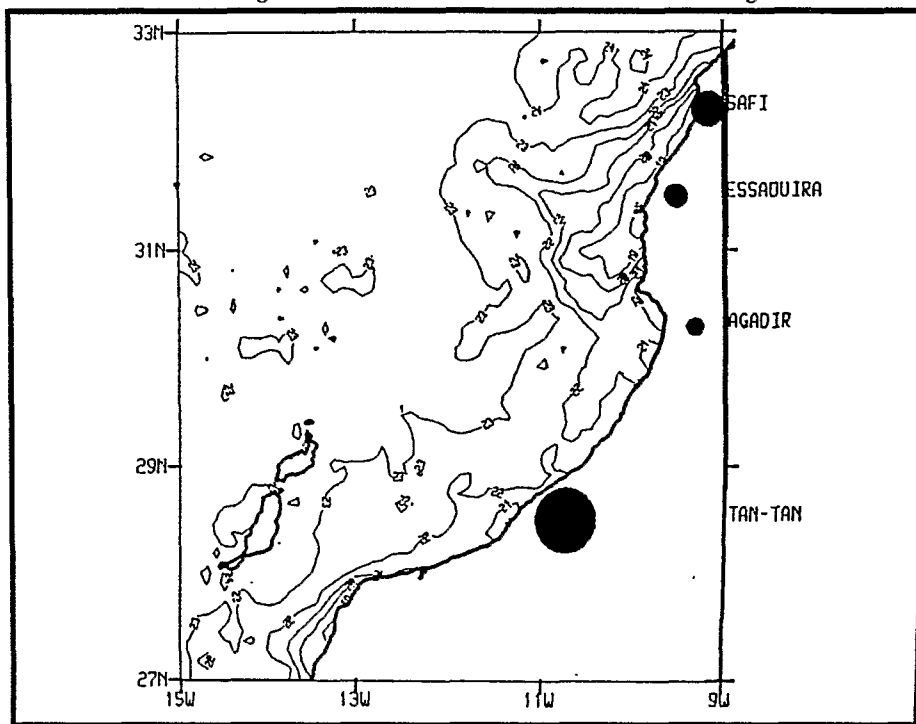


Figure 1 : Les principaux ports sardiens du Maroc et les structures thermiques observées en conditions exceptionnellement claires.

Situation su 10 septembre 1987 de l'image NOAA9. La surface des cercles est proportionnelle aux débarquements de l'ensemble du mois de septembre 87 dans les différents ports. A cette saison, les captures sont toujours importantes dans le secteur de Tan-Tan où le stock réside l'hiver. Mais suivant le développement de l'upwelling, un basculement semble s'opérer entre Safi et Agadir (ici au profit de Safir).

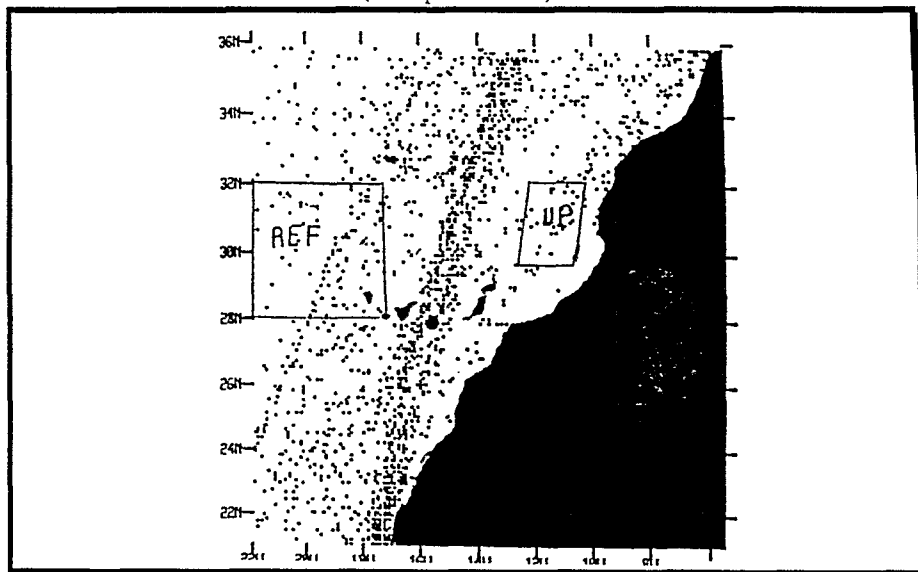


Figure 2 : Localisation des observations *in situ* du 4 août au 26 septembre 1986.

Les limites du secteur proche de l'upwelling ("UP") sur lequel sont calculées les températures mensuelles moyennes ainsi que celles du secteur de référence ("REF") sont indiquées sur cette image.

détriment de la région d'Agadir qui bénéficie en temps normal du déplacement vers le sud d'eaux issues de l'upwelling du nord. Ces eaux sont portées par un courant côtier s'écoulant du nord vers le sud associé localement à un large tourbillon cyclonique trouvant son origine dans la topographie du plateau continental (Mittelstaedt 1989). L'affaiblissement de l'upwelling ne permettrait plus cette arrivée d'eaux plus riches qui crée une continuité et une sorte de pont entre les secteurs du sud et du nord. Cette hypothèse peut être faite par l'observation de situations isolées révélées par des images claires. Probablement existe-t-il aussi des relations entre l'intensité de l'upwelling et la biomasse (par l'effet de l'upwelling sur le développement des larves) ainsi qu'entre cette dernière et l'extension géographique de la population qui se localise principalement à la côte lorsque son importance diminue. Nous sommes donc à la recherche d'un indice simple permettant de caractériser l'importance moyenne de l'upwelling calculée par période d'un mois pour un suivi portant sur plusieurs années. L'allure générale de l'upwelling révèle une extension importante des eaux froides vers le large aux environs du parallèle 31°N. Nous nous proposons de calculer une température moyenne mensuelle à partir des données des bateaux mesurées sur les lignes de navigation croisant le secteur que nous dénommerons 'UP' représenté sur la figure 2. Nous constaterons en 86 et 87, deux années particulièrement contrastées, l'aptitude des données des bateaux à restituer les caractéristiques hydrologiques de l'upwelling et discuterons les relations apparaissant entre les captures et les indices mensuels calculés.

2 LES OBSERVATIONS

2.1 L'OBSERVATION INSTANTANEE PAR TELEDETECTION

Le rayonnement électro-magnétique situé dans les longueurs d'onde de l'infra-rouge thermique, reçu par le capteur AVHRR des satellites NOAA, permet de restituer la température de la pellicule de la surface océanique. Le signal est cependant soumis à une absorption lors du trajet dans l'atmosphère. Un algorithme (de type "Split Window", (Deschamps et Phulpin 1980)) permet, en condition de ciel clair, de filtrer une partie des effets atmosphériques par combinaison des températures restituées par les canaux 4 et 5 du capteur

$$T_s = 3T_4 - 2T_5 + C_0 C_0$$

est une constante évaluée par calibration de l'image étudiée sur un jeu de données *in situ*. C_0 varie de .5 à 1.5 °C selon la saison. C_0 est en général plus faible l'hiver que l'été sur la région. La largeur du pixel est d'environ 1500 mètres, la limite inférieure 1100 mètres étant atteinte sur la trace du satellite. Après correction géométrique,

l'image est parfaitement positionnée. Les données que nous avons utilisées proviennent du Centre de Météorologie Spatiale de Lannion. Très avantageuses pour la restitution des champs thermiques instantanés, les données satellitaires sont peu efficaces pour un suivi régulier de l'upwelling. Ainsi, au cours des mois de juillet de 1986 à 1990, aucune image claire n' a pu être obtenue. Cela est d'autant plus regrettable que cette période correspond au plus fort développement de l'upwelling et de la pêche.

2.2 L'OBSERVATION EN MER

Dans la plupart des cas, la température mesurée par les navires est celle de l'eau servant à refroidir les moteurs. Elle a donc une profondeur très variable suivant le type de bateau. A cette variabilité en profondeur se joignent une dispersion temporelle, les mesures étant enregistrées à tout moment de la journée, et surtout les erreurs de transmission, de localisation et de calibration des thermomètres. Il est donc important de faire un tri des données aberrantes; c'est à dire des observations visiblement en dehors du champ du possible. Sur le secteur étudié s'étendant de Tanger au Cap Blanc, de 36N à 21S et de 22W à 5.50W, environ 2% des 2000 données mensuelles acquises auprès des services de la Météorologie Nationale sur le réseau SMT temps réel sont situées sur la terre. Les autres données douteuses sont plus difficiles à déceler. Il est cependant indispensable de les éliminer. Pour cela, on procède à un tri rigoureux. Après avoir effectué une analyse structurale, chaque observation d'un même navire est estimée par krigeage à partir des observations des navires du voisinage en excluant les autres observations de ce même bateau. Lorsque l'écart entre les valeurs observées et estimées est supérieur à 3 fois la valeur de l'écart type de krigeage, la donnée est retirée du fichier. On retire toutes les données d'un bateau lorsque le pourcentage des différences supérieures à 2.5 fois l'écart type de krigeage correspondant dépasse 30%.

3 REPARTITION DES GRADIENTS ENTRE LE LARGE ET LA COTE

3.1 DEFINITION

Les données des bateaux $T(x_i, t_i)$ vont subir une transformation visant à restituer l'écart avec la température observée au même instant t_i sur une zone de référence. Cette zone, choisie pour son caractère de stabilité thermique, est située au Nord-Ouest des îles Canaries (figure 2). A partir de $T(x_i, t_i)$, on définit une nouvelle variable $T'(x_i)$ par :

$$T'(x_i) = T(x_i, t_i) - T_m(t_i)$$

$T_m(t_i)$ est la température moyenne de la zone de référence calculée sur une période de ± 4 jours autour de la date t_i .

3.2 ANALYSE STRUCTURALE ET INTERPOLATION

La zone est séparée en deux secteurs de caractéristiques structurales très différentes. La zone du large est beaucoup plus régulière que la région côtière. On définit les régions "LARGE" et "COTE" de part et d'autre de l'axe 36N, 7.30W et 21N, 20W. L'analyse structurale est effectuée par calcul des demi-variogrammes expérimentaux sur les deux zones. Le demi-variogramme est une modélisation de la variance des écarts de T, supposée suivre une Fonction Aléatoire sur laquelle on fait les hypothèses de stationnarité suivantes:

a) Les accroissements sont de moyenne nulle.

$$E[T(x+h)-T(x)] = 0$$

où x et x+h sont deux points distants de h.

b) La variance des accroissements ne dépend que de la distance entre les points.

$$V(h) = 1/2 E[T(x+h)-T(x)]^2$$

Les demi-variogrammes expérimentaux sont calculés à partir de couples de mesures issues de bateaux distincts. L'interpolation est faite par krigeage ordinaire sur un réseau régulier.

$$TK(x) = \sum_{i=1}^N l_i T(x_i) \quad i=1, N \quad N=8$$

$$i=1$$

$$\text{avec } \sum_{i=1}^N l_i = 1$$

et $E[TK(x+h)-T(x)]^2$ minimale

4 RESULTATS

4.1 CARTOGRAPHIE DES GRADIENTS

Après élimination des données erronées, 2102 et 2558 observations sont conservées en 1986 et 1987 respectivement. Sur chacun des secteurs, deux variogrammes sont calculés suivant des axes Nord-

Sud (à longitude fixée) ou Ouest-Est (à latitude fixée) avec une tolérance d'angle de répartition des couples autour des axes de 10° . A la côte, les demi-variogrammes expérimentaux (figure 3) révèlent une très nette anisotropie. Pour prendre en compte l'augmentation de la variabilité sur l'axe Est-Ouest, on effectue une correction d'anisotropie en contractant les distances d'un facteur 0.1 sur la direction Nord-Sud. Le demi-variogramme expérimental établi sur des distances ainsi transformées a une allure linéaire. Si l'on regarde plus finement son comportement à l'origine, on constate qu'il croît moins vite que sur les grandes distances. Cet aspect, de type parabolique, est conforme aux déformations attendues d'un variogramme théorique linéaire en cas d'erreur de positionnement et de variabilité temporelle (Chiles 1977).

Les ajustements proposés des demi-variogrammes sont les suivants:

$$V(h) = 190 + 2h \text{ (Côte)}$$

$$V(h) = 190 + h \text{ (Large)}$$

où h est exprimé en pixels de 5 km.

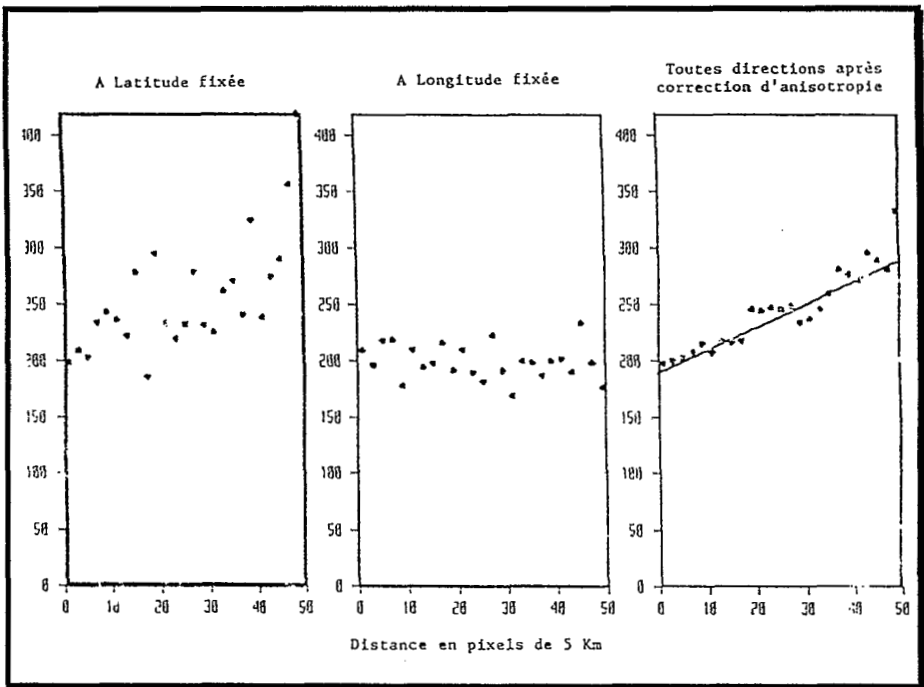


Figure 3 : Les demi variogrammes expérimentaux

A l'aide de ces demi-variogrammes, les gradients sont estimés par krigeage local (8 points du voisinage sont utilisés pour l'estimation) sur un réseau régulier (tous les 20 km).

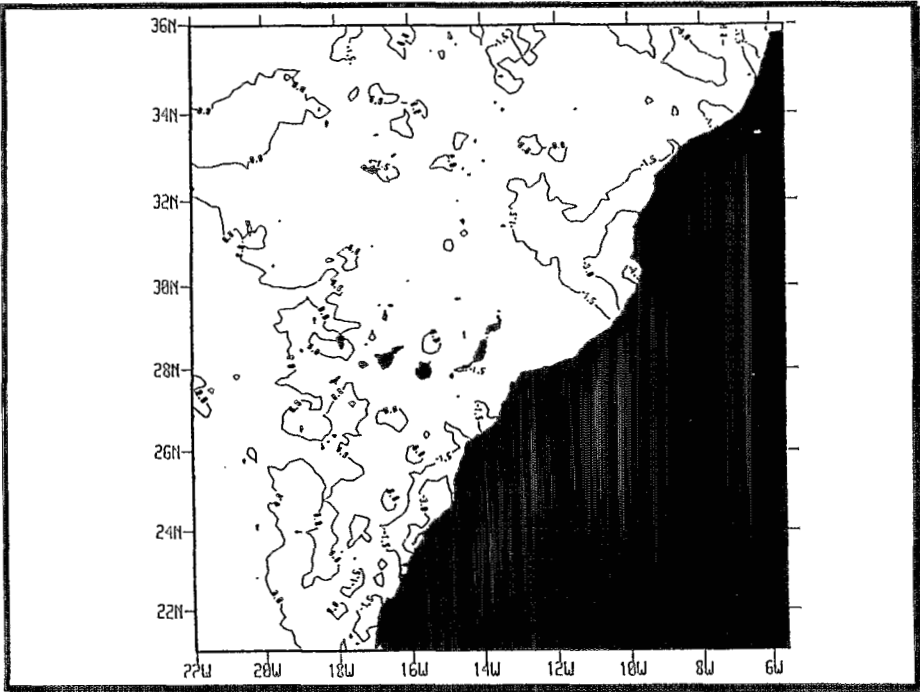


Figure 4 : Les gradients large-côte en 1986.

Les structures sont fortes dans la région Nord, où l'upwelling est en moyenne bien développé.

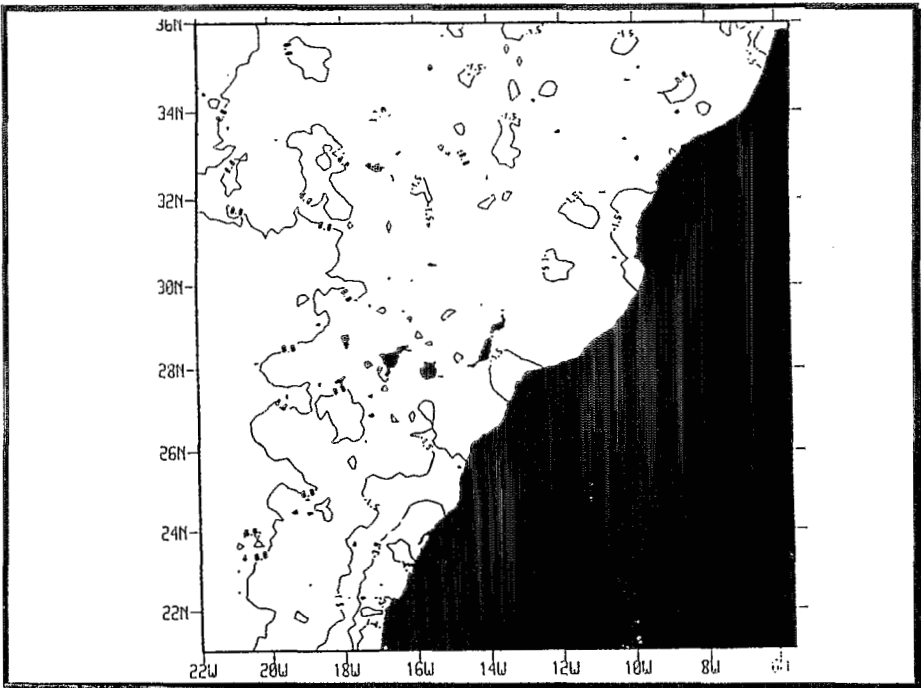


Figure 5 : Les gradients large-côte en 1987.

Les structures sont marquées sur la côte saharienne et très faible au Nord.

On constate sur les figures 4 et 5 que les gradients sont très puissants au nord en 1986 alors qu'ils sont localisés au sud en 1987. Les valeurs atteintes par les gradients sont très fortes, de l'ordre de 4 °C, ce qui est d'autant plus considérable que ce sont des valeurs moyennes, calculées sur une période de deux mois.

4.2 INDICES MENSUELS DES TEMPERATURES ET RELATION AVEC LA REPARTITION DES CAPTURES

Une fois constaté l'intérêt des données in situ pour représenter les gradients côtiers, nous avons mis en relation les températures moyennes calculées mensuellement sur le secteur 'UP' avec la répartition relative des captures du port de SAFI par rapport à l'ensemble SAFI+AGADIR. Les indices sont calculés de mai à septembre. Chaque mois est séparé en période de 6 jours sur lesquelles on calcule la valeur moyenne des mesures faites par des bateaux différents les uns des autres. Ces valeurs sont ensuite moyennées pour donner l'indice mensuel. La valeur de juin 1989 n'a pu être calculée du fait de l'absence de distribution de données par la Météorologie Nationale à cette époque.

Pour tenir compte de l'effet saisonnier; c'est à dire de l'augmentation des températures moyennes de mai à septembre, les valeurs sont exprimées par rapport aux moyennes mensuelles calculées sur les 4 années étudiées. Ces écarts mensuels, joints aux indices relatifs, sont représentés sur la figure 6.

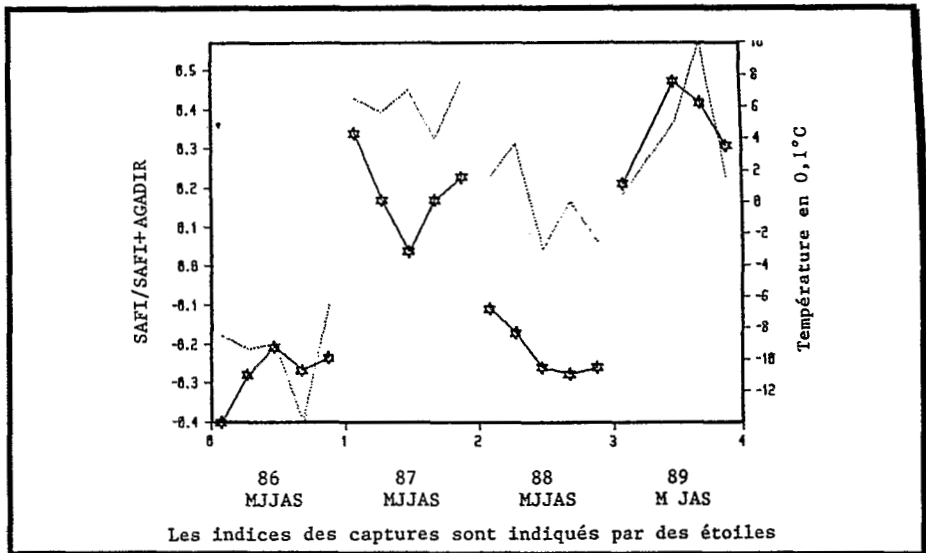


Figure 6 : Répartition des captures et indice mensuel relatif des températures

Il apparaît sur la figure 5 une relation entre la répartition des captures et la température mensuelle du secteur 'UP', les captures étant d'autant plus fortes à Safi que l'année est "chaude". L'année 88 se distingue par rapport à ce schéma en montrant des captures plus fortes à Agadir alors que les structures hydrologiques ne sont pas en faveur d'une telle répartition. Il est indéniable que notre schéma simplifie grossièrement les processus complexes conduisant à la forte variabilité des captures. Il n'est pas question dans ce texte de démontrer le caractère mécanique de la réponse de la population, observée par les captures, aux variations du milieu mais d'apporter un complément aux observations déjà faites dans d'autres régions d'upwelling sur une contraction du stock sur le coeur de l'upwelling en cas de diminution de celui-ci.

5 CONCLUSION

Face à l'impossibilité de suivre par télédétection infra-rouge les évolutions de l'upwelling sur la base mensuelle des captures de sardine, nous avons plaidé dans ce texte pour l'usage des données in situ. La capacité des données des bateaux à représenter les structures moyennes a été montrée par la réalisation des cartes de gradients Côte-Large lors de deux années, 1986 et 1987, particulièrement contrastées. La méthode du krigeage a été utilisée en tant qu'outil opératoire pour réaliser une cartographie automatique. En effet, dans notre cas les hypothèses de stationnarité ne sont pas des plus adaptées car les variogrammes linéaires laissent deviner l'existence d'une tendance, c'est à dire d'une dérive allant à l'encontre des hypothèses de stationnarité. A vrai dire, nous savons qu'il y a une tendance Côte-Large puisque nous cherchons à la mettre en évidence!

Quoi qu'il en soit, l'usage de la méthode du krigeage, basée sur des hypothèses de stationnarité acceptables dans un voisinage local, permet de restituer les traits essentiels des structures Côte - Large en faisant la part, dans les estimations, entre le bruit, caractérisé par la partie constante du variogramme, et la variabilité spatiale.

Sur les deux années étudiées, nous avons mis en évidence la sensibilité de la zone dite 'UP' aux effets de l'upwelling. La température absolue moyenne de cette zone est fortement liée à l'upwelling côtier bien que la dépendance ne soit pas totale puisque une augmentation de la couverture nuageuse et un brassage de la couche homogène de surface dû des vents forts mais sans rapport avec les alizés agiront dans le même sens qu'un renforcement de l'upwelling.

Cet indice mensuel peut donc servir à caractériser la variabilité de l'upwelling à une échelle compatible avec celle des répartitions mensuelles de sardine. Nous n'avons pas eu l'ambition dans ce texte de mettre en évidence l'ensemble du processus liant l'hydrologie et les captures mais d'apporter une modeste contribution à la compréhension des effets des upwellings en insistant sur les intérêts

relatifs des satellites à capteur infra-rouge et des données in situ. Chacune de ces données, à son échelle, apporte une description particulière et intéressante de ces zones fortement instables.

BIBLIOGRAPHIE

- Belvèze H. Biologie et dynamique des populations de sardine peuplant les côtes atlantiques marocaines et propositions pour un aménagement des pêcheries. Thèse d'état, Université de Bretagne Occidentale, 1984.
- Chiles J.P. Géostatistique des phénomènes non stationnaires. Thèse de docteur-ingénieur. Université de Nancy 1, 1977.
- Deschamps et Phulpin. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μm . Bound. Lay. Meteorology, 18, 131-143, 1980.
- Fréon P., Gerlotto F., Mullon Ch. Les changements d'échelle en halieutique: l'exemple des petits pélagiques côtiers. Compte-rendu du congrès SEMINFOR 1990.
- Furnestin J. et Furnestin M.L. La sardine marocaine et sa pêche. Migrations trophique et génétique en relation avec l'hydrologie et le plancton. Rapp P.V. Reunion. Cons. Int. Expl. Mer. 159: 165-175.
- Gohin F. Analyse géostatistique des champs thermiques de surface de la mer. Thèse de Docteur Ingénieur. Ecole des Mines de Paris, 1987.
- Mittelstaedt E. The surface waters off northwest Africa. Rapport Interne; Centre Commun de Recherche D'Ispra, 1987.

OUTILS DU CHANGEMENT D'ECHELLES EN TELEDETECTION ASPECT RADIOMETRIQUES ET SPATIAUX

DAGORNE D.

RESUME

Pour de nombreux paramètres d'environnement, l'approche par télédétection est la seule qui puisse réaliser une couverture spatio-temporelle suffisante pour la connaissance de ces phénomènes. La source de donnée satellitaire présente en effet un large éventail d'échelles d'études qui par diverses méthodes physiques et statistiques permettent l'obtention de valeurs géophysiques et leur validation. Nous présentons des outils méthodologiques développés pour répondre à la superposition géométrique de données satellitaires et spatialisées, de résolution et de couverture différentes. L'ensemble de ces techniques, préalable à l'utilisation "multi-sources", est mise en oeuvre au sein d'outils informatiques, indépendants de la thématique considérée. Divers exemples tirés de programmes de recherches et d'exploitation opérationnelles illustrent nos propos.

I INTRODUCTION

Pour de nombreux phénomènes de l'environnement, qu'ils soient atmosphériques, océaniques ou continentaux, l'approche par télédétection a révolutionné au cours de la décennie passée les communautés scientifiques et opérationnelles de diverses sciences. Ceci a été réalisé à partir des moyens d'observations satellitaires tant "météorologiques" (géostationnaires et défilants) en climatologie, météorologie, océanographie, hydrographie, que "d'observation de la terre" (LANDSAT, SPOT...) pour l'occupation des sols, l'agriculture, le littoral, l'urbanisme..etc .

Pour les études globales d'environnement, les mesures par satellites sont en effet les seules qui puissent à la fois réaliser une couverture spatiale suffisante, particulièrement dans des régions dépourvues de systèmes d'observation, et à des pas de temps acceptables pour des études dynamiques et sur des périodes continues. La connaissance de ces phénomènes est indispensable pour de multiples applications.

Les satellites sont conçus pour répondre à des spécifications d'observations définies par les utilisateurs. Ce choix d'échelles d'utilisations, tant spectrales, spatiales que temporelles est lié aux caractéristiques orbitales et instrumentales des moyens satellitaires. D'abord utilisées "qualitativement" à l'aide de techniques de "photo interprétation", ces données sont de plus en plus employées à la restitution de valeurs quantitatives, dans leurs composantes radiométrique et spatiale. En effet pour de nombreux phénomènes, ces valeurs doivent être quantifiées en mesures "géophysiques", puis exploitées, éventuellement avec d'autres sources de données, afin de produire des documents cartographiques utilisables par les spécialistes du domaine concerné. Ceci implique plusieurs transferts d'échelles, dont nous détaillerons certains aspects.

Pour nos applications, au sein d'une équipe de recherche utilisant les moyens satellitaires météorologiques, ces méthodes sont mises en oeuvre au moyen d'un logiciel de traitement de données, avec un accent particulier sur les outils géométriques permettant l'utilisation de méthodes "multisources" (multiéchelles). Divers exemples tirés de notre expérience illustreront notre propos.

II ECHELLES DE LA TELEDETECTION

La donnée satellitaire, sous la forme classique d'une image (radiomètre imageur éventuellement multicanaux) ou non ("spot" sondeur, signal sous la trace), est fonction du couple VECTEUR (orbitographie du satellite)-CAPTEUR (caractéristique de l'instrument). Ces paramètres conditionnent les échelles de la donnée dans ses composantes spectrale, spatiale et temporelle.

On rappelle ci-après les principales échelles, qui définissent les classes d'utilisation d'une telle source.

- Echelle spectrale

Tous les corps réfléchissent et émettent des flux d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. L'énergie réfléchie ou émise en fonction de la longueur d'onde, constitue la "signature spectrale" de l'objet considéré. Pour un capteur, qui effectue une mesure dans une longueur d'onde donnée (éventuellement instrument multispectrale dans plusieurs longueurs d'ondes), la signature spectrale de l'objet correspond au niveau radiométrique enregistré (niveaux numérisés et traités en Compte Numérique - CN).

Les capteurs de télédétection ne sont pratiquement utilisés que du visible aux hyper-fréquences (micro-ondes), en passant par l'infrarouge (proche, moyen et thermique), et ceci sur des fenêtres plus ou moins large et à des résolutions radiométriques variées. Cette mesure spectrale est soumise à diverses "corrections", dues à la

nature de la cible et au trajet atmosphérique du signal reçu. C'est cette mesure du rayonnement qui permet le passage vers des valeurs géophysiques.

- Echelle spatio-temporelle

Elle est conditionnée, à la fois par le capteur (résolution spatiale du point élémentaire image, amplitude de visée de l'instrument), et par les caractéristiques d'orbite du vecteur. Des limitations pratiques d'utilisation sont liées aux modes d'accès des données (acquisition directe depuis une station dans la zone de réception, enregistrement à bord et distribution à postérieurei,..) ainsi qu'à l'adéquation de l'instrument avec l'utilisation envisagée (nuage).

Pour les satellites d'environnement (ou météorologiques) on recherche une grande répétitivité : 30 minutes sur la partie du globe visée, pour un satellite géostationnaire (Météosat, GOES), 12 heures pour les satellites de la série NOAA soit soit une zone approximative de 2000 km autour d'une station d'acquisition à partir de plusieurs orbites successives. La résolution spatiale reste faible dans le visible et l'infrarouge (respectivement 2.5 et 5 Km pour Météosat, 1.1 Km sous la trace du satellite pour l'imageur AVHRR/NOAA)

Ces satellites sont également équipés de "sondeurs" infrarouge et micro-ondes (VAS, TOVS,..) qui fournissent des indications de faible résolution (spot de 20 a 150 km), mais pour de nombreuses bandes spectrales, permettant la reconstitution de profils verticaux atmosphériques de température et d'humidité.

Ces satellites fournissent ainsi, de façon continue, des informations "météorologiques" globales, à l'échelle de plusieurs centaines de kilomètres carrés, et à des pas de temps compatibles avec l'évolution des phénomènes atmosphériques globaux. Ils sont également utilisés, après décontamination des nuages, pour des phénomènes terrestres et maritimes, de variabilité temporelle plus faible sur des suites multitemporelles d'images.

Les satellites d'observation de la terre (SPOT, Landsat) ont une faible répétitivité dans le temps (plusieurs jours, plus avec les possibilités de dépointage de l'instrument), pratiquement beaucoup moins avec les limitations d'utilisation liées à la couverture nuageuse et aux conditions d'obtentions des données. Par contre il fournissent une très bonne résolution spatiale et ceci dans de nombreuses bandes spectrales (de 10m - panchromatique- et 20 m - visible/PIR - pour SPOT à 30 m et plus pour LANDSAT visible, infrarouge thermique). Ils permettent des analyses fines à des périodes données sur des surfaces de plusieurs dizaines de Km².

Il existe d'autres systèmes spatiaux combinant divers instruments suivant les techniques passives (radiomètre) ou actives (radar imageur, diffusiomètre,..). Ceux-ci sont soit expérimentaux et arrêtés

(SEASAT, NIMBUS7), soit en projet (ERS1, SPOT3,...), soit non disponibles (DMSP, MOS,...). Aussi pour des applications immédiates et un suivi permanent de l'environnement à échelle globale ou régionale, l'accès aux données des satellites météorologiques opérationnels est un moyen de travail irremplaçable.

III CHANGEMENT D'ECHELLE SPECTRALE RESTITUTION DES PARAMETRES GEOPHYSIQUES

La valeur numérisée du "pixel" image (CN) est une mesure radiométrique de la cible visée au sommet de l'atmosphère et à un instant donnée. Cette mesure est spatialement et radiométriquement "intégrée" par l'angle instantané de visée (IFOV), et la bande spectrale du capteur considérée. Après calibration du signal, la reconstitution d'un paramètre "géophysique" nécessite l'utilisation de modèles radiométriques et énergétiques. Il est habituel de classer ces paramètres en trois classes de complexités croissantes: paramètres primaires reliés directement à la radiance mesurée (réflectance, température de surface,...), paramètres secondaires en relation avec un processus physique à la surface tel l'humidité du sol, l'inertie thermique, et quantités tertiaires indirectes telles la production de bioamasse, l'évapotranspiration moyenne, ...

III-1 Calibration

Il existe une relation entre le CN mesurée et la valeur radiométrique enregistrée, par le biais d'un coefficient de calibration propre au capteur, si celui-ci est disponible. On peut ainsi restituer les valeurs radiométriques de base avec des tables fournies par le constructeur et la connaissance de paramètres régulièrement entretenus lors de la durée de vie du capteur (visée espace, "corps noir", ...)

Par exemple pour les satellites météorologiques on obtient dans le visible la valeur du pourcentage d'albédo et dans l'infrarouge thermique une valeur "radiance" ($W/m^2 \cdot str$) convertible en température radiative. Ces valeurs entre satellites géostationnaires différents sont inter-calibrées par le biais d'un satellite défilant unique.

III-2 Méthode déterministe

Pour extraire du signal qui est reçu par le satellite l'information spectrale relative à la cible, il est indispensable de mettre en oeuvre des méthodes de correction des données atmosphériques (paramètres primaires). La connaissance du trajet cible/capteur permet l'extraction d'informations sur les interactions des

rayonnements électromagnétiques avec les constituants de l'atmosphère (diffusion par les gaz, diffusion atmosphérique due aux molécules et aux aérosols dans le spectre visible, rayonnement atmosphérique dans l'infrarouge). Les conditions de visée, angles solaires et satellitaires à l'instant de la mesure, doivent également être connues.

L'extraction d'un paramètre géophysique secondaire ou tertiaire nécessite en plus de la connaissance purement radiative du signal, des conditions supplémentaires et des modélisations du phénomène étudié. L'objet visé doit être connu avec précision par la signature radiométrique de la cible dans les bandes spectrales du capteur, caractérisant la nature du sol, de la végétation, du nuage,... Des méthodes physiques complexes intègrent ces paramètres souvent obtenus ou évalués par d'autres moyens, satellitaires, classiques, ou climatologiques à base d'atlas à échelle saisonnière et régionale. Les résultats obtenus sont validés par comparaison avec ceux obtenus "in-situ" par des mesures directes ou indirectes.

A titre d'exemple, dans le cas de capteurs passifs météorologiques, on peut citer les études "atmosphériques" qui sont un préalable à tous résultats océaniques ou continentaux. Le résultat est la détermination des "pixels" clairs ou contaminés ("masque nuages") avec une classification nuageuse. Ceci est réalisé à l'aide des brillances (visible) et des températures de nuages (infrarouge thermique), ainsi que d'atlas climatologiques (température de la mer, nature du sol..) et la considération de paramètres de structure/texteure des cibles visées. Il est alors possible d'évaluer correctement, après d'autres modélisations, les températures de la mer et des surfaces continentales, de déterminer les flux à l'interface (ondes longues et courtes), le bilan hydrique à l'échelle d'une région, d'étudier les courants marins à partir des cartographies thermiques, l'inertie thermique des sols, de déterminer des indices représentatifs de divers phénomènes : index "normalisé" de végétation (NDVI) permettant d'estimer de façon globale la production de biomasse, indice de "turbidité" (sédiments et polluants en zone côtière), etc..

Ces études réclament la parfaite superposition géométrique des données (satellitaires ou non), d'où l'importance de pouvoir disposer de celles-ci dans un même référentiel (voir chapitre IV).

III-3 Méthodes statistiques

Pour une donnée unitaire ou "synthétique" (c'est à dire issue du mixage multitemporelle de données élémentaires dans le même référentiel), cette méthode est utilisée si le phénomène étudié n'a pas de relation évidente avec la signature radiométrique. On passe alors directement de la mesure satellite à une sortie géophysique par le calcul d'un "ajustement". La validité d'une telle approche est en général limitée dans l'espace et dans le temps. Les méthodes statistiques permettent d'utiliser plusieurs données (satellitaires ou

non), à des échelles de temps différentes par le couplage de plusieurs "capteurs" de résolution spatiale variées, fournissant des informations complémentaires.

Une application type des méthodes multitemporelles statistiques est réalisée à partir de l'imagerie "géostationnaire", à haute cadence de réception, sur des périodes continues, pour des phénomènes climatiques qu'il est difficile, pour diverses raisons, de suivre évènement par évènement (température "maximum" du sol et de l'océan, précipitations, flux à l'interface,..)

III-4 Méthode mixte

Cette solution consiste à mettre au point des modèles simples, utilisant un nombre réduit de paramètres. Elle intègre des approches statistiques spatiales (géostatistique) et temporelle sur des données satellitaires ou non. Elle permet ainsi le mixage de données d'échelles très différentes, en utilisant les caractéristiques d'une source, corrigés par une ceux d'une autre à une résolution différente.

Un exemple est celui du suivi permanent d'un phénomène à partir d'une donnée répétitive, mais de faible résolution géométrique et radiométrique (géostationnaire), calibré par une information plus fine (autre satellite, mesure terrain), mais disponible à des pas temporels plus grands ou irrégulier.

IV CHANGEMENT D'ECHELLE SPATIALE RESTITUTION DE PARAMETRES GEOMETRIQUES

Toutes les informations images satellitaires brutes, corrigées radiométriquement, ou en valeurs géophysiques, extraites de la donnée de télédétection non "rectifiée", sont définies spatialement à l'échelle du "pixel" nominal du capteur (IFOV) et sur l'étendu de la visée de celui ci. Des modèles "géométriques" mettent en relation la position du pixel image avec sa localisation terrestre. Le mixage "multisources", c'est à dire multicapteurs - multivecteurs satellitaires, mesures classiques, données d'analyse et de modèle, ainsi que la restitution cartographique avec la superposition d'atlas et de représentations "graphiques" diverses (isolignes,..) d'autres données, nécessite des outils afin d'assurer la parfaite transparence géométrique de ces entités. Le niveau de résolution spatiale est choisi par l'utilisateur. La résolution finale "pixel" est souvent dégradée par rapport au maximum nominal de la donnée.

Il s'agit ici d'un véritable changement d'échelle au sens cartographique du terme, où l'on reconstitue à partir des données existantes en "projection" quelconque (projection satellitaire dépendante de l'orbitographie et de la visée), une image dans une projection donnée, habituellement cartographique. Pour un résultat

à échelle fixée, intervient également la "taille du pixel" du périphérique de restitution en mode "raster".

La technique utilisée est celle du rééchantillonnage d'image à l'aide d'un modèle de déformation, modèle mettant en correspondance les pixels de l'image destination avec ceux de l'image source. La reconstitution des pixels "rectifiée" est réalisée par interpolation avec ceux de l'image "brute", et ceci suivant plusieurs schémas : plus proche voisin, interpolation bilinéaire, bi cubique, spline....

Cette déformation peut être globale sur l'ensemble de l'image. Il existe alors une relation linéaire ou de degré supérieur (polynôme de déformation), valable pour tous les points de l'image. Ceci est réalisé pour des images faiblement déformées (cas général des images d'observations de la terre).

Pour des images "météorologiques", où la distorsion est très importante et non uniforme (effet de la rotation de la terre, de l'avance du satellite sur sa trace dans le cas des satellites défilants, des angles de visée importants sur une surface sphérique), on préfère une méthode par morceaux, où les images sont découpées en "pavés" réguliers (ou non) aux noeuds d'une matrice de localisation.

La construction du modèle de déformation entre images est liée à ces 2 techniques :

- Le "polynôme de déformation" est réalisé par la prise de points d'amers entre images, avec la mise en correspondance de certains points de la source avec une carte "référence" numérisée;

- dans le second cas, chacune des images est localisée aux noeuds d'une grille de points. Cette localisation est calculée suivant le type d'image, par des modèles de projection cartographique (type, échelle) et de navigation d'image satellitaire fonction du couple vecteur - capteur. Les méthodes par points d'amers sont inutilisables globalement sur de telles images, par ailleurs dépourvues de tels repères (mer, nuage). L'interpolation directe et inverse entre coordonnées géographiques (lat-lon en deg) et coordonnées images (lig-pix), puis la relation avec les coordonnées cartographiques (x-y en mm) permet le passage vers et depuis n'importe lequel des référentiels.

Dans une image quelconque munie d'une localisation, il est possible de positionner toute référence géographique et inversement de connaître les coordonnées géographiques de tout pixel. La mise en correspondance de 2 localisations avec le calcul d'une déformation, et l'application d'un schéma de rééchantillonnage des pixels, permet de reconstituer une image à une projection donnée et à une échelle fixée. Cette approche autorise la superposition géométrique dans un même référentiel d'informations d'origines très différentes.

Pour éviter une dégradation importante de l'information spatiale origine, il est préférable de rectifier la donnée brute proche de sa résolution nominale. Les méthodes utilisées réalisent une "agrégation" de plusieurs pixels dans le cas d'un sous échantillonnage. Dans le cas inverse l'information est recréée par interpolation à partir d'un pixel et de ses voisins.

V LES OUTILS DU LOGICIEL "TRISKEL"

Le logiciel TRISKEL est développé à l'Antenne ORSTOM de LANNION depuis quelques années, en soutien à une équipe de recherche utilisatrice de données de télédétection satellitaire "météorologique". Les méthodes précédentes sont mises en oeuvre au sein de programmes, interfacés avec des structures de données, le tout dans un environnement "informatique" [1].

Si le transfert d'échelle "géophysique" est lié aux utilisations thématiques envisagées, les méthodes géométriques mises en oeuvre [2] sont des outils généraux de traitement et de restitution, qui restent un préalable à l'utilisation effective de données "multisources". Elles peuvent également servir d'outils de cartographie indépendamment de l'application en imagerie de télédétection.

VI ILLUSTRATIONS

Trois exemples illustreront nos propos. Le premier est tiré d'une activité "de routine" d'estimation des pluies en zone sahélienne, réalisé à l'Antenne ORSTOM de Lannion. Le second est relatif à la restitution de paramètres géophysiques des données des satellites météorologiques NOAA au Centre de Météorologie Spatiale. Le troisième est un exemple d'applications multi-satellites dans deux domaines.

VI-1 Estimation des pluies

Deux types d'approches sont utilisés pour l'estimation des précipitations par satellite : les méthodes de suivi d'événements isolés, coûteuses et peu fiables actuellement, et les méthodes statistiques, qui donnent des résultats acceptables sur des périodes longues [3].

Nous avons développé et validé plusieurs algorithmes "statistiques" à partir de données "synthétiques" satellitaires par période de 10 jours. Ceux-ci permettent d'obtenir une précision acceptable en précipitation à l'échelle du mois avec une efficacité croissante pour des périodes cumulées au cours de la saison des pluies. Les méthodes

mis au point intègrent des images composites réalisées à partir de 24 images/jour Météosat infra-rouge, pour la température radiative maximale du sol et la somme d'occurrence de nuages "froids". Ces données sont ensuite mixées avec des données exogènes (température de l'air, latitude, climatologie d'"efficacité" de précipitation..) pour être comparées avec les relevés pluviométriques aux stations [4]. Ces algorithmes ont été testés à diverses échelles spatiales, du niveau synoptique (ensemble des pays du sahel), régional (Niger) ou local (degrés carré de Niamey) [4]

Dans une action de validation, la donnée élémentaire METEOSAT IRT a été comparée à celle d'enregistrements radar de répétitivité plus importante, données pouvant apporter des précisions sur l'étendue et l'intensité des précipitations [5]. Les premiers résultats obtenus sont encourageants et ouvrent la voie à d'autres validations soit classiquement par des mesures in-situ, soit par l'utilisation prometteuse de techniques satellitaires micro-onde.

VI-2 traitement NOAA

L'élément essentiel de ce traitement est l'aspect "atmosphérique" qui permet, par un mixage sondeur TOVS - imageur AVHRR, d'identifier la nébulosité de l'atmosphère [6]. Sur les pixels "clairs", il est alors possible d'effectuer des traitement spécifiques à divers domaines : restitution de la température de surface océanique (algorithme split-window "régional"); caractérisation des paramètres sols et principalement du NDVI; index de turbidité, etc....

Les produits finaux, synthèses de résultats "instantanés", sont réalisés à des échelles de temps variables (semaine, mois, saison), permettant l'exploitation et le suivi permanent de plusieurs phénomènes.

Le domaine spatial concerné est l'étendue de la zone d'acquisition de Lannion, en projection cartographique (stéréopolaire). Chaque image élémentaire est obtenue après la fabrication d'une mosaïque composée de plusieurs orbites successives (maximum 3). La distribution des produits finaux est assuré par le groupement SATMOS.

VI-3 Mixage géostationnaire-défilant

Divers travaux ont démontré l'intérêt de l'utilisation de la température de surface océanique ou continentale, estimée à partir de l'infrarouge thermique "géostationnaire". Compte tenu de l'imprécision des valeurs radiatives issues de Météosat, la température obtenue à partir des canaux thermiques de NOAA est utilisée pour étalonner cette donnée conjuguant le découpage

temporel et la haute répétitivité permis par le satellite géosationnaire et la bonne précision radiométrique du défilant.

Il est alors possible à une échelle de temps pentadaire ou décadaire, caractéristique de l'agroclimatologie, de disposer d'un outil de diagnostique de l'état hydrique régional tout à fait complémentaire des données climatiques du réseau [7].

En océanographie, le même principe d'une calibration fine issue de NOAA/AVHRR, autorise le suivi précis de température de la mer (réchauffement diurne,..) et leur synthèse (moyenne, maxi,..) à partir des données Météosat semi-horaire [8] ou sa correction par le sondeur atmosphérique du même vecteur (TOVS).

Ces produits climatiques sont réalisées à partir des synthèses "thermiques" Météosat, réalisées à échelle pentadaire par l'antenne ORSTOM de LANNION, pour les besoins du programme "veille climatique".

VII CONCLUSIONS

Nous avons présenté au sein de l'application "télédétection" certaines approches du transfert d'échelle, dans ses aspects radiométrique et spatial. L'interprétation correcte des données de télédétection, passe par une meilleure connaissance de la part de l'utilisateur final, des modèles, permettant leur mise en oeuvre. Celui-ci n'est en effet que trop souvent attaché à l'aspect "belles images" pour sa thématique propre, en oubliant certains principes généraux et certaines limites à l'utilisation de telles données.

Les méthodologies développées ont été mises en oeuvre au sein d'outils logiciels généraux susceptibles de répondre efficacement aux besoins exprimés par les chercheurs. C'est un élément essentiel au transfert de "savoir faire" auprès de partenaires, dans un domaine scientifique qui tend parfois à sous-estimer l'aspect technique par un étalage de "faire-savoir" tapageur.

Classiquement dans les sciences de l'environnement, les données de télédétection sont utilisées seules pour étudier un phénomène. Leur utilisation future doit être vu dans un cadre multidisciplinaire, pour évaluer les processus qui cause ces phénomènes et pour prédire leur évolution. Les systèmes étudiés sont très complexes et font de plus en plus un appel important à des modèles couplés. Ils peuvent être étudiés à différentes échelles par le biais de modèles indépendants dont la télédétection est une des composantes. L'utilisation efficace d'une telle source dans les modèles suppose la résolution des problèmes d'intégration de données et en particulier quelles sont les résolutions spatiale et temporelle nécessaire pour décrire ces systèmes?

De façon plus pratique, pour valider et interpréter les données satellitaires à des échelles locale, régionale ou globale, il est nécessaire de mettre en relation les points de mesure ponctuelle, obtenus lors de campagne d'essais, avec ceux distribués spatio-temporellement issus de la télédétection. Deux voies possible, soit en augmentant la "taille" de la mesure ponctuelle jusqu'à la résolution du paramètre mesuré, soit en dégradant celui-ci jusqu'à une échelle locale. Diverses études en ce sens reste à réaliser.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DAGORNE D.; 1989; Traitement de données météorologiques satellitaires et conventionnelles pour la connaissance de l'environnement; SEMINFOR 3 "Système d'information pour l'environnement", Bondy 26-28/09/1989, Colloques et séminaires ORSTOM (à paraître)
- [2] DAGORNE D.; 1988; Modélisation géométrique en télédétection, superposition et rectification de données satellitaires et spatialisées; SEMINFOR 2 "La modélisation : aspects pratiques et méthodologie", Colloques et séminaires, Montpellier 26-28/09/88 ORSTOM. p 175-194.
- [3] GUILLOT B.; 1988; Compte rendu de la réunion EPSAT de Reading, 11-12/10/1988; Veille climatique satellitaire No 28; coéditeurs : Antenne ORSTOM et Centre de météorologie Spatiale, Lannion. p 11-22.
- [4] CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.P.; 1989; Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique sahêlo-soudanienne; Veille climatique satellitaire No 28; ccoéditeurs : Antenne ORSTOM et Centre de météorologie Spatiale, Lannion. p 47-54.
- [5] SAUVAGEOT H, DAGORNE D., DESPAUX G; 1990; Relations entre les champs de précipitations déterminés par radar et l'imagerie Météosat; Colloque de climatologie Lannion-Rennes, 16-19/06/1990, Association Internationale de Climatologie.
- [6] DERRIEN M., LE GLEAU H.; HARANG L; NOYALET A., PIRIOU J.L.; 1989; An Automatic cloud classification using AVHRR at night; proceedings of the 4th AVHRR users meeting, Rothenburg , 5-8/09/1989, Agence Spatiale Européenne. p 69-72.
- [7] SAVANE M., SEGUIN B., GUILLOT B.; 1989; Utilisation des synthèses thermiques de Météosat étalonnées par NOAA-AVHRR en agroclimatologie : application à la France; Veille climatique satellitaire No 28; coéditeurs : Antenne ORSTOM et Centre de météorologie Spatiale, Lannion. p 55-60.
- [8] RADENAC M.H.; 1986; Restitution de la température de la mer à échelle moyenne à l'aide du canal infrarouge de Météosat-2, application au golfe de Gascogne, Thèse de doctorat 3eme cycle, océanographie physique, Université de Bretagne occidentale. 132 p.

LE SYSTEME EAU/SOL

EVALUATION DES CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DE SOLS A DIFFERENTES ECHELLES CAS DES SOLS SULFATES ACIDES SABLEUX DE LA VALLEE DE KATOURE (BASSE CASAMANCE, SENEGAL)

*BOIVIN P., BRAUDEAU E., COLLEUILLE H., EISENLOHR L., MONTOROI J.P.,
TOUMA J. ET ZANTE P.*

RESUME

Le problème du changement d'échelle est abordé dans le cas d'une étude monodisciplinaire, et discuté en fonction de la variabilité spatiale de résultats expérimentaux. Pour que le changement d'échelle des résultats d'une caractérisation soit possible, il faut au minimum que les conditions d'interpolation soient bonnes, c'est à dire qu'une structure spatiale ait été identifiée. Dans un second temps, l'extrapolabilité de résultats à partir de variables simples est recherchée. Par rapport aux problèmes d'interpolation et d'extrapolation, trois exemples expérimentaux illustrent l'importance de la reconnaissance des structures naturelles, tant au plan des stratégies d'échantillonnage, du choix des protocoles expérimentaux, qu'au niveau du choix du cadre scientifique de l'exploitation des mesures.

INTRODUCTION

Les résultats présentés dans ce texte sont extraits pour l'essentiel de travaux réalisés dans le cadre d'une ATP ORSTOM /CNRS /INRA /CIRAD intitulée «Influence des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols à l'échelle régionale». Ces recherches ont par ailleurs été suscitées par le contexte de catastrophe naturelle que connaît le Sénégal et en particulier la basse Casamance : la sécheresse .

En basse Casamance, la sécheresse a provoqué une modification des régimes hydriques, au niveau des eaux de surface et des nappes superficielles : disparition des écoulements dans le réseau hydrographique, intrusion des eaux salées dans l'estuaire, abaissement et salinisation des nappes superficielles (Boivin et al, 1986). Au niveau des sols des bas fonds, ces phénomènes se

traduisent par une forte dégradation, par salure et acidification, et aboutissent dans la plupart des cas à une désertification.

Les bas fonds de basse Casamance, aménagés en rizières, sont traditionnellement la principale ressource alimentaire de la région. Les pouvoirs public et la population ont donc activement développé une politique d'aménagement en réaction aux dégradations que nous venons de rappeler. Cette politique d'aménagement est basée sur l'édification de petits barrages anti-sel, constitués par des digues de retenue caulinaires équipées d'un ouvrage bétonné sur le lit mineur. Les ouvrages réalisés sont à l'échelle des communautés agricoles villageoises et concernent des surfaces de l'ordre de 100 à 1000 hectares. Les rizières délimitées par des digues ont une superficie de quelques centaines de mètres carrés.

Le développement et l'optimisation des projets d'aménagement font intervenir des calculs de gestion de l'eau au niveau des retenues et du parcellaire, en particulier lorsque les sols sont saturés et que leur dessalement est entrepris par lessivage. Un programme de définition des caractéristiques hydrodynamiques des sols a donc été mis en oeuvre sur un premier site test, les dispositifs expérimentaux envisagés devant permettre une caractérisation des sols depuis l'échelle de la centaine d'hectares jusqu'à celle du profil de sol. Ce travail a permis notamment de mettre en relation les caractéristiques de variabilité et d'organisation du milieu et les problèmes de transfert d'échelle des résultats obtenus. Dans la suite de ce texte, nous illustrerons par quelques exemples précis les principales conclusions qui se sont imposées. Afin de préserver une certaine concision, nos exemples seront extraits de leur contexte global et les aspects «matériel et méthodes» seront très brièvement cités. Les références bibliographiques permettront au lecteur de se reporter aux publications plus détaillées le cas échéant.

I- MATERIEL ET METHODES : BREF RAPPEL

I-1 Les sols

On pourra se reporter, pour une étude détaillée, aux descriptions de Boivin (1990) à l'échelle de la parcelle et Colleuille (1989) à l'échelle du profil. Il s'agit d'une façon générale de sols sulfatés acides sableux évolués. La nappe phréatique est peu profonde (1 à 1,5m). Les profils de sol comportent de très nombreuses taches d'oxydo-réduction plus ou moins indurées selon l'importance de l'accumulation d'oxyhydroxydes de fer. La teneur en sable varie de 75 à 90% à 70cm de profondeur, la fraction limoneuse est de l'ordre de 5% et varie peu. La fraction argileuse se déduit donc de la teneur en sables à laquelle elle est très fortement corrélée négativement. En surface on rencontre parfois un horizon superficiel argileux à structure polyédrique. Cet horizon correspond à un dépôt argileux d'environ trente centimètres d'épaisseur, qui occupe d'anciennes dépressions du dépôt sableux. La

répartition spatiale de l'argile correspond donc à des lentilles d'une dimension moyenne d'environ 40 à 50 mètres.

Les facteurs de différenciation des sols sont principalement la mise en place des matériaux (qui détermine la répartition des lentilles d'argile en surface, figure 1) et la pédogenèse. Cette dernière se manifeste sous forme de gradients d'acidité et de salure perpendiculaires au cours d'eau (figure 2). Dans l'espace, tous les paramètres de description morphologique ou analytique des sols présentent donc une organisation, soit sous forme de structures régulières (variables liées à la mise en place des matériaux), soit sous forme de gradients.

A l'échelle du profil de sol et si l'on excepte l'apparition d'une stratification (argile/sable), les variations verticales sont très faibles et permettent de considérer les profils comme homogènes par comparaison aux variations latérales. En particulier dans le cas des profils purement sableux, les profils texturaux et de densité sont presque uniformes (figure 3). Seules les taches d'oxydo-réduction semblent ne pas posséder d'organisation dans leur répartition à l'échelle de la parcelle ou du profil. Elles déterminent une mosaïque complexe à une échelle d'observation plus fine, de l'ordre de la dizaine de centimètres (Colleuille, 1989, et figure 4).

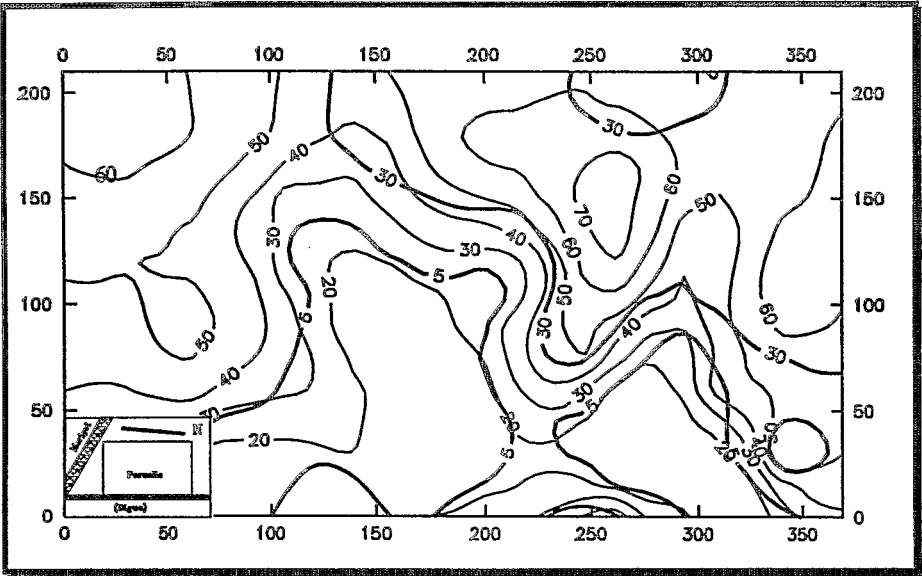


Figure 1. Carte de teneur en argile de la couche 10-30 cm. sur une parcelle de huit hectares. En traits gras figurent les épaisseurs 5 et 30 cm. de l'horizon argileux superficiel

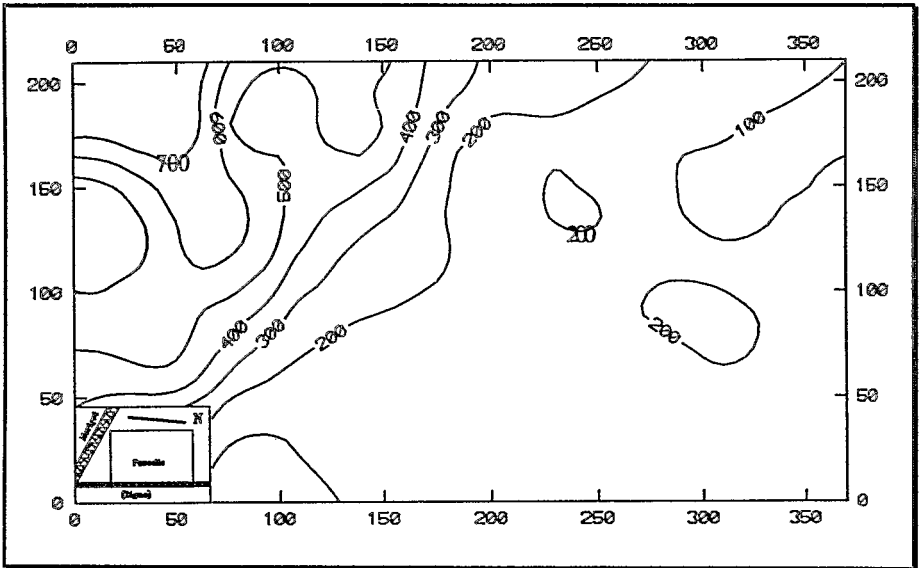
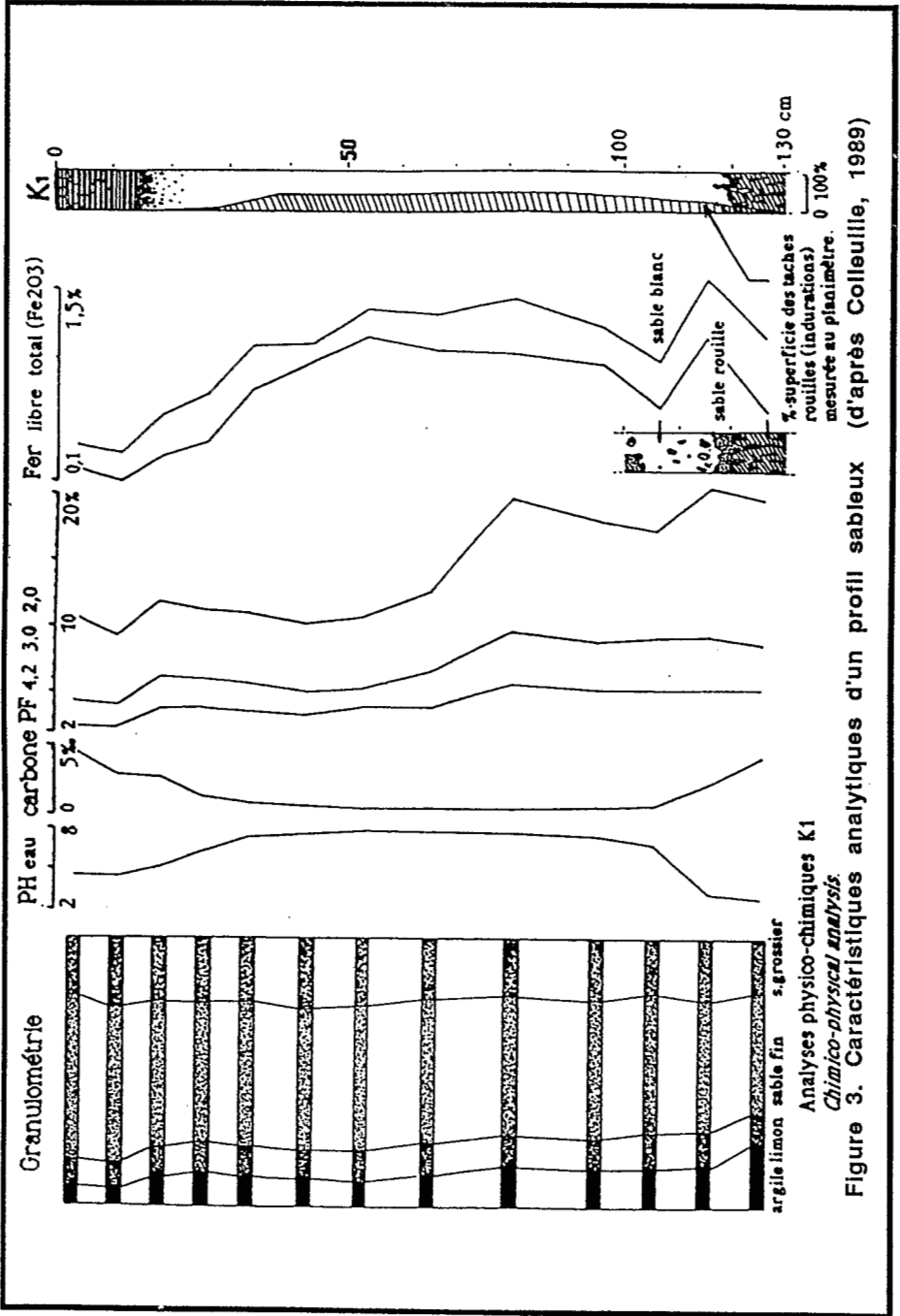


Figure 2. Carte de conductivité électrique de l'extrait 1/5 de sol, valeurs exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$, niveau 10-30 cm, parcelle de huit hectares



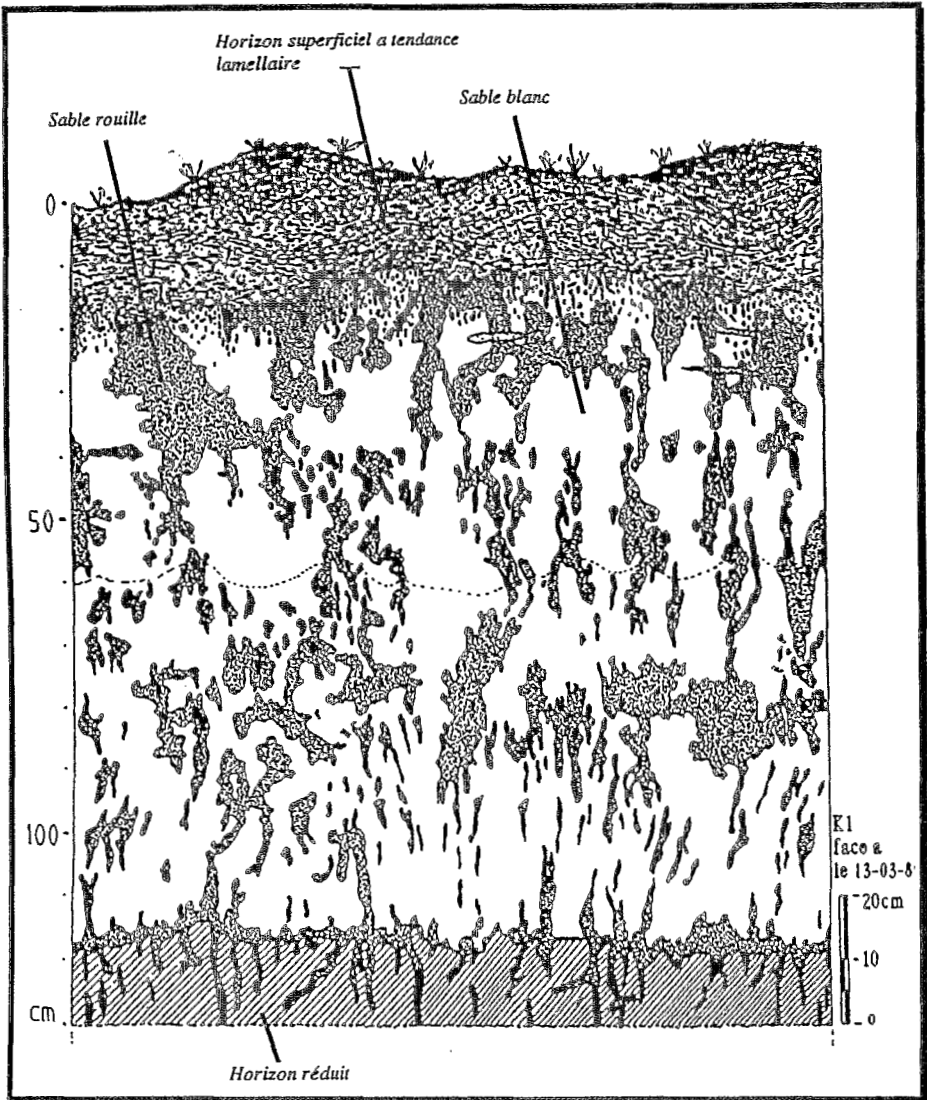


Figure 4. Représentation schématique d'un profil sableux (d'après Colleuille, 1989) montrant la répartition complexe des taches d'oxydo-réduction

I-2 Grandeurs recherchées et déterminations effectuées

L'effort expérimental a été concentré sur la recherche d'un nombre limité de grandeurs hydrodynamiques, la détermination d'un grand nombre de valeurs étant privilégiée de façon à apprécier de façon précise les caractéristiques de variabilité spatiale. Les deux grandeurs recherchées systématiquement aux différentes échelles ont été la conductivité hydraulique à saturation (K_s) et la courbe caractéristique de succion $h(\theta)/\theta$ teneur en eau volumique). Ces deux

grandeurs ont été étudiées au laboratoire et in situ. (Montoroi et al, 1989, Eisenlohr, 1989, Boivin, 1990, Boivin et Touma, 1989, Boivin et al, 1989, Touma et Boivin, 1989).

La détermination de K_s a été tentée in situ par la méthode de l'infiltromètre double anneau (figure 5) et au laboratoire sur monolithes cylindriques non perturbés. La détermination de la courbe de succion a été effectuée in situ selon le protocole défini par Vachaud et al (1978) et au laboratoire sur monolithes de sol non perturbé à l'aide du rétractomètre (Boivin, 1990). Dans le premier cas, la teneur en eau de l'échantillon est déterminée à l'aide de la sonde à neutrons. Dans le second cas elle est déterminée par pesée. La pression de l'eau est évaluée par une mesure tensiométrique «ponctuelle» dans les deux cas : la céramique qui assure le contact avec le sol mesure 8cm de long dans le cas de la détermination in situ, un centimètre dans le cas de la détermination au laboratoire.

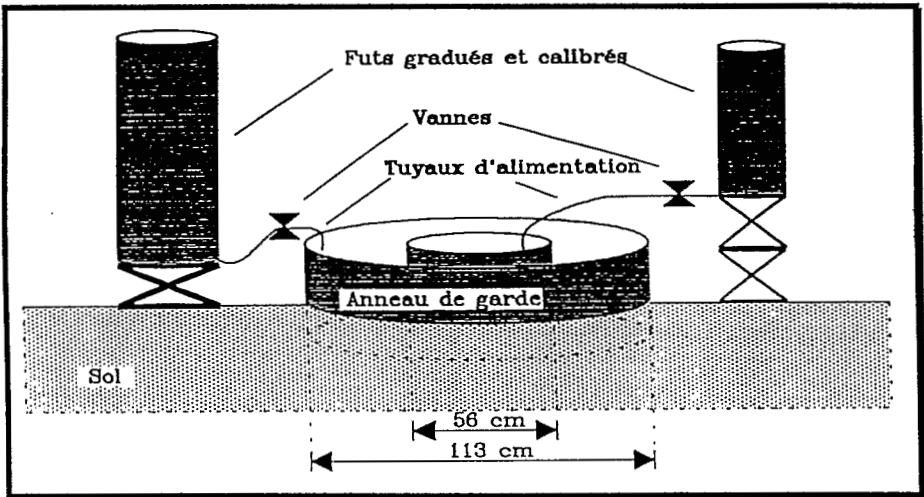


Figure 5. Représentation schématique de l'infiltromètre double-anneau utilisé

II - RESULTATS EXPERIMENTAUX

II-1 Evaluation de la courbe de succion in situ à l'échelle d'un horizon

Une caractérisation hydrodynamique «in situ» a été entreprise par Montoroi et al (1989). Il s'agit d'une caractérisation ponctuelle, correspondant à un profil de sol. En pratique, un tube d'accès de sonde à neutrons est installé, de façon à mesurer la teneur en eau du profil de sol à l'aide d'un humidimètre neutronique. De part et d'autre du tube de sonde à neutrons, des tensiomètres sont implantés à différentes profondeurs, afin de déterminer des profils de pression de l'eau. Une fois ce dispositif implanté, le profil de sol est saturé par

une infiltration verticale d'eau sous charge. Puis la redistribution de l'eau dans le sol est étudiée au cours du temps. De cette façon, on dispose par tranche de sol instrumentée d'un ensemble de couples de mesures teneur en eau/ pression de l'eau.

Dans le cas étudié, les profils texturaux et de densité se sont révélés uniformes. Dans ces conditions et s'agissant d'un sol sableux à priori indéformable, on considère généralement que la courbe de succion sera très peu variable. Cependant, Montoroi et al (1989) ont trouvé de fortes variations dans leurs résultats expérimentaux, faisant apparaître autant de comportements différents que de tensiomètres implantés.

Colleuille (1989) a pu expliquer cette hétérogénéité en montrant l'existence d'une relation étroite entre le degré de rigidification du plasma argileux par les oxy-hydroxydes de fer (présents sous forme de taches rouille de coloration plus ou moins intense) et l'aspect de la courbe de succion. Ainsi, deux échantillons correspondant au même type d'accumulation du fer auront le même comportement de gonflement/ retrait et la même courbe de succion. Inversement, si les tensiomètres sont implantés dans des taches rouille d'intensité différente, ils produiront des mesures différentes. Or les taches rouilles correspondent à de petits volumes de forme compliquée et de quelques centimètres de dimension caractéristique. Leur répartition dans le profil de sol est complexe (figure 4). Il devient délicat d'interpréter les résultats de la mesure tensiométrique par tranche de sol (ou horizons), alors que la forte variabilité enregistrée correspond en fait à une organisation se manifestant à une échelle inférieure à celle de l'horizon. Ne pas tenir compte de cette organisation conduirait à définir autant d'horizons fictifs que de tensiomètres implantés ...Ce problème ne se manifeste pas pour les mesures à l'humidimètre neutronique, qui intègrent un volume de sol important.

Ce premier exemple montre qu'au cours d'une seule détermination, un changement d'échelle peut être effectué de façon implicite : l'échelle d'instrumentation correspond à un contact sol / tensiomètre de quelques centimètres carrés, l'interprétation des résultats se fait en supposant l'existence d'horizons homogènes et le tout est destiné à caractériser un profil.

Une structure importante se manifeste à l'échelle de l'instrumentation et n'est pas prise en compte à l'échelle d'interprétation : les résultats deviennent incompréhensibles (ou aléatoirement distribués et fortement variants, ce qui revient au même).

II-2 Modélisation de la courbe de succion et variabilité à l'échelle de la parcelle

La courbe de succion a été mesurée au laboratoire sur des échantillons provenant de chaque horizon de soixante profils de sols répartis selon un maillage aléatoire sur huit hectares (Boivin, 1990). Les courbes expérimentales ont ensuite été modélisées au moyen d'un modèle classiquement employé par les hydrodynamiciens et représentatif de la plupart des modèles existants (Van Genuchten, 1980).

Ce modèle est défini de façon empirique, de telle sorte que ses paramètres de calage (au nombre de 4) n'ont aucune signification physique. Alors que toutes les variables de description de la couverture pédologique présentent une organisation dans l'espace, les paramètres de calage du modèle de succion sont aléatoirement distribués et ne sont corrélés à aucune autre grandeur. Outre que ce résultat est difficile à admettre, il compromet toute possibilité d'interpolation ou d'extrapolation des courbes caractéristiques de succion : c'est à dire tout changement d'échelle des résultats.

Dans le même temps, les caractéristiques de retrait des échantillons analysés ont été déterminées. Ces caractéristiques sont résumées à partir des paramètres de calage du modèle de la courbe de retrait (Braudeau, 1988 a et b), appelés paramètres pédo-hydriques et dotés d'une signification pédologique et/ou physique. Deux résultats sont à retenir :

1- à l'échelle de la parcelle, la variabilité spatiale des paramètres pédo-hydriques est essentiellement expliquée par la variation de la teneur en argile de l'échantillon de sol, et secondairement par les caractéristiques chimiques de l'échantillon (figure 6). Les valeurs de ces paramètres sont donc nettement organisées dans l'espace. En revanche, Colleuille (1989) a montré qu'à l'échelle du profil de sol, où les caractéristiques chimiques et texturales sont constantes, c'est la teneur en fer total qui explique la variabilité des paramètres pédo-hydriques.

2- Boivin (1990) montre une forte relation entre les points caractéristiques de la courbe de retrait et la forme de la courbe de succion, pour l'ensemble des déterminations effectuées. Dans ces conditions, il est possible de définir des modèles de la courbe de succion faisant intervenir des caractéristiques pédo-hydriques : c'est à dire des paramètres de calage reflétant dans l'espace une organisation liée à la répartition de grandeurs pédologiques simples (texture, pH etc..) (Braudeau et Boivin, en rédaction).

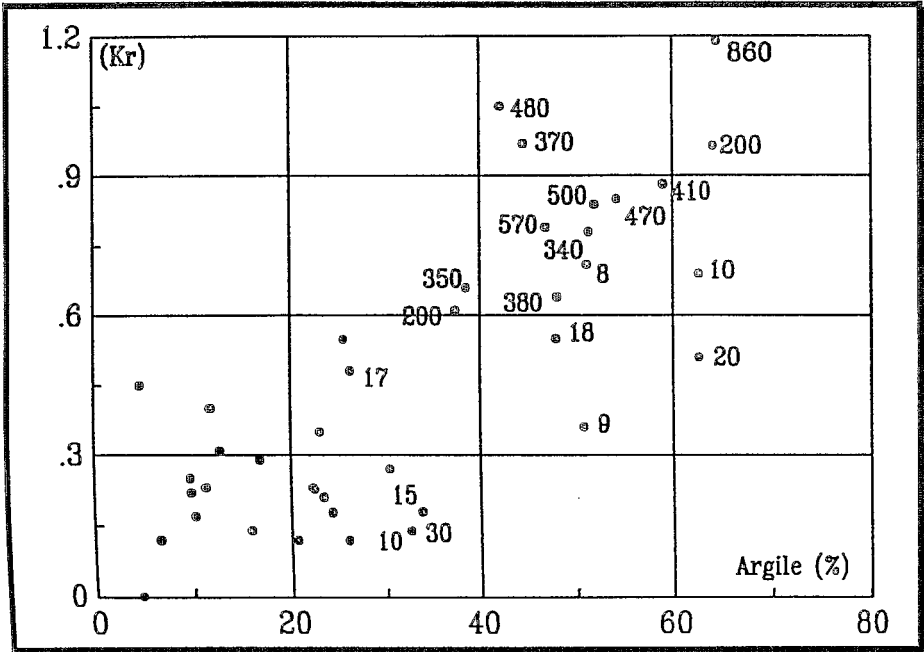


Figure 6. Exemple de la relation entre teneur en argile (en abscisses) et Kr (paramètre pédo-hydrrique).
Les valeurs indiquées sur les points sont les conductivités électriques mesurées sur extrait de sol, en $\mu\text{S}/\text{cm}$.
 (valeurs déterminées sur des échantillons répartis sur des parcelle de huit hectares)

De tels paramètres peuvent être interpolés dans de bonnes conditions (pour le calcul de valeurs ponctuelles ou par blocs, au moyen du krigeage), et probablement extrapolés sur la base de la connaissance des caractéristiques analytiques des sols : un changement d'échelle est envisageable.

Ce deuxième exemple montre que la même détermination analytique peut se prêter ou non au changement d'échelle, selon le cadre scientifique de sa modélisation. Le problème de changement d'échelle n'est plus ici lié aux caractéristiques du milieu lui même, mais dépend de la façon dont les résultats sont synthétisés (choix d'un modèle).

II-3 Détermination de la conductivité hydraulique à saturation: choix d'une méthode de mesure

Deux méthodes de détermination de la conductivité hydraulique à saturation ont été testées. La méthode de l'infiltromètre double anneau se fait sur sol non perturbé, au champ, en suivant la cinétique d'infiltration d'une lame d'eau maintenue à une épaisseur constante (Boivin et al, 1988). Pour extraire des courbes expérimentales une estimation de la conductivité hydraulique à saturation, il est nécessaire d'effectuer des hypothèses sur le

déroulement de l'infiltration et l'état initial du sol. Ces hypothèses permettent d'ajuster sur les données expérimentales des lois simplifiées de l'infiltration faisant intervenir la conductivité hydraulique à saturation comme paramètre de calage.

Dans notre cas, les hypothèses préliminaires à l'application des modèles simplifiés d'infiltration ne sont jamais respectées. Touma et Boivin (1988) montrent par simulation numérique que le non respect de ces hypothèses ne modifie pas significativement la cinétique d'infiltration. Dans ces conditions, ils concluent à l'ajustement possible des modèles d'infiltration pour obtenir une estimation de la conductivité hydraulique à saturation. Mais en toute rigueur, la signification physique du paramètre obtenu par ajustement du modèle d'infiltration n'est pas démontrée.

La grandeur ainsi obtenue se révèle peu variante, bien structurée dans l'espace (figure 7). La détermination est reproductible et insensible aux modifications de la dimension du dispositif de mesure (figure 8)(Boivin, 1990, Eisenlohr, 1989). La structure spatiale identifiée est la même que celle des variables pédologiques liées à la mise en place des matériaux. En revanche, la carte interpolée par krigeage des valeurs de conductivité hydraulique à saturation est discordante avec les cartes de ces mêmes paramètres pédologiques.

La seconde méthode employée (Eisenlohr, 1989) est une détermination au laboratoire sur monolithes non perturbés. Dans ces conditions expérimentales, la conductivité hydraulique à saturation peut être déterminée au sens de Darcy sans qu'il y ait de doute sur la signification physique du paramètre obtenu. Mais on montre dans ce cas que les résultats expérimentaux obtenus sont aléatoirement distribués dans l'espace, et présentent sur quelques mètres carrés une variance plus importante que les estimations obtenues par la méthode du double anneau sur huit hectares. La conductivité hydraulique à saturation obtenue au laboratoire est donc une grandeur qui n'est ni interpolable ni extrapolable. Dans ce cas, il semble donc préférable de retenir les estimations effectuées au moyen de l'infiltromètre double anneau, si l'objectif de la détermination est une modélisation à l'échelle de la parcelle ou du profil de sol.

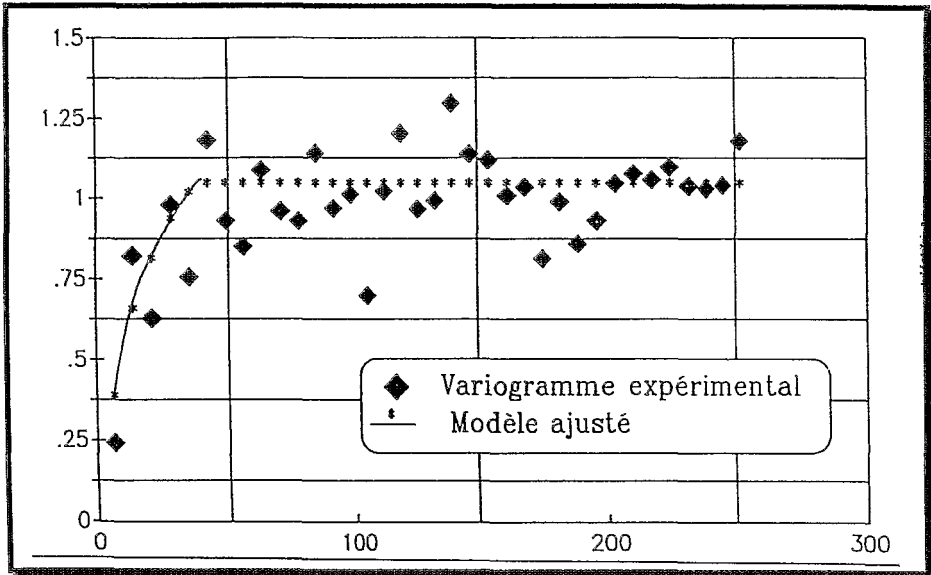


Figure 7 . Variogramme moyen calculé sur 106 valeurs du logarithme de K_s obtenu au moyen du dispositif double anneau, et modèle ajusté

Cette expérimentation montre que la recherche d'une même grandeur peut conduire à des résultats incompatibles d'une méthode à l'autre, si l'on considère la variabilité spatiale des résultats obtenus. Les critères d'organisation dans l'espace peuvent alors permettre de discuter de la validité d'une méthode de détermination. En particulier, le fait qu'un dispositif expérimental permette d'estimer une grandeur physique dans des conditions (physiquement parlant) rigoureuses n'est pas une condition suffisante pour caractériser un milieu naturel dont l'organisation doit pouvoir être reconnue.

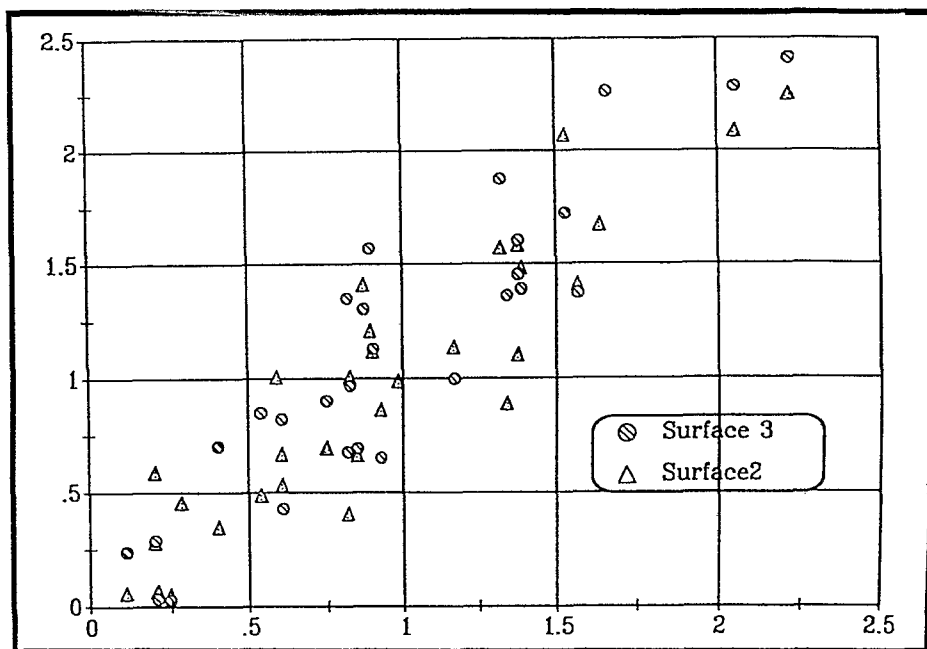


Figure 8 . Relation entre les valeurs de Ks (en cm/heures) déterminées sur les surfaces internes aux différents anneaux (en abscisses : Ks déterminé en surface 1; en ordonnées, Ks déterminé en surface 2 et 3)

CONCLUSION

Plusieurs aspects du problème de transfert d'échelle sont illustrés à l'occasion de ce travail.

i) Il existe dans le milieu naturel des structures (et donc des limites structurales) qui se manifestent à certaine échelles. Ces structures doivent être reconnues et prises en compte dans le choix des méthodes d'étude et des stratégies d'échantillonnage. L'économie de ce travail conduira à l'obtention de variables fortement variantes et apparemment désorganisées dans l'espace. Leur interprétation supposera alors la recherche de théories complexes (Burrough, 1983a,b,c; Sisson et Wierenga, 1983, Bresler, 1989). Les problèmes de transfert d'échelle sont alors inabordables.

ii) Le résultat d'une même détermination pourra se révéler indifféremment organisé dans l'espace ou non, selon le choix du modèle d'interprétation. Il s'agit encore d'un problème de reconnaissance des structures naturelles, cette fois-ci au niveau de la conception des modèles qui reproduisent leur fonctionnement.

iii) Une méthode expérimentale doit être discutée en fonction de la rigueur théorique du protocole, mais aussi de son aptitude à identifier les structures naturelles. Une étude de variabilité spatiale permet de mettre en évidence ces propriétés.

Ces trois points conditionnent la possibilité d'effectuer des interpolations ou des extrapolations à partir de l'évaluation ponctuelle d'une grandeur, et sont donc particulièrement importants lorsqu'un transfert d'échelle doit être envisagé.

TRANSFERTS D'ECHELLE ET ETUDE DES ECOULEMENTS DE SURFACE SUR UNE PENTE.

PLANCHON O.

RESUME

De nombreuses études, concernant les bilans d'eau au sens large, se situent à une échelle intermédiaire entre la parcelle élémentaire et le bassin versant : le versant, le champ, ... Il est le plus souvent impossible d'effectuer des mesures directement à ces échelles. Nous sommes donc contraints à réaliser des observations à des échelles différentes. C'est ainsi qu'apparaît la question du transfert de ces informations de l'échelle de mesure à l'échelle d'étude.

Selon cette présentation, il apparaît que beaucoup de questions concernant les transferts d'échelle ont avant tout une origine métrologique.

A partir d'études menées sur le ruissellement des versants à Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) et à Bidi (Burkina-Faso), nous montrerons comment il est possible de contourner partiellement la question du transfert d'échelle en menant les observations à une échelle proche de celle que l'on étudie.

Dans un deuxième temps, on constate que l'infiltrabilité globale d'une portion de versant est d'autant plus grande que les caractéristiques locales de l'infiltration y sont hétérogènes (toutes choses égales par ailleurs, et en particulier la valeur moyenne de ces caractéristiques). Ces résultats peuvent fournir une base conceptuelle à la question du transfert d'échelle appliquée au ruissellement de surface.

INTRODUCTION

Le transfert d'échelle est une opération courante, presque omniprésente, dans toutes les études du milieu naturel. Elle est parfois implicite ; ainsi, l'hydrologue qui calcule une hauteur d'averse sur un bassin-versant à partir de quelques pluviomètres de 400 cm² effectue-t-il un transfert d'échelle...

Le transfert d'échelle consiste généralement à utiliser une connaissance, quantitative ou qualitative, acquise sur un objet pour connaître (ou mieux connaître) un autre objet plus grand contenant le premier. Il peut répondre à plusieurs motivations, que l'on peut séparer en deux groupes : la connaissance quantitative des "grands" objets (pour reprendre l'adjectif utilisé plus haut) et celle, qualitative, des phénomènes qui en régissent le fonctionnement interne. La seconde peut être nécessaire à la première.

La connaissance des objets peut porter sur la pluie d'un bassin-versant, le ruissellement d'une pente, la hauteur d'eau infiltrée dans un champ au cours d'une averse, etc... Un transfert d'échelle est généralement rendu nécessaire, dans ce cas, par l'impossibilité d'instrumenter le "grand" objet : comment construire un pluviomètre d'un hectare d'étendue, mesurer le flux de ruissellement traversant une ligne de 500 mètres de long ou le stock hydrique de quelques dizaines de milliers de mètres cubes de sol ? Nous n'avons pas d'appareils de cette taille.

La connaissance des phénomènes internes nécessite, par définition, une étude aux deux échelles qui bornent le domaine de connaissance, objet de l'investigation.

Les problèmes rencontrés dans ces transferts proviennent des nouveaux phénomènes, spécifiques du "grand" objet et non pris en considération lors de l'étude du "petit". Certes, les lois de la physique sont universelles, mais elles s'appliquent aux différentes échelles avec des magnitudes qui leurs sont propres, si bien que les lois dont la prise en compte est efficace à une échelle peuvent être inutiles à la caractérisation de l'autre. Les concepteurs de modèles hydrologiques connaissent bien ce problème : lorsqu'il s'agit de reconstituer les débits d'un petit bassin-versant, ils se heurtent au calcul du bilan, c'est à dire à la "fonction de production", tandis que sur les grands bassins, l'opération la plus délicate est la propagation des crues, c'est-à-dire la "fonction de transfert".

A travers l'exemple des écoulements de surface sur les versants de Booro-Borotou (programme HYPERBAV, Côte d'Ivoire), nous montrons une démarche possible dans un des cadres énumérés ci-dessus.

DEFINITION DE L'ECHELLE D'ETUDE

L'échelle d'étude est celle d'une zone homogène au regard de la carte du paysage de la figure 1, document synthétique établi au moyen d'un Système d'Informations Géographiques (ARC/INFO). La construction de cette carte est décrite en détail par Mitja et Planchon (1989). Dans ses grandes lignes, elle consiste à croiser 6 cartes au 1/2500, à faire l'analyse factorielle des correspondances sur un tableau issu de la carte croisée et à regrouper les caractères élémentaires décrits par les six cartes pour définir 7 unités paysagères synthétiques. Ces zones sont homogènes au sens de trois

des six cartes, sélectionnées d'après l'AFC pour la définition des unités paysagères. Elles possèdent de nombreux autres caractères communs, tant au regard des trois autres cartes que pour des propriétés non explicitement contenues dans le jeu de données initial, mais dont l'influence a été reconnue dans l'organisation de l'espace factoriel.

Il s'agit d'unités "en équilibre", dans le sens où elles regroupent un grand nombre de caractères interagissant les uns sur les autres. C'est cette propriété qui a permis d'utiliser le terme "unités paysagères" pour les composantes de cette carte.

L'objectif principal est d'évaluer les écoulements de surface produits par chacune de ces unités, tant sous forme de ruissellement diffus que d'écoulement concentré dans des ravines d'érosion. Ce résultat acquis, on s'attachera à interpréter les différences entre les résultats de cette approche globale et ce que l'on pouvait en supposer au seul vu des mesures ponctuelles réalisées par ailleurs.

Les résultats concernant le ruissellement diffus sont décrits et interprétés par Planchon et Janeau (1989) ; l'ensemble de cette étude a fait l'objet du travail de Planchon (1989). Nous en donnons ici un court résumé pour nous attacher plus particulièrement à la réflexion du changement d'échelle qu'ils permettent de mener.

CHOIX D'UNE METROLOGIE ADAPTEE A CETTE ECHELLE

Nos objectifs portent avant tout sur l'échelle d'étude elle-même plutôt que sur ses relations avec les autres échelles. Nous devons mener nos observations à l'échelle exacte que nous étudions ou, à défaut, à une échelle la plus proche possible de celle-ci.

Il est difficile de creuser un fossé de plusieurs centaines de mètres de long pour collecter et mesurer directement le ruissellement produit par une des unités cartographiques étudiées. Un tel procédé interdirait en outre la mesure de plusieurs unités consécutives le long d'une pente, celles du bas étant privées de leur apport naturel en ruissellement.

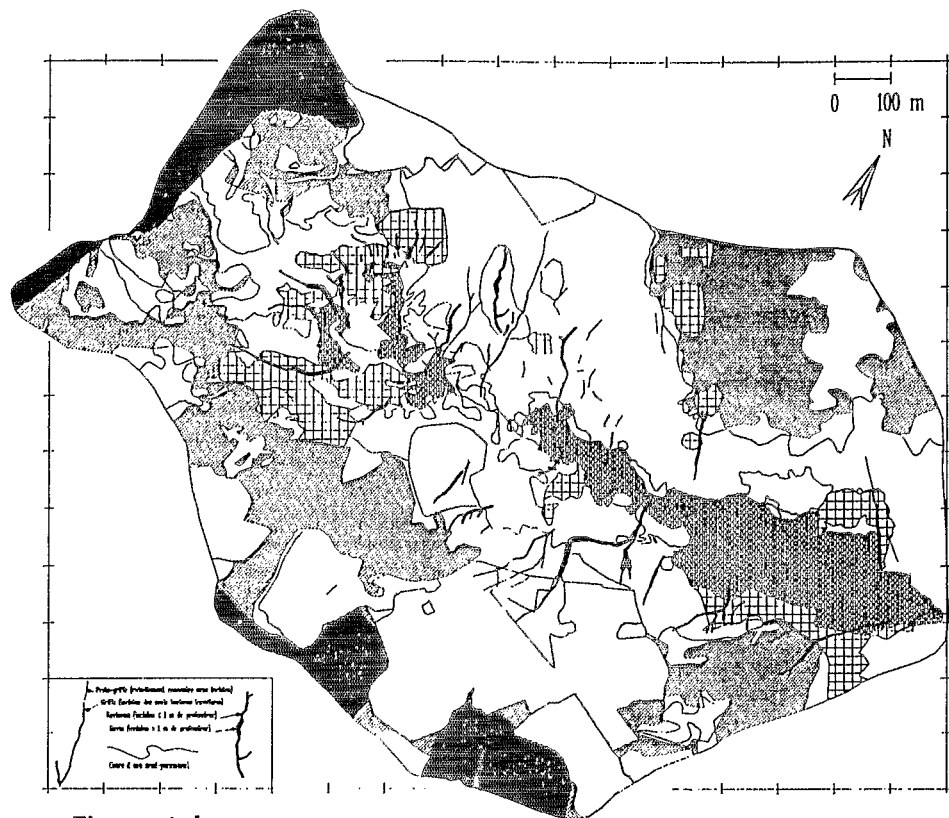


Figure 1 Le paysage

Les unites de paysage :

- Plateaux et talus
- Milieux fermes
- Milieux ouverts
- Bas-fonds
- Savane boisée hygrophile
- Milieux anthropisés
- Milieux hétérogènes

L'extrapolation des mesures au simulateur de pluie présentent de nombreux inconvénients que nous cherchons à contourner :

- leur échelle est très éloignée de la nôtre ;
- les phénomènes naturels qu'ils tentent de reproduire sont sensiblement différents de ceux que nous cherchons à évaluer. En effet, une parcelle de simulation de pluie ne reçoit d'eau que de l'asperseur alors qu'en tout point d'un versant se combinent les apports par la pluie et par le ruissellement provenant de l'amont ;
- il s'agit d'expérimentations. Autant que faire se peut, il est souhaitable que celles-ci soient utilisées pour reproduire un phénomène naturel connu par ailleurs, de telle sorte que les résultats puissent en être critiqués, et que le biais introduit par les protocoles expérimentaux par rapport aux phénomènes naturels qu'ils sont sensés reproduire soient évalués.

Nous avons donc mis au point une nouvelle méthode de mesure sous pluies naturelles. Deux idées nous ont guidées dans ce travail :

- un flux, quel qu'il soit, intègre en un point, une ligne ou une surface, le résultat d'un certain nombre de phénomènes qui ont lieu respectivement sur une ligne, une surface ou un volume : une mesure ponctuelle de flux donne des informations globales sur l'ensemble du domaine situé à l'amont¹ du point de mesure ;
- à défaut de pouvoir construire un instrument de mesure gigantesque, il est possible d'utiliser un grand nombre de points d'observation éparpillés dans l'espace. Leur combinaison forme un et un seul instrument dont la définition est équivalente au premier².

Deux sites, réputés parmi les plus ruisselants du bassin, ont été instrumentés dans cet esprit : chacun d'eux est constitué d'une quinzaine de points d'observation du flux de ruissellement, miniaturisés et éparpillés sur le site : les mini-pièges.

Un mini-piège est une rigole de 25 cm de long disposée perpendiculairement à la pente ; elle collecte le flux de ruissellement qui la traverse et le déverse dans un bidon de 60 litres. Les mesures fournies sont discontinues. Le volume exact recueilli n'a en effet pas de signification et on se contente de l'état du bidon après l'averse : vide, en partie plein ou débordé.

¹ "Amont" est ici utilisé au sens large, c'est à dire au sens des potentiels croissants.

² Cette technique a été utilisée en astronomie avec des radio-télescopes.

Le site des Champs couvre la plus grande zone de paysage anthropisé. C'est un champ de riz pluvial. Il est homogène pour la plupart de ses caractéristiques : sols, végétation, états de surface. Il est par ailleurs fortement encroûté et exempt de micro-relief.

Le site de Savane couvre la plus grande zone de paysage ouvert. C'est une savane claire recouverte de croûtes structurales à 2 micro-horizons ou d'érosion, ces deux types étant dérivés de la forme complète à 3 micro-horizons par décapage successif des deux premières sous l'action érosive du ruissellement. La végétation et les états de surface sont homogènes du point de vue cartographique mais présentent des variations locales importantes, tant à l'échelle unitaire qu'à celle de la dizaine de mètres.

A l'échelle unitaire, la répartition de la porosité superficielle est liée à celle des graminées. Au pied des touffes d'herbe, l'activité faunique est importante, principalement celle des vers de terre, si bien que chaque touffe d'herbe est entourée d'une couronne très poreuse de quelques centimètres de largeur. Ce n'est qu'entre les touffes que se développent les croûtes.

A l'échelle décamétrique, le peuplement graminéen subit les irrégularités de celui des ligneux. Lorsque ceux-ci se trouvent suffisamment proches les uns des autres, les graminées caractéristiques des paysages ouverts cèdent la place à celles des zones boisées, accompagnées des états de surface qui leurs sont propres. On observe ainsi des petits bosquets aux formes irrégulières sous-lesquels l'infiltrabilité locale est importante.

Le site est par ailleurs suffisamment grand pour traverser toutes les différenciations pédologiques du versant, depuis les sols ferrallitiques de l'amont jusqu'aux sols sableux du bas de versant, en passant par les carapaces de mi-versant.

RESULTATS

Les résultats sont représentés sur les diagrammes de la figure 3. Les trois axes des diagrammes représentent, respectivement et en pourcentage, le nombre de fois que le bidon a été trouvé vide, en partie plein ou débordé. Les ronds blancs représentent les mini-pièges les plus hauts sur la pente dans chacun des sites, les ronds noirs représentent les plus bas, et quatre niveaux de gris intermédiaires permettent de comparer la longueur de pente qui caractérise chacun des mini-piège. De plus, les mini-pièges situés rigoureusement sur la même ligne de pente sont reliés par un trait plein.

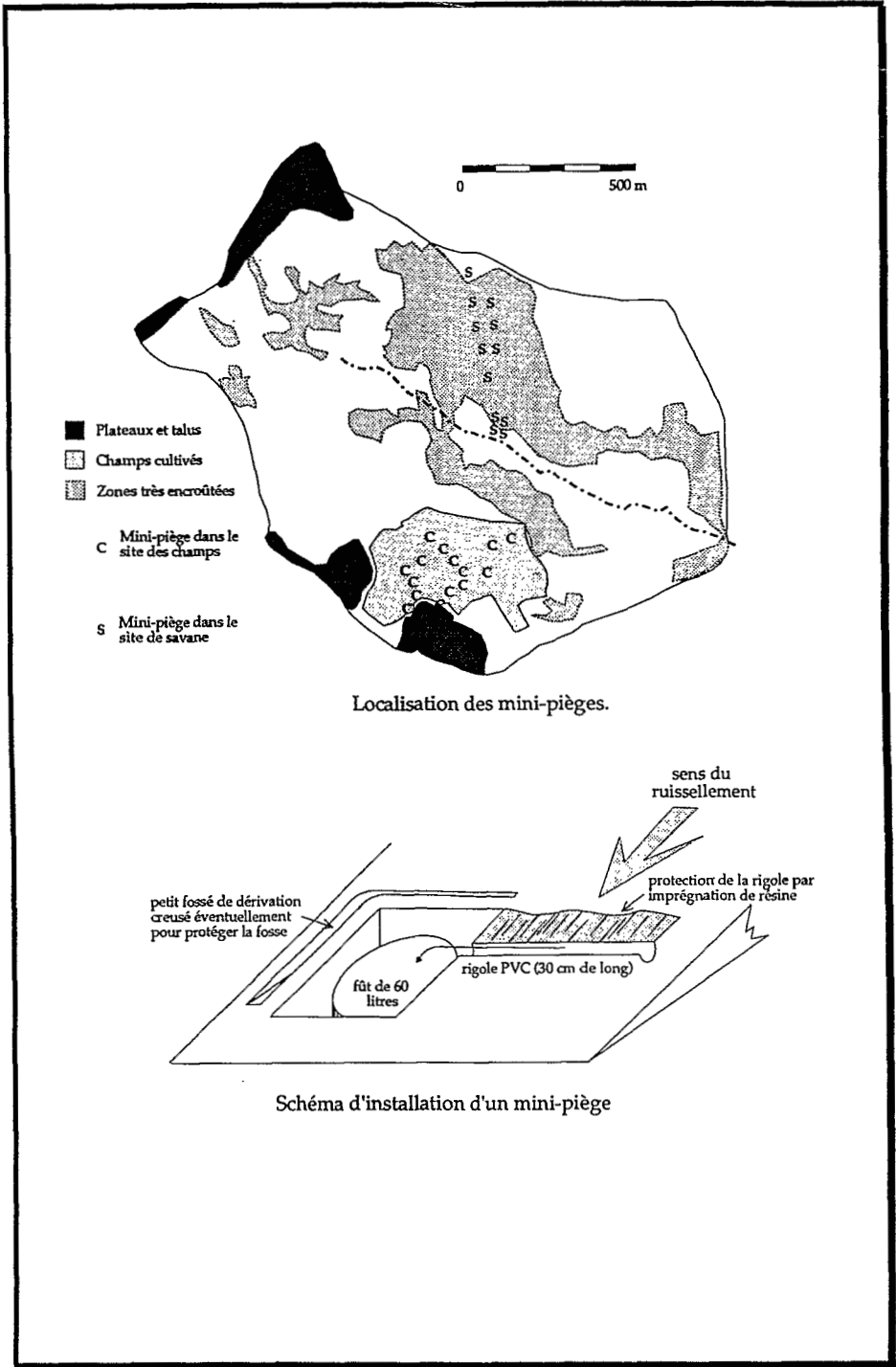


Figure 2 : Description des mini-pièges et de leur implantation sur les sites de mesure, dénommés "Champs" et "Savane".

Le site des champs

La figure 3a illustre les résultats obtenus pour le site des champs. On constate que :

- les mini-pièges situés rigoureusement le long d'une même ligne de pente sont alignés, sur le diagramme, le long d'axes caractérisés par une valeur "vide" constante. Cela signifie qu'un mini-piège déborde d'autant plus souvent qu'il est bas dans la pente et que, sur une même ligne de pente, du ruissellement apparaît partout, ou nulle part : la pente ruisselle dans son ensemble ou ne ruisselle pas du tout ;
- à longueur de pente égale (pour les points de même niveau de gris), le nombre de fois que le mini-piège a débordé reste à peu près constant.

Le site de savane

Sur le site de savane en revanche, (figure 3c), il est impossible de mettre en évidence une telle organisation :

- en haut du versant (points blancs), les mini-pièges sont souvent vides (près de 9 fois sur 10). pour les 10% restant, l'un d'entre eux déborde toujours et l'autre pratiquement jamais ;
- de l'amont vers l'aval du versant, même les mini-pièges situés exactement sur la même ligne de pente ne sont pas alignés sur l'axe théorique, ce qui signifie que les conditions locales d'infiltration dominent sur l'organisation générale du ruissellement à l'échelle du versant ;
- en bas du versant (points noirs), les mini-pièges débordent moins d'une fois sur trois, et trois d'entre eux moins de deux fois sur 10. Ces valeurs sont à comparer au résultat du site des Champs, pour lequel les mini-pièges situés les plus bas sur le site, c'est à dire juste à l'amont de la rupture de pente de mi-versant, débordent près de deux fois sur trois. Ceci signifie, là encore, que quelles que soient les modalités du ruissellement dans la partie supérieure du versant, celui-ci est susceptible de s'infiltrer avant d'atteindre le bas de la pente.

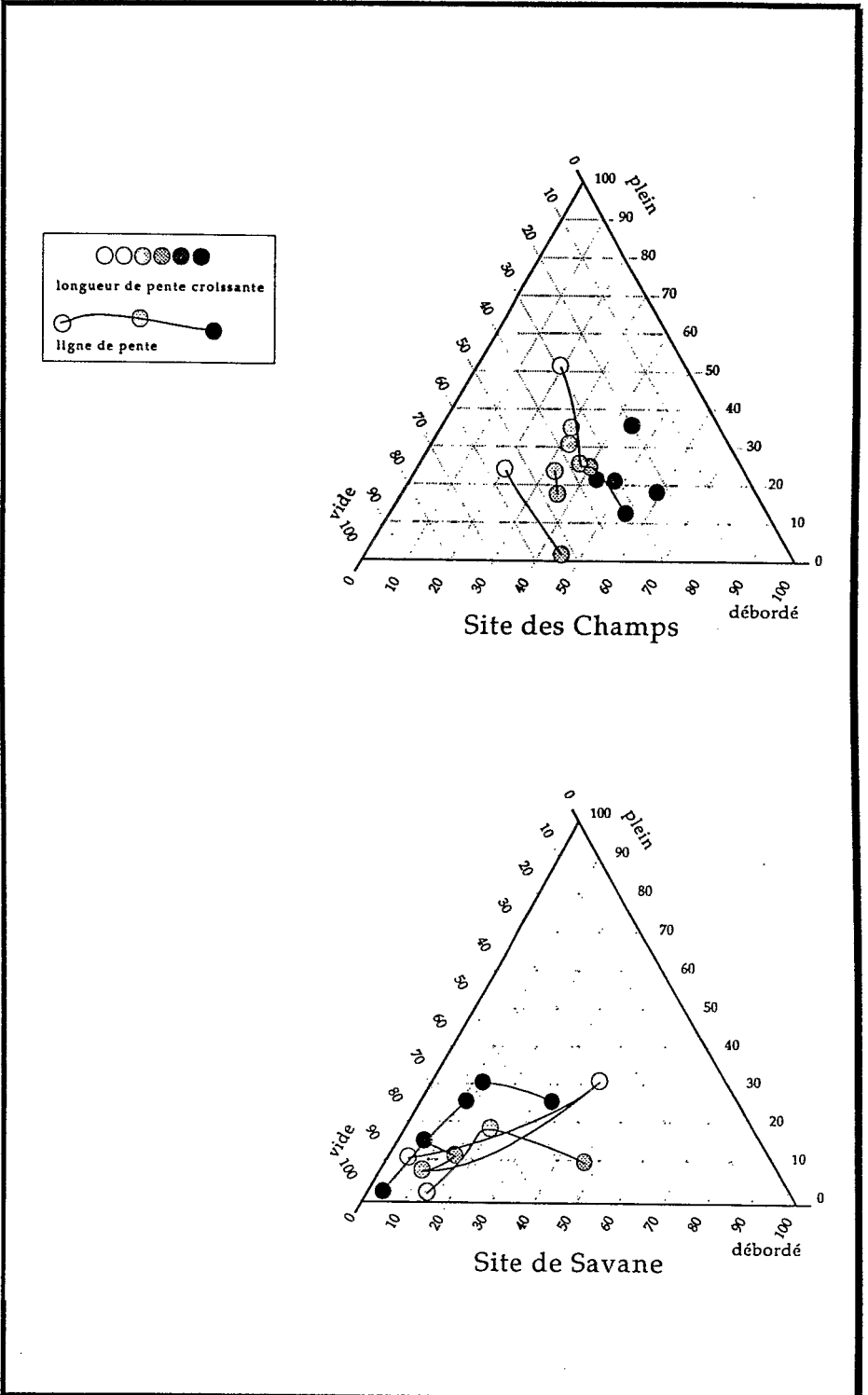


Figure 3

INTERPRETATION

Dans les champs, c'est à dire dans un milieu sans micro-relief et homogène pour les sols, les états de surface et la végétation, l'organisation des résultats sur le diagramme ternaire montre que le ruissellement est cumulatif de l'amont vers l'aval : le flux de ruissellement augmente avec la longueur de pente, si bien qu'une même averse a d'autant plus de chance de provoquer un flux supérieur à 60 litres pour 25cm (seuil de débordement des bidons) que le point d'observation est bas dans la pente. Il est possible, dans ce cas, d'envisager l'utilisation de mesures ponctuelles, effectuées par exemple au simulateur de pluie, pour prévoir le ruissellement d'une zone entière. La relation ne sera probablement pas proportionnelle et le coefficient permettant de passer d'une échelle à l'autre peut être difficile à généraliser, mais l'opération reste cohérente avec les phénomènes observés.

En revanche, il n'en est pas de même dans les zones de savane où :

- le micro-relief est important ;
- la porosité superficielle est organisée à l'échelle du mètre carré, en relation avec les peuplements graminéens ;
- l'infiltrabilité locale est soumise à l'irrégularité des peuplements ligneux.

On observe alors qu'une portion de versant subit des écoulements en relation avec l'infiltrabilité locale du sol, de façon strictement indépendante de sa position le long de la pente et de l'éventuelle existence d'une zone ruisselante à l'amont : le haut et le bas du versant ont un fonctionnement analogue tandis que c'est sur la zone carapacée de mi-versant que les flux mesurés sont les plus importants.

Les résultats du site des champs montre que notre protocole d'observation est à même de mettre en évidence, s'il existe, le rôle de la longueur de pente sur le flux de ruissellement. On conclut donc que le résultat du site de Savane représente une propriété intrinsèque de ce milieu et non une limite du protocole.

Il n'y a donc pas cumul des écoulements le long de la pente et l'application d'une règle de proportionnalité entre les mesures ponctuelles et la production globale de ruissellement est invalide, quelle qu'en soit la formulation.

Les résultats des observations sur les ravines d'érosion (Planchon 1989) permettent de généraliser ce type de fonctionnement à l'ensemble des zones non anthropisées du bassin, tous types d'écoulements confondus :

En dépit de coefficients d'infiltration parfois très faibles à l'échelle du mètre carré, il est exceptionnel que les versants non cultivés fournissent de l'eau au cours d'eau sous forme d'écoulement superficiel.

DISCUSSION

Le paragraphe précédent répond à la question posée : quels sont les écoulements de surface produits par les unités paysagères. La réponse en ce qui concerne les champs est insuffisamment quantifiée, mais cette lacune tient avant tout à l'exploitation trop sommaire des résultats que propose les diagrammes ternaires plutôt qu'à une limite strictement métrologique. La modélisation de la propagation d'un flux de ruissellement sur une pente est en cours. Elle tiendra compte des interactions entre ruissellement et infiltration, mises en évidence au cours de cette étude ; les mini-pièges seront utilisés pour le calage du modèle.

La technique de mesure mise au point est ainsi susceptible de fournir des informations directement à l'échelle d'étude qu'est la portion de versant.

Nous pouvons dès lors comparer ces résultats à ceux fournis par des échelles différentes : le mètre carré et le bassin-versant dans son ensemble.

Du mètre carré au versant

Un versant ruisselle moins que l'ensemble de ses mètres carrés constitutifs. Un tel défaut d'écoulement peut trouver trois explications :

- les éléments de comparaison sont biaisés : l'infiltrabilité mesurée au simulateur de pluie est inférieure à celle de la même zone sous pluie naturelle ;
- une goutte de pluie peut cheminer quelques mètres à la surface du sol avant de trouver une zone propice à son infiltration ;
- une partie de l'eau est concentrée dans des chenaux et échappe ainsi aux mesures de flux.

La troisième hypothèse est peu plausible dans le cas du site étudié : Une seule ravine se trouve à l'intérieur du site étudié. Son bassin-versant théorique (identifié sur une carte hypsométrique à l'équidistance de 20 cm, dressée pour l'occasion) à une largeur maximale de 25 mètres. Une étude de terrain très fine a par ailleurs permis de repérer toutes les zones dont l'état de surface est marqué par un ruissellement important. Ces zones sont nombreuses sur le

site mais toujours limitées à quelques dizaines de mètres de longueur. Elles ne sont pas connectées les unes aux autres.

Les deux premières hypothèses semblent en revanche se combiner pour expliquer le défaut de ruissellement mis en évidence :

- à l'échelle du mètre carré, la répartition particulière de la porosité a été décrite plus haut : encroûtement dans les zones basses situées entre les touffes d'herbe et porosité importante sur leurs piémonts. Lorsque l'infiltrabilité du sol est conditionnée par la porosité superficielle, une telle géométrie est propice à l'accroissement très important de l'infiltrabilité avec l'épaisseur de la lame d'eau ; ceci non en raison de la simple charge hydraulique mais par l'accès à une porosité importante mais "haut perchée". La simulation de pluie donne des informations globales sur la relation entre les intensités d'averse et d'infiltration sans que le rôle spécifique de l'épaisseur de la lame d'eau ne soit pris en compte. Si celle-ci est importante, tous les résultats s'en trouvent difficiles à interpréter en condition naturelle, puisque là, la lame d'eau dépend non seulement de l'intensité de l'averse mais également, et pour une part importante, de la quantité d'eau provenant de l'amont.

- la deuxième hypothèse n'est pas non plus à exclure en raison de l'hétérogénéité de la répartition des ligneux et donc de celle des encroûtements. On se trouverait ainsi proche du modèle de la "planche à trous" (une planche entièrement imperméable parsemée de trous pouvant supporter un débit illimité). Dans ce cas, l'infiltrabilité globale de la zone dépend davantage de la densité des trous que de leur surface totale et n'est donc pas proportionnelle à la moyenne des infiltrabilités locales.

Ces deux hypothèses ont été développées en détail dans les publications déjà citées, si bien que nous nous contenterons ici du rappel sommaire que nous en avons fait.

Du versant au bassin

La genèse des crues sur le bassin-versant suit quelques mécanismes simples mais dont la rapidité autant que la variabilité spatiale en rend la prise en compte délicate dans un modèle.

Quelques observations permettent de supposer que la genèse des crues à Booro-Borotou répond à la théorie des aires contributives variables :

- pris dans leur globalité, les versants ne ruissellent pas ;

- la forme des crues trouve une explication simple : l'occurrence d'une crue de forme pointue (débit maximum relatif au volume écoulé) est sous la dépendance de l'apparition d'une crue violente (intensité maximale en 15 minutes élevée) alors que le débit de base est également élevé avant l'averse.

La modélisation satisfaisante du bassin-versant de Booro-Borotou aux petits pas de temps a, jusqu'à présent, échappé aux premières tentatives, effectuées avec les modèles les plus classiques utilisés à l'ORSTOM. Les raisons en sont multiples et on déjà été discutées (Chevalier 1988, Chevallier, Planchon, Quinn, 1989). Elles débouchent toutes sur le constat qu'un modèle aux petits pas de temps sur un petit bassin doit simuler le plus exactement possible les phénomènes propres à ce bassin particulier.

On peut comparer un modèle à une horloge : il transforme un signal d'entrée (les battements du ressort / la chronique des pluies) en signal de sortie (le mouvement des aiguilles / la chronique des débits). Ceci se fait au moyen d'un *mécanisme* qui possède lui-même des dispositifs de *réglage*. On conçoit, sur cet exemple simple, que le choix des bons réglages ne peut se substituer à celui des mécanismes. En d'autres termes, quelques soient le jeu de paramètres choisis pour un modèle donné, le signal de sortie fournit par celui-ci appartiendra toujours à une famille limitée de signaux de sortie correspondant à l'expression d'un nombre limité de concepts de base.

Ce sont des études menées à des échelles différentes qui permettent de proposer tel ou tel mécanisme pour le modèle. Ainsi, si les résultats de l'étude des écoulements sur les versants avaient été connus avant que la modélisation hydrologique ne soit entreprise, nous aurions pu éviter l'utilisation de certains modèles, d'avance voués à l'échec car possédant des "mécanismes" manifestement inconciliables avec les processus observés à Booro-Borotou.

Notre étude confirme les conclusions de Chevallier (1988) : la modélisation satisfaisante de Booro-Borotou aux petits pas de temps nécessite la prévision correcte du niveau de la nappe avant l'averse. C'est de lui, en effet, que dépend l'extension de l'aire contributive de l'averse.

Top-Model est un modèle hydrologique qui applique la théorie des aires contributives variables. Son utilisation n'a pas donné entière satisfaction. Ceci doit être attribué à une modélisation trop simpliste de l'extension de l'aire contributive au regard de la complexité des phénomènes qui la régissent à Booro-Borotou :

- la nappe n'est jamais en équilibre et l'est encore moins en cours d'hivernage ;
- elle n'est pas parallèle à la surface du sol, comme le suppose Top-Model ;

- les écoulements des versants, s'ils n'atteignent pas directement le cours d'eau, sont en revanche susceptibles de s'infiltrer à proximité de celui-ci (principalement en tête de vallée) et d'influer sensiblement sur le niveau de la nappe au cours de l'averse. Il a été observé de visu que le point d'affleurement de la nappe en tête du cours d'eau peut remonter de 100 mètres le long du talweg au cours d'une averse, ce qui correspond à une remontée du niveau de la nappe de plus d'un mètre en 20 minutes.

CONCLUSION

Les trois échelles observées simultanément à Booro-Borotou sont régies par des lois qui leurs sont propres :

- l'échelle unitaire est soumise à la variation annuelle des encroûtements et de l'humidité du sol. Pour la résumer d'un mot, c'est l'échelle du ruissellement ;
- l'échelle du versant est liée à la répartition des caractéristiques locales de l'infiltration, plus qu'à leur valeur moyenne. C'est l'échelle de l'infiltration ;
- l'échelle du bassin est liée à la dynamique de la nappe. C'est l'échelle du ruissellement sur surface saturée.

Chacune de ces échelle doit être étudiée avant tout de façon spécifique, avec les instruments et les concepts qui permettent au mieux l'appréhension des phénomènes majeurs qui en régissent le fonctionnement.

Nous avons partagé, en introduction, les transferts d'échelle selon deux types : la connaissance des objets et celle des processus.

En ce qui concerne la connaissance des objets, les problèmes d'échelles nous sont toujours apparus comme strictement métrologiques, liés à l'impossibilité d'effectuer des mesures directement à l'échelle de l'objet étudié. En tant que telles, ces question trouvent des réponses opportunistes plutôt que conceptuelles ; elles doivent être un préalable à l'instrumentation et non un objectif de recherche. C'est ce type de démarche qui a été décrit ici au sujet des mini-pièges et mis en oeuvre avec succès.

Dans la recherche des processus, la conclusion principale que nous tirons de cette étude à différentes échelles est que les résultats d'une étude à une échelle plus fine est avant tout utile pour énoncer des concepts pertinents (construire le mécanisme de l'horloge) plutôt que directement, dans son aspect strictement quantitatif (régler un mécanisme préexistant).

Enfin, l'histoire des mini-pièges n'est pas dénuée d'enseignements. C'est Christian Valentin qui, le premier, a supposé l'absence d'écoulements de surface en bas de versant. Cette hypothèse a été formulée sur la seule base de la description des états de surface : tout le bas-fond est bordé d'une zone caractéristique de 5 à 10 mètres de large tout au plus, sur laquelle on observe d'importants dépôts de sables grossiers et l'absence des croûtes caractéristiques de l'érosion. Valentin a alors supposé que cette zone était le lieu privilégié de l'infiltration des écoulements en provenance des versants et lui a donné le nom de "bande d'arrêt".

Si notre étude montre que l'infiltrabilité des versants pris dans leur ensemble n'est pas exclusivement imputable aux "bandes d'arrêt", il reste que c'est leur description qui nous a incités à étudier plus en détail la propagation des écoulements sur les versants : l'observation a précédé et orienté la mesure. L'enseignement général que l'on peut en tirer est la prédominance de l'observation sur les mesures dans ce type de travail. La tentative de calculer le comportement général par la seule composition des comportements individuels est tentante mais perverse.

Tentante car les différentes échelles ne sont finalement pas si éloignées les unes des autres : on peut voir, à ses pieds, la parcelle de simulation de pluie et lever la tête pour embrasser du regard tout un bassin-versant.

Perverse car, malgré cette proximité, le milieu naturel est et restera toujours plus complexe et plus hétérogène qu'un gaz parfait, qu'un conducteur électrique ou que tout autre objet d'application classique des grandes lois de la physique. Observer par nous-même nos terrains d'étude avant d'y appliquer des concepts établis ailleurs, c'est avant tout faire preuve d'humilité devant cette complexité et de cette hétérogénéité du milieu naturel, qui limitent la portée des théories que nous cherchons à lui appliquer.

Le corollaire de cette nécessaire humilité est que la précision de tout transfert d'échelle effectué a priori est illusoire, et que tout travail dans ce domaine doit se baser sur des observations aux bornes de l'intervalle étudié.

REFERENCES

- Chevalier (1988). Complexité hydrologique du petit bassin-versant. Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). Etudes et thèses. ORSTOM. 331 p.
- Chevallier, Planchon, Quinn, (1989). In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin-versant de savane humide. Etudes et thèses. ORSTOM. pp. 91-104.

- Mitja et Planchon (1989). Etude du paysage du bassin. *In* : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin-versant de savane humide. Etudes et theses. ORSTOM. pp. 91-104.
- Planchon (1989). Le relief, le paysage et les formes d'érosion linéaires : leur importance dans le fonctionnement d'un petit bassin-versant. (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat. USTL, Montpellier. 225 p.
- Planchon et Janeau (1989). Le fonctionnement hydrodynamique à l'échelle du versant. *In* : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin-versant de savane humide. Etudes et theses. ORSTOM. pp. 165-184.

EFFET D'ECHELLE OBSERVE SUR LE RUISSELLEMENT DANS LE NORDESTE BRÉSILIEEN

MOLINIER M¹., LEPRUN J.C.², AUDRY P.³

RESUME

Ce travail présente une partie des résultats des études effectuées dans une région du semi-aride du Nord-Est brésilien par une équipe de pédologues et d'hydrologues de l'ORSTOM. Il aborde notamment le problème d'effet d'échelle de la superficie sur le ruissellement; phénomène qui a pu être mis en évidence et chiffré sur des surfaces allant du mètre carré à l'hectare. Une explication liée à la structure du substrat rocheux et à la distribution des sols dans le paysage a pu être proposée. De plus, la mise au point d'un modèle vertical de simulation de l'infiltration sur des microparcelles de 1m² pourra permettre de préciser les règles de transfert des résultats de cette superficie élémentaire à des superficies plus grandes prenant en compte le rôle de la distribution des sols et de la végétation sur les différents termes du bilan hydrique.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des travaux d'une ATP-PIREN intitulée : "*Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols*" dont les rapports finaux viennent d'être publiés (MOLINIER et al. 1989a; MOLINIER et al. 1990), les conditions d'extrapolation spatiale ont été abordées. Les résultats obtenus concernant le couple pluie-ruissellement de surface qui ont trait au transfert d'échelle sont repris et présentés ici.

¹Hydrologue ORSTOM - DNAEE, Brasilia.

²Pédologue ORSTOM - Représentation ORSTOM/CIRAD, Brasilia.

³Pédologue ORSTOM - CNPq, Recife.

2 - CADRE DE L'ETUDE

Le bassin expérimental de Sumé, Etat de la Paraíba, est situé dans la zone semi-aride du Nord-Est brésilien (7°40'S, 37°00'W) et fait partie d'un bassin représentatif de 137,4 km². Il est inclus dans le sous-bassin de Umburana de 10,7 km² dont le comportement hydrologique est étudié depuis 1971 (CADIER et FREITAS, 1982; CADIER et al, 1983) par la SUDENE (Surintendance de Développement du Nordeste).

A l'amont d'une retenue collinaire (açude) ont été installés divers dispositifs de mesure. Le site a été choisi en raison de l'homogénéité du sol et de la représentativité régionale des sols, du climat, des roches, du relief, de la végétation et des pratiques culturales.

Le climat est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 590 mm dont le coefficient de variation peut dépasser 50%, 7 à 8 mois secs par an, une température moyenne de 24°C et une évaporation moyenne annuelle du bac de classe A de 2900 mm. Les roches dominantes sont des migmatites du socle cristallin précambrien. Le modelé, faiblement ondulé, est constitué de versants courts dont la pente varie de 4 à 9% en moyenne. La végétation, du type forêt épineuse basse et dense de 2 à 5 m de hauteur, appelée "caatinga", est riche en légumineuses arborées et arbustives et présente une strate graminéenne réduite. Son pouvoir de régénération est important. 85% des sols du bassin sont classés comme sols "bruns non calciques vertiques", les 15% restants étant composés de sols bruns non vertiques et de vertisols. Les sols dominants sont constitués de 4 horizons argilo-sableux: A1 à structure polyédrique, (B) cubique, (B)C vertique et C arénitique et ont une épaisseur de 50 à 90 cm. Ce sont des sols chimiquement riches mais dont la faible épaisseur et la perméabilité réduite limitent les potentialités agricoles. Ils sont cependant cultivés en coton arboré, maïs, haricot et palme fourragère en sec et en légumes divers sous irrigation.

3 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Un dispositif expérimental constitué de microparcelles de 1m², de parcelles de 100 m² et de microbassins de 1 ha a permis d'étudier le ruissellement en fonction de ces trois échelles de superficie sur sol nu et sous végétation naturelle. Les sols sont, pour toutes les superficies utilisées, les mêmes sols bruns plus ou moins vertiques. Les microbassins comportent toutefois, à l'amont, une association de sols bruns non vertiques peu épais et de lithosols et affleurements rocheux et à l'aval des vertisols. La figure 1 illustre la succession ordonnée des sols et des roches. Cette distribution des sols dans le paysage est sous la dépendance étroite de la nature de la roche sous-jacente : sols bruns et lithosols sur les pegmatites des lignes de crête,

sols bruns vertiques sur les gneiss à amphiboles des versants, vertisols sur les amphibolites des dépressions.

Les ruissellements sur microparcelles ont été obtenus à partir de pluies simulées. L'appareil utilisé est l'infiltromètre à aspersion type ORSTOM (ASSELINÉ et VALENTIN, 1978; CASENAVE, 1982). Pour un examen plus détaillé du dispositif expérimental est il est demandé de se reporter au rapport final (MOLINIER et al. 1989a).

On a pu établir des relations donnant la lame ruisselée (LR) en fonction de l'averse correspondante (P) et de l'indice d'humidité (IP) représentatif de l'état d'humectation préalable des sols.

L'indice d'humidité choisi est de la forme suivante :

$$IP_n = (IP_{n-1} + P_{n-1}) * K^{Tr}$$

où :

- Tr est le temps séparant l'averse étudiée Pn de l'averse antérieure Pn-1
- IP_n est l'indice d'humidité avant la pluie Pn du jour n
- IP_{n-1} est l'indice d'humidité avant la pluie Pn-1
- K est un coefficient d'ajustement qui dépend de la perméabilité du sol et de la cinétique de ressuyage de ses horizons.

4 - RESULTATS OBTENUS

4.1 - Les relations pluie-ruissellement

Pour mieux représenter la lame ruisselée LR, on a retenu deux types de relation LR=f(P,IP) :

$$LR = a.P + b.IP + c \quad [\text{sols nus}] \quad [1]$$

$$LR = A.P + B.P.IP + C.IP + D \quad [\text{sols sous végétation}] \quad [2]$$

Le tableau I ci-dessous donne les différents coefficients de ces 2 relations pour chacune des trois superficies étudiées sur sol brun vertique et la figure 2 donne la représentation graphique de ces mêmes relations dans les 6 cas étudiés et dans des conditions comparables d'humidité préalable des sols (conditions médianes IP=125).

TABLEAU I : Valeurs des coefficients des relations [1] et [2]

SOLS NUS			SOLS SOUS VEGETATION				
	a	b	c	A	B	C	D
1m2	0.691	0.009	-3.1	0.165	0.00064	0.0116	-5.26
100 m2	0.605	0.016	-4.5	0.149	0.00052	0.0090	-6.01
1ha	0.558	0.020	-7.9	0.134	0.00039	0.0065	-6.94

Les coefficients a, b, A, B, C et D sont directement fonction de la superficie correspondante, ou plus exactement de son logarithme. Si bien que l'on peut calculer la valeur de la lame ruisselée en fonction de la pluie (P), de l'indice d'humidité (IP) et de la superficie (S) à l'aide des relations suivantes, pour des superficies comprises entre 1m2 et 1ha :

Sols nus

$$LR = 0,69.P - (0,033.P - 0,003.IP).logS + 0,010.IP - 5 \quad [3]$$

Végétation :

$$LR = 0,165.P + 0,00064.P.IP + 0,0116.IP - 5,26 - logS (P/129 + P.IP/16000 + IP/784 0,42) \quad [4]$$

Ces résultats montrent que, dans des conditions moyennes d'humidité, le ruissellement sur les sols nus de Sumé diminue d'environ 5% chaque fois que la superficie double.

Le graphique de la figure 3 donne les valeurs du ruissellement sous végétation en fonction de celui sur sol nu, pour une même pluie et pour 2 indices d'humidité :

IP = 50 ----> sol sec

IP = 300 ----> sol très humide

On constate que la réduction de ruissellement est d'autant plus importante que le sol est plus sec. En effet, sur sols secs, l'influence de la végétation sur l'infiltration est prépondérante. Mais lorsque les sols sont très humides, cette influence diminue, et l'horizon A fortement saturé devient un des facteurs principaux limitant l'infiltration.

Ce graphique montre, en outre, que sur microbassins de 1ha, les sols sous végétation naturelle retiennent, selon l'état d'humidité des sols, les 10 à 20 premiers millimètres qui s'écoulent sur les microbassins dénudés. Par la suite, dans le cas des fortes pluies, 60 à 85 % de la part supérieure à ces 10 ou 20 premiers millimètres seront retenus dans le sol. Sur 1m², la première interception se réduit à 5-15 mm et la suivante à 50-80 % de la part supérieure à ces 5-15 mm.

4.2 - Autres résultats

Le rôle prépondérant de deux facteurs a été mis en évidence dans le déterminisme de la circulation des solutions dans l'écosystème. Il s'agit du couvert végétal qui règle l'infiltration superficielle et de l'organisation de la couverture pédologique qui règle les circulations internes. Un schéma du fonctionnement de l'écosystème à l'échelle du versant a été proposé (fig. 4). A partir de ce schéma des différents flux circulant dans le sol, il a été possible de déterminer chacune des composantes d'un modèle vertical de circulation de l'infiltration. Ce modèle (MOLINIER et al, 1989b) est constitué d'un module unidimensionnel vertical, basé sur la loi de Darcy, calé sur les deux grands types de sols présents, sols bruns vertiques et sols bruns modaux. Il simule l'infiltration et le remplissage des réservoirs correspondants aux divers horizons, ainsi que la redistribution verticale et l'évapotranspiration. Chaque fois que les horizons A et C arrivent à saturation, les transferts latéraux sont réalisés sous la forme d'une vidange des réservoirs qui interfèrent, bien entendu, avec l'ensemble des profils hydriques de chaque unité de l'espace discrétisé.

Un bilan géochimique des solutions permet de chiffrer les flux d'entrée, des stagnations et de transit ou de sortie des eaux de l'écosystème, et les processus d'acquisition de leur minéralisation.

5 - EFFET D'ECHELLE

Les résultats obtenus sur les microparcelles de 1m², les parcelles de 100m². et les microbassins de 1ha du bassin versant expérimental de Sumé (tableau I, fig. 2 et 3), ont montré que, tant sur sols dénudés que sous végétation naturelle, la lame ruisselée diminuait lorsque la superficie augmentait, pour une même pluie et dans des conditions comparables d'humidité préalable des sols. Ce phénomène d'effet d'échelle de la superficie sur l'écoulement est assez connu des hydrologues qui ont souvent des difficultés à extrapoler les résultats obtenus sur petites superficies à des superficies plus grandes. Cependant, il est parfois possible d'obtenir, localement, des résultats assez intéressants. Ainsi, on a pu montrer (MOLINIER, 1981) que dans la région de Comba au Congo, certaines caractéristiques des crues des petits bassins versants de superficies comprises entre 1 et 100 km².étaient directement proportionnelles à ces superficies.

Une explication de ce phénomène peut être donnée par la différence de chemin parcouru par l'eau avant d'arriver à l'exutoire. En effet, on admet que l'eau de pluie qui ruisselle sur une microparcelle de 1m^2 parvient intégralement au dispositif d'enregistrement. Sur des parcelles plus grandes, ou des bassins versants, on conçoit parfaitement que l'eau ruisselant de l'amont puisse s'infiltrer en aval avant de parvenir à l'exutoire, et ceci avec une probabilité d'autant plus importante que le bassin, donc le chemin parcouru, est plus grand. Ces pertes par infiltration peuvent donc expliquer, en partie, l'effet d'échelle.

Mais dans le cas des sols de Sumé, un facteur explicatif supplémentaire de ce phénomène est la nature diversifiée et la structure plissée-faillée du substrat rocheux qui commande, aux différentes échelles, la distribution et les proportions relatives de sols à comportements hydrologiques différents. Dans ce système où dominent les sols peu perméables (bruns vertiques) associés à des sols plus perméables (bruns modaux passant à lithosols), la proportion de ces derniers augmente à mesure qu'on embrasse une superficie croissante en remontant un versant jusqu'à intégrer l'ensemble du bassin. L'augmentation de la proportion des zones perméables - qui favorisent l'infiltration - lorsqu'on augmente la superficie peut aussi expliquer l'effet d'échelle constaté. On peut ajouter qu'à une échelle plus ample, on intégrerait des sédiments des marges d'axes de drainage qui augmentent la capacité moyenne d'infiltration à l'aval.

On a aussi constaté que sur sol sec et sous végétation naturelle, l'effet d'échelle est pratiquement inexistant. Une explication de ce phénomène pourrait être la suivante: si l'on considère que l'intensité du ruissellement est maximum lorsque le réservoir constitué par l'horizon A est très proche de la saturation (indépendamment de l'échelle), l'effet d'échelle pourrait être du à l'apparition croissante de "fuites" (drainage latéral et profond du à l'influence de la végétation et des racines) éliminant une partie de l'eau de ce réservoir au fur et à mesure qu'augmente la superficie.

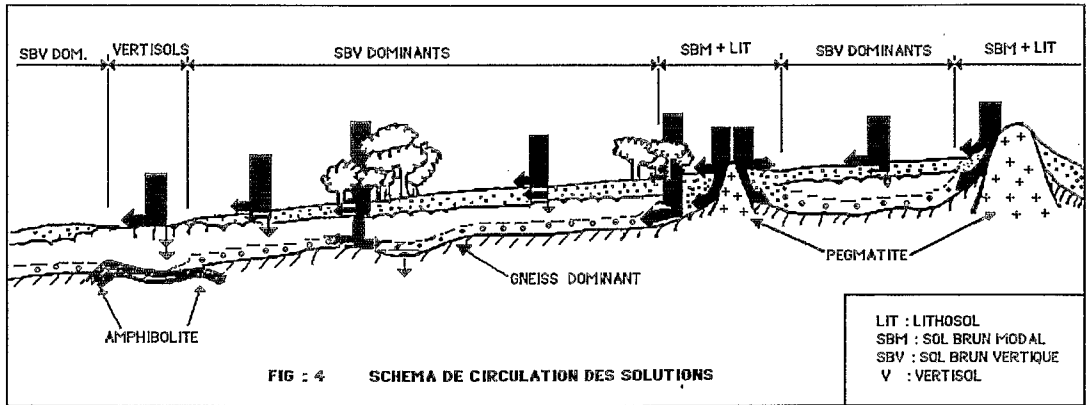
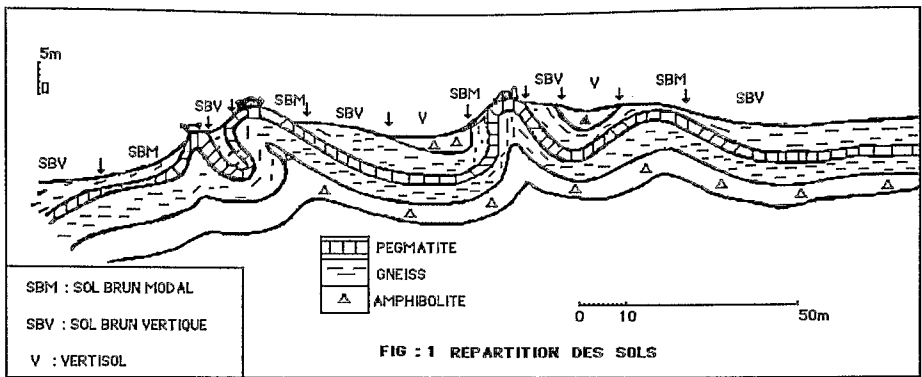
6 - CONCLUSION

Les études réalisées sur le bassin versant expérimental de Sumé ont permis de mettre en évidence un effet d'échelle sur la lame ruisselée pour des superficies comprises entre le mètre carré et l'hectare (et même 10km^2 pour les forts ruissellements). Ce phénomène a pu être quantifié grâce aux relations donnant la lame ruisselée en fonction de la pluie, de l'état d'humidité préalable des sols et de la superficie étudiée (Cf. relations [3] et [4] ci-dessus). Une explication spécifique au système des sols de la région a pu être apportée. Celle-ci s'appuie sur l'hétérogénéité du sol et du sous-sol dont la distribution et les proportions relatives influent sur les comportements hydrologiques de chaque superficie étudiée.

Outre la possibilité d'évaluer les différents termes du bilan hydrique au niveau de la parcelle élémentaire (unité géographique), le modèle vertical cité ci-dessus doit permettre de préciser les règles de transfert des résultats en fonction des superficies considérées, simulant ainsi l'effet d'échelle qui, dans ce cas, est représenté par la diminution de la lame ruisselée lorsque la superficie drainée augmente. Ce facteur d'échelle pourrait être mis en évidence par l'interconnexion entre eux des modules verticaux de simulation. Pour ceci, chaque superficie plus importante sera divisée en zone élémentaire de caractéristiques physiques homogènes (sol, végétation, pente, état de superficie), où seront appliqués les modèles de simulation verticaux calés précédemment sur des superficies élémentaires de 1m² possédant les mêmes caractéristiques physiques que chaque zone élémentaire choisie.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELINE, J., VALENTIN, C., (1978), "Construction et mise au point d'un *infiltromètre à aspersion*". Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Volume XV, n°4.
- CADIER, E., FREITAS, B.J. de, (1982), "*Bacia representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanhas de 1973*" a 1980. Recife, SUDENE-DRN, Série Hidrologia, n°13.
- CADIER, E., FREITAS, B.J. de, LEPRUN, J.C., (1983), "*Bacia experimental de Sumé. Instalação e primeiros resultados*". Recife, SUDENE-DRN, Série hidrologia, n°16.
- CASENAVE, A., (1982), "Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures". Cah., ORSTOM, Sér. Hydrol. Volume XIX n°4.
- MOLINIER, M. (1981) - "Etude hydrologique des bassins de la Comba (République Populaire du Congo)". Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., Volume XVIII, n°2-3, pp. 75-190.
- MOLINIER, M., AUDRY, P., DESCONNETS, J.C., LEPRUN, J.C., (1989a) Projet : "Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale". Rapport final. ATP-PIREN, ORSTOM, Recife.
- MOLINIER, M., AUDRY, P., LEPRUN, J.C., (1989b) "Modelagem do escoamento e da infiltração em um solo bruno não cálcico do Nordeste". VIII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 26-30 nov. 1989, Vol. 1, pp
- MOLINIER, M., AUDRY, P., DESCONNETS, J.C., LEPRUN, J.C., (1990) Projet : "Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale". ATP : "Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols", juin 1986-juin 1989. Rapport final, IMG, Grenoble, pp. 159-177.



RELATIONS AVERSE-RUISSELLEMENT

Sols de Sumé-Brésil

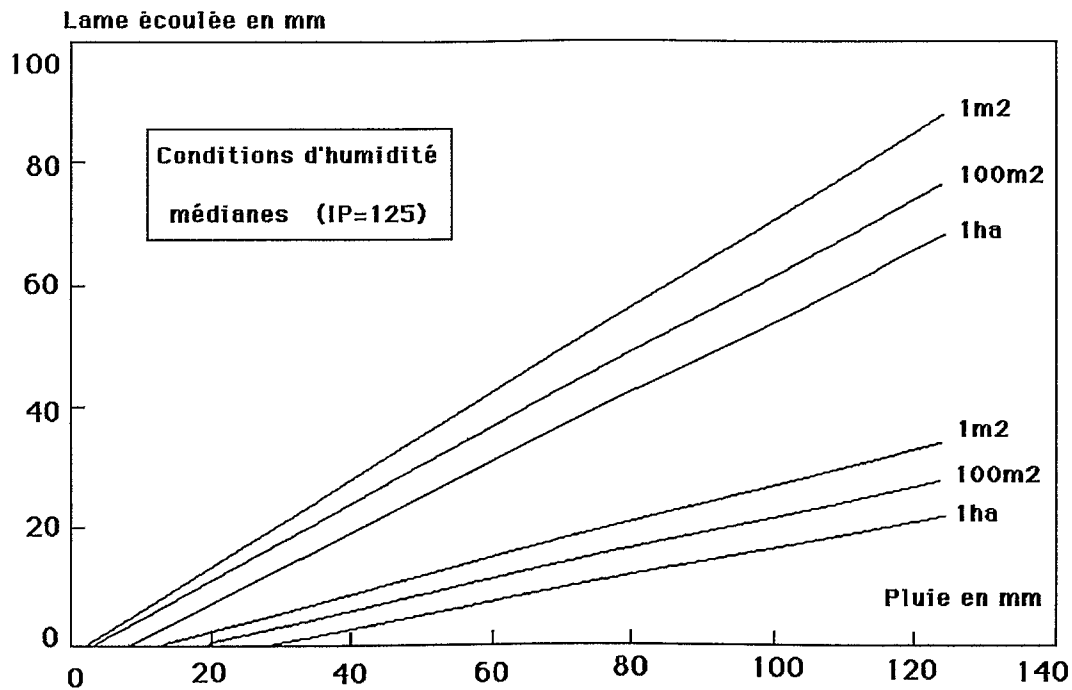
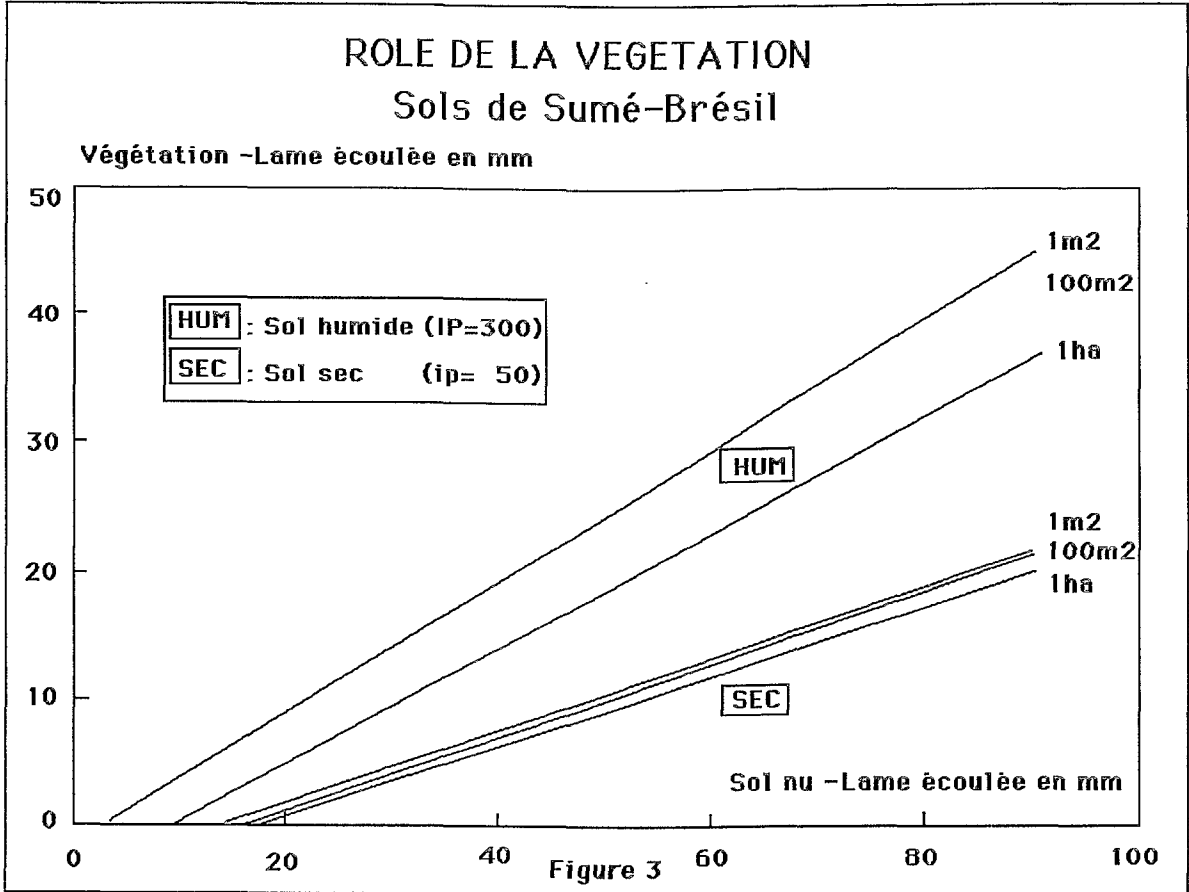


Figure 2



NOTION D'ECHELLE ET VARIABILITE SPATIALE DE LA SALURE DANS LES SOLS

JOB J.O., HACHICHA M.

RESUME

L'étude de la répartition des sels dans les sols fait appel à plusieurs techniques. De l'échelle microscopique au bassin versant, le choix de l'échelle impose la méthode d'approche. L'investigation spatiale par conductivimétrie électromagnétique en particulier permet de faire des transferts à l'échelle agronomique. Il faut préalablement définir des unités homogènes représentatives de la dynamique des sels de l'ensemble. Des exemples traités dans un programme national de suivi de la salure des sols irrigués en Tunisie montrent qu'il y a plusieurs manières de faire le changement d'échelle à partir des données recueillies sur une parcelle.

INTRODUCTION

Le problème posé est celui de l'évolution de sols très divers, situés dans des contextes agroclimatiques différents et irrigués avec de l'eau salée.

Les sols étudiés couvrent à peu près 20000 hectares repartis du Nord au Sud de la Tunisie, la pluviométrie variant de 600 à 150 mm. Leur texture varie de sableuse à argilo-limoneuse, les quantités d'eau d'irrigation utilisées de 200 à 500 mm par an, leur charge en sels de 1,5 à 2,5 gr/l, leur faciès chimique est chlorure sodique avec une proportion croissante de sulfate de calcium vers le Sud.

METHODOLOGIE

La méthodologie mise au point pour l'ensemble du projet a été la suivante:

l-choix d'une variable spatialisée sur laquelle sont faits des tests de comportement des sols et définition de paramètres agrépédologiques à prendre en compte.

2-inventaire des situations existantes en Tunisie et choix de zones caractéristiques eu égard aux paramètres précédemment définis.

3- à l'intérieur de chaque zone caractéristique, choix d'une ou plusieurs parcelles représentant des unités fonctionnelles homogènes, c'est à dire des unités de sols qui traduisent une variation de la salure par une variation identique de la variable choisie. Choix du pas de temps de mesure suivant la vitesse de l'évolution.

4- transfert des résultats de la parcelle au périmètre, soit de l'hectare à la centaine d'hectares à peu près.

L'étape n° 2 n'ayant pas de rapport avec le transfert d'échelle ne sera pas traitée ici.

LA VARIABLE SPATIALISEE

Traditionnellement les mesures de salure du sol se font par prélèvement d'échantillon et analyse en laboratoire. On obtient ainsi la conductivité de l'extrait à saturation du sol qui est la référence habituelle dans les publications du monde entier (USSL, 1954). Cette méthode ne convient pas à l'étude spatiale car aucun repère visuel ne permet de localiser les sels dans les sols et donc de choisir les points de mesures. Un échantillonnage aléatoire est donc nécessaire. IL nécessite un nombre de mesure élevé, incompatible l'échantillonnage traditionnel.

La variable choisie est la conductivité apparente globale du sol, intégrée entre 0 et 2 mètres de profondeur. La mesure se fait avec un conductivimètre électromagnétique (de JONC et al., 1979). Elle est représentée par deux descripteurs:

CEa qui représente la teneur en sels,
p qui représente l'allure du profil salin.

Un sol sous irrigation aura une valeur de σ_a assez faible et une valeur de $p < l$, alors qu'un sol dans lequel se manifestent des remontées capillaires par suite d'abandon ou de mauvaise gestion de l'eau aura une valeur de σ_a plus élevée et une valeur de $p > l$.

Le comportement salin d'un sol est donc assez bien défini par ces deux mesures qui peuvent être répétées tous les deux mètres linéaires ou se faire suivant n'importe quel maillage suivant les résultats escomptes.

TEST PRELIMINAIRES

La variable CEa dépend de l'humidité volumique du sol, de sa porosité et de la nature des argiles (Mc Neill 1980).

Une expérimentation menée en Syrie (Job, Loyer, Ailoul, 1987) a montré que le comportement électromagnétique des sols calcaires des régions arides méditerranéennes est indépendant de leur teneur en gypse et peut se diviser en trois classes de comportement différent suivant les textures : sableuses, équilibrées et limono-argileuses ou plus fines.

D'où d'une part les paramètres agropédologiques pris en compte dans le choix des sites à étudier: texture (trois niveaux) et porosité, d'autre part la stratégie consistant à faire des mesures à humidité du sol homogène sur l'étendue mesurée, après les pluies d'hiver ou en pleine saison sèche.

LES UNITES FONCTIONNELLES HOMOGENES

C'est la partie fondamentale qui permet un transfert d'échelle des mesures.

Les sites une fois sélectionnés, on les divise en unités fonctionnelles homogènes, c'est à dire en surfaces de sol qui auront le même comportement salin lorsqu'elles seront irriguées de la même manière avec la même eau. Le comportement salin étant grossièrement la répartition des sels au sein du profil, leur accumulation sur les argiles, leur précipitation en place ou leur lessivage en dehors de la zone racinaire.

C'est sur les critères agropédologiques définis précédemment que se fait le choix de ces unités qui s'insèrent dans le paysage. Il est important de noter que ce choix, donc la taille des unités de même comportement est imposé par le système étudié. Elle varie de dix à cinq cent hectares dans le premier exemple choisi à Sidi-Saad (Hachicha, 1990) et peut atteindre plusieurs milliers d'hectares sur les basses terrasses du moyen Euphrate (Syrie) par exemple.

LE CHOIX DES PARCELLES REPRESENTATIVES

La parcelle représentative est un sous-ensemble d'unité fonctionnel homogène dans laquelle seront faites les mesures. Sa taille dépend de structure de la répartition des sels. On la détermine après examen du variogramme des mesures faites dans l'unité fonctionnelle homogène.

EXEMPLES

Dans notre programme les étapes ont été les suivantes :

-choix de cinq zones climatiques : Hte Mejerdah, Basse Mejerdah, Kairouannais, Sahel, Oasis de Gafsa.

- choix de 13 sites d'études repartis dans ces cinq zones.
- délimitation de 17 unités fonctionnelles homogènes.
- mesures sur 29 parcelles (Il peut y avoir plusieurs parcelles par unité fonctionnelle homogène pour vérifier l'hypothèse d'homogénéité des unités)

Ces 17 unités fonctionnelles correspondent à des situations que l'on doit retrouver partout en Tunisie sauf dans le Sud pré-saharien.

Le comportement de ces 17 types d'association sol-pratiques culturales sera suivi pendant quatre ans afin de pouvoir dégager un comportement propre à chacun des types et étendre les résultats acquis à toute la Tunisie (Ben Hassine et al., 1988).

Le Tableau 1 montre quelles sont en gros ces 17 situations qui font l'objet d'une étude pédologique détaillée par ailleurs.

CARACTERISTIQUES DU SITE			CARACTERISTIQUES AGROPÉDOLOGIQUES	
région	sup(ha)	nb. de par.	type de sol	irrig.
BIZERTE	3000	1 a Utique	sols argilo-limoneux	planche
TUNIS	2750	3 a Cebala	sols argilo-limoneux	planche
JENDOUBA	2750	3 a Zama	sols argilo-limoneux	rampe
CAP BON	2000	2 Grombalia	sols argilo-limoneux	aspers.
KAIROUAN	1200	3 Sidi-Saad	texture moyenne à sableuse	aspers
KAIROUAN	60	1 a Oussif	sols lourds	planche
KAIROUAN	120	1 Zaafrana	texture moyenne à lourde	planche
MAHDIA	80	1 Essaafet	limon sur argile tirsifiée	planche
MAHDIA	60	1 Zelba I	limons à nodules	planche
MAHDIA	60	1 Zelba II	alluvions limono sableuses	planche
GAFSA	835	2 GAFSA SO	alluv. colluvions fines	aspers
GAFSA	700	3 à Lclat	alluv. gypso-salines	planche
GAFSA	550	7 Guettar	gypso-salins hydromorphes	planche

Tab.1-Taille des sites étudiés, nombre des parcelles mesurées type de sols et d'irrigation.

TRAITEMENT DES RESULTATS

Le traitement statistique des données repose toujours sur le même principe: on s'assure que les valeurs de CEa sont bien un échantillon de la population des conductivités apparentes globales de l'unité fonctionnelle homogène et qu'elles sont réparties autour d'une moyenne suivant une loi normale. C'est le signe que l'unité fonctionnelle et la parcelle ont été correctement définis et que l'irrigation a été correctement menée. L'irrigation tend en effet à normaliser les distribution salines (JOB, 1986).

Le tableau n° 2 montre deux situations différentes:

1) Olivette de Lelat (région de Gafsa)

Le cas le plus simple est celui où quelle que soit la taille de la parcelle on retrouve la même distribution des valeurs de CEa autour de la même moyenne (test f de Fisher).

C'est le cas de l'olivette de Lelat (700 ha) où les oliviers sont plantés tous les dix mètres et la quantité d'eau distribuée par propriétaire est la même. Les parcelles MR2 de 2400 mètres carrés et la parcelle SA1 de 40 hectares ont des moyennes équivalentes, avec un risque de 5% (Tab.2). Le transfert d'échelle se fait ipso-facto.

2) Le grand périmètre irrigué de Sidi-Saad

C'est le cas le plus fréquent. Il faut diviser la zone étudiée en plusieurs unités fonctionnelles homogènes. Par exemple dans le grand périmètre irrigué de Sidi-Saad près de Kairouan, la parcelle SS7 est choisie dans une première unité fonctionnelle homogène constituée par des sols à texture moyenne de bonne porosité et de faible salure qui représentent les trois quarts des 1000 ha de la zone étudiée.

La parcelle SS8 représente une autre unité qui fonctionne différemment: sols lourds situés à l'aval du périmètre dans lesquels se fixent les sels. La microtopographie de la parcelle introduit une structure dans la distribution des sels que l'on met en évidence à l'aide d'un variogramme et d'une carte d'isovaleurs (non reproduits ici).

Dans le premier cas il n'y a pas de problème, dans le second le transfert des résultats se fait actuellement qualitativement en étudiant les changements de forme du variogramme (JOB 1987) car il est difficile de trouver une loi de distribution de la variable. Les phénomènes peuvent tendre en effet au cours du temps soit vers une loi normale (irrigation désalinisante) soit vers une loi du type

quelconque (irrigation avec salinisation excessive d'une partie de la parcelle) que l'on peut quelquefois seulement assimiler à une distribution de Poisson.

Des études sont en cours pour l'interprétation quantitative, en mesurant par exemple les surfaces comprises entre les deux isohales 90 et 140 mS/m qui représentent des valeurs caractéristiques de CEa toxiques pour de nombreuses cultures.

date	CEa	p	nb	m	taille	culture	maille	traitement	fich
12:89	78	1,2	24	11	2100m	oliviers	10m	moyennes	MR2
12:89	70	1,2	39	12	40000m	oliviers	100m	moyennes	SA1
10:89	45	1,5	104	12	5400m	sorgho	20m	moyennes	SS7
10:89	113	1,1	70	17	5400m	luzerne	20m	isovaleurs	SS8

Tab.2-Exemples de résultats CEa et p pour une humidité Θ_m du sol donné par parcelle.

3) L' oasis d'El Guettar (région de Gafsa)

Cette oasis peut être considérée comme un ensemble composé de trois types de parcelles correspondant à trois itinéraires cultureux différents. Celles qui sont cultivées sur trois strates dont la salure est faible et tend à diminuer, celles qui ne sont cultivées que sur deux strates dont la salure est moyenne et stationnaire et celles dont seule la strate de palmier existe dont la salure tend à augmenter et se concentrer en surface au cours du temps.

Une enquête préalable conduit à étudier non plus une parcelle représentative d'une unité de fonctionnement homogène, mais un groupe de parcelles représentatif de l'ensemble. Ce groupe contient les mêmes proportions de chacun des itinéraires cultureux que l'ensemble. Soit pour 2450 parcelles au total, un sous-ensemble de 64 parcelles est étudié. Chacune de ces 64 parcelles fait l'objet de vingt mesures réparties de manière aléatoire.

L'évolution de l'ensemble est déduit de l'évolution produite par chacun des trois itinéraires agronomiques pris séparément (Job, Marai, 1990).

CONCLUSIONS

Dans le cadre de notre programme qui est l'étude de la distribution spatiale des sels dans les sols arides Méditerranéens sur des superficies de l'ordre de la centaine au millier d'hectare, nous pouvons faire des transferts d'échelle aux conditions suivantes:

- 1- Nous choisissons une variable qui garde sa signification à toutes les échelles étudiées.
- 2- Nous connaissons la structure, au sens géostatistique (Delhomme, 1976) de cette variable à toutes les échelles.
- 3- Nous partons de l'ensemble le plus vaste que nous divisons en autant d'unités susceptibles de variations semblables au cours du temps et nous choisissons dans ces unités des parcelles représentatives sur lesquelles seront faites les mesures.
- 4- Nous définissons un pas de temps et une durée des mesures, car il ne peut y avoir de transfert d'échelle dans l'espace que par rapport à un temps donné.

Ceci fait, le transfert d'échelle est possible entre parties du paysage soumises à des variations de même nature, de même sens et de même amplitude.

Cette démarche impose un grand nombre de mesures et une connaissance minimum du phénomène à toutes les échelles et en tout point de la zone étudiée.

Les résultats acquis pourront être régionalisés à l'ensemble de la Zone méditerranéenne (Magreb et Moyen-Orient) qui possèdent des unités fonctionnelles semblables. Il existe cependant des cas où la notion d'unité fonctionnelle perd de son attrait: soit parce qu'il faudrait diviser l'espace en de trop petites unités, soit parce que la gestion agronomique introduit des dysfonctionnements (jachère nue suivant une culture par exemple qui provoque l'inversion des profils salins par exemple).

REFERENCES

- Ben Hassine H., Hachicha M., Job J.O., Loyer J.Y., 1988- La conductivimétrie électromagnétique: application au suivi de la salinité des sols des périmètres irrigués de Tunisie. Rapport multigr., ORSTOM/DS, Montpellier, 22 pp.
- Boivin P., Hachicha M., Job J.O., Loyer J.Y., 1989- Une méthode de cartographie de la salinité des sols. Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. *Science du sol*, vol.25, n°1, p:69-73.

- de Jonc E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.W., 1979-Measurement of Apparent Electrical Conductivity of Soils by an Electromagnetic Probe to Aid Salinity Surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 810-812.
- Delhomme J.P., 1976- Applications de la théorie des variables généralisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Paris VI-Ecole des Mines de Paris.
- Hachicha M., Mohdi M., Soussi A., 1990- La salinité des terres dans le Kairouannais. Ministère de L'agriculture, Direction des sols, 28 p.
- Job J.O., 1985- Conductivimétrie électromagnétique: application à la cartographie des sols sales. 25ème semaine des Sciences de Damas (Syrie).
- Job J.O., 1986- Conductivimétrie électromagnétique:étalonnage sur les sols sales de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie). Rapport scientifique, Centre ORSTOM de Montpellier, 3 fig., 9 p.
- Job J.O., Hachicha M., 1989- Programme de suivi de la salure dans les périmètres irrigués. Rapport d'activité et perspectives pour 1990-1992, rapport multigr., 8pp.
- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987- Utilisation de la conductivimétrie électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, ser. Pedol., vol.XXIII, n°2* p:123-131.
- Job J.O., Ben Marai M., 1990- Etude de la salinité des sols de l'Oasis d'El Guettar. ORSTOM/DS, Pub. n° E-S 258, 15 p, 3 cartes.
- McNEILL J.D., 1980- Electromagnetic conductivity measurement at low induction numbers. Technical note n° TN-6 , Geonics Ltd, Mississauga, Canada
- USSL, 1954-Diagnosis and Improvement of saline and Alkali Soils. *Agriculture Handbook n° 60*, Richards ed., US Dep. of Agriculture.

MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DES SOLS. PASSAGE DE L'ECHELLE MICROSCOPIQUE A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE

PERRIER E.

RESUME

Suivant l'échelle d'observation du sol, la modélisation des transferts hydriques s'appuie sur des lois physiques ou statistiques différentes. Cependant, lorsque l'on dépasse le cadre strict d'application des lois connues et que le fonctionnement du système eau-sol apparaît comme trop complexe à un niveau donné, on recherche des informations plus fines ou de différente nature. Leur prise en compte effective conduit inévitablement à des problèmes de transfert d'échelle. C'est le cas par exemple lorsque l'on cherche à intégrer des informations sur l'organisation structurale du sol dans un modèle de fonctionnement hydrique global.

Nous présentons ici une revue bibliographique de différentes méthodes théoriques récentes tentant d'effectuer le transfert d'échelle entre les processus mis en évidence à l'échelle microscopique (au niveau des grains et des pores constituant un sol) et les propriétés hydrodynamiques macroscopiques d'un échantillon de sol (de taille suffisamment grande vis-à-vis des dimensions granulométriques) .

En particulier, la méthode de simulation numérique des "gaz sur réseau" semble prometteuse: La représentation d'un fluide sous forme de particules élémentaires soumises à des règles de déplacement et de collision simples, les vitesses et le temps envisagés eux aussi sous une forme entièrement discrétisée, permettent de retrouver des comportements microscopiques et macroscopiques connus, qu'il s'agisse des équations différentielles de Navier-Stokes régissant la mécanique des fluides ou de la loi de Darcy caractérisant les écoulements dans un milieu poreux macroscopiquement homogène.

I) PRESENTATION DU PROBLEME DE TRANSFERT D'ECHELLE EN MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

A) A chaque échelle du cycle de l'eau, différentes disciplines développent leurs propres modèles. Pourquoi pas?

Un certain nombre de modèles ont été mis au point pour simuler la dynamique de l'eau dans un sol. Chacun d'eux s'applique dans des conditions idéales restrictives, la première de ces conditions étant une certaine échelle d'utilisation; il n'est pas question a priori de considérer le sol comme un ensemble de grains et de pores pour évaluer la recharge d'une nappe à la suite d'une pluie. A chaque niveau d'étude, et pour un même processus étudié, à savoir des écoulements d'eau dans un sol, correspond un certain type de modélisation, avec bien souvent cohabitation de mondes clos; les physiciens des milieux poreux travaillent à l'échelle microscopique, les hydrodynamiciens au niveau macroscopique, les agronomes s'intéressent à l'évolution de stocks hydriques sur une parcelle, les hydrologues ont leurs propres modèles au niveau du bassin versant.

On peut considérer cette situation comme normale et satisfaisante. *"En général, deux phénomènes dont les longueurs caractéristiques sont très différentes ont peu d'influence l'un sur l'autre: On peut ainsi les étudier séparément. Par exemple, l'interaction de deux molécules d'eau voisines est la même, qu'elles soient dans un océan ou dans un verre d'eau. On peut aussi décrire de façon très précise une vague sur un océan comme une perturbation dans un milieu continu, sans avoir (et c'est heureux) à tenir compte de la structure moléculaire de l'eau. Le succès de la plupart des théories physiques vient de ce qu'elles ont su limiter les études à une certaine échelle de longueur et ignorer le reste."*(Kenneth Wilson, 1989)

Tant qu'un modèle répond aux objectifs qui ont conduit à sa mise en place, le bon sens indique de s'en tenir à la représentation utilisée, schématique par essence, et forcément incomplète, d'une réalité toujours complexe.

Par exemple, les transferts hydriques dans un bac à sable saturé d'eau sont bien décrits par un seul coefficient de proportionnalité K (appelé perméabilité du milieu) entre les flux hydriques et le gradient de charge hydraulique, comme l'indique la loi empirique établie par Darcy au siècle dernier. Dans ces conditions les considérations théoriques de Matheron (1979) démontrant mathématiquement l'émergence de la loi de Darcy à partir des équations de Navier Stokes bien connues en mécanique des fluides peuvent apparaître comme un jeu intellectuel, satisfaisant notre besoin de rationalité, mais purement gratuit.

B) Où la nécessité du transfert d'échelle se fait sentir: Limitations de la loi de Darcy au niveau macroscopique

Lorsque qu'un modèle ne peut reproduire assez précisément le processus étudié à une certaine échelle, une façon naturelle de procéder consiste à rechercher des informations à un niveau plus fin. Ainsi, lorsque des fonctions globales de transfert ne permettent pas de quantifier correctement les flux générés par l'exploitation d'un gisement d'huile, les pétroliers procèdent à de nombreux prélèvements dans l'espace géologique concerné afin d'évaluer les perméabilités locales suivant la loi de Darcy. L'hétérogénéité du milieu naturel se traduit par une grande variabilité spatiale des coefficients de perméabilité et nous nous contentons ici d'évoquer l'importance accordée aux problèmes de transfert d'échelle entre ces niveaux macroscopique et "gigascope".

Nous plaçant au niveau macroscopique, la loi de Darcy elle-même n'est pas la panacée. Exprimons explicitement cette loi, établie expérimentalement, et dont l'utilisation reste soumise à des hypothèses très restrictives: Pour un sol saturé d'eau, un écoulement permanent uni-dimensionnel, un fluide incompressible et chimiquement pur, on vérifie que:

$$Q = -K \Delta P \quad (1)$$

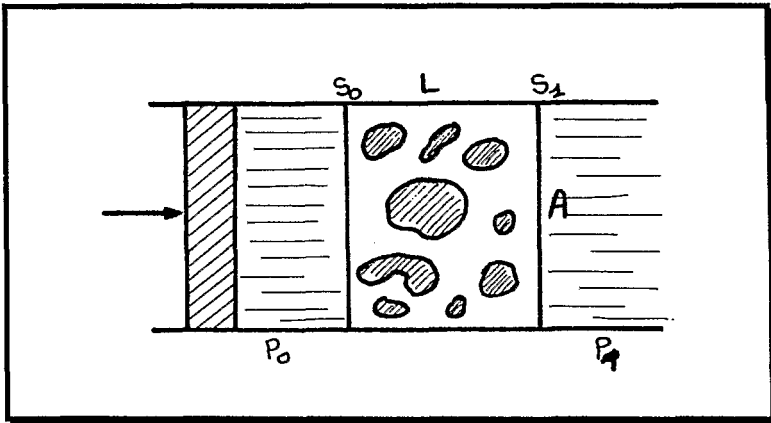


Figure 1. Expérience de Darcy

Si une différence de pression ΔP est imposée entre deux sections parallèles distantes de L limitant un cylindre de section A , le débit Q de fluide est proportionnel à ΔP (fig. 1). Si L et A varient, le coefficient de proportionnalité K reste constant pour un échantillon de sol homogène du point de vue hydrodynamique. Cette perméabilité K est une constante caractéristique du milieu poreux macroscopique.

Pour des écoulements transitoires, l'équation (1) est réécrite sous forme différentielle; elle est couplée avec une équation de continuité exprimant la conservation de la masse.

Parce que l'expression de la loi de Darcy est particulièrement simple, on a constamment cherché à la généraliser pour caractériser les flux macroscopiques dans leur ensemble. Ce sont les tentatives d'extension de cette loi en deçà de ses conditions initiales d'application qui soulèvent des questions théoriques et pratiques non résolues. Citons la généralisation aux écoulements multi-dimensionnels, où la perméabilité scalaire est remplacée par un tenseur de perméabilité; et la généralisation aux flux multiphasiques (eau, air, huile) où la constante de perméabilité, dans le cas d'un sol non saturé (circulation simultanée des deux fluides air et eau), est remplacée par un coefficient variable en fonction de la teneur en eau du sol, définissant ainsi une fonction $K(\theta)$ caractéristique du fonctionnement hydrique d'un sol donné.

Ces généralisations introduisent de multiples paramètres de calage d'autant plus difficiles à estimer que les difficultés métrologiques sont importantes. Dans d'autres conditions la loi n'est plus applicable: C'est le cas des écoulements trop rapides (turbulence) ou trop lents, c'est aussi le cas des milieux déformables.

Prendre alors son microscope et regarder ce qui se passe à une échelle plus fine va ici faire apparaître les hétérogénéités locales, au niveau microscopique, et plus particulièrement la géométrie et l'organisation structurale du sol à ce niveau. Reste à déterminer comment se fait le passage des processus locaux identifiés à des équations hydrodynamiques macroscopiques. Le passage de Navier-Stokes à Darcy, dans le cadre de certaines hypothèses est un cas d'école; il servira souvent de référence pour tester la validité de la méthode de changement d'échelle utilisée.

II) CHANGEMENT D'ECHELLE PAR INTEGRATION D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES DANS UN MILIEU CONTINU

La validité des équations de Navier Stokes à l'échelle microscopique n'étant pas jusqu'à présent remise en cause, leur intégration devrait permettre de retrouver la loi de Darcy, ainsi que ses variantes ou ses éventuelles concurrentes. *"L'extraordinaire complexité du problème que pose la résolution d'une telle équation, compte tenu de la complexité de la géométrie des pores, contraste fortement avec le caractère très simple de la loi qui émerge au niveau macroscopique"* (Matheron, 1979) .

Pour un écoulement permanent suffisamment lent pour que l'on puisse négliger les termes d'énergie cinétique, l'équation de Navier peut prendre l'expression simplifiée suivante

$$\Delta u = \mu \text{ grad } p$$

(2)

où u et p représentent respectivement la vitesse et la pression ponctuelle.

Des solutions exactes existent pour caractériser les écoulements lents et permanents de fluide incompressible dans un pore de géométrie simple; par exemple dans une fissure parallépipédique, ou dans un tube circulaire de rayon r (loi de Poiseuille), exprimant la perméabilité ou conductance d'un pore de cette forme en fonction de ses dimensions.(De Marsily, 1981).

Mais cette équation n'est valable que dans les pores; et c'est l'expression des conditions aux limites, sur la surface de chaque grain, qui justifie l'inexistence d'intégrales mathématiques exactes pour une géométrie quelconque du sol. La linéarité de l'équation (2) laisse prévoir intuitivement la proportionnalité entre les variables macroscopiques correspondantes pour un dispositif expérimental donné. Mais que le coefficient de proportionnalité, la perméabilité de Darcy soit indépendante de la forme et de la taille de l'échantillon (dans un milieu homogène) est beaucoup plus surprenant. Matheron(1979) justifie ce phénomène au moyen de démonstrations mathématiques non élémentaires.

L'intégration numérique d'équations différentielles mettant en jeu des variables ponctuelles pour en déduire des relations entre les variables globales moyennes continue d'être l'objet de recherches approfondies de la part de physiciens et mathématiciens des milieux poreux. En particulier, une méthode de "prise de moyenne" d'équations microscopiques pour en déduire leur expression macroscopique connaît un certain succès(Whitaker, Quitard, 1985). Nous en donnons un aperçu dans les paragraphes suivants.

Dans le milieu poreux schématisé sur la figure 2, β représente la phase liquide ; la loi de Navier-Stokes peut s'écrire sous la forme i et l'équation de continuité sous la forme (ii)

$$0 = -\nabla p_{\beta} + \rho_{\beta} g + \mu_{\beta} \nabla^2 v_{\beta} \quad [i]$$

$$\nabla \cdot v_{\beta} = 0 \quad [ii]$$

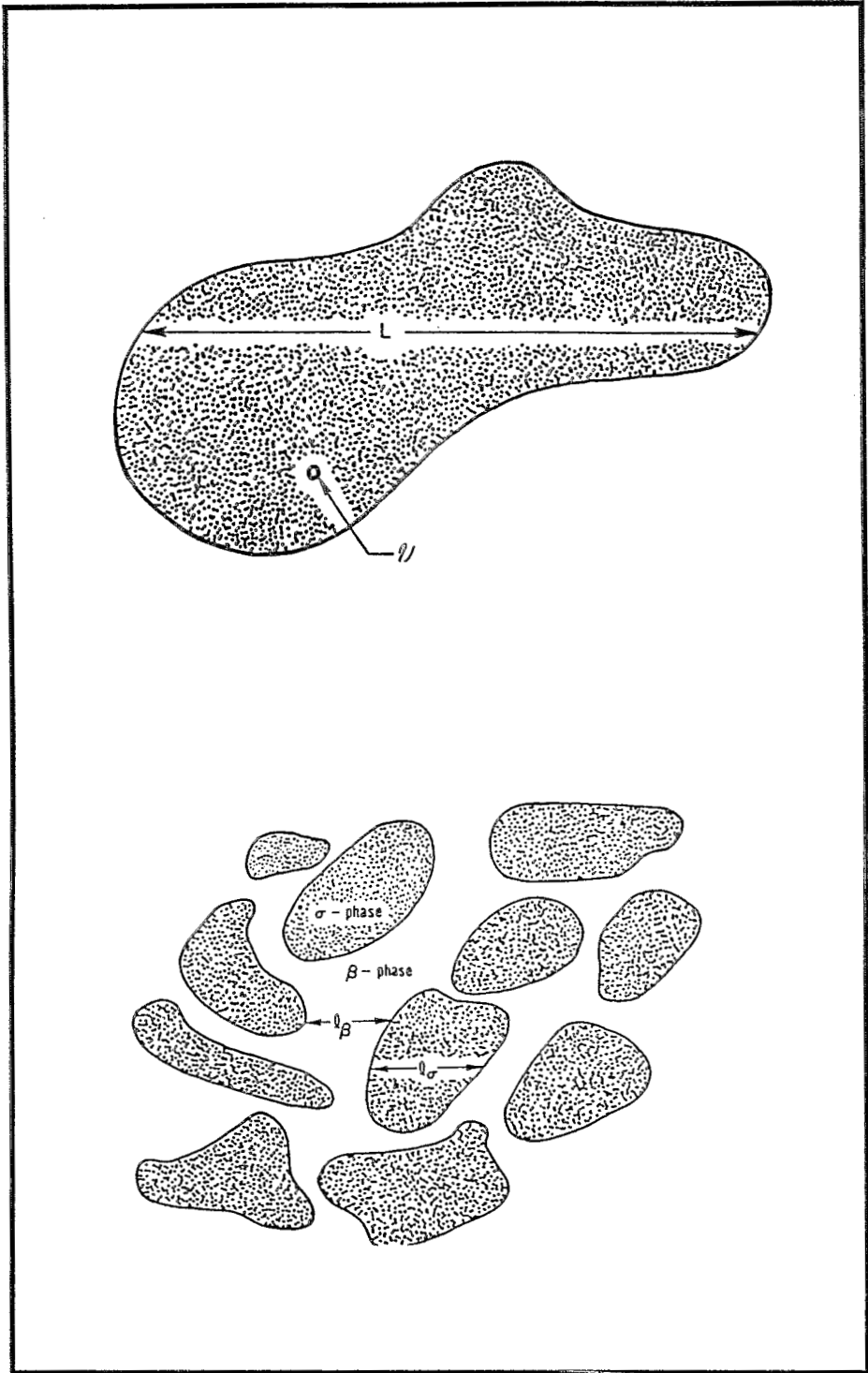


Figure 2. Prise de moyenne à l'échelle locale, sur un volume élémentaire représentatif V du système solide-fluide (Whitaker 1986)

Si, dans un certain volume V , on cherche à exprimer la pression macroscopique comme la moyenne $\langle p_\beta \rangle$ des pressions ponctuelles p_β dans la phase β , il s'agit de calculer une intégrale volumique. Quand l'intégration est effectuée sur l'ensemble des termes de l'équation (ii), on obtient des moyennes (intégrales) de gradients de valeurs ponctuelles, alors que l'on s'intéresse au niveau macroscopique aux gradients des valeurs moyennes.

Le théorème de prise de moyenne volumique

$$\langle \Delta p_\beta \rangle = \Delta \langle p_\beta \rangle + \frac{1}{V} \int_{S_{\beta\sigma}} n_{\beta\sigma} p_\beta dS \quad [3]$$

permet d'exprimer la différence entre $\langle \Delta p_\beta \rangle$ et $\Delta \langle p_\beta \rangle$ comme une intégrale double sur la surface interfaciale limitant les phases solide et fluide. L'intégrale double s'annule pour l'équation (ii) puisque la vitesse du fluide doit être nulle sur les interfaces, mais ne n'est pas toujours le cas, comme pour l'équation (i) par exemple.

Les valeurs ponctuelles sont ensuite décomposées comme somme de leur moyenne et d'un terme de déviation par rapport à la moyenne.

$$p_\beta = \langle p_\beta \rangle + \overset{\text{---}}{p}_\beta \quad [4]$$

Suivent bon nombre d'approximations justifiées physiquement, puis l'expression des termes de déviation en fonction des valeurs moyennes (fermeture des équations) et en fonction de paramètres dépendant de la géométrie de l'espace poral. L'existence et l'unicité de solutions peuvent être démontrées.

Dans le cas de figure cité, on retrouve l'expression de la loi de Darcy (Whitaker, 1986). Le calcul analytique de la perméabilité est alors calculable pour une géométrie aussi simple et classique que celle du tube capillaire.

La méthode a l'avantage d'être générale; elle ne suppose, du moins au départ, aucune hypothèse restrictive; elle permet d'entrevoir des solutions théoriques pour représenter les écoulements multiphasiques ou les transferts en milieu déformables à partir de la connaissance d'équations microscopiques appropriées. Elle est utilisée pour appréhender d'autres phénomènes de transfert dans les milieux poreux (diffusion, adsorption, convection). La même technique est employée une deuxième fois pour des prises de moyenne à grande échelle dans le cas de milieux hétérogènes.

La méthode a l'inconvénient d'être plutôt hermétique pour le lecteur non averti, alors que chaque nouvelle application est subordonnée à de nouveaux calculs, et donc à la maîtrise complète de cette théorie

d'intégration. De plus il est préférable d'avoir une idée sur la nature des équations macroscopiques pour pouvoir effectivement les retrouver.

III) CHANGEMENT D'ECHELLE PAR SIMULATION NUMERIQUE: REPRESENTATION DISCRETE DE L'ESPACE PORAL

On a déjà cité l'existence de résultats globaux, macroscopiques, pour des écoulements de fluide dans un pore de forme très simple. Un certain nombre de travaux représentent alors le milieu poreux par un ensemble "équivalent" de tubes ou de fractures, respectant une loi de distribution de pores connue. La perméabilité d'un faisceau de tubes ou de fractures identiques et parallèles est aisément obtenue à partir des conductances élémentaires. Mais pour une répartition aléatoire des pores dans plusieurs directions, même sur un maillage régulier, on procède par simulation numérique. La forme du réseau est variable suivant les travaux et la dimension euclidienne de l'espace, la distribution des pores peut être fractale ou log-normale, théorique ou mesurée, la répartition des pores (comme liens ou sites du réseau) aléatoire ou périodique.

C'est l'approche utilisée par exemple pour mettre en évidence des seuils critiques de pression ou de densité des pores à partir desquels l'eau percole à travers un réseau donné (Groupe poreux, 1985) : A une grande étendue de la distribution de la taille des pores correspond une large gamme de perméabilités locales qui induisent des écoulements préférentiels. Encore faut-il que ces pores soient suffisamment bien connectés pour que la perméabilité globale ne soit pas nulle. C'est seulement à partir d'un seuil précis de connectivité n_c (dépendant des détails du réseau) qu'une perméabilité globale apparaît (fig 3); elle s'exprime, pour un réseau de taille suffisamment grande devant la longueur de corrélation, suivant une forme classique en théorie de la percolation:

$$K = K_0 (n - n_c)^\mu \quad [5]$$

où μ est un exposant universel ne dépendant que de la dimension euclidienne.

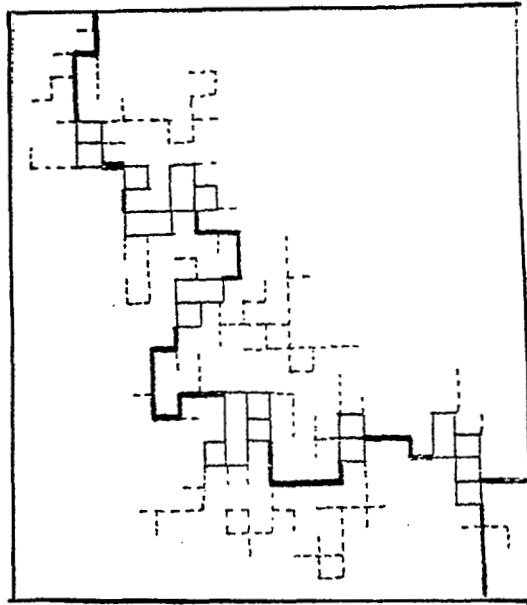


2.a $n < n_c$

2.b $n = n_c$

2.c $n > n_c$

Percolation sur un ensemble d'aiguilles de position d'orientation aléatoires. n est le nombre total d'aiguilles sur la figure, n_c est le seuil de percolation.



Amas infini de percolation sur un réseau carré. Les traits pointillés représentent les bras morts et les traits gras les liens sensibles.

Figure 3. Réseau de percolation (Groupe poreux 1985)

Une méthode analogue permet de simuler de écoulements en milieu non saturé, ou la dynamique, au sein du milieu poreux ainsi schématisé de deux phases non miscibles. On utilise la loi de Laplace, qui exprime la pression capillaire sur l'interface séparant deux fluides non miscibles comme inversement proportionnelle au rayon de courbure; cela indique que les pores d'une taille donnée ne peuvent être remplis par le fluide "*non mouillant*" qu'à partir d'un certain seuil de pression capillaire. Là aussi, l'existence de chemins préférentiels dépendant de la répartition géométrique de pores sur le réseau, les transitions brutales des processus de drainage ou d'imbibition observés macroscopiquement à l'échelle du réseau est en contradiction avec l'approche darcynienne classique, "*la notion de perméabilités relatives des deux fluides ne restant valable que si l'on peut définir un volume élémentaire représentatif à l'échelle duquel le mélange des deux fluides peut être considéré comme homogène*" (Groupe poreux, 1985). Les inhomogénéités peuvent en effet s'étendre sur de très grandes échelles de longueur au voisinage de la saturation par un des deux fluides.

Cette représentation du sol comme un ensemble de pores idéalisé, conçus comme des réservoirs élémentaires au comportement hydrique connu est aussi présentée par Rieu(1990) qui l'utilise pour exprimer les caractéristiques hydrodynamiques d'un sol en fonction de sa dimension fractale.

IV) CHANGEMENT D'ECHELLE PAR SIMULATION NUMERIQUE. REPRESENTATION DISCRETE DE L'ESPACE PORAL ET DISCRETISATION DU FLUIDE. LES MODELES DE "GAZ SUR RESEAU"

A) Méthode

Récemment, de nouveaux modèles de simulation ont fait leur apparition en dynamique des fluides. On peut les considérer comme une application de la méthode des automates cellulaires (introduits par Von Neumann et Ulam), qui peuvent être définis comme des systèmes dynamiques où le temps, l'espace, et la "variable dépendante" sont discrétisés. La discrétisation de la variable dépendante (le flux hydrique en ce qui nous concerne) constitue la principale innovation par rapport aux méthodes de différences finies. Les automates cellulaires peuvent être représentés par un nombre fini de bits à chaque site d'une maillage régulier de l'espace. L'automate évolue discrètement, l'état de chacun des sites étant mis à jour à chaque itération temporelle par application de règles déterministes ou non, impliquant seulement un nombre fini de sites voisins.

La classe d'automates cellulaires définie de façon à ce que le comportement "moyen" obéisse aux équations hydrodynamiques de mouvement d'un fluide incompressible porte le nom de gaz sur réseau.

B) Détermination pratique de réseaux et de règles

Les mises au point successives du type de réseau ainsi que des règles d'évolution des particules à une échelle quasi "pré-microscopique" sont guidées par un objectif de base: retrouver les équations traditionnelles de mécanique des fluides et les lois de comportement macroscopique précédemment bien établies, tout en respectant des principes élémentaires de physique, tels que la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Exemple Le réseau carré du modèle HPP (Hardy, de Pazzis, Pomeau)(fig.4).

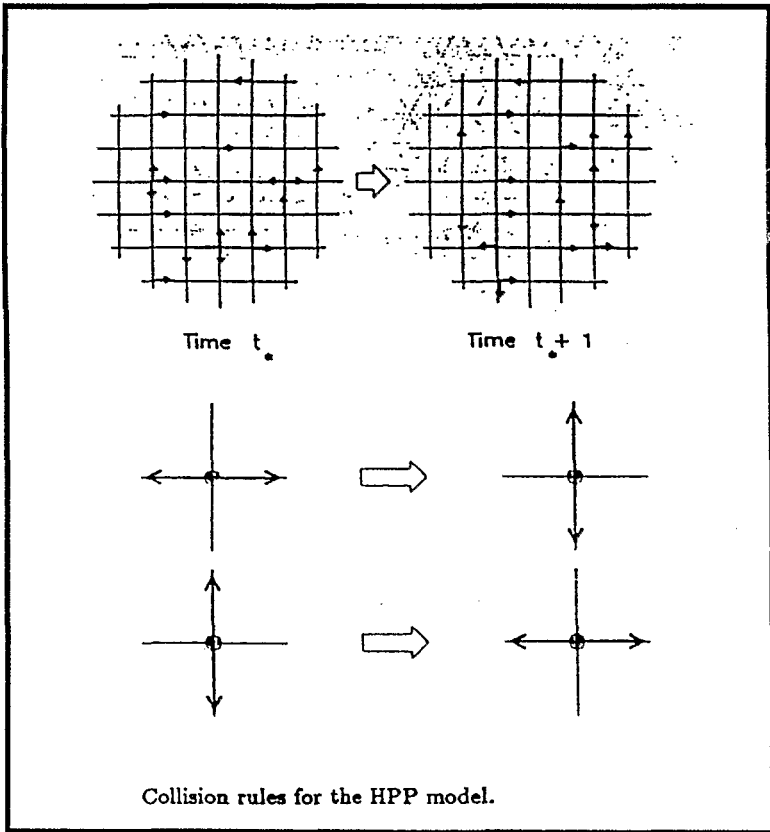


Figure 4. Modèle de "gaz sur réseau" HPP en dimension 2 (Frisch et al 1987)

Le modèle initial date de 1976 et a été développé en 2 dimensions. Les particules de fluide sont situées aux noeuds d'un réseau carré. Les vitesses de deux particules occupant un même site ne peuvent avoir

la même direction (principe d'exclusion) . Chaque site ayant quatre plus proches voisins est représenté par un vecteur de dimension 4, les composantes étant booléennes, 0 pour "occupé" et 1 pour "vide". A chaque itération d'une unité de temps, le système évolue en subissant alternativement une première phase de propagation par translation des 4 images binaires et une deuxième phase de collision: lorsque deux particules arrivent au même site avec deux directions opposées, elles repartent dans les deux autres directions orthogonales .La dynamique de ce modèle est invariante pour toute transformation conservant les symétries du réseau, en particulier pour les rotations à 90 degrés. Ce n'est pas suffisant pour respecter l'isotropie des flux. Cela conduit au choix maintenant communément accepté d'un réseau hexagonal en deux dimensions: le modèle FPP (Frisch,Hasslacher,Pomeau) (fig. 5).

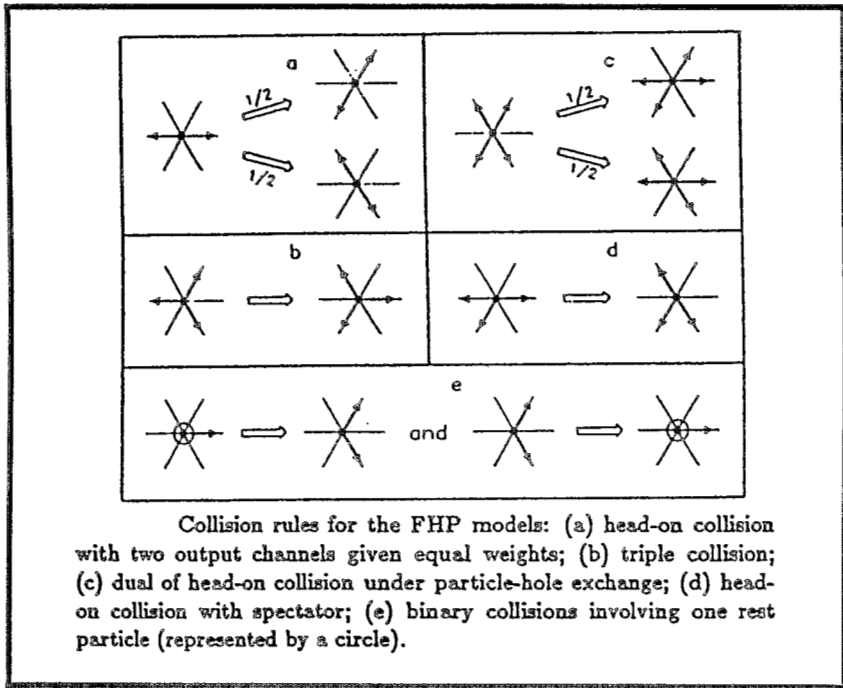


Figure 5. Réseau hexagonal: règles de collision pour le modèle FHP en dimension 2 (Frisch et al 1987)

Six directions c_i de déplacement sont possibles à chaque noeud. Certains auteurs rajoutent une septième composante au vecteur booléen $n_i(x)$ représentant l'état d'un site x , introduisant des particules au repos (de vitesse nulle). Toutes les règles de collision conservant globalement la masse ($N = \sum_{i,x} n_i(x)$) et la quantité de mouvement ($G = \sum_{i,x} n_i(x) c_i$) sont acceptées. Des règles non-déterministes (tirage au sort) sont introduites lorsque plusieurs issues sont possibles à la suite d'une collision.

En trois dimensions, aucun réseau régulier n'ayant pu exhiber les symétries requises pour respecter l'isotropie, l'extension de la méthode s'effectue pour l'instant sur le projeté d'un réseau hypercubique à faces centrées construit initialement en dimension 4 (fig. 6)

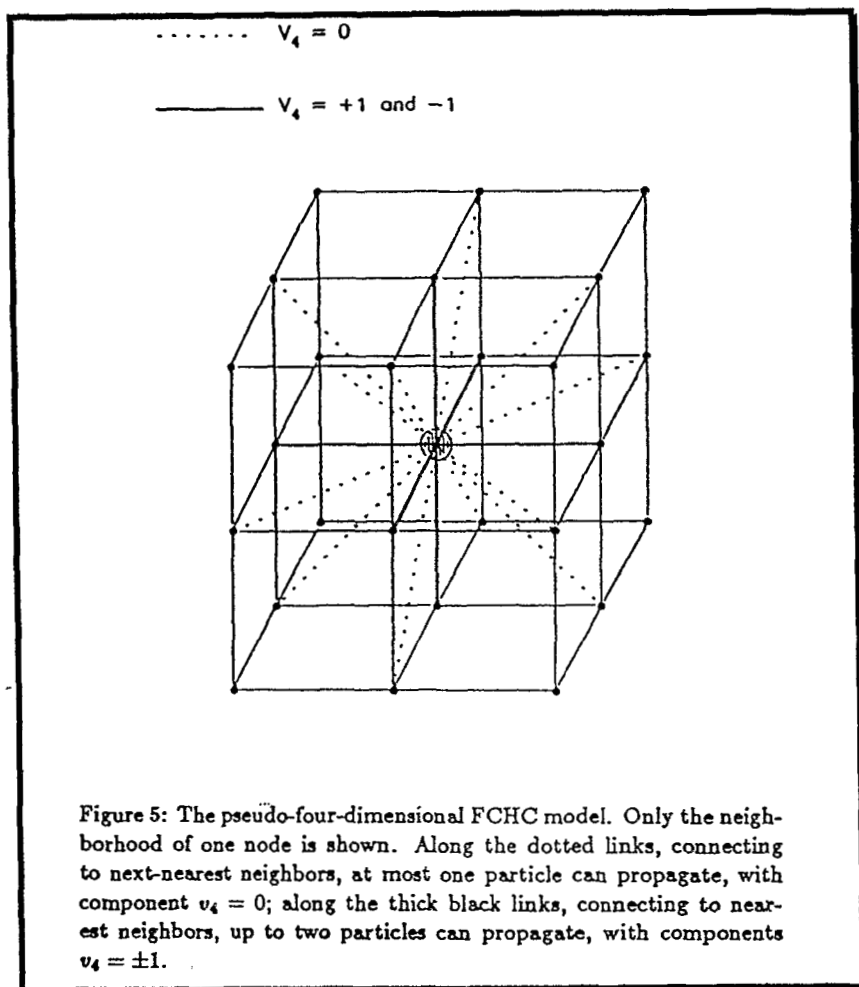


Figure 6. En dimension 3, projection du modèle FCHC (Frisch et al 1987)

C) Démonstrations théoriques d'un transfert d'échelle "adéquat"

Les démonstrations théoriques visent essentiellement à retrouver les équations de Navier Stokes, à partir de considérations statistiques et d'une prise de moyenne sur des sous ensembles du réseau de taille convenable.

Les règles de déplacement et de collision peuvent être traduites sous forme d'équations "microdynamiques" booléennes:

$$Ni(x+ci, t+1) = Ni(x, t) + \sum_{s, s'} A(s, s') (s'_t - s_t) \prod_j n_j^{s_j} (1 - n_j)^{s'_j}$$

Ces équations de Boltzmann relient les composantes binaires du vecteur d'état en chaque site entre l'instant t et l'instant $t+1$. Elles s'écrivent sous une forme probabiliste en considérant l'ensemble de réalisations possibles du modèle. Des solutions exactes existent pour les situations d'équilibre. L'expression statistique de quantités moyennes, (population moyenne, densité moyenne, quantité de mouvement moyenne, vitesse moyenne) est explicitée.

Le passage au continu est approximé par l'évolution du système pour des états d'équilibre locaux rapprochés dans le temps et dans l'espace; une équation de continuité est induite par le respect de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement; au moyen de développements mathématiques classiques en physique statistique mais relativement complexes, l'émergence de l'équation de Navier-stokes est acquise.

D) Vérifications expérimentales et principaux développements

En fait l'essentiel des résultats est obtenu par simulation numérique. Les premiers succès de la méthode ont entraîné de nombreux développements. Une application classique est la simulation des écoulements dans un milieu poreux: On retrouve la loi de Darcy

En deux dimensions, et sur un réseau hexagonal, Jeulin (1979) simule la circulation de fluide dans un conduit poreux. Les parois latérales et la présence de grains sont des limites à l'écoulement introduisant une nouvelle règle de collision: une particule butant sur un obstacle repart dans la direction opposée. (Cela reproduit les conditions classiques de non-glissement sur les interfaces liquide-solide, puisque la vitesse moyenne est ainsi nulle sur les parois). Si n particules sortent du conduit au travers des bords gauche et droits laissés "ouverts", n particules sont réinjectées pour simuler l'immersion dans un milieu infini. Pour créer un gradient de pression horizontal, des particules en nombre pn sont introduites sur le bord gauche et animées d'une vitesse horizontale vers la droite. La conservation de la quantité totale de particules est alors assurée par l'introduction de 6 fois $n(1-p) / 6$ particules sur les bords à chaque itération (fig.7) La variation de p de 0 à 1 permet de faire varier le gradient de pression. Une stabilisation du flux hydrique est assez rapidement obtenue. Le flux est alors proportionnel au gradient de pression, ce qui constitue une reproduction numérique de l'expérience de Darcy (Fig.8).

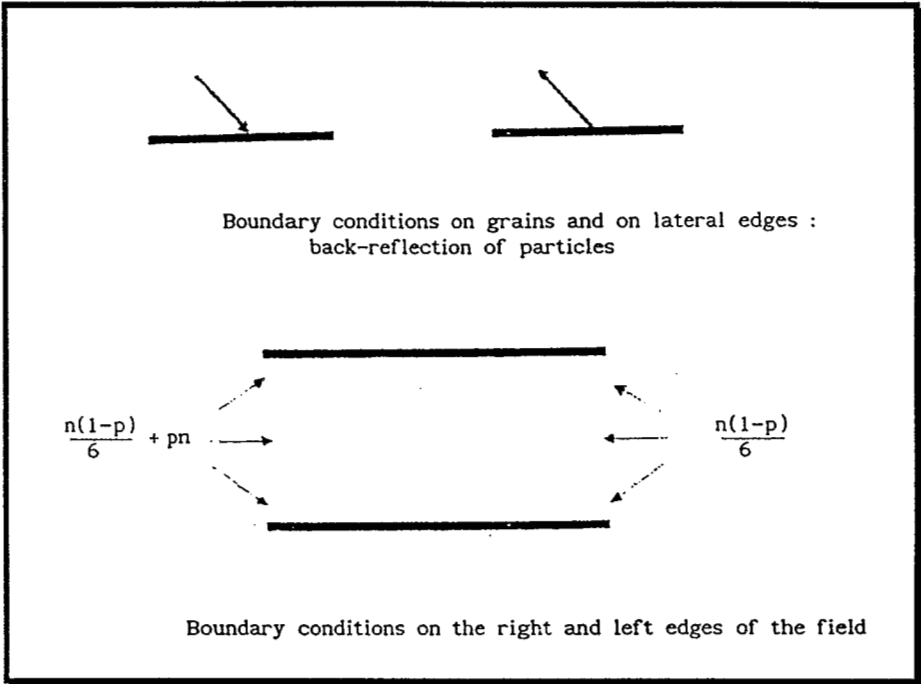


Figure 7. Conditions aux limites d'un modèle de gaz sur réseau dans le cas d'un système poreux fini (Jeulin 1990)

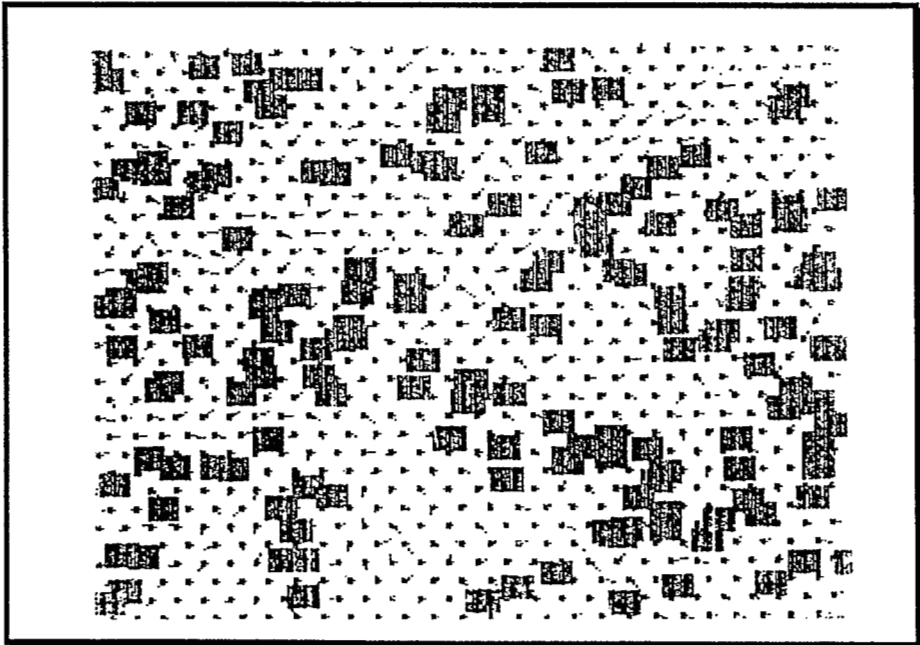


Figure 8. Particules de fluide circulant dans un milieu poreux aléatoire. Vérification "expérimentale" de la loi de Darcy (Jeulin 1990)

Rothman et Keller (1988) ont étendu la méthode à la simulation d'écoulements bi-phasiques en dimension 2.

Deux types de particules coexistent, représentant deux fluides immiscibles, "bleu" et "rouge". Sur un réseau hexagonal, deux vecteurs aux 7 composantes binaires caractérisent les vitesses possibles pour chaque "espèce" de particules. La présence d'une particule bleue et d'une rouge en un même site et dans la même direction est exclue. La masse de chacun des fluides reste constante et la quantité de mouvement totale est conservée en chaque site. Lors d'une collision, lorsque différentes issues sont possibles, les solutions qui encouragent le regroupement de particules de même couleur sont choisies (fig. 9) (Formellement, les règles de collision sont celles qui minimisent le travail effectué par le flux contre le champ de couleur local). Un nombre plus grand de sites "voisins" est donc utilisé.

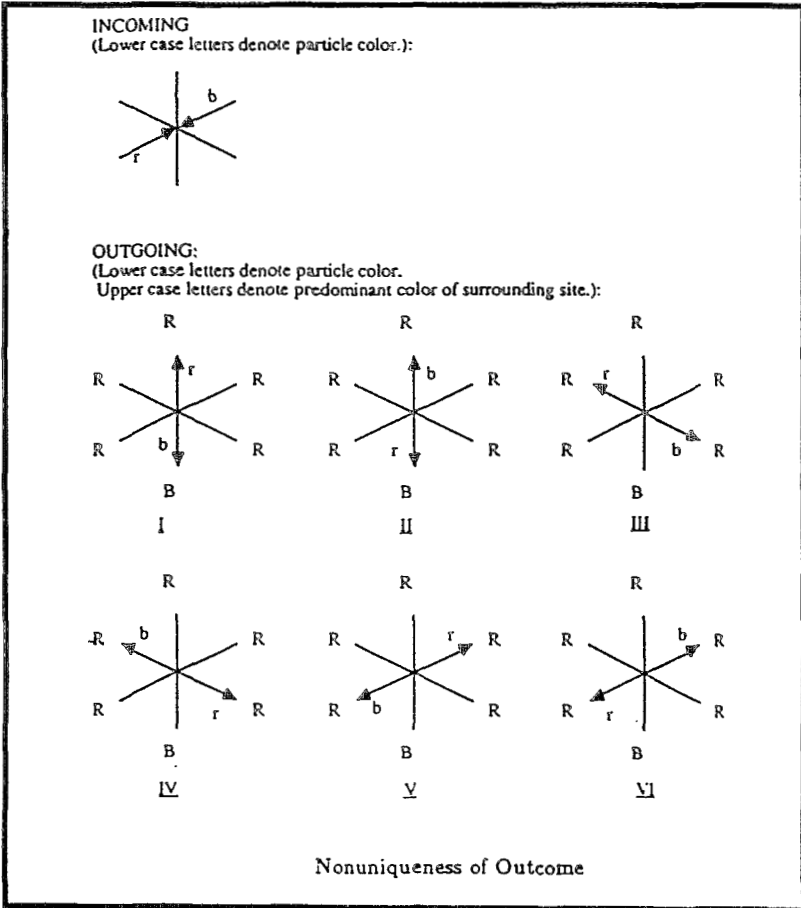


Figure 9. Regroupement des particules d'un même fluide (Rothman et Keller 1988)

A l'équilibre, les expériences numériques montrent que le modèle obéit à la loi de Laplace exprimant la tension superficielle aux interfaces.

Pour des situations initiales en déséquilibre (fluides homogénéisés), les simulations numériques reproduisent la séparation des phases, en accord avec l'expérience; assez loin de l'interface, à l'intérieur d'une des deux phases fluides, on retrouve la validité des équations de Navier-Stokes.(fig. 10)

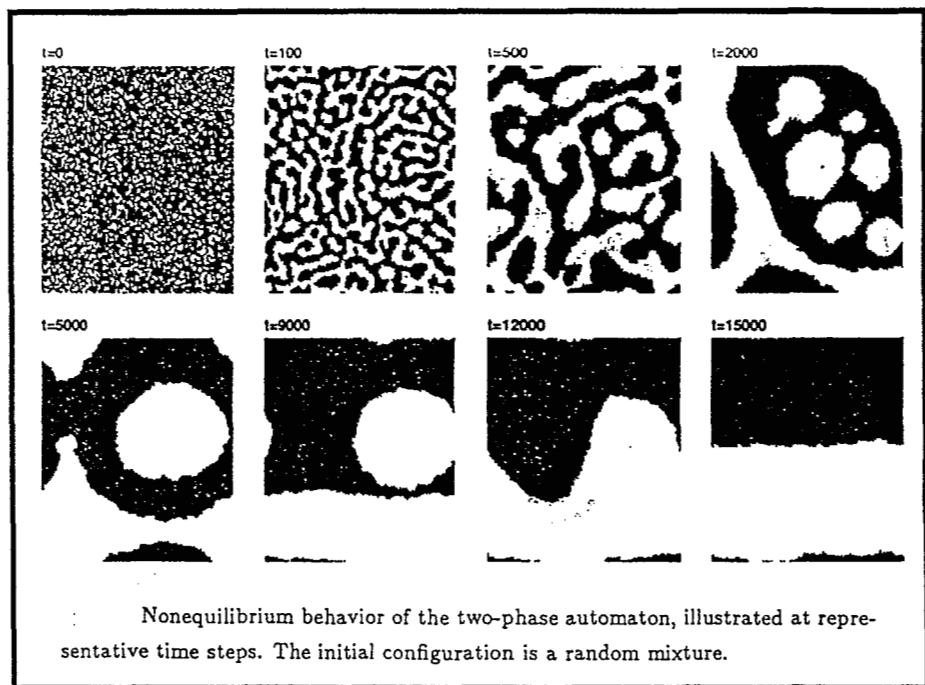


Figure 10. Les différentes étapes de la séparation de deux fluides non miscibles initialement homogénéisés (Rothman et Keller 1988)

Sans prétendre à l'exhaustivité, citons l'utilisation de la méthode:

- pour un mélange de 3 fluides (Gunstensen, 1989) ;
- pour tester l'aptitude du modèle à provoquer des transitions de phase par l'adjonction de règles d'interaction à distance entre particules de même nature (Appert, Zaleski, 1990) ;
- pour déterminer expérimentalement (numériquement) la perméabilité d'un lit de sphères en dimension 3 et comparer avec les bornes (Chang, 1989) supérieures et inférieures théoriques.

Dans les nombreuses applications rapportées, le type de comportement observé est en excellent accord avec la théorie; des phénomènes connus mais plus ou moins bien expliqués peuvent être

simulés. Par contre la confrontation du modèle avec des expériences réelles et des valeurs numériques mesurées n'a eu lieu que dans un petit nombre de cas de figure, principalement sur des modèles de réseaux capillaires gravés de type Lenormand.

E) Réflexions sur la méthode de transfert d'échelle

Dans ce cadre, la modélisation est la même quelle que soit la taille du réseau. Le changement d'échelle s'étudie simplement par la simulation d'un réseau plus grand. Le réseau peut être alors partitionné en des régions (macrolattice) regroupant plusieurs sites; une quantité hydrodynamique telle que la vitesse macroscopique du fluide sur une région donnée est calculée comme moyenne des vitesses de toutes les particules présentes dans la région (coarse-grain averaging) .

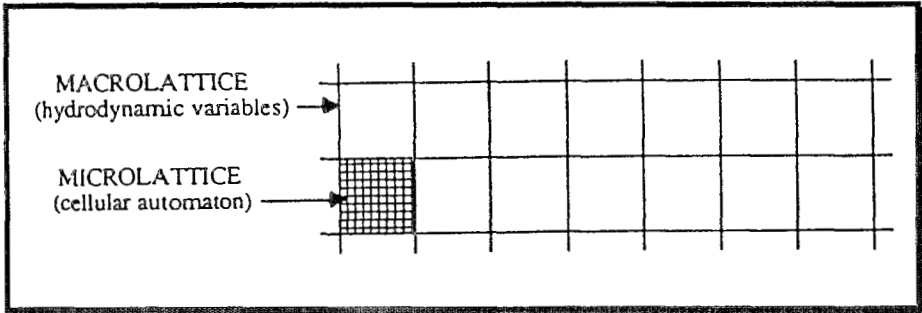


Figure 11. Prise de moyenne spatiale (Boghosian, Rothman 1988)

Il s'ensuit une approximation de la valeur de la variable microscopique qui ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs. (Par contre les erreurs d'arrondi des algorithmes de différences finies sur des nombres réels n'ont pas lieu d'exister) . La méthode introduit un bruit statistique sur l'estimation d'une variable macroscopique, en rapport avec l'échelle de la région sur laquelle s'effectue la prise de moyenne. La principale limitation est évidente: elle découle des possibilités de calcul des ordinateurs, qui ne seront jamais infinies.

Le transfert d'échelle est essentiellement empirique; il utilise la notion d'expériences numériques, parfaitement contrôlées; les équations microscopiques étant respectées, on peut tenter d'évaluer ce qu'elles induisent aux niveaux supérieurs dans diverses conditions.

On peut constater, peut-être avec étonnement que le respect d'un petit nombre de règles simples au niveau pré-microscopique conduit à un comportement global plus complexe (Stockes). Les phénomènes de transferts peuvent être décrits à une échelle encore supérieure par des équations à nouveau relativement simples (Darcy) dans certaines conditions restrictives.

"Lattice gases thus bridge not only the microscopic "molecular" and continuum scales, but also the macroscopic scale of volume-averaged flow. This traversal of scales presents an attractive opportunity for the numerical study of the relationships between the microscopic structure of a porous medium and macroscopic parameters such as permeability" (Rothman,1988) .

S'étant libéré de la nécessité de conditions aux limites simples, la méthode des gaz sur réseau permet l'étude de l'influence de géométries quelconques sur des écoulements. Dans le cas d'un sol, on pourrait même envisager la simulation de modifications dynamiques de cette géométrie (exemple: retrait gonflement). Le problème du transfert d'échelle se pose alors de nouveau, sur un autre plan, celui de la détermination de caractéristiques morphologiques et structurales, de la modélisation du milieu lui-même et non de son comportement; sachant que les données expérimentales sont disponibles à différentes échelles. et que le sol peut présenter plusieurs niveaux d'organisation intermédiaires entre le micro et le macroscopique.

V) CONCLUSION

La simplicité relative des modèles formulés de façon discrète dès leur conception contraste avec le formalisme mathématique nécessaire à l'expression d'équations différentielles. Les résolutions concrètes des équations n'étant presque toujours envisageables qu'après approximations, discrétisation et résolution numérique, il est tentant d'utiliser des méthodes résolument discrètes, éventuelle même au prix d'approximations initiales qui peuvent paraître simplistes. Les techniques présentées restent pour l'instant dans le domaine théorique, peut-être à cause de leur nouveauté. Les premiers succès des méthodes de gaz sur réseau incitent à construire des représentations schématiques du réel sous forme d'interactions simples entre objets élémentaires, croyant que la complexité de la dynamique globale résulte essentiellement de la juxtaposition d'un grand nombre d'évènements élémentaires. Le transfert d'échelle est alors analysé au moyen d'expériences numériques. Un telle approche est par essence informatique. Il reste à trouver un compromis entre le niveau de discrétisation et les temps de calcul.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Appert C.,S.Zaleski, 1990. Lattice Gas with a liquid-gas transition. Phys. Rev. Lett 64,1-4.
- Boghosian B. M. , D. H. Rothman, 1998. A Cellular-Automata Simulation of Two Phase Flow on the CM2-Connection Machin Computer, MIT Porous Flow Project, report no 1, edited by D.H.Rothman,M.I.T.,Cambridge, Mass.

- Chang C., 1989. Numerical studies of the permeability of a 3D model geometry. MIT Porous Flow Project, report no 2, edited by D.H.Rothman, M.I.T., Cambridge, Mass.
- De Marsily G., 1981. Hydrogéologie quantitative, Masson Paris.
- Frisch U., D.d'Humières, B.Hasslacher, P.Lallemand, Y.Pomeau, J.P.Rivet, 1987. Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions. Complex Systems 1, 649-707.
- Groupe poreux PC, Baudet C., E.Charlaix, E.Clément, J.P.Hulin, E.Guyon, C.leroy, 1985. Scaling concepts in porous media. in "scaling phenomena in disordered systems" NATO conferences, ed. Plenum, London
- Gunstensen A.K., 1989. A three-phase immiscible lattice gas. MIT Porous Flow Project, report no 2, edited by D.H.Rothman, M.I.T., Cambridge, Mass.
- Jeulin D., Tang Chang Qing, 1989. Lattice gas flow simulations in 2-D random porous media. Rapport Ecole des Mines de Fontainebleau.
- Matheron G., 1979. L'émergence de la loi de Darcy. Publication interne. Ecole des mines de Fontainebleau.
- Rieu M., 1990. Représentation fractale du sol et de son fonctionnement hydrique. Seminfor "Transfert d'échelle".
- Rothman, D.H., J.M.Keller, 1988. Lattice gas automata for immiscible two phase flow. J.Stat.Phys.52,1119.
- Whitaker S., 1986. Flow in porous media: A theoretical Derivation of darcy's law. Transport in Porous Media pp 3-25.
- Whitaker S., M.Quintard, 1989 Cours avancé sur les transferts dans les milieux poreux homogènes et hétérogènes. Prise de moyenne à l'échelle locale et Prise de moyenne à grande échelle.
- Wilson K., 1989. Les phénomènes de physique et les échelles de longueur. in L'ordre du chaos, Bibliothèque Pour la science, Editions Belin.

REPRESENTATION FRACTALE DU SOL ET DE SON FONCTIONNEMENT HYDRIQUE

RIEU M.

RESUME

Une représentation fractale du sol, considéré comme un milieu à la fois fragmentaire et poreux, est proposée. Ce modèle met en jeu la définition d'un domaine d'échelles dans lequel une structure fractale est développée, ainsi que de la fragmentation incomplète d'un élément de sol en classes de fractures semblables et un volume résiduel. Des relations générales entre porosité, dimension fractale et rapport de similitude sont établies. Les principales prédictions de ce modèle sont illustrées par des données déjà publiées sur des sols de textures différentes :

- (i) Une dimension fractale < 3 ;
- (ii) Une relation inverse entre la taille et la densité des agrégats;
- (iii) Une relation exponentielle entre la taille et le nombre des agrégats;
- (iv) Une relation inverse entre le potentiel de l'eau dans la porosité et les puissances croissantes du rapport de similitude.

INTRODUCTION

La structure du sol, "faite de particules et d'éléments structuraux...formés par l'agrégation de particules plus petites" (Baver et Rhoades, 1932) a été étudiée intensivement par les physiciens du sol durant les dernières décennies. L'objectif essentiel était de déterminer "l'état d'agrégation" du sol de façon à rendre compte de "la variation de la structure ou de l'agrégation des sols" (Alderfer, 1946). Ce problème classique de la physique du sol a pris récemment une nouvelle dimension avec la prise de conscience que, parce que le sol est à la fois un milieu fragmentaire et un milieu poreux, une représentation fractale de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1986;

Feder, 1988). Cette question est brièvement étudiée dans les pages qui suivent. Après le rappel de quelques propriétés de la structure du sol, une structure fragmentaire fractale est présentée. Les propriétés de cet objet fractal sont comparées à celles du sol et son aptitude à représenter la structure du sol sont analysées. La possibilité de définir une structure fractale équivalente à celle du sol est confirmée.

1. LA STRUCTURE FRAGMENTAIRE DU SOL ET SES PROPRIETES

Quelle que soit sa taille, un élément de sol présente rarement un aspect continu. Une motte semble parcourue par un réseau de fractures de sorte qu'elle peut être aisément fragmentée en éléments plus petits. Une observation détaillée de ces derniers révèle encore des fissures fines et apparemment discontinues, si bien qu'une action mécanique ménagée, comme un choc ou une humectation rapide, produit une nouvelle fragmentation en éléments encore plus petits où l'on distingue toujours quelques fissures, d'autant plus rares que les éléments sont petits. Finalement on n'observe plus que des éléments très fins et compacts.

La structure fragmentaire du sol est très généralement observée. Elle peut être décrite comme l'imbrication d'éléments de toutes tailles, séparés par un réseau complexe de fractures et de fissures. Ces dernières constituent une porosité particulière qui représente une part importante de la porosité totale du sol.

Si l'on mesure la pression de l'eau dans un élément de sol de la taille d'une motte, pour une teneur en eau évoluant de la saturation à l'état sec, on constate que cette pression ne varie pas de façon continue mais se stabilise à des paliers successifs. Si l'on indexe par un nombre entier i ces paliers et l'on note h_i la valeur correspondante de la pression, on vérifie que (Fig. 1) :

$$\log \left(\frac{h_i}{h_0} \right) = -i \log (r) \quad (1)$$

où h_0 est la valeur la plus proche de 0, mesurée au palier que l'on indexe 0, et r est un nombre positif inférieur à 1.

Qu'il s'agisse de tubes capillaires ou de fissures, la pression de l'eau vérifie la loi de Laplace que l'on peut exprimer simplement par:

$$h_i = \frac{R}{\rho_i} \quad (2)$$

où ρ_i représente le rayon du tube ou la largeur de la fissure et R une constante faisant intervenir la densité de l'eau, sa tension de vapeur et la constante de la gravité.

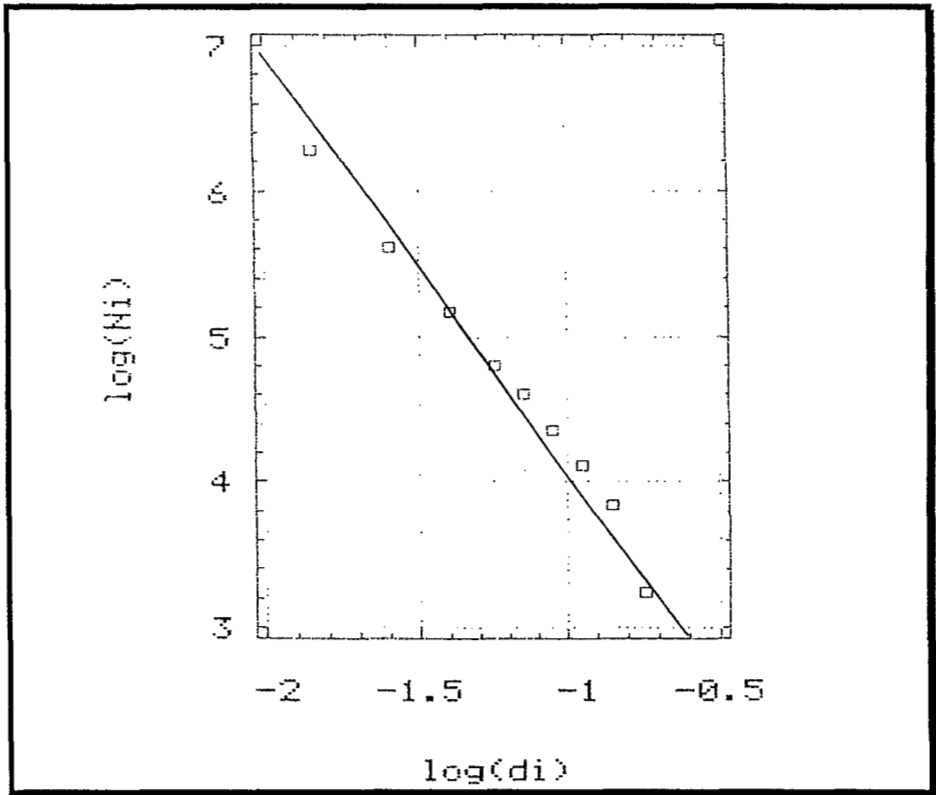


Figure 1. Valeurs stationnaires de la pression de l'eau dans le sol de l'Ariana (Données de Bousnina, 1984)

Il résulte des équations (1) et (2) que:

$$P_i = P_0 r^i \quad (3)$$

L'équation (3) exprime que la largeur des fissures décroît en raison des puissances croissantes du facteur d'échelle r . En d'autres termes, dans l'élément de sol étudié, la taille des fissures est réglée par une homothétie interne.

L'élément de sol peut être fragmenté en une collection d'agrégats dont la taille est caractérisée par leur diamètre moyen d_i . On note d_m le diamètre des agrégats les plus petits et d_0 celui des plus grands.

On vérifie que le nombre N_i d'agrégats de taille supérieure à un diamètre donné d_i ($d_m \leq d_i \leq d_0$) est tel que (Fig. 2):

$$\log(N_i) = -D \log(d_i) + A \quad (4)$$

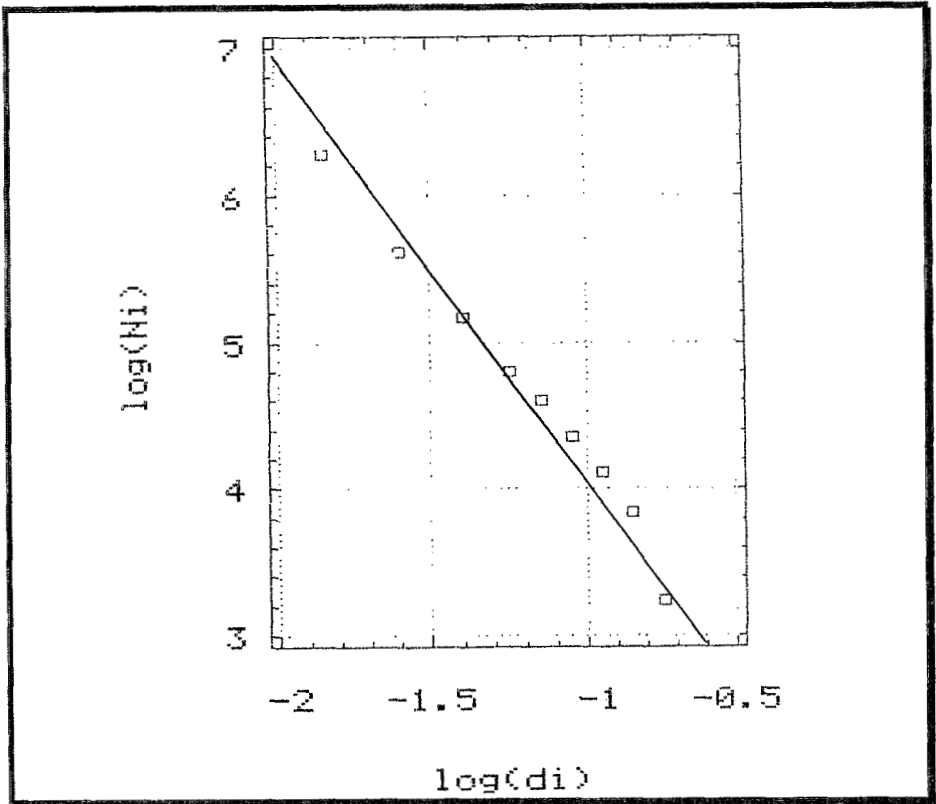


Figure 2. Distribution du nombre d'agrégats en fonction de leur taille dans le sol de l'Ariana (Données de Bousnina, 1984)

où A et D sont des constantes ($2 < D < 3$).

L'équation (4) exprime que le nombre des agrégats croît de façon strictement exponentielle lorsque leur taille diminue. Si l'on considère que la fragmentation de l'élément de sol initial se produit selon les fissures qui le parcourent, on en conclut que le réseau qu'elles forment est strictement organisé.

La mesure de la densité des agrégats des différentes tailles apporte une information complémentaire. On constate que les agrégats sont d'autant plus denses que leur taille est réduite, ce qui est cohérent avec les observations précédentes sur la fissuration des agrégats, et que la variation de la densité est décrite par la loi exponentielle (Fig. 3) :

$$\log(\sigma_i/\sigma_0) = -C \log(d_i/d_0) \quad (5)$$

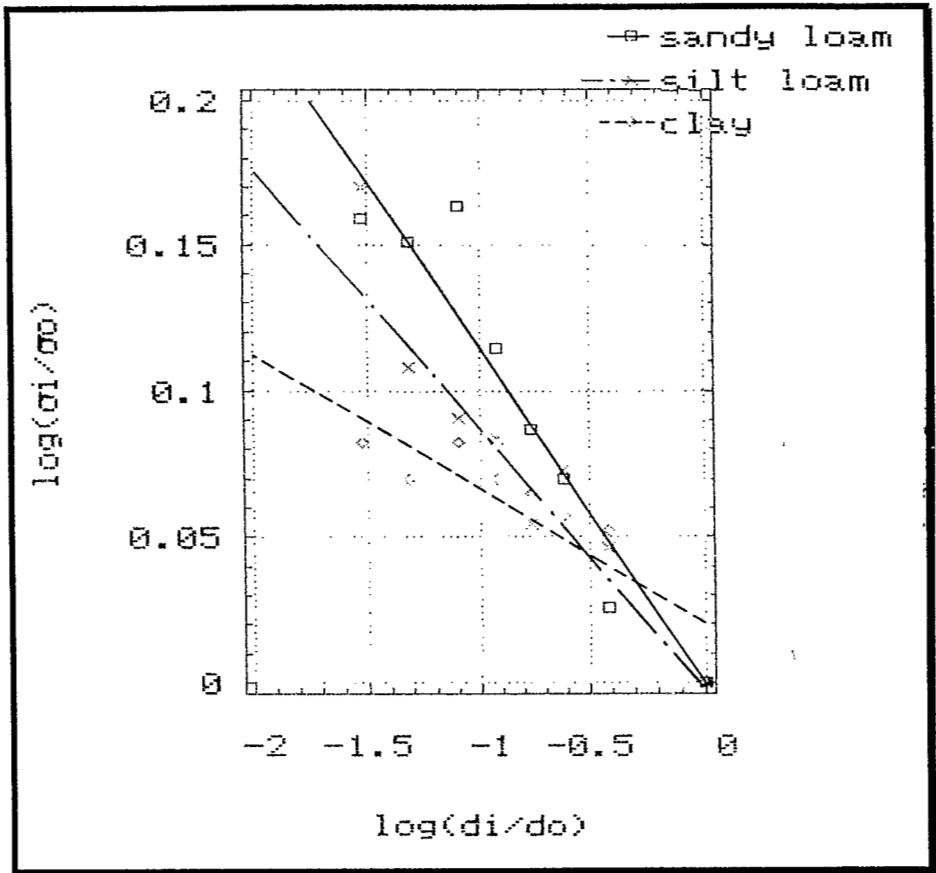


Figure 3. Variation de la densité d'agrégats de trois sols de texture différente en fonction de leur taille (Données de Chepil, 1950)

où σ_1 est la densité d'un agrégat de diamètre d_1 et C un nombre positif inférieur à 1. L'équation (5) exprime que la porosité, ou le taux de fissuration, des agrégats varie de façon exponentielle en raison de leur taille. On notera que une densité uniforme pour tous les agrégats correspond à la condition : $C = 0$.

Les observations qui précèdent montrent que un milieu apparemment hétérogène et de structure complexe comme le sol comporte en fait, dans un domaine de tailles où le caractère fragmentaire de sa structure et de sa porosité est prédominant, des éléments d'organisation très robustes : Le degré de fissuration des agrégats qui le constituent dépend étroitement de leur taille; les fissures forment un réseau organisé et leur largeur est réglée par une homothétie interne. Toutefois ces propriétés ne semblent vérifiées que dans un domaine d'échelles limité. On peut observer sur la Figure (4) que l'homothétie des tailles des fissures n'est vérifiée qu'entre deux largeurs particulières.

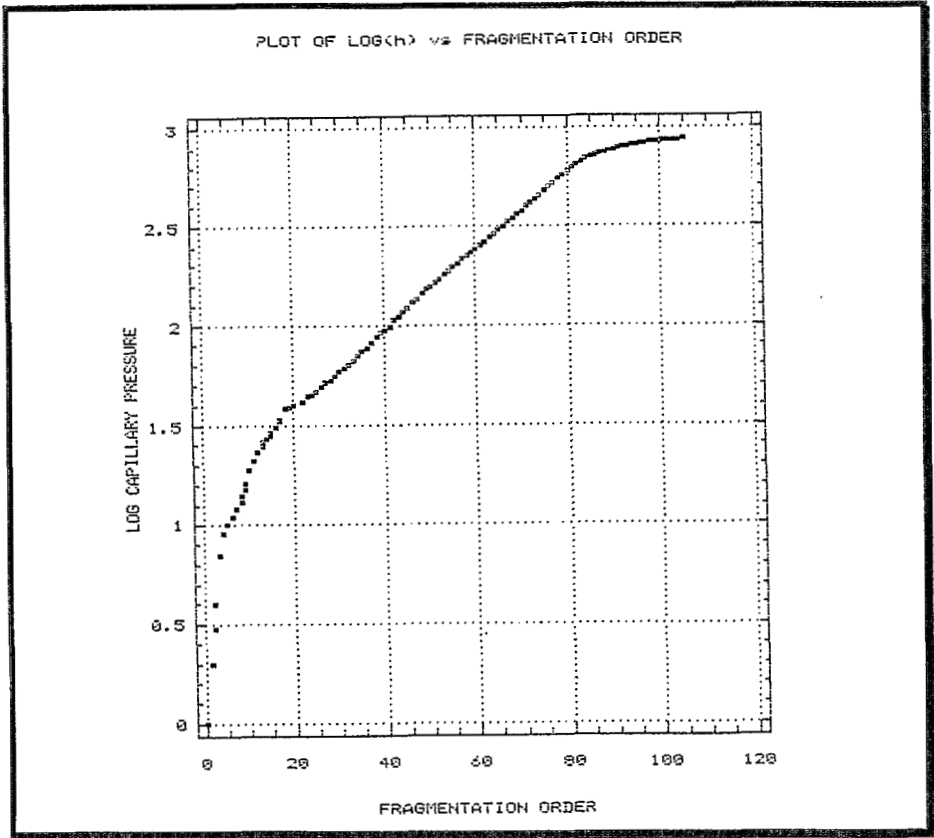


Figure 4. Valeurs stationnaires de la pression de l'eau dans un sol ferrallitique (Données de Braudeau, 1990)

Par ailleurs, la densité des agrégats ne peut pas être supérieure à la densité des particules élémentaires ni inférieure à la densité apparente du sol lui-même. Les éléments d'organisation identifiés précédemment ne sont que des propriétés particulières d'une structure générale au sein de laquelle elles trouvent leur lien. Une telle structure, en raison du type même de propriétés qu'elle possède, présente des similitudes frappantes avec une structure fractale.

2. OBJETS FRACTALS ET STRUCTURE FRAGMENTAIRE FRACTALE

La "Poussière de Cantor" est un objet fractal fragmentaire à une dimension dont l'initiateur est un segment de droite (Fig. 5). Il présente la propriété fondamentale commune à tous les objets fractals : une homothétie interne, définie par un rapport linéaire r inférieur à 1, qui fait correspondre à tout élément un nombre constant N d'éléments transformés. Sa dimension fractale est définie en fonction des paramètres r et N (Mandelbrot, 1983) :

$$D = \log(N)/\log(1/r) \quad (6)$$

ou encore :

$$Nr^D = 1 \quad (7)$$

Etant donné une forme initiale et un "générateur" qui précise les positions respectives des produits de chaque étape de l'homothétie interne, deux des trois paramètres N , r et D suffisent à définir un objet fractal.

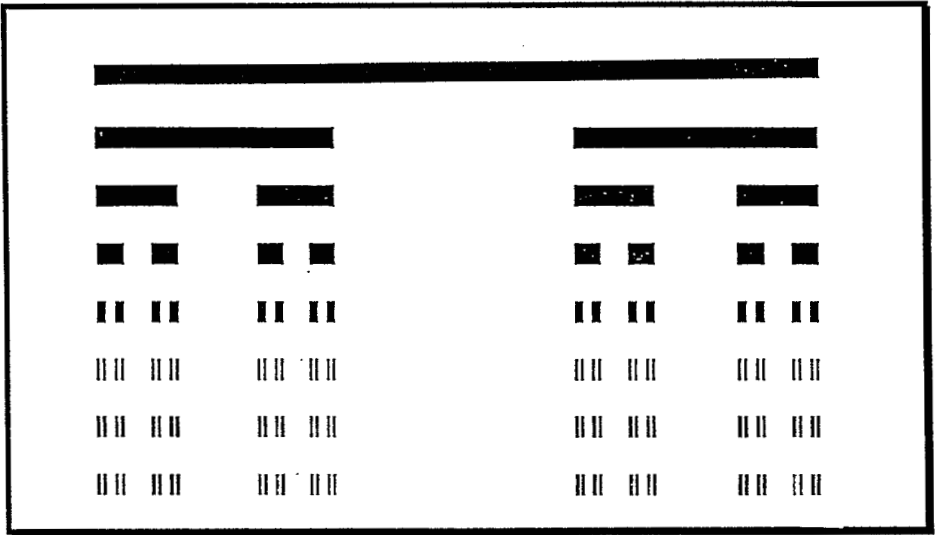


Figure 5. Les 7 premières étapes du développement de la "Poussière de Cantor" (D'après Mandelbrot, 1983)

Dans le cas de la poussière de Cantor, l'initiateur est un segment de droite de longueur $d_0 = 1$, le générateur est tel que les éléments transformés sont alignés selon un axe confondu avec le segment initial, $r = 1/3$, $N = 2$ et $D = 0.6309$. On notera que aussi bien les éléments figurés que les lacunes ménagées par le développement du fractal vérifient l'homothétie interne. Toutefois, toutes les lacunes sont conservées tandis que les segments sont indéfiniment transformés en éléments de plus en plus petits; d'où le nom de poussière donné à cet objet fractal. La première étape de la construction crée 2 segments de longueur $d_1 = rd_0$ et l'étape m crée N^m segments de longueur $d_m = r^m d_0$: lorsque la longueur est multipliée par r , le nombre de segments est multiplié par N . On conçoit aisément que le nombre N_i de segments de longueur $d > d_i$ soit de la forme :

$$N_i = A d_i^{-D} \quad (8)$$

avec $d_i = r^i d_0$ et $A = (rd_0)^D$. La relation entre le nombre et la taille des éléments d'un objet fractal fragmentaire est une conséquence directe de la propriété d'homothétie interne. A ce titre, elle peut être considérée suffisante pour caractériser une distribution fractale (Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1986; 1989).

A deux dimensions, l'équivalent de la poussière de Cantor est le "Tapis de Sierpinski" ($N = 8$; $r = 1/3$; $D = 1.8928$), (Fig. 6)

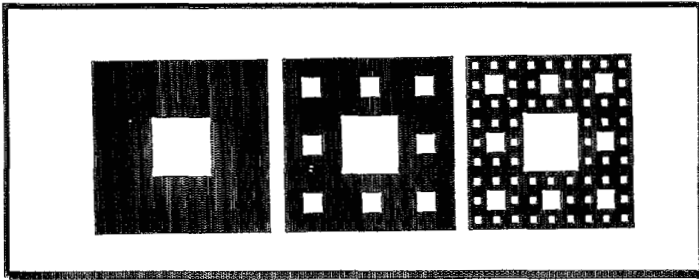


Figure 6. Les 3 premières étapes du développement du "Tapis de Sierpinski" (D'après Mandelbrot, 1983)

L'équivalent tridimensionnel du tapis de Sierpinski est l'"Eponge de Menger" ($N = 20$; $r = 1/3$; $D = 2.7268$), (Fig. 7). Cet objet fractal est un milieu poreux régulier, de type lacunaire. L'initiateur est un cube unitaire et le générateur est tel que l'espace vide dégagé dans chaque élément à toute étape i du développement du fractal soit concentré en un même lieu : Chaque cube d'arête d_i est décomposé en 27 petits cubes jointifs d'arête $d_{i+1} = rd_i$ dont 7 cubes, disposés selon les axes de symétrie principaux, sont vides.

On peut aussi envisager un générateur tel que l'espace vide créé à chaque étape soit régulièrement réparti autour de tous les petits cubes correspondants. Il en résulte une structure fragmentaire imbriquée où tout cube est décomposé en N petits cubes non jointifs, séparés par un réseau de fractures (Fig. 8). Pour les valeurs $N = 8$ et $r = 0.4665$ la dimension fractale d'une telle structure est identique à celle de l'éponge de Menger. Il découle de l'homothétie interne que les largeurs p_i des fractures successives sont dans le même rapport que les arêtes d_i des cubes: $p_{i+1}/p_i = d_{i+1}/d_i = r$.

Dans l'éponge de Menger comme dans la structure fragmentaire, aussi bien les éléments solides, jointifs ou non, que les espaces vides, cubiques ou plans, présentent la propriété essentielle d'homothétie interne de rapport linéaire $r < 1$ et ils vérifient une distribution fractale. Ces deux objets fractals peuvent être utilisés comme des modèles théoriques de milieux poreux. En raison de son générateur particulier, la structure fragmentaire comporte des similitudes remarquables avec la structure du sol analysée précédemment.

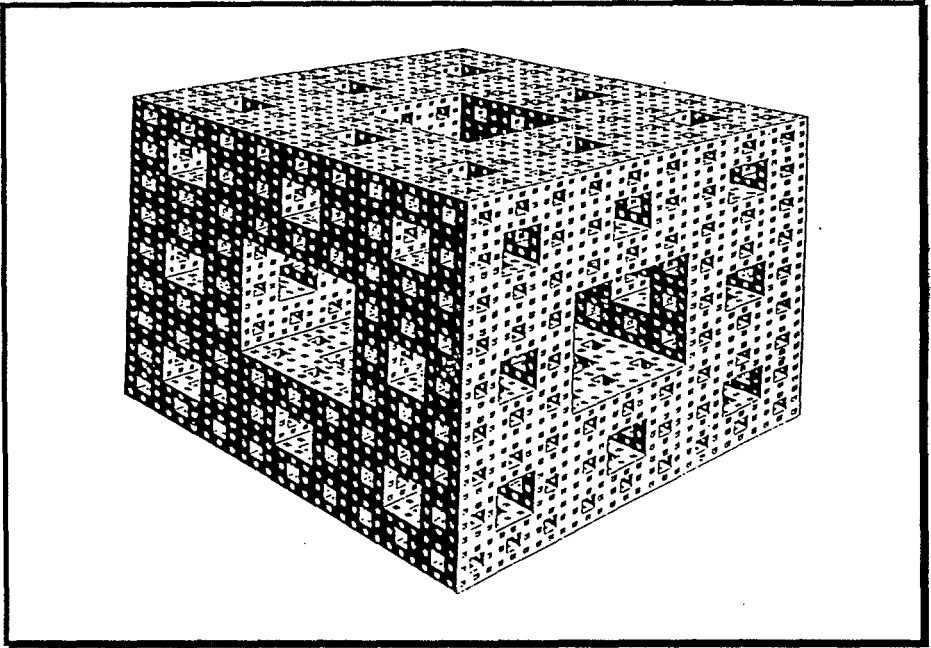


Figure 7. La quatrième étape du développement de l'"Eponge de Menger" (D'après Mandelbrot, 1983)

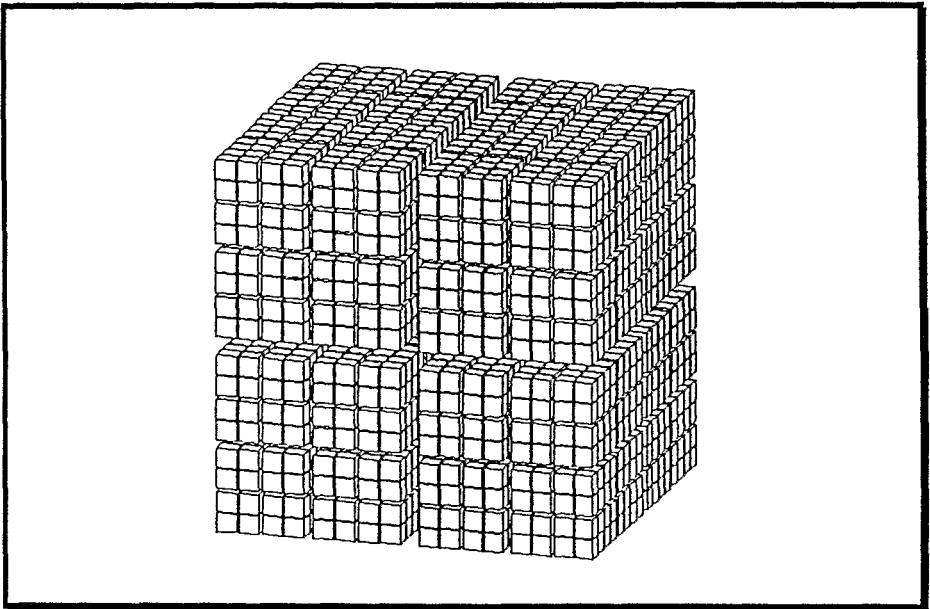


Figure 8. La quatrième étape du développement de la structure fragmentaire fractale (D'après Rieu et Sposito, 1990)

3. STRUCTURE FRAGMENTAIRE FRACTALE ET STRUCTURE DU SOL

Les objets fractals ne sont pas limités dans l'espace. On peut toutefois étudier leur structure dans un domaine d'échelles borné. Ce domaine peut être défini par la longueur d_m de l'arête de l'élément solide le plus petit et, soit le nombre m d'étapes de développement du fractal qui ont produit le plus petit élément, soit la longueur d_0 de l'arête de l'élément solide le plus grand. Ceci porte à quatre le nombre de paramètres nécessaires pour définir un objet fractal borné; par exemple : r , D , d_m et d_0 ou m .

Dans le cas de la structure fragmentaire, le cube d'arête d_m n'inclut aucune fracture; sa porosité est nulle et sa densité est notée σ_m . Le cube d'arête d_0 , et de densité σ_0 , contient toutes les fractures possibles dans le domaine considéré. Le cube d'arête d_{m-1} ne contient que des fractures de largeur p_{m-1} , tandis que la largeur des fractures les plus ouvertes contenues dans le cube d'arête d_0 est notée p_0 .

Tous les éléments de la structure fragmentaire vérifient une distribution fractale. Cette propriété est exprimée par (Cf. Eq. (8)) : $N_i = A d_i^{-D}$. Cette relation est équivalente à l'équation (4) vérifiée par la distribution des agrégats du sol. On en déduit que cette distribution est fractale ainsi que la distribution des fissures délimitant les agrégats. On observera que l'équation (4) permet de déterminer expérimentalement la valeur de la dimension fractale D de ces distributions.

On démontre (Rieu et Sposito, 1990) que, dans la structure fragmentaire fractale, la porosité de l'élément de taille d_0 est :

$$\phi_0 = 1 - (r^{3-D})^m \quad (9)$$

où r est le rapport d'homothétie interne et D la dimension fractale de la structure fragmentaire.

La porosité d'un élément de taille d_i est exprimée par :

$$\phi_i = 1 - (r^{3-D})^{m-i} \quad (10)$$

Dans les équations (9) et (10) la condition : $\emptyset < 1$ implique que la dimension fractale d'un milieu poreux est nécessairement inférieure à 3. Par ailleurs, il résulte de l'équation (7) que, pour une valeur

constante de N, si $D \rightarrow 3$, $r \rightarrow 1$ et $\emptyset \rightarrow 0$: Plus la valeur de la dimension fractale se rapproche de celle de la dimension Euclidienne, plus l'espace poral est réduit et finement divisé; inversement, plus la dimension fractale est inférieure à 3, plus la porosité est développée et grossière.

Si un processus d'humectation a rempli d'eau toutes les fractures de largeur inférieure ou égale à p_i , la teneur en eau volumique est :

$$\theta_i = (r^{3-D})^i - (r^{3-D})^m \quad (11)$$

La porosité d'un élément de taille d_i et de densité σ_i est par définition:

$$\emptyset_i = 1 - \sigma_i / \sigma_m \quad (12)$$

Il résulte de l'homothétie interne que $d_m = d_0 r^m$ et $d_i = d_0 r^i$. L'équation (10) peut être réécrite sous la forme :

$$\emptyset_i = 1 - (d_m / d_i)^{3-D} \quad (13)$$

En combinant les équations (12) et (13) on obtient :

$$\sigma_i / \sigma_m = (d_i / d_m)^{D-3} \quad (14)$$

De la même façon on a :

$$\sigma_0 / \sigma_m = (d_0 / d_m)^{D-3} \quad (15)$$

et la combinaison des équations (14) et (15) produit :

$$\sigma_i / \sigma_0 = (d_i / d_0)^{D-3} \quad (16)$$

L'équation (16) est identique à l'équation (5), avec la constante $C = 3 - D$: La propriété exprimée par l'équation (5) est strictement une propriété d'un milieu poreux fractal. Comme cela a été observé à propos de cette équation, la condition $D = 3$, équivalente à $C = 0$, implique que le milieu n'est pas poreux, c'est à dire que tous les éléments ont la même densité.

un rapport d'homothétie déterminés expérimentalement dans le sol. Une telle structure, développée entre deux limites correspondant à la taille des agrégats le plus petit et le plus grand observés dans le sol, est équivalente à la structure du sol.

4. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE

Il résulte de l'homothétie interne que $p_i = p_0 r^1$ (Cf. Eq. (3)). La pression de l'eau dans une fracture de largeur p_i peut s'écrire (Cf. Eq. (2)) :

$$h_i = h_0 r^{-i} \quad (17)$$

où $h_0 = R/p_0$ est la pression dans la fracture la plus large, c'est à dire la pression la plus proche de 0. L'équation (17) est identique à l'équation (1) : La variation de la pression de l'eau mesurée dans le sol est identique à la variation de la pression dans une structure fragmentaire fractale. On observera que l'équation (1) permet de déterminer expérimentalement la valeur du rapport d'homothétie interne r .

Les équations (9) et (11) permettent d'écrire :

$$\theta_i = (r^{-i})^{D-3} + \varphi_0 - 1 \quad (18)$$

et en combinant les équations (17) et (18), on obtient :

$$h_i = h_0 (1 - \varphi_0 + \theta_i)^{1/(D-3)} \quad (19)$$

L'équation (19) exprime la loi de variation de la pression de l'eau dans le système de fractures d'une structure fragmentaire fractale en fonction de la teneur en eau. Les valeurs expérimentales de la pression de l'eau dans le sol reportées sur la Fig. (1), sont présentées en fonction de la teneur en eau du sol correspondante sur la Fig. (9) et confrontées aux valeurs modélisées par une structure fractale équivalente. Les paramètres de cette structure ont été déterminés expérimentalement :

$$\varphi_0 = 0.46 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

$$h_0 = 0.22 \text{ m}$$

$$r = 0.82 \text{ (Eq. 1)}$$

$$D = 2.90 \text{ (Eq. 4)}$$

$$m = 31 \text{ (Eq. 9)}$$

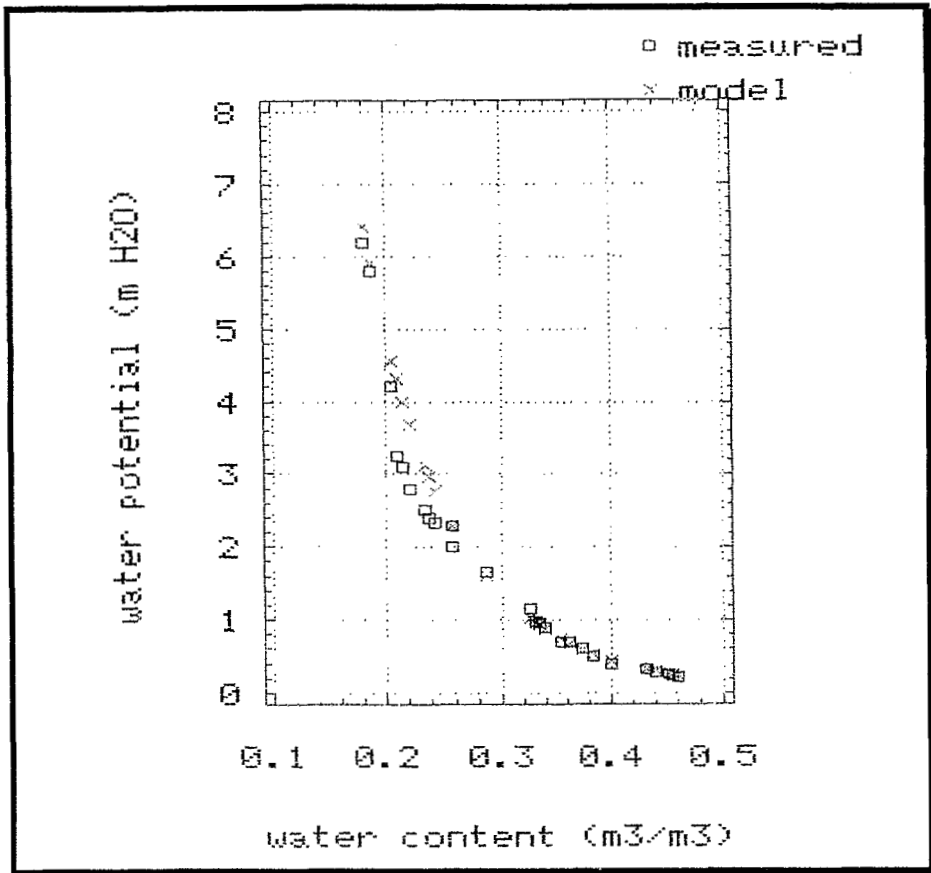


Figure 9. Variation de la pression de l'eau en fonction de la teneur en eau dans le sol de l'Ariana. Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs modélisées par l'équation (19) (Données de Bousnina, 1984)

La bonne correspondance entre l'expérimentation et le modèle permet d'affirmer que les variations simultanées de la pression de l'eau et de la teneur en eau dans le sol sont identiques à celles qui se produisent dans une structure fragmentaire fractale équivalente. On notera par ailleurs que l'ajustement d'une courbe théorique de la forme : $h = h_0 (1 - \theta + \theta)^E$ à un graphe expérimental de $h(\theta)$ permet de déterminer la dimension fractale D .

CONCLUSION

La mesure expérimentale de quelques propriétés liées à la structure du sol ainsi que la détermination théorique des propriétés d'une structure fragmentaire fractale permettent d'établir une équivalence entre les deux structures. Cette équivalence n'est pas limitée à des caractères statiques telles que la distribution ou la taille des

éléments structuraux mais il est possible de modéliser le comportement hydrodynamique du sol par celui de la structure fragmentaire fractale équivalente à la structure du sol. Cette structure est définie par deux paramètres qui peuvent être déterminés expérimentalement et développée entre deux limites mesurées dans le sol. Une telle structure représente en quelque sorte une abstraction idéale et simplifiée de l'assemblage du sol, complexe et délicat à analyser en raison de son apparente hétérogénéité. De là à affirmer que, au moins dans un domaine d'échelles limité, la structure du sol est fractale, il n'y a qu'un pas qui ne pourra cependant être franchi qu'après de nombreuses vérifications étendues à la plus large variété de sols possible.

REFERENCES

- ALDERFER, R.B. 1946. Seasonal variability in the aggregation of Hagerstown silt loam. *Soil Sci.* 62:151-168.
- BAVER, L.D., ET H.F.R. RHOADES. 1932. Aggregate analysis as an aid in the study of soil structure relationships. *J. Amer. Soc. Agron.* 24:920-930.
- BOUSNINA, H., 1984. Comparaison de différentes méthodes d'étude des propriétés hydrodynamiques d'un sol à texture fine. *Mém. Fin Et. Institut National Agronomique. Tunis, Tunisie.*
- CHEPIL, W.S., 1950. Methods of estimating apparent density of discrete soil grains and aggregates. *Soil Sci.* 70:351-362.
- FEDER J. 1988. *Fractals.* Plenum Press, New York.
- MANDELBROT B.B. 1983. *The fractal geometry of nature.* W.H. Freeman, San Francisco.
- RIEU, M., ET G. SPOSITO. 1990. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties. (Soumis à *Soil Sci. Soc. Amer. J.*)
- TURCOTTE, D.L. 1986. Fractals and fragmentation. *J. Geoph. Res.* 91:1921-1926.
- TURCOTTE, D.L. 1989. Fractals in Geology and Geophysics. *Pageoph.* 131:171-196.

LE TRANSFERT D'ECHELLE EN HYDROLOGIE : CONCEPT OU CONFUSION ?

LEBEL T.

RESUME

S'agissant d'un concept aussi largement utilisé dans un grand nombre de disciplines que l'est le "transfert d'échelle", on ne s'étonnera pas qu'il puisse être compris très diversement et suscité la perplexité. Appliquer ce concept dans une discipline (l'hydrologie) qui est à la recherche d'un nouveau paradigme, c'est se plonger dans la contemplation d'un océan d'incertitudes. Entre une vision intégratrice classique qui prend comme Unité élémentaire le bassin versant et une démarche analytique visant à délimiter des unités de fonctionnement de chacune des composantes du cycle de l'eau, le débat est posé à la fois en terme d'échelle et d'objectif. Si à un objectif donné correspond une échelle d'étude privilégiée, la notion de transfert d'échelle n'a guère de sens, il s'agit simplement de déterminer une échelle d'analyse et d'instrumentation pertinente. La question se présente différemment à partir du moment où, pour des raisons les plus souvent liées à une volonté de modélisation, on estime nécessaire d'étendre les résultats obtenus à une certaine échelle à d'autres échelles. Quelques exemples récents de travaux menés à l'ORSTOM permettent d'illustrer ces deux cas de figure. Il n'est cependant pas toujours aisé de déterminer a priori si il existe effectivement une ou plusieurs échelles de travail pertinentes. Cette ambiguïté est à l'origine de nombreux échecs rencontrés dans le domaine de la modélisation. Elle peut également être source de discussions fécondes parce qu'elle oblige une discipline à affiner ses concepts ou tout du moins à tester de façon plus rigoureuse ceux sur lesquels elle a coutume de s'appuyer. C'est une telle situation qui guide la réflexion en cours sur la modélisation hydrologique à entreprendre dans le cadre du projet HAPEX telle qu'elle est présentée dans une autre communication à ce séminaire.

1 LES ECHELLES DE TRAVAIL EN HYDROLOGIE

Une des grandes vocations de l'hydrologie devrait être de travailler aux échelles continentale et planétaire, puisque son propos est l'étude du cycle de l'eau. En réalité, l'histoire récente de cette discipline est celle d'une recherche souvent laborieuse et tâtonnante

qui s'est concentrée autour de la compréhension et de la simulation d'un des mécanismes seulement de ce cycle : la formation des écoulements de surface, et leur transfert ultérieur dans le réseau hydrographique. Même dans ce domaine restreint, on attend encore l'émergence d'un concept dominant, supporté par des intuitions s'imposant à tous ou par des confirmations expérimentales : il nous manque l'équivalent de ce que fut par exemple la loi d'Ohm à la naissances des sciences électriques.

Dans ces conditions, c'est souvent le problème à traiter qui impose son échelle de travail à l'hydrologue, et non des considérations physiques. Or le bassin versant, unité de référence des études d'écoulement, est une entité naturelle dont la superficie, même en étant stricte sur sa définition, varie de plusieurs ordres de magnitude (en gros de 1 à 10^6 km²). Par ailleurs c'est un système qui est doté d'une réponse ponctuelle unique (le débit à l'exutoire) intégrant l'ensemble des mécanismes de détail qui président à son fonctionnement. Toutes ces conditions réunies ont créé une situation où le débit observé est considéré comme l'élément privilégié de connaissance du milieu. A défaut d'en bien comprendre la formation (en dehors de quelques généralités connues depuis longtemps), l'hydrologie s'est laissée guider par des besoins de type opérationnelle : reconstituer ou prévoir les débits sont devenus les deux impératifs finalisés qui permettaient de faire la preuve de l'utilité et de l'efficacité des hydrologues. Bâtie sur un corpus de connaissances suffisamment vague pour s'abstraire des problèmes d'échelle, la modélisation hydrologique a longtemps limité son ambition à gagner quelques points de variance expliquée dans la relation débits observés - débits calculés. L'abus de procédures numériques aveugles et réductrices a fini par masquer la grande diversité des observations et des connaissances empiriques acquises par les hydrologues un peu partout dans le monde. Quelques précurseurs comprirent dès le milieu des années 70 l'impasse dans laquelle nous entraînait cette approche. Il fallait pour cela être à la fois un homme de terrain, un expérimentateur et un esprit doué pour la conceptualisation, des qualités difficiles à réunir chez une même personne. Le manque de structuration de la discipline et la faible considération dont elle jouit dans les milieux dominants de la géophysique n'ont par ailleurs pas permis de constituer des équipes de recherche suffisamment solides et riches pour rassembler des individus à l'expérience et au tempérament complémentaires, condition souvent nécessaire à l'émergence de nouveaux concepts. On a donc assisté à la poursuite d'une démarche basée avant tout sur les techniques numériques au détriment de l'observation et de la compréhension. Cette démarche, qui a eu le mérite d'une certaine efficacité dès lors qu'on évitait de tester la transposabilité des modèles ainsi conçus, est désormais vouée à reproduire les échecs du passé, notamment parce qu'elle ne prend pas en compte un point essentiel : l'espace hydrologique est formé d'une juxtaposition de domaines limités par des discontinuités. Ces discontinuités peuvent être sensiblement invariantes dans le temps (discontinuités du milieu) ou évoluer (variables d'état). Pour déboucher sur une modélisation qui dépasse le niveau de la caricature, il faut donc définir des domaines élémentaires homogènes du point de vue des

mécanismes dominants et étudier comment agissent les forces créées par ces discontinuités.

La discrétisation de l'espace est ainsi le point central de tout projet de modélisation réaliste des bassins versants. On conçoit d'ailleurs aisément que ce qui est vrai pour le bassin versant, l'est aussi pour tout système hydrologique complet, c'est à dire incluant la proche atmosphère et le milieu souterrain. Il faut donc chercher des critères pertinents pour structurer l'espace hydrologique, fonctions du problème traité mais aussi de différentes échelles qui interfèrent : échelle du bassin, échelles de mesure (trop souvent négligées), échelles des zones élémentaires définies ci-dessus. De plus échelles de temps et d'espace doivent être cohérentes. Il est absurde de découper l'espace en unités très fines si on est incapable d'appréhender séparément l'excitation de chacune de ces unités, à cause d'un lissage temporel excessif. Si l'échelle de temps est imposé par des contraintes extérieures à la nature du problème traité, l'échelle d'espace s'impose à un niveau correspondant, ce qui peut amener à conclure que le problème n'est pas traitable dans ces conditions : conclusion triviale mais pourtant rarement admise.

2 VOUS AVEZ DIT TRANSFERT D'ECHELLE ?

Le transfert d'échelle a incontestablement été une notion à la mode, le type de vocabulaire qu'il fallait glisser dans toute demande de financement d'une action de recherche pour augmenter significativement les chances de voir cette demande aboutir. Est-ce pour autant un concept précis applicable aussi bien en sciences humaines qu'en sciences de l'environnement ? Il est plus vraisemblable que chaque discipline lui attribue en réalité un sens bien particulier.

Pour ce qui est de l'hydrologie, force est de constater que l'on mélange plusieurs idées lorsqu'on parle de transfert d'échelle. A dire vrai le mot échelle lui-même devient ambiguë dans ce contexte. C'est ainsi qu'on parle indistinctement de transfert d'échelle pour :

- la représentativité d'une mesure sur une petite surface pour évaluer la valeur moyenne sur une surface plus grande.
- les études de similitude entre structures représentées à des échelles différentes (échelle qualifie alors aussi bien l'aire d'étude que sa représentation).
- la généralisation à de grandes aires d'étude de lois caractérisant des processus étudiés sur de petites surfaces.

Ces trois questions relèvent en fait d'approches totalement différentes, comme nous allons le voir sur des exemples.

3 REPRESENTATIVITE DE LA MESURE PONCTUELLE : UN AUTRE ASPECT DE LA DISCRETISATION DE L'ESPACE

La pluviométrie est, en hydrologie, une des seules variables que l'on sache mesurer directement, et avec une assez bonne précision. Le seul inconvénient de cette mesure est qu'elle est virtuellement ponctuelle au regard des surfaces sur lesquelles on travaille usuellement. L'aire du cône de réception d'un pluviomètre varie en effet de 400 (parfois même 100) à 2000 cm², à comparer à des surfaces de bassins versants de 1 à plusieurs dizaine de milliers de km². On doit en conséquence s'interroger sur la possibilité de déduire d'une ou plusieurs de ces mesures ponctuelles P_i , la valeur moyenne P_S sur la zone d'étude, qui est la seule pertinente pour l'hydrologue. Il y a alors deux façons d'aborder la question. La première est de considérer la quantité d'eau recueillie dans le pluviomètre comme un simple indicateur pluviométrique. Si on possède plusieurs postes sur un bassin, on fait une moyenne, éventuellement pondérée empiriquement, de ces individus. Cette moyenne est utilisée comme donnée d'entrée (I_p) des modèles selon l'hypothèse :

$$P_S = a \cdot I_p$$

Le paramètre 'a' peut être un facteur de calage du modèle, puisque si on calcule des bilans annuels, la sortie moyenne sur l'année est généralement bien connue. Une des causes de l'inadéquation entre les sorties (débits) calculées et observées pouvant être attribuée au fait que 'a' est différent de 1, le respect de la conservation de la masse autorise en principe à l'ajuster pour équilibrer entrées (pluies réelles) et sorties (débits et évaporation), sous hypothèse de variation du stock nulle. L'inconvénient, bien entendu, est qu'on ne dispose d'aucun moyen objectif d'évaluer 'a' indépendamment du modèle, et que son estimation dépend alors fortement des spécifications de ce modèle, donc de ses erreurs. C'est pourquoi on préfère généralement considérer que $P_S = I_p$ ce qui présente l'inconvénient alternatif d'attribuer au modèle lui-même les erreurs résultant de cette approximation. Or, si on ne peut pas connaître 'a' de façon certaine (le contraire signifierait que l'on sait mesurer P_S), on peut par contre essayer d'obtenir une estimation de P_S graduée en probabilité. C'est ce que vise la deuxième approche, où on remplace I_p par :

$$P_S^* = \sum_i \lambda_i P_i$$

et où on cherche une méthode "objective" pour quantifier ($P_S - P_S^*$). Un critère couramment utilisé pour cela est celui de la variance d'estimation (e.g. Lebel, 1984)

$$\sigma_S^2 = E (P_S - P_S^*)^2 .$$

Les méthodes statistiques apparentées à l'analyse objective permettent d'obtenir un estimateur de σ_s^2 fondé sur l'identification d'une fonction de structure spatiale, par exemple le variogramme dans le cas du krigeage simple (Delhomme et Delfiner, 1973, sont les premiers à avoir utilisé le krigeage pour interpoler des champs pluviométriques). Dans les ouvrages de référence de géostatistique (e.g. David, 1977), σ_s^2 est appelée variance d'extension. Cette "extension" de la valeur ponctuelle à la valeur moyenne sur une surface n'est rien d'autre qu'une interpolation, puisque, dans la pratique on n'estime σ_s^2 que sur des zones situées à l'intérieur du domaine de mesure.

En analyse objective, on assimile la pluie à un champ aléatoire caractérisé par sa structure statistique dans l'espace. C'est à dire qu'il y a continuité entre la valeur mesurée ponctuellement et la valeur moyenne estimée. C'est une situation bien différente de celles pour lesquelles a été conçu le concept de "transfert d'échelle", où l'on est dans l'incapacité de formaliser analytiquement ou statistiquement le passage de la petite structure à celles caractérisant une structure de quelques ordres de grandeur supérieure.

Il faut remarquer que l'apparition relativement récente des moyens de télédétection, notamment radar, n'ont pas modifié la nature des traitements effectués. Les radars fournissent une valeur d'ensemble sur un pixel, et couvrent l'espace de façon continue. Mais comme cette valeur ne résulte que d'une mesure indirecte de la pluie, elle doit être étalonnée à l'aide de données sol, c'est à dire celles des pluviographes ou pluviomètres. On doit alors procéder à des interpolations spatiales basées sur des algorithmes purement numériques, ou en partie statistiques, de la même famille que ceux utilisés pour interpoler les données pluviométriques (e.g. Creutin et al., 1988). En conclusion, l'exemple de l'analyse des champs pluviométriques montre bien que l'estimation de valeurs moyennes spatiales à partir de valeurs quasi ponctuelles ne doit pas être vue comme un processus de changement d'échelle (passage de la valeur sur une petite surface à la valeur sur une surface plus grande), mais bien comme une simple interpolation.

4 TOPOLOGIE DES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES : LE ROLE DE LA REPRESENTATION DANS L'ETUDE DES PROCESSUS PHYSIQUES

"Il est frappant, en effet, que lorsqu'une baie ou une péninsule que l'on avait retenue sur une carte au 1/100 000, est réexaminée sur une carte au 1/10 000, on aperçoit sur son pourtour d'innombrables sous-baies et sous-péninsules. Sur une carte au 1/1000, on voit aussi apparaître des sous-sous-baies et sous-sous péninsules, et ainsi de suite [...], et on trouve que les cartes correspondant aux niveaux d'analyse successifs [...] ont le même caractère global, les mêmes

traits génériques. En d'autres termes, on est amené à croire qu'à l'échelle près, le même mécanisme eût pu engendrer les petits aussi bien que les gros détails des côtes". Cette citation, tirée de l'introduction de Mandelbrot (1975) à la désormais classique théorie des fractales définit parfaitement ses deux fondements conceptuels :

1) il y a continuité des échelles, c'est à dire qu'il n'existe pas d'échelle privilégiée pour observer le phénomène étudié, autre que celles dictées par la simplicité des nombres (l'échelle du 1/100000 est plus parlante que celle du 1/126693 correspondant à 1 inch pour 1 mile) ou de la faisabilité expérimentale (il est assez aisée d'arpenter une côte, plus laborieux de mesurer le parcours d'une fourmi qui en suivrait les contours à son échelle);

2) cette continuité des échelles s'explique par l'existence d'un même mécanisme générateur pour les petites et les grandes structures.

Une application directe du concept fractal est la caractérisation de l'arborescence d'un réseau hydrographique. L'utilité d'une telle caractérisation ne sera pas discuter ici, mais on conçoit qu'elle puisse stimuler la réflexion au même titre que la détermination de la longueur de la côte bretonne. On peut ainsi étudier les changements de longueur de réseau de drainage ou de surface couverte par le chevelu hydrographique en fonction des échelles de représentation ou de discrétisation de l'espace.

La nature fractale du réseau hydrographique a suscité récemment de nombreux travaux, dont les conclusions varient du positivisme le plus absolu (Tarboton et al., 1988) au scepticisme modéré (e.g. Evans, 1989). Néanmoins, quelques points se dégagent qui permettent de mieux apprécier l'intérêt et les limites de cette approche basée sur l'autosimilarité. Tout d'abord, lorsqu'un auteur conclut à l'efficacité du modèle fractal pour décrire l'évolution de certains paramètres hydrographiques (e.g. Hjelmfelt, 1982), le modèle n'est validé que sur une gamme de magnitudes limitée. Par ailleurs, l'utilité de ce type de modèle ne va guère au delà de la description. Il n'a encore jamais servi de base à un quelconque modèle hydrologique, que ce soit sous la forme d'une prédétermination de paramètres hydrographiques ou de mise en évidence d'une relation opératoire entre la dimension fractale et la nature de l'écoulement, alors même que des essais dans cette direction ont été effectués (e.g. Moussa, 1989). Enfin le modèle fractal ne peut, par sa nature même, s'accommoder des discontinuités qui sont si fréquentes en géomorphologie (ruptures de pente, falaises, cluses, ...). En particulier, le modèle fractal est impuissant à rendre compte du passage d'un état de versant sans réseau de drainage à la brusque apparition d'un émissaire hydrologique les limites du modèle fractal sont parfaitement prévisibles dès lors qu'on réalise qu'au contraire des constructions humaines, la nature ne connaît pas la notion de modèle réduit. On n'y trouve pas l'équivalent des maquettes d'avion dont on fixe l'échelle pour que les pièces tiennent dans une boîte de taille donnée ou des modèles réduits d'architecte dont les dimensions sont fixées

pour flatter au mieux l'oeil du décideur. La nature est au contraire organisée autour d'échelles préférentielles qui résultent de mécanismes spécifiques, et c'est le passage d'un état à l'autre sur ce spectre discret qui importe pour la connaissance hydrologique. La notion de similitude, lorsqu'elle s'applique, n'est donc généralement valide que dans certaines limites et ne peut rendre compte des discontinuités qui se produisent au voisinage de certaines échelles. Elle échappe ainsi à la problématique du transfert d'échelle au sens couramment admis du terme

5 DE LA PARCELLE AU BASSIN VERSANT : QUELLE CONTINUITÉ ?

Il est aisé de faire l'inventaire des forces qui président à la partition de l'eau précipitée entre infiltration et écoulement de surface. Ce bilan hydrologique sommaire (où l'évaporation peut être négligée dans la phase de réponse rapide du système) est en effet sous la dépendance exclusive des forces de gravité (dans et à la surface du sol), et des forces de potentiel capillaire. On peut donc formuler de façon assez simple les équations de la physique fondamentale qui s'appliquent au niveau le plus élémentaire. Mis à part quelques problèmes d'intégration numérique, que l'apparition des gros ordinateurs modernes permettent de résoudre tant bien que mal, l'extension de ces équations à l'ensemble du domaine ne présente en principe aucune difficulté conceptuelle. On sait que la réalité est toute autre. En effet, si chaque processus considéré individuellement peut être intégré, les interactions possibles entre les différents processus qui entrent en ligne de compte, deviennent si nombreuses quand ce domaine grandit, qu'il est impossible de déduire leur influence des mesures effectuées à petite échelle. Cette influence est le plus souvent indétectable ou négligeable à cette échelle; elle peut devenir prépondérante à grande échelle. Ainsi l'étude du bilan hydrique d'un pot de fleur fait abstraction des contraintes de pente qui sont pourtant capitales lorsqu'on travaille sur un bassin versant. On pourrait objecter à cette remarque que ces deux terrains d'étude n'ont rien de commun et que nul scientifique censé n'essaierait de transposer les résultats obtenus sur un pot de fleur à la caractérisation du bilan hydrologique d'un bassin versant de plusieurs dizaines ou centaines de km^2 . Et pourtant, c'est à la philosophie du pot de fleur qu'obéissent les expériences de simulation de pluie sur parcelles de un ou quelques m^2 . Ces dernières visent à reproduire, en situation de pluie contrôlée, les processus d'infiltration sur sol naturel. Par delà les problèmes de réalisme expérimental (distribution de la taille des gouttes de l'asperseur, reconstitution d'une chronique plausible des apports, dégradation des surfaces, entre autres), l'inconvénient majeur de ce type d'expérimentation est le véritable saut conceptuel qu'il faut opérer pour admettre que ces résultats sont susceptibles d'être étendus à l'échelle supérieure. Les conditions aux limites qui influencent très fortement l'infiltration mesurée sur un m^2 n'ont rien à voir avec celles qui sont déterminantes sur bassin versant. Sur parcelle de 1 m^2 , on a une discontinuité sur le bord de la parcelle

entre volume arrosé et volume épargné. C'est à dire qu'il ne peut y avoir de relation de similitude entre la parcelle et le bassin, car la dimension verticale ne subit aucune distorsion (on travaille sans condition à la limite inférieure dans les deux cas), alors que les dimensions horizontales sont tronquées. De plus, sur bassin versant, une condition à la limite primordiale est la pente, dont l'effet, pas plus que pour le pot de fleur, ne peut être pris en compte sur la parcelle du simulateur. Cette absence de similitude a pour traduction notre incapacité à obtenir des performances améliorées de nos modèles en y intégrant les paramètres déduits des expériences de simulation de pluie. Par ailleurs ces expériences n'ont, jusqu'à présent, pas non plus permis d'imaginer d'autres modèles construits autour de ces paramètres et dont les résultats seraient meilleurs que ceux des modèles globaux les plus éprouvés. Ceci peut s'expliquer par le fait que, si ces derniers restent souvent proches de la caricature, ils n'en retiennent pas moins quelques caractéristiques majeures du fonctionnement global du bassin (par exemple sa pente ou certains indices de couverture végétale). Ces caractéristiques majeures, même décrites par des paramètres qui sont des moyennes grossières, ont finalement plus de pouvoir d'explication que la prise en compte de processus physiques, certes valides, mais dont la paramétrisation à l'échelle de la parcelle ne s'applique plus à celle du bassin.

6 CONCLUSION

Dans le cas particulier de l'hydrologie, une fois mis de côté des questions qui sont faussement interprétées comme relevant de la problématique du changement d'échelle (telle l'extension d'une valeur ponctuelle à une valeur spatiale par simple interpolation d'un champ aléatoire), il existe de nombreuses situations où les expériences et modèles développés à petite échelle sont d'une utilité limitée, voire nulle, pour les échelles supérieures. Dans certains cas, le concept de transfert d'échelle peut alors devenir un obstacle à la réflexion car il pousse à croire que les connaissances acquises à petite échelle doivent être "transférées" aux échelles supérieures. Cette vision des choses nous empêche alors de rechercher les paramètres qui sont déterminants pour l'analyse et la compréhension des processus à ces échelles. Certaines disciplines, proches de l'hydrologie, ont bien identifié le hiatus qui sous-tend ces questions et ont renoncé à expliciter ou même seulement à recourir au concept de transfert d'échelle. L'utilisation du formalisme statistique de la turbulence ou la schématisation fractale sont deux exemples d'une telle démarche (voir par exemple Lovejoy et Schertzer, 1986, en météorologie). A l'inverse, la notion de transfert peut être fructueuse si, au lieu de s'attacher à des paramètres descriptifs du milieu, elle s'attache à des variables physiques, l'énergie par exemple, qui ont la même signification quelle que soit l'échelle considérée. A défaut de savoir caractériser un système hydrologique par de tels variables, nous en sommes réduits à inverser les termes du problème. C'est la question posée qui conditionne l'échelle de travail et il s'agit d'identifier les mécanismes déterminants qui opèrent à cette échelle. Ces

mécanismes, si on peut les appréhender à l'aide de mesures ou de considérations théoriques, peuvent alors servir de base à la construction d'un modèle qui sera valide à cette échelle et à elle seule.

Comme le souligne Klemes (1983), l'extrapolation à un niveau supérieur de lois physiques valides à une échelle, a été régulièrement source de déceptions et de paradoxes. En hydrologie, comme dans beaucoup de disciplines voisines, la priorité n'est pas tant d'étudier les modalités d'une telle extrapolation, que de d'abord savoir identifier la ou les variables qui caractérisent le mieux un système hydrologique à une échelle donnée.

REFERENCES

- CREUTIN, J.D., G. DELRIEUX, and T. LEBEL, Rain measurement by raingage-radar combination : a geostatistical approach, *J. Atmos. and Ocean. Techno.*, 5(1), 102-115, 1988.
- DAVID, M., Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1977 .Delhomme, J.P., et P. Delfiner, Application du Krigeage à l'optimisation d'une campagne pluviométrique en zone aride, in *Proc. Symp. on Design of Water Resources Projects With Inadequate Data*, Vol.2, 191-210, UNESCO, Paris, 1973.
- EVANS, I.S., Digital terrain models in geomorphology. Deuxièmes Journées ULM : "Prise en compte du relief dans les études hydrologiques de bassins versants", ORSTOM - Montpellier, 6-7 Avril 1989.
- HJELMFELT, A.T., Fractals and the river length catchment-area ratio, *Water resources Bulletin*, 24(2), 1982.
- KLEMES, V., Conceptualization and scale in hydrology, *Journal of Hydrol.*, 65, 1-23, 1983.
- LEBEL, T., Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant: estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes, thèse docteur-ingénieur, USMG-INPG, Grenoble, 1984.
- LOVEJOY, S., and D. SCHERTZER, Scale invariance, symmetries, fractals, and stochastic simulation of atmospheric phenomena, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 67(1), 21-32, 1986.
- MANDELBROT, B., Les objets fractals, Flammarion ed., Paris, 1975, réédition 1989, 268 p.
- MOUSSA, R., Nature fractale du réseau hydrographique, Deuxièmes Journées ULM : "Prise en compte du relief dans les études hydrologiques de bassins versants", ORSTOM - Montpellier, 6-7 Avril 1989.
- TARBOTON, D.G., R.L. BRAS and I. RODRIGUEZ-ITURBE, The fractal nature of river networks. *Water resources research*, 24(8), 1317-1322, 1988

**PROBLEMES STATISTIQUES DU
TRANSFERT D'ECHELLE**

CHANGEMENT DE MAILLE ET CHANGEMENT DE SUPPORT

WACKERNAGEL H.

RESUME

En parlant d'échelle, il est important de distinguer entre la maille et le support de l'information, ce dernier étant un élément de volume ou de surface, parfois assimilé à un point, sur lequel une information est définie. Une modification de la maille ou une modification du support ont des implications différentes, ce qui sera illustré ici dans le contexte simple de la géostatistique linéaire. Le problème pourra également être multivariable, à savoir que l'on dispose de plusieurs sources d'information sur des mailles ou des supports différents.

1 MAILLE ET ECHELLES

La maille d'échantillonnage définit les distances entre des paires d'échantillons. Nous désignons par h un vecteur décrivant à la fois la distance entre deux points dans l'espace et l'orientation de l'axe passant par la paire de points. Les différentes échelles seront décrites par l'ensemble de paires de points de données réalisées par la maille d'échantillonnage. La plus petite échelle à laquelle l'échantillonnage nous permette d'accéder sera, dans le cas d'une maille régulière, le pas de cette maille. La plus grande échelle sera égale à la moitié de la largeur du domaine échantillonné: la moitié seulement, car c'est au plus jusqu'à cette distance que l'on peut former des couples faisant intervenir tous les points de mesure; au-delà, les points échantillonnés au centre du domaine n'interviennent plus.

2 VARIABILITE EN FONCTION DE L'ECHELLE

Nous allons mesurer la variabilité à différentes échelles tout simplement en calculant une mesure de dissemblance entre deux données z_1 et z_2 situées en deux points x_1 et x_2 . Cette dissemblance entre deux valeurs, désignée par γ , vaudra.

$$\gamma = \frac{(z_1 - z_2)^2}{2}$$

On fait dépendre la dissemblance γ de la distance et de l'orientation d'une paire de points, décrits par le vecteur $h = x_2 - x_1$, indifféremment de la position de la paire dans le domaine étudié.

$$\gamma(h) = \frac{(z(x_1+h) - z(x_1))^2}{2}$$

En formant la moyenne des dissemblances γ entre valeurs pour toutes les nh paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de variogramme expérimental.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{\alpha=1}^n (z(x_\alpha+h) - z(x_\alpha))^2$$

Généralement la dissemblance des valeurs augmente en moyenne en fonction de l'éloignement spatial des points de mesure et atteint fréquemment un palier de variation à grande échelle. Lorsque la pente du variogramme change abruptement on peut penser à des paliers intermédiaires.

Le comportement aux très petites échelles, près de l'origine du variogramme, est d'une importance capitale, car il est un indicateur du degré de continuité de la variable régionalisée, à savoir: différentiable, continue mais non différentiable, ou carrément discontinue. Dans ce dernier cas on aura affaire à une variable régionalisée donnant lieu à un effet de pépite, symptôme de valeurs changeant abruptement à très petite échelle, comme les teneurs de l'or lorsqu'il y a des pépites.

3 AJUSTEMENT D'UNE FONCTION DE COVARIANCE

Lorsque le variogramme présente un palier aux grandes échelles, on ajustera une fonction de covariance $C(h)$ en se basant sur la formule.

$$\gamma = b - C(h)$$

où b caractérise un palier de variation.

Dans la suite, le modèle $C(h)$ sera soit un effet de pépite,

$$C_{pep}(h) = \begin{cases} b & \text{lorsque } |h| = 0 \\ 0 & \text{lorsque } |h| > 0 \end{cases}$$

soit un modèle sphérique.

$$C_{sph}(h) = \begin{cases} b(1 - \frac{3|h|}{2a} + \frac{1|h|^3}{2a^3}) & \text{lorsque } 0 \leq |h| \leq a \\ 0 & \text{lorsque } |h| > a \end{cases}$$

Le paramètre a indique la portée de la covariance: la covariance s'éteint lorsque la portée est atteinte. Le paramètre b indique la valeur maximale de la covariance: la covariance sphérique diminue de manière continue à partir de la valeur maximale b , située à l'origine, jusqu'à disparaître complètement lorsque la portée est atteinte. Le modèle de l'effet de pépite pourrait être considéré comme un cas particulier d'un sphérique avec une portée a infiniment petite. Il y a cependant une différence notable entre les deux modèles:

$C_{pep}(h)$ décrit un phénomène discontinu où les valeurs changent brutalement d'un point à un autre, tandis que $C_{sph}(h)$ décrit un phénomène continu, mais non différentiable, qui serait en quelque sorte rugueux au toucher.

4 MODELES EMBOITES

On peut souvent distinguer plusieurs paliers de variation qui sont en rapport étroit avec la morphologie de la variable régionalisée [4].

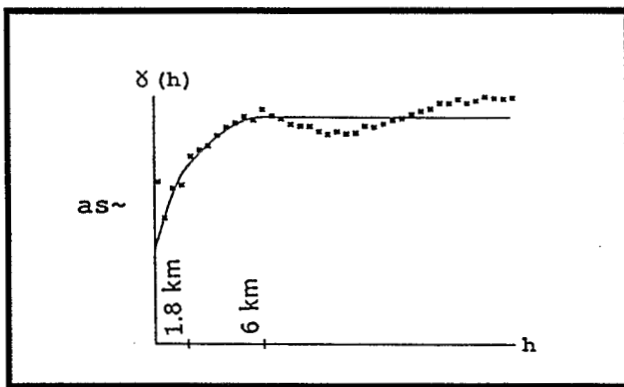


Figure 1: Variogramme expérimental ajusté avec deux modèles sphériques de portées 1.8 et 6 km.

Définissons d'abord une fonction de covariance normée à un palier unitaire.

$$c(h) = \frac{C(h)}{b}$$

c'est-à-dire

$$C(h) = b c(h)$$

On numérotera les paliers de variation b_u observés sur le variogramme avec un index $u = 0 \sim 5$. On peut ainsi construire un *variogramme gigogne*.

$$g(h) = b \cdot \sum_{u=0}^s b_u c_u(h), \text{ où } \sum_{u=0}^s b_u = 1$$

avec une covariance pépitique $C_0(h)$ et plusieurs covariances sphériques $c_u(h)$ de portées a_u différentes. Un exemple d'ajustement d'un modèle de variogramme gigogne par deux modèles sphériques (de portées 1.8 et 6 km) est donné sur la Figure 1.

De même peut-on alors décomposer la variable régionalisée en une somme de composantes spatiales indépendantes agissant à différentes échelles. i.e. atteignant leurs différents paliers de variation b_u à des échelles différentes.

$$z(x) = z_0(x) + \dots + z_u(x) + \dots + z_s(x) + m(x)$$

Il est clair qu'une composante à petite échelle ne pourra être identifiée que si la maille d'échantillonnage est suffisamment fine. De même, une composante à grande échelle n'apparaîtra sur le variogramme que si le rayon du domaine échantillonné est assez important.

On supposera, dans ce modèle, les différentes composantes $z_u(x)$ de moyenne nulle, de sorte que la moyenne de $z(x)$ sera contenue dans la dérive $m(x)$. Cette dérive, comme son nom l'indique, pourra varier lentement d'un bout de la région à l'autre: la fonction $m(x)$ sera néanmoins suffisamment plane pour être assimilée à une constante aux petites et moyennes échelles, et elle sera ainsi systématiquement filtrée par le variogramme expérimental.

5 TRANSFERT D'INFORMATION

Armés d'un modèle caractérisant une variabilité spatiale complexe, identifiée sur un variogramme expérimental, nous allons nous intéresser au problème suivant: ayant une maille d'échantillonnage avec une disposition très irrégulière des échantillons dans l'espace, comment transférer cette information sur un réseau de points

régulier? Surtout, quelles déformations subira l'information contenue dans les données lors du passage de la maille d'échantillonnage à la maille d'estimation?

La méthode examinée ici sera le krigeage ordinaire, et nous allons essayer d'éclaircir son fonctionnement en le comparant au filtrage de composantes spatiales.

6 KRIGEAGE ORDINAIRE

Le krigeage ordinaire est une opération qui est répétée en chaque noeud x_0 d'une grille régulière recouvrant le domaine étudié. Pour un ensemble de n points de données x_i , d'un voisinage centré autour d'un point x_0 de la maille d'estimation, on peut construire, en minimisant la variance d'estimation, le système de *krigeage ordinaire* suivant,

$$\begin{pmatrix} C(x_1-x_1) & \dots & C(x_1-x_n) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C(x_n-x_1) & \dots & C(x_n-x_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(x_1-x_0) \\ \dots \\ C(x_n-x_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

où les λ_α sont des pondérateurs à affecter aux points de données et où

μ est un paramètre de Lagrange qui intervient pour des raisons algébriques. Le membre gauche du système contient les covariances entre les points de données, tandis que le membre droit contient les covariances entre chaque point de donnée et le point d'estimation x_0 .

Ce système une fois résolu permet de transférer au point x_0 l'information des points de données, par le calcul d'une valeur estimée z^* ,

$$z^* = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha z(x_\alpha)$$

En effectuant la multiplication matricielle, on peut réécrire le système sous la forme.

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta C(x_\alpha-x_\beta) + \mu = C(x_\alpha-x_0)$$

La condition que les poids soient de somme unité exprime le fait que dans le cas extrême où les données sont égales à une constante dans un voisinage donné, la valeur estimée reproduira cette constante.

Nous nous bornerons dans la suite à écrire l'équation générale du krigeage ordinaire.

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu = \sum_{u=0}^s C_u(x_{\alpha} - x_0)$$

en sous-entendant le système et la condition sur les poids, représentée par le paramètre μ . Dans le membre droit on a écrit de manière explicite un modèle de covariance gégogne.

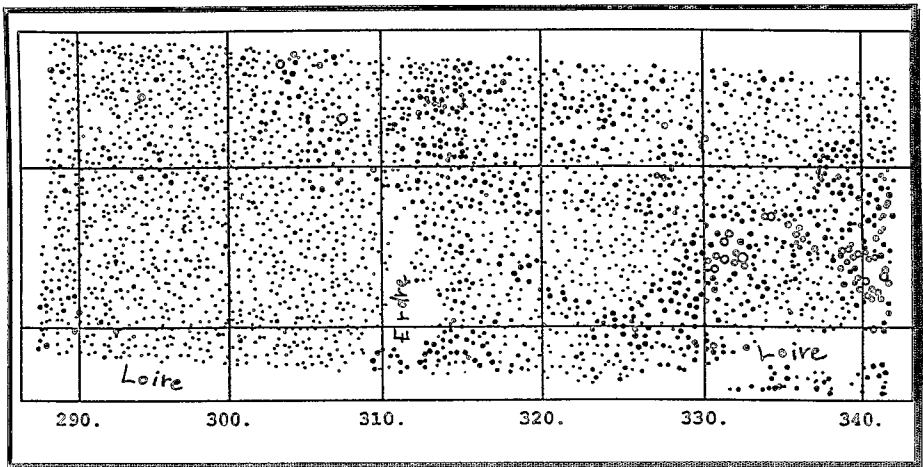


Figure 2: Carte de la position des échantillons représentant les valeurs (en log) de l'Arsenic par des cercles proportionnels (unité: km)

7 FILTRAGE DE COMPOSANTES SPATIALES

On filtre une composante spatiale en retirant les covariances correspondantes $C_u(x_{\alpha} - x_0)$ du membre droit de l'équation (2) du krigeage ordinaire. Ainsi peut-on par exemple éliminer l'effet de pépite en retirant les termes correspondant à $C_0(h)$ du membre droit de (2) et l'on obtient alors une estimation de la variable régionalisée amputée de la composante pépitique $z_0(x)$.

A titre d'exemple, nous présentons deux filtrages réalisés sur des données du BRGM prélevés dans le cadre de l'inventaire géochimique national dans la région délimitée par les cartes géologiques au 1/50000 "Nort-sur-Erdre" et "Ancenis". La Figure 2 représente les valeurs prises par l'arsenic (en log) dans cette région d'une

dimension de 56 x 23 km². On remarquera des valeurs fortes isolées, sur la gauche, qui disparaîtront lors du filtrage, et des groupes de valeurs élevées, au centre et sur la droite, qui, sans être nécessairement constitués de valeurs extrêmes, seront mis en évidence par les filtrages.

Le variogramme expérimental omnidirectionnel de ces données, avec un ajustement par un modèle gigogne composé d'un effet de pépite et de deux sphériques de portées 1.8 et 6 km, a déjà été montré sur la Figure 1.

Le filtrage de la Figure 3 élimine la variation associée à l'effet de pépite et à la composante de courte portée, mettant en évidence les structures à grande échelle, souvent liées à la géologie. Pour extraire ces structures, il est nécessaire d'utiliser un voisinage de krigeage suffisamment grand: ici on a utilisé les 50 points les plus proches [5].

La Figure 4 représente le filtrage de l'effet de pépite et de la composante de longue portée, mettant bien en évidence les structures à caractère plus local, qu'on pourrait qualifier d'anomalies locales, en opposition à des anomalies ponctuelles définies sur des échantillons isolés.

Les trois représentations prises ensemble permettent, associées à la carte géologique, de délimiter dans une prospection les zones les plus favorables, en effectuant un tri entre les anomalies ponctuelles (souvent décevantes) et les anomalies locales [6].

8 KRIGEAGE ORDINAIRE ET FILTRAGE

Prenons une variable régionalisée pour laquelle on aurait identifié trois composantes de variation non corrélées,

$$z(x) = z_0(x) + z_1(x) + z_2(x) + m(x)$$

A cette situation correspond le modèle de covariance.

$$C(h) = C_0(h) + C_1(h) + C_2(h)$$

avec $C_0(h)$ un effet de pépite et $C_1(h)$, $C_2(h)$ des modèles sphériques de portées a_1 et a_2 , numérotés de sorte que $a_1 < a_2$.

Supposons que la maille d'échantillonnage soit très irrégulière entraînant une répartition des données extrêmement inégale dans l'espace. Afin d'établir une carte, on va construire un réseau de points, aussi fin que l'on voudra, et l'on exécutera en chaque point l'opération de krigeage ordinaire.

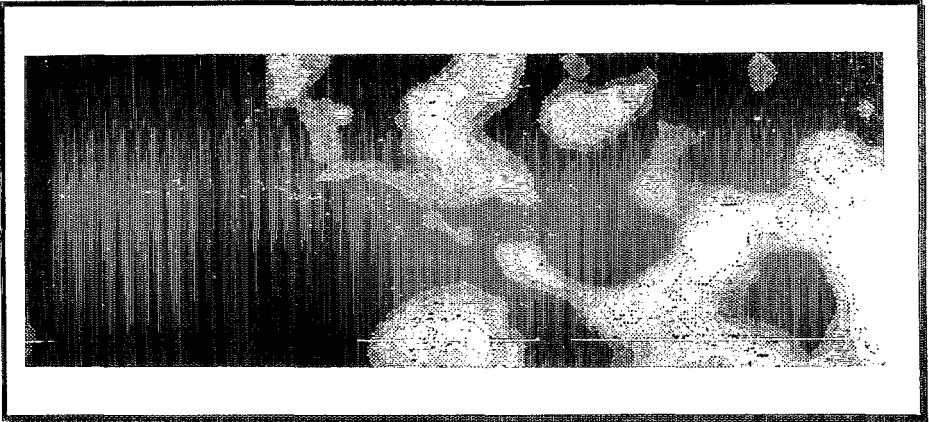


Figure 3: Filtrage des composantes $z_0(x)$ et $z_1(x)$ (voisinage de krigeage: les 50 échantillons les plus proches).

Vu la grande irrégularité dans la disposition des échantillons, différents cas de figure peuvent se présenter, que nous allons examiner séparément dans la suite.

8.1 x_0 est éloigné $> a_2$ des données

Ce cas de figure peut se produire si x_0 se trouve en plein milieu d'un grand trou dans la maille d'échantillonnage. Le krigeage ordinaire est alors équivalent à un *krigeage de la moyenne* dont l'équation générale s'écrit.

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu = 0$$

Le membre droit est nul puisque toutes les composantes s'annulent pour un écartement supérieur à a_2 . L'information transférée sera une estimation de la dérive $m(x)$ dans le voisinage centre sur x_0 .

$$m^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} z(x_{\alpha})$$

On notera bien la différence entre un krigeage de la moyenne et le calcul de la moyenne arithmétique des données dans le voisinage de krigeage: cette dernière ne tient pas compte de la disposition spatiale des échantillons.

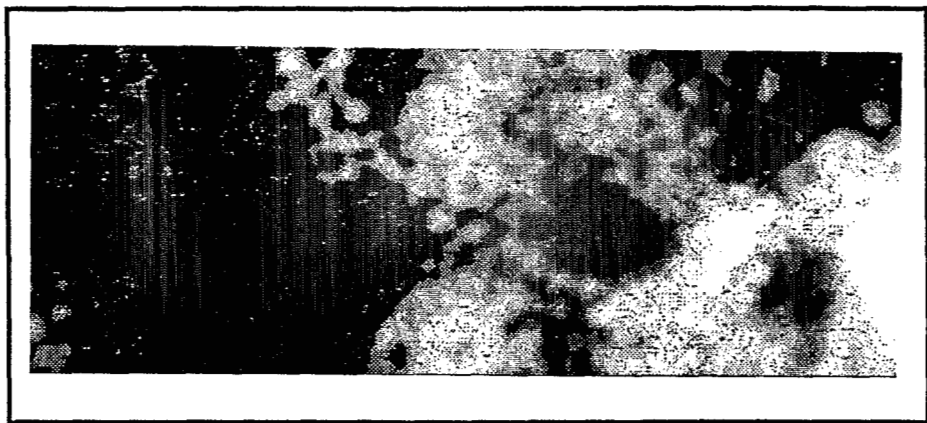


Figure 4: Filtrage des composantes $z_0(x)$ et $Z_2(X)$ (voisinage de krigeage: les 50 échantillons les plus proches).

8.2 x_0 est écarté $< a_2$ et $> a_1$ du point x_α le plus proche

Avec cette disposition spatiale le système de krigeage ordinaire est équivalent à un filtrage des composantes $z_0(x)$ et $z_1(x)$, l'équation générale s'écrivant.

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta C(x_\alpha - x_\beta)^{\mu} = C_2(x_\alpha - x_0)$$

8.3 x_0 est écarté $< a_2$ et > 0 du point x_α le plus proche

Dans cette situation le krigeage ordinaire transférera de l'information non seulement sur la composante de longue portée $z_2(x)$, mais aussi sur la composante $z_1(x)$, qui varie plus rapidement dans l'espace et qui suscitera une description plus détaillée de la variable régionalisée dans les zones de la carte où les données abondent. On devine que le krigeage ordinaire est maintenant équivalent au filtrage.

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta C(x_\alpha - x_\beta)^{\mu} = C_1(x_\alpha - x_0) + C_2(x_\alpha - x_0)$$

8.4 x_0 coïncide avec un point de donnée

Dans ce dernier cas, le krigeage ordinaire ne filtrera rien du tout et restituera fidèlement la donnée mesurée au point $x_\alpha = x_0$: c'est un interpolateur exact !

Cette fidélité peut cependant être indésirable lorsqu'il n'y a que quelques points de coïncidence purement fortuits, entre une maille d'échantillonnage irrégulière et une maille d'estimation régulière. Pour éviter des sauts abrupts des valeurs estimées en ces quelques points, certains programmes de krigeage à vocation cartographique (tel Bluepack) proposeront de filtrer systématiquement la composante pépitique $z_0(x)$.

9 DONNEES MULTIVARIABLES

La généralisation multivariable du modèle de variogramme (1) est immédiate, en écriture matricielle,

$$\Gamma(h) = B \cdot \sum_{u=0}^s B_u c_u(h) \text{ avec } B = \sum_{u=0}^s B_u$$

où les matrices de corégionalisation B_u sont semi-définies positives.

Le *cokrigeage* ordinaire d'une variable $z_{i_0}(x)$, basé sur ce modèle de corégionalisation, a l'équation générale,

$$\sum_{j=1}^N \sum_{\beta=1}^n \lambda_j^\beta C_{ij}^\beta(x_\alpha - x_\beta) + \mu_i = \sum_{u=0}^s b_{i_0}^u c_u(x_\alpha - x_0)$$

avec des pondérateurs de somme unité pour la variable à estimer et de somme nulle pour chacune des variables auxiliaires.

Dans le membre droit du système on voit entrer en scène les coefficients de corégionalisation b_{ij}^u dont l'influence dépendra, comme précédemment, de l'écart entre x_0 et les données du voisinage. L'élément nouveau est le jeu subtil des corrélations qui peuvent être fort différentes aux diverses échelles spatiales.

10 SUPPORT

On ne s'intéressera souvent pas seulement à des valeurs définies sur des points, mais également à des valeurs moyennes sur des éléments de surface (comme les "pixels" de la télédétection) ou de volume V . Un volume $V(x)$ centré au point x s'appelle le *support* de la variable régionalisée $Z_V(x)$, qui peut être comprise comme la régularisée d'une variable $z(x)$ de support ponctuel,

$$z_V(x) = \frac{1}{|V|} \int_{x' \in V} z(x') dx'$$

Le passage d'une variable ponctuelle à une variable régularisée a des effets sur les divers paramètres géostatistiques liés au variogramme et à la loi spatiale, qui sont loin d'être triviaux. Le variogramme, par exemple, subit une transformation non-linéaire: l'effet de pépité s'atténue, le comportement linéaire à l'origine du modèle sphérique se transforme en un comportement parabolique, la portée est en général modifiée et le palier diminué.

11 KRIGEAGE DE BLOCS

Le krigeage ordinaire, à partir d'informations ponctuelles, d'une valeur définie sur un volume V_0 centre sur un noeud x_0 d'une grille d'estimation, possède une équation générale du type,

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = \sum_{u=0}^s \bar{C}_u(x_{\alpha}, V_0)$$

où les $\bar{C}_u(x, V)$ sont des covariances moyennes point-bloc.

Numériquement, le krigeage d'un bloc peut être rapproché d'un filtrage, puisque le résultat va être plus lisse que le krigeage ordinaire ponctuel correspondant, mais la comparaison s'arrête là. Plus le support augmente, plus les covariances point-bloc sont diluées, et le krigeage ordinaire d'un bloc de très grande taille devient, à la limite, identique à un krigeage de la moyenne [7].

12 VARIABLES SUR SUPPORTS DIFFERENTS

Dans certaines applications, on dispose de plusieurs sources d'informations définies sur des supports différents (par exemple, des

mesures de réflectance de télédétection et des données au sol pédologiques, géochimiques ou biologiques).

Une manière plus générale d'écrire (8) est de l'exprimer sous la forme d'un produit de convolution stochastique de valeurs ponctuelles d'une fonction aléatoire stationnaire d'ordre deux $Z_i(x)$ par une fonction de pondération $p(x)$,

$$Z_{p_i}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z_i(x+y)p_i(y)dy = Z^* \check{p}_i$$

où $\check{p}_i = p(-x)$ est la transposée de la fonction de pondération.

La covariance croisée régularisée s'écrit ensuite,

$$C_{ij}^-(h) = C_{ij} * \check{p}_i * p_j$$

Les variogrammes croisés régularisés peuvent être posés de la même manière,

$$\overline{\gamma}_{ij}(h) = \gamma_{ij} * \check{p}_i * p_j - A_{ij}$$

avec des constantes A_{ij} garantissant que $\overline{\gamma}_{ij}(0) = 0$.

Par le choix de fonctions de pondération appropriées, on peut construire des modèles de corégionalisation adaptés à la physique des variables considérées [1][2][8][9].

CONCLUSION

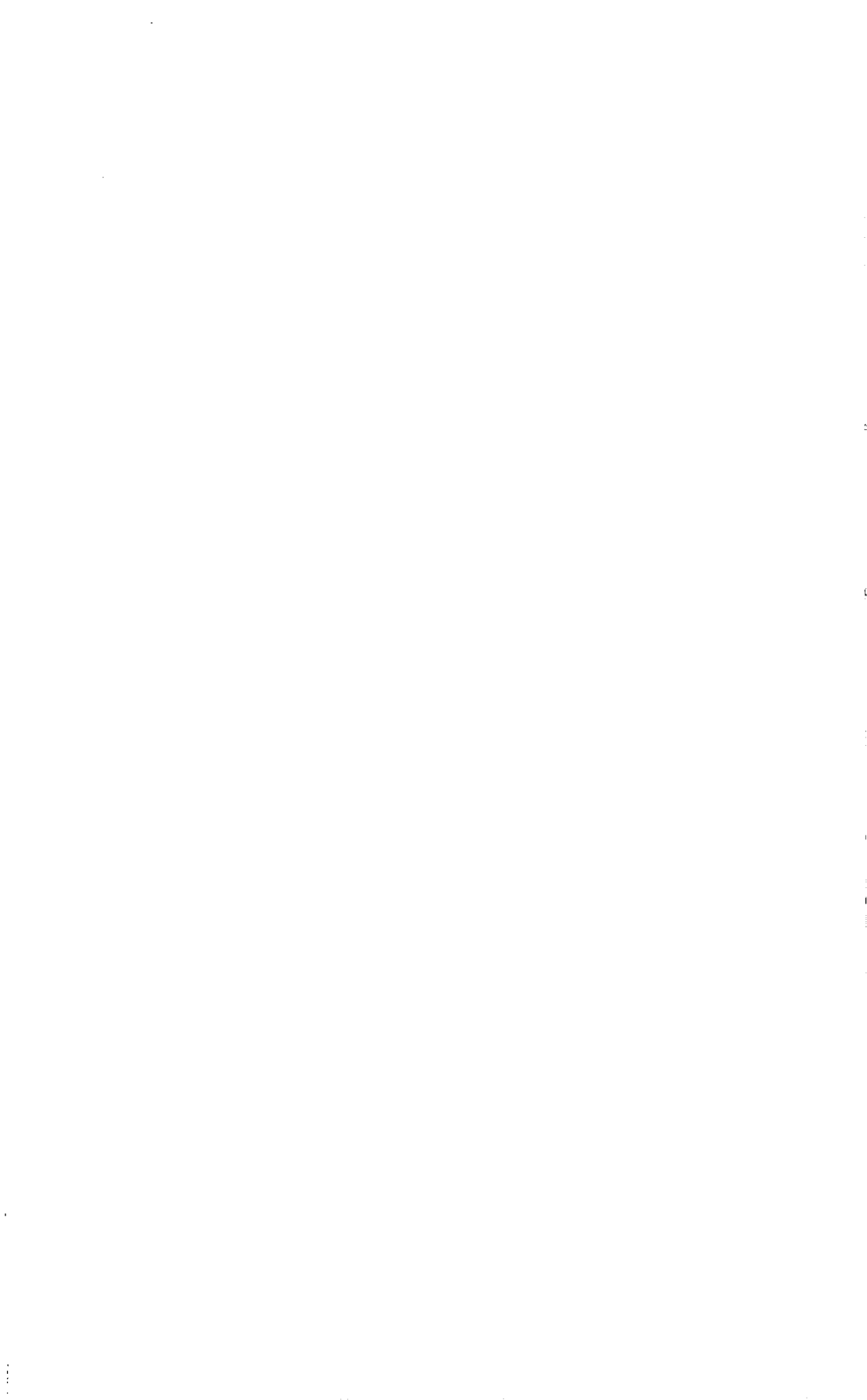
Nous nous sommes attachés, dans la première partie de ce bref exposé, à montrer de quelle manière le krigeage ordinaire tient compte des différentes composantes identifiées dans une analyse de la variabilité spatiale.

Nous n'avons fait qu'effleurer le problème du changement de support dans un contexte de géostatistique linéaire. Dans maintes situations, en particulier lorsqu'on s'intéresse à la proportion d'une région (éventuellement subdivisée en des unités d'une taille différente du support des échantillons) pour laquelle la variable régionalisée dépasse un certain seuil critique, il est plus avantageux

Le domaine des méthodes applicables à des données multivariées mesurées sur des supports différents est, quant à lui, encore peu exploré.

REFERENCES

- [1] MATHERON G (1965) *Les Variables Régionalisées et leur Estimation*. Masson, Paris.
- [2] MATHERON G (1970) *La Théorie des Variables Régionalisées et ses Applications*. Fascicule 5, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- [3] MATHERON G (1989) *Estimating and Choosing*. Springer-Verlag, Berlin .
- [4] SERRA J (1968) *Les structures gigognes: morphologie mathématique et interprétation métallogénique*. Mineral. Deposita, 3, 135-154.
- [5] GALLI A, GERDIL-NEUILLET F & DADOU C (1984) *Factorial kriging analysis: a substitute to spectral analysis of magnetic data*. In: Verly G et al (eds) *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, 543-557, NATO ASI Series C-122, Reidel, Dordrecht.
- [6] WACKERNAGEL H & BUTENUTH C (1989) *Caractérisation d'anomalies géochimiques par la géostatistique multivariable*. J. Geochem. Explor., 32, 437-444.
- [7] RIVOIRARD J (1984) *Le Comportement du Poids de Krigeage*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole des Mines de Paris.
- [8] HUIJBREGTS C (1971) *Reconstitution du variogramme ponctuel à partir d'un variogramme régularisé*. N-244, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- [9] SEGURET S & CHAUVET P (1988) *Pour une méthodologie de déconvolution de variogrammes*. N-51/88/G, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- [10] LANTUEJOUL C (1990) *Cours de Sélectivité*. C-140, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- [11] RIVOIRARD J (1990) *Introduction au Krigeage Disjonctif et à la Géostatistique Non-Linéaire*. C-139, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.



VARIABILITE ET SOURCES DE VARIABILITE A DIFFERENTES ECHELLES ANALYSE DE VARIANCE DE MODELES A EFFETS FIXES OU ALEATOIRES

LALOE F.

RESUME

L'identification de sources de variations à divers niveaux d'observation pose une difficulté due à la diffusion de l'hétérogénéité à travers ces niveaux.

Nous présentons le problème à partir de l'analyse de variance de modèle à effets fixes ou aléatoires, et en nous appuyant sur des exemples issus d'enquêtes de santé et de rendement de pêche.

Nous discutons des conséquences en matière de cartographie ou d'analyse de séries chronologiques.

INTRODUCTION

La collecte d'information à divers échelles d'observation est monnaie courante. Ainsi dans le domaine de l'échantillonnage, les méthodes de sous échantillonnage font l'objet de chapitres entiers dans les manuels de référence (par exemple Cochran, 1977).

Dans le cas de la pêche artisanale au Sénégal, la collecte d'une partie de l'information repose sur un plan à trois niveaux, avec la sélection:

- de poissons dans des pirogues,
- de pirogues au cours de jours d'enquête,
- de jours d'enquêtes au cours de quinzaines.

Dans le cas d'une enquête sur la couverture vaccinale des enfants de Pikine (périphérie de Dakar), les observations concernaient:

- des enfants dans des îlots,
- des îlots dans des quartiers,
- des quartiers dans des sous zones de la ville.

On désire en général analyser la variabilité aux divers niveaux, en tentant de répondre à des questions qui peuvent être formulées de diverses manières. On peut par exemple se demander si la couverture vaccinale peut varier d'une sous-zone à l'autre, ou bien si certaines caractéristiques des sous-zones sont sources de variabilité dans la couverture vaccinale. Les mêmes questions peuvent être posées pour ce qui concerne les pêches réalisées au cours de quinzaines différentes.

Ces questions sont différentes. Il peut y avoir des différences entre les taux de vaccination selon les sous-zones ou entre les pêches selon les quinzaines sans que les sous-zones ou les quinzaines constituent en elles mêmes des sources, mais tout simplement parce que ces sources peuvent se trouver à des échelles plus fines, les quartiers ou les jours de pêche par exemple.

Pour répondre à ces questions différentes, il existe des approches différentes par analyse de variance de modèles à "effets fixes" pour ce qui concerne la recherche de variabilité, ou de modèles à "effets aléatoires" pour ce qui concerne la recherche des sources de variabilité.

I ANALYSE DE LA VARIANCE DE MODELES HIERARCHIQUES

Nous nous placerons ici dans le cas de deux sources de variation, avec des effectifs équilibrés, conduisant à des formulations permettant d'exposer les différentes approches de la façon la plus claire possible. On trouvera une présentation claire et rigoureuse dans le livre de P. Dagnélie (1975).

I-1 Le modèle à effets fixes

En nous inspirant de l'exemple halieutique évoqué en introduction, on peut construire le modèle théorique suivant:

$$Y_{ijk} = m + a_i + b_j + E_{ijk}$$

Où Y_{ijk} est par exemple la variable aléatoire dont une réalisation est le poids y_{ijk} de poissons dans la $k^{\text{ième}}$ pirogue de retour de pêche le $j^{\text{ième}}$ jour d'enquêtes de la $i^{\text{ième}}$ quinzaine. Il y a p quinzaines ($i=1\dots p$), q jours d'enquêtes dans chaque quinzaine ($j=1\dots q$ pour tout i) et n pirogues font l'objet d'observations lors de chacun de ces jours ($k=1\dots n$ pour chaque les combinaison i et j). Les réalisations (observations) s'écrivent quant à elles:

$$y_{ijk} = m + a_i + b_{ij} + e_{ijk}$$

en imposant les contraintes:

$$\sum_i a_i = 0 \text{ et } \sum_j b_{ij} = 0 \text{ pour tout } i,$$

les estimations par les moindres carrés des paramètres du modèles sont les suivantes:

$$\hat{m} = \bar{y}_{...}, \hat{a}_i = (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) \text{ et } \hat{b}_{ij} = (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..})$$

(les indices sur lesquels on effectue des moyennes sont remplacés par des points, $\bar{Y}_{i..}$ étant par exemple la moyenne de toutes les observations réalisées lors de la $i^{\text{ième}}$ quinzaine). On a l'équation d'analyse de la variance suivante:

$$\sum_{i,j,k} (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 =$$

$$qn \sum_i (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + n \sum_{ij} (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..})^2 + \sum_{ijk} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad \text{soit}$$

$$\sum_{ijk} (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = SCE_a + SCE_{b(a)} + SCE_r,$$

ou en termes de carrés moyens:

$$\sum_{ijk} (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = (p-1)CM_a + p(q-1)CM_{b(a)} + pq(n-1)CM_r$$

Si les variables E_{ijk} suivent des lois normales centrées indépendante de même variance σ_r^2 , on peut tester les hypothèses suivantes:

H_0 ; $b_{ij} = 0$ pour tout i et j (égalité des moyennes de tous les jours d'une même quinzaine),

H_0 ; $a_i = 0$ pour tout i (égalité des moyennes de toutes les quinzaines).

Sous l'hypothèse H_0 , la valeur $\frac{CM_a}{CM_r}$ est une réalisation d'une variable aléatoire $F_{p-1, pq(n-1)}$.

Sous l'hypothèse H_0 , la valeur $\frac{CM_{b(a)}}{CM_r}$ est une réalisation d'une variable $F_{p(q-1), pq(n-1)}$.

1-2 Le modèle à effets aléatoires

En poursuivant avec le même exemple, nous pouvons écrire le modèle sous une forme traduisant l'origine des sources de variabilité. Le modèle théorique devient:

$$Y_{ijk} = m + A_i + B_{ij} + E_{ijk}$$

où A_i et B_{ij} et E_{ijk} sont cette fois des variables aléatoires centrées indépendantes de variances respectives σ_a^2 , σ_b^2 et σ_r^2 . Y_{ijk} devient alors une variable aléatoire de moyenne m et de variance $\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_r^2$. Lorsque les lois des variables A , B et E sont normales, les trois termes SCE_a , $SCE_{b(a)}$ et SCE_r sommés dans l'équation de l'analyse de la variance sont des réalisations de lois proportionnelles à des χ^2 :

$$SCE_a : (qn\sigma_a^2 + n\sigma_b^2 + \sigma_r^2) \chi^2_{p-1}$$

$$SCE_{b(a)} : (n\sigma_b^2 + \sigma_r^2) \chi^2_{p(q-1)}$$

$$SCE_r : (\sigma_r^2) \chi^2_{pq(n-1)}$$

Les espérances des carrés moyens CM_a , $CM_{b(a)}$ et CM_r sont respectivement égales à $qn\sigma_a^2 + n\sigma_b^2 + \sigma_r^2$, $n\sigma_b^2 + \sigma_r^2$ et σ_r^2 .

Le test de l'hypothèse H_0'' ($\sigma_a^2 = 0$, absence de source de variation au niveau des quinzaines) s'effectue donc maintenant à l'aide de $\frac{CM_a}{CM_{b(a)}}$ qui est une réalisation d'une loi de Fisher à $p-1$ et $p(q-1)$ degrés de liberté multipliée par la valeur $\frac{(qn\sigma_a^2 + n\sigma_b^2 + \sigma_r^2)}{(n\sigma_b^2 + \sigma_r^2)}$ qui est supérieure à 1 dès que σ_a^2 est strictement positif.

L'hypothèse de nullité de σ_b^2 est quant à elle semblable à l'hypothèse H_0 du modèle à effet fixe ($b_{ij} = 0$ pour tout i et j) et peut être testée en

remarquant que $\frac{CM_{b(a)}}{CM_r}$ est une réalisation d'une loi de Fisher à $p(q-$

1) et $pq(n-1)$ degrés de liberté multipliée par valeur $\frac{n\sigma_b^2 + \sigma_r^2}{\sigma_r^2}$ qui est

égale à 1 si la variance σ_b^2 est nulle.

Si l'hypothèse H_0 s'exprime de façon semblable dans les deux cas, les hypothèses H_0' et H_0'' sont différentes et il est possible (et relativement fréquent) que l'égalité des moyennes au niveau supérieur (quinzaines ici) soit rejetée alors que celle de nullité de la variance σ_a^2 ne le soit pas. Ce résultat est normal et provient du fait qu'une source de variabilité à une échelle donnée peut se traduire par une variabilité à un niveau supérieur. Si par exemple il n'y a pas de variabilité au niveau des quinzaines (pouvant provenir par exemple d'une saisonnalité), le fait que des jours peuvent être meilleurs que d'autres fera que des quinzaines seront différentes les unes des autres parce que ne bénéficiant pas du même nombre de bons ou de mauvais jours. Ceci permet de comprendre pourquoi le carré moyen apparaissant au dénominateur du test de l'hypothèse H_0' (quinzaines semblables) fait référence à la variabilité intra jour alors que celui du test de l'hypothèse H_0'' (absence de source de variation au niveau de la quinzaine) fait référence à la variabilité intra et inter jours. Lorsque le test de l'hypothèse H_0 conduit à la rejeter, on peut

en fait que peu d'intérêt, puisque la question n'est plus de savoir s'il existe des différences entre quinzaines, auxquelles on s'attend, mais de rechercher si ces différences sont accrues par l'existence de sources de variation s'exprimant à ce niveau.

II IMPLICATIONS

La distinction entre variation et source de variabilité est tout à fait importante, aussi bien pour la recherche de cadres descriptifs (modèles) susceptibles d'être utilisés pour la synthèse de l'information disponible sur un système, et l'étude de son comportement, que pour ce qui concerne la présentation des résultats, selon une expression cartographique par exemple.

II-1 Les cadres de description

L'exemple halieutique que nous avons présenté est issu d'un problème rencontré dans le cadre d'une recherche descriptive sur les résultats de pêcheurs artisans au Sénégal (Gérard et Greber 1985). Il convenait, pour évaluer les qualités du système de collecte de l'information, de rechercher à quelles fréquences peuvent s'exprimer les diverses sources de variabilité affectant les rendements de pêche. L'analyse a permis de montrer que la variabilité "inter jours-intra quinzaine" est élevée pour les rendements obtenus pour de nombreuses espèces de poissons, mais il était également important de savoir si les différences entre quinzaines peuvent s'expliquer par cette seule variabilité, ou si elles sont amplifiées par d'autres sources de variations s'exprimant à des fréquences plus faibles. Pour cette étude, les déséquilibres du plan rendaient délicate l'approche par modèle aléatoire, mais la mise en évidence de saisonnalités suffisait pour répondre positivement à la question. Ce type de questions est incontournable lorsqu'on désire étendre le sujet, en s'intéressant aux stratégies d'exploitation des unités de pêche par exemple, et à leur impact sur le système d'exploitation en général. En fonction des rapidités selon lesquelles les pêcheurs décident des changements de tactique pouvant impliquer ou non leur migration, les fréquences auxquelles s'expriment les diverses sources de variabilité affectant les rendements prennent des sens différents, et il doit en être tenu compte au niveau de la recherche d'une synthèse générale des données.

II-2 La présentation des résultats

Nous présenterons ici de façon un peu plus complète le traitement d'une partie du jeu de données sur la couverture vaccinale d'enfants de Pikine, dont l'analyse a fait l'objet d'une publication (Laloë et al 1989). Afin de disposer d'un modèle équilibré, nous n'avons conservé

ici que quatre quartiers, pris au hasard, dans chacune des 7 sous-zones où quatre quartiers au moins avaient été visités. Pour chacun des 28 quartiers concernés on dispose de deux observations, proportions d'enfants entre 0 et 4 ans à jour de leurs vaccination dans deux îlots de 14 parcelles.

Le modèle théorique peut s'écrire de deux façons:

$$Y_{ijk} = m + a_i + b_{ij} + E_{ijk} \quad (\text{modèle à effets fixes}),$$

$$Y_{ijk} = m + A_i + B_{ij} + E_{ijk}' \quad (\text{modèle à effets aléatoires}).$$

i est le numéro de la sous-zone (i=1...7),

j est le numéro du quartier dans la sous-zone (j=1...4),

k est le numéro de l'îlot dans le quartier (k=1,2)

La variable E_{ijk} rend compte de la variabilité des proportions dans les quartiers et de l'erreur d'estimation de la proportion réelle d'enfants vaccinés dans l'îlot "ijk". La variance de E_{ijk} (σ_r^2) dépend donc de la proportion et de l'effectif n_{ijk} d'enfants observés. La

variabilité modérée de l'ensemble des quantités $\frac{y_{ijk}(1-y_{ijk})}{n_{ijk}}$ nous permet d'admettre un bonne robustesse du modèle et de considérer que les niveaux de rejet des tests présentés sont des approximations satisfaisantes des niveaux réels.

Les valeurs moyennes de proportions d'enfants à jour de leurs vaccinations sont données dans le tableau ci-dessous:

Quartier sous-zone	1	2	3	4	Moyenne
1	0.432	0.404	0.442	0.700	0.494
2	0.394	0.317	0.308	0.515	0.383
3	0.364	0.216	0.250	0.321	0.288
4	0.274	0.477	0.290	0.288	0.332
5	0.140	0.726	0.444	0.303	0.403
6	0.423	0.283	0.390	0.263	0.340
7	0.575	0.551	0.308	0.446	0.470

Les carrés moyens obtenus sont:

$$CM_a = 0.045 \quad CM_{b(a)} = 0.036 \quad \text{et} \quad CM_r = 0.016$$

La valeur de CM_r est une estimation de σ_r^2 et, dans le cas particulier du modèle à effets aléatoires, les estimations de σ_a^2 et σ_b^2 peuvent se déduire des espérances des carrés moyens CM_a et $CM_{b(a)}$:

$$\hat{\sigma}_b^2 = \frac{1}{2}(CM_{a(b)} - CM_r) = 0.020/2 = 0.01 \text{ correspondant à un écart-type de } 0.1$$

$$\hat{\sigma}_a^2 = \frac{1}{8}(CM_a - CM_{b(a)}) = 0.009/8 = 0.001 \text{ correspondant à un écart type de l'ordre de } 0.03$$

La valeur $\frac{CM_{b(a)}}{CM_r} = 2.23$ permet de rejeter l'hypothèse H_0 de nullité

des b_{ij} ou de nullité de la variance σ_b^2 avec un risque d'erreur inférieur à 5% (le seuil est de 1.96 pour une loi de Fisher à 21 et 28 ddl).

La valeur $\frac{CM_a}{CM_r} = 2.82$ permet de rejeter l'hypothèse H_0' de nullité des a_i avec un risque d'erreur également inférieur à 5% (le seuil est de 2.45 pour une loi de Fisher à 6 et 28 ddl; il existe des différences entre les proportions d'enfants vaccinés selon les sous-zones).

Mais la valeur $\frac{CM_a}{CM_{b(a)}} = 1.26$ ne permet pas de rejeter l'hypothèse

H_0'' : $\sigma_a^2 = 0$ (il n'existe pas de source de variabilité significative s'exprimant au niveau de la sous-zone; le seuil de rejet au risque 5% est de 2.60 pour une loi de Fisher à 6 et 21 ddl).

Ces conclusions engendrent une difficulté au niveau de l'expression cartographique des résultats. En effet, à partir des différences de couverture vaccinale selon les quartiers, on pourrait rechercher une présentation de ces quartiers, au moyen de couleurs différentes sur une carte. Mais on ne dispose pas de données dans tous les quartiers, et on aimerait pouvoir affecter chaque quartier à une couleur. Une solution pourrait alors consister en un regroupement des quartiers par sous-zone, permettant alors de présenter une information dans

les quartiers non visités. Mais une telle présentation laisse entendre une homogénéité intra sous-zone ou au moins l'existence d'une source de variabilité s'exprimant à l'échelle de la sous-zone.

Lors de l'étude plus complète des données disponibles, nous avons également envisagé une classification des quartiers en fonction de leur proximité avec des dispensaires, mais cette tentative n'a pas non plus donné de résultat positif.

La conclusion générale que nous avons tirée dans ces conditions a été l'impossibilité d'une cartographie de la couverture vaccinale sur l'ensemble de Pikine, à partir des seules informations disponibles à partir de cette enquête.

CONCLUSION

L'analyse de la variabilité est un domaine vaste dans lequel on s'intéresse à un objet qui peut être abordé selon différents points de vue. L'analyse de la variance, sur laquelle nous avons insisté ici n'est heureusement pas le seul outil permettant des analyses, mais les différentes formulations d'hypothèses présentées permettent une mise en évidence de la variété des questions auxquelles on peut tenter de répondre.

Il s'agit là de différentes façons de qualifier l'information dont on dispose, qualification conduisant à des connaissances sur la distribution des données, et donc à des formulations de problématiques qui, en étant des traductions plus fidèles des questions émises par les choses étudiées, peuvent conduire à des définitions plus satisfaisantes de nos objets d'études, et à une meilleure appréhension de leurs formes.

REFERENCES

- COCHRAN W.G. 1977. Sampling techniques. Third edition, J.Wiley and sons, 428 p.
- DAGNELIE P. 1975. Théorie et méthodes statistiques, vol. 2. Presses agronomiques de Gembloux, 463 p.
- GERARD M. et P. GREBER, 1985. Analyse de la pêche artisanale au Cap-Vert. Description et étude critique du système d'enquête. Doc. Sci. Centre Rech. Océano. Dakar Thiaroye, 98, 77 p.
- LALOE F., SALEM G. et C. BENARD, 1989. Définition de sous-zones à risques: dimensions géographiques de la couverture sanitaire à Pikine. In Urbanisation et santé dans le tiers monde, G. Salem et E. Jeannée ed. 471-476. Collection Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris.

PROBLEMES STATISTIQUES DE LA TRES GRANDE VARIABILITE

MULLON CH.¹, PICHON G.²

RESUME

L'analyse expérimentale des phénomènes présentant une très grande variabilité semble correspondre à une limitation de l'usage des lois des grands nombres. Nous examinons comment cette constatation expérimentale s'explique naturellement lorsque les phénomènes étudiés suivent des lois de Pareto. Nous indiquons ensuite quelles raisons nous conduisent à envisager que ces lois de Pareto ne sont pas exceptionnelles et correspondent en fait à des situations hiérarchisées rencontrées assez souvent dans l'analyse des phénomènes complexes, notamment à l'occasion de modélisations fractales.

Dans ce sens, cet exposé qui ne contient pas de résultats originaux peut être considéré comme une introduction à la partie statistique de la théorie de Mandelbrot.

INTRODUCTION

Le problème fondamental du transfert d'échelle, entre données quantitatives, réside dans la difficulté d'extrapoler des mesures effectuées sur des parties à une mesure valable sur le tout : on se trouve parfois dans la situation où on ne peut accepter le résultat, manifestement faux, du calcul d'une moyenne ou d'une somme. Si l'explication la plus courante de cette situation est "fonctionnelle" et réside dans une nécessaire prise en compte d'interactions entre les parties, on doit cependant considérer que l'emploi de méthodes issues de la statistique inférentielle peut, en certaines circonstances, ne pas être possible, et se révéler tout à fait inapproprié à des calculs de moyennes et de sommes. En fait ces circonstances sont celles de la très grande variabilité.

¹ ORSTOM-LIA

² ORSTOM-LIA

Lorsqu'une équipe de recherche répète une même expérience et obtient des résultats chaque fois différents sans pouvoir indiquer les causes de ces différences, elle en déduit une très grande variabilité pour le phénomène étudié. La théorie statistique enseigne que cette variabilité observée peut être inhérente aux phénomènes, mais également provenir du dispositif expérimental employé, notamment dans sa partie statistique; c'est ce point que nous voudrions développer ici.

En effet, la situation de la grande variabilité apparaît paradoxale sur un plan statistique : elle semble correspondre à une remise en cause de la loi forte des grands nombres ou du théorème central-limite, qui précisent dans quelle mesure une augmentation du nombre des essais dans une expérience produit une augmentation de la précision du résultat obtenu.

STATISTIQUE DE L'EXPERIMENTATION

Donnons très rapidement quelques rappels sur la théorie statistique de l'expérimentation.

La première hypothèse est que le résultat d'une expérience peut être vu comme une variable aléatoire X ayant une loi de densité $f(x)$. La loi de répartition de X est donnée par :

$$F(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

La valeur cherchée, le résultat de la mesure, qui est en fait la moyenne de la variable aléatoire X , est donnée par :

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx.$$

La variabilité de cette quantité, la sensibilité de la mesure, est indiquée par son écart-type

$$\sigma(X) = \sqrt{V(X)}$$

où $V(X)$ est la variance de la variable aléatoire X :

$$V(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M(X))^2 f(x) dx$$

Pour estimer la quantité $M(X)$, on effectue N essais expérimentaux et on en note les résultats

$$\{X_i, i=1, N\}.$$

Alors, on estime $M(X)$ par :

$$M_{\text{echant}}^{(X)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

Et, les lois des grands nombres nous indiquent qu'un indicateur de la qualité de cette estimation est son écart-type et qu'il est donné par :

$$\sigma_{\text{estimateur}} = \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}}$$

où l'on voit clairement que l'augmentation du nombre d'essais conduit à une augmentation de la qualité de l'estimation. On utilise ainsi le théorème central-limite qui permet de déduire des résultats du type :

Il est probable à 95% que $M(X)$ appartienne à l'intervalle

$$\left[M_{\text{echant}}^{(X)} - 1.96 \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}}, M_{\text{echant}}^{(X)} + 1.96 \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} \right].$$

Or une première difficulté vient du fait que dans presque tous les cas, on ne connaît pas la valeur exacte de $\sigma(X)$; lorsque l'on veut aller plus loin et avoir une mesure effective de la sensibilité de l'estimation, on estime $V(X)$ et $\sigma(X)$ par:

$$V_{\text{echant}}^{(X)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M_{\text{echant}})^2$$

$$\sigma_{\text{echant}}^{(X)} = \sqrt{V_{\text{echant}}^{(X)}}$$

Nanti de ces deux estimations, et de l'assimilation entre σ et $\sigma_{\text{echant}}^{(X)}$ on déduit :

Il est probable à 95% que $M(X)$ appartienne à l'intervalle

$$\left[M_{\text{echant}}^{(X)} - 1.96 \frac{\sigma_{\text{echant}}^{(X)}}{\sqrt{N}}, M_{\text{echant}}^{(X)} + 1.96 \frac{\sigma_{\text{echant}}^{(X)}}{\sqrt{N}} \right]$$

LE CAS DE LA TRES GRANDE RARETE

Un premier exemple très simple où les résultats d'une expérimentation peuvent conduire à un diagnostic de très grande variabilité est celui de la grande rareté. Considérons en effet, le cas où la variable aléatoire peut prendre les valeurs 0 et 1 avec les probabilités :

$$P\{X=1\}=p$$

$$P\{X=0\}=q=1-p$$

Alors on trouve immédiatement que :

$$E(X) = p$$

$$V(X) = pq = p(1-p)$$

Lorsque l'on effectue une estimation de la moyenne de X , en fait de p , on compte le nombre n de cas où la valeur X_i a été trouvée égale à 1 à l'occasion des N essais; on estime ainsi :

$$E_{\text{echant}}^{(X)} = \frac{n}{N}, V_{\text{echant}}^{(X)} = \frac{n}{N} \left(1 - \frac{n}{N}\right), \sigma_{\text{echant}}^{(X)} = \sqrt{\frac{n}{N} \left(1 - \frac{n}{N}\right)}$$

Donnons une application directe de ces calculs :

Lorsque l'on veut estimer le nombre de personnes atteintes en France d'une maladie rare (à priori de l'ordre de 1 pour 1000) et que l'on effectue une enquête sur 10.000 personnes parmi lesquelles 16 se révèlent atteintes, on ne peut conclure qu'à un résultat du type : il y a 95% de chances pour que le nombre de malades parmi 50 millions de Français appartienne à l'intervalle $[25.000, 135.000]$; en première estimation il peut être estimé égal à 80.000, mais un autre sondage dans des conditions identiques aurait pu tout aussi bien conduire à une valeur de 120.000. Si l'on effectue une enquête sur 100.000 personnes parmi lesquelles 160 sont atteintes, cet intervalle devient $[68.000, 92.000]$.

Ce cas trivial de la grande rareté conduit à des résultats expérimentaux très variables et on comprend bien pour quelles raisons seule l'augmentation du nombre d'essais peut conduire à une plus grande précision. Il n'y a là aucune difficulté d'ordre théorique, seulement

l'exigence de protocoles expérimentaux très lourds dont on cherche parfois, mais en vain, à faire l'économie.

LA LOI DE PARETO

Nous voudrions évoquer une situation beaucoup plus intéressante dans laquelle la variabilité a une cause moins immédiate. Considérons la loi hyperbolique, cas particulier de la loi de Pareto. Sa fonction de densité est donnée par la formule :

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 1 \\ \alpha x^{-\alpha-1} & \text{si } x \geq 1 \text{ où } \alpha > 0 \end{cases}$$

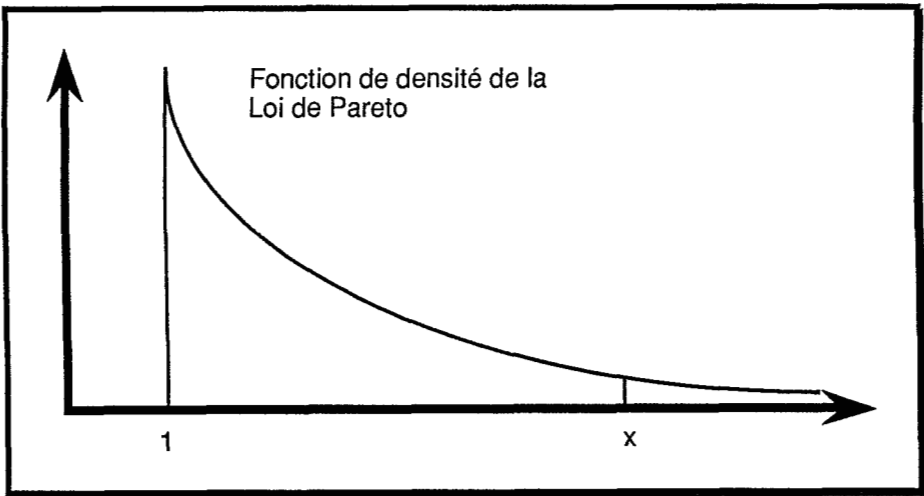


Figure 1 : Distribution de la loi de Pareto

La fonction de répartition $F(X)$ est donnée par :

$$F(x) = P(X < x) = \int_1^x f(x) dx = \int_1^x \alpha x^{-\alpha-1} dx = [-x^{-\alpha}]_1^x = 1 - x^{-\alpha}$$

Si $i < \alpha$, le $i^{\text{ième}}$ moment de cette loi est donné par :

$$E^i(X) = \int_1^{\infty} x^i f(x) dx = \int_1^{\infty} -\alpha x^{-\alpha-1+i} dx = \left[\frac{\alpha}{i-\alpha} (x^{i-\alpha}) \right]_1^{\infty} = \frac{\alpha}{\alpha-i}$$

Mais si $i \geq \alpha$, le $i^{\text{ième}}$ moment est infini.

En particulier, la moyenne et la variance de cette loi sont données par :

$$M(X) = \frac{\alpha}{\alpha-1} \text{ si } \alpha > 1$$

$$V(X) = \frac{\alpha}{(\alpha-1)^2(\alpha-2)} \text{ si } \alpha > 2$$

Et on voit qu'une difficulté surgit lorsque α est compris entre 1 et 2: en effet, dans ce cas, la loi de X a une moyenne, mais a une variance infinie!

Il est alors nécessaire d'être très prudent à l'occasion d'une expérimentation visant à étudier un phénomène qui suit une telle loi. En effet, dans toute expérimentation, on peut calculer une moyenne d'échantillonnage et une variance d'échantillonnage et ensuite appliquer directement les résultats ci-dessus, sans se souvenir de l'assimilation de $s(X)$ à $\sigma_{\text{echant}}(X)$, qui ici n'est absolument pas justifiable.

SIMULATION DE LA LOI DE PARETO

On trouve sur le tableau suivant, les résultats d'une simulation informatique : on a tiré N nombres selon la loi de Pareto de paramètre α et on en estime la moyenne pour un certain nombre de valeurs de α et de N . On y voit que lorsque $\alpha > 2$, la variabilité de l'estimation décroît bien lorsque le nombre d'essais augmente et que l'expérience permet d'aboutir au chiffre exact. Par contre, dès que α se trouve entre 1 et 2, on trouve une variabilité très grande de l'ordre de la moyenne recherchée, et de plus qui ne diminue pas en fonction du nombre d'essais expérimentaux.

$\alpha=1.1$ $N = 100$ $E = 11$		
Essai	M echant	$\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ echant
0	3.386390	0.55158
1	7.946462	0.61697
2	5.940941	0.77283
3	4.184160	0.69072
4	4.978180	0.85373
5	7.089252	0.20945
6	5.248021	0.24577
7	5.696202	0.56436
8	4.841200	0.80710
9	3.613520	0.84695

$\alpha=1.1, N = 1000, E = 11$		
Essai	M echant	$\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ echant
0	4.741370	0.60386
1	5.810760	0.80448
2	4.081090	0.41123
3	5.857451	0.23124
4	21.993371	0.56232
5	6.650982	0.19758
6	5.039570	0.66299
7	5.268920	0.54118
8	7.647731	0.71144
9	7.051291	0.22852

$\alpha=2.62, N=100, E=1.61$		
Essai	M echant	$\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ echant
0	1.574710	0.07844
1	1.525870	0.06719
2	1.691580	0.12495
3	1.752150	0.11953
4	1.604210	0.09688
5	1.679090	0.09756
6	1.454240	0.04941
7	1.592570	0.08640
8	1.714410	0.10508
9	1.539150	0.08069

$\alpha=2.62, N=1000, E=1.61$		
Essai	M echant	$\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ echant
0	1.645150	0.03248
1	1.699280	0.05005
2	1.587370	0.02664
3	1.590200	0.02670
4	1.621830	0.03766
5	1.559810	0.02917
6	1.694080	0.05530
7	1.613850	0.05726
8	1.669360	0.04053
9	1.630710	0.03520

REMARQUE SUR LA FORME DE LA DISTRIBUTION DE LA LOI DE PARETO

La forme de la fonction de densité de la loi de Pareto est classique, avec un mode à l'origine et une décroissance régulière. Elle ne diffère, en fait, de lois plus connues, comme la loi géométrique, que par la forme de sa décroissance à l'infini, relativement lente. L'importance, dans les calculs statistiques, de cette décroissance est d'autant plus grande que le phénomène étudié est quantifié sur une très large gamme d'échelles : on peut ainsi considérer que, s'il y a entre les valeurs extrêmes des distributions observées un rapport inférieur à 100, l'utilisation de la loi géométrique ou de la loi binomiale négative s'avère justifié, notamment par le fait qu'elle conduit à des calculs fiables. Par contre, dès que le rapport entre les valeurs extrêmes est supérieur à 1000, par exemple dans le cas des distributions de revenus, on est conduit à s'intéresser principalement au comportement à l'infini de la distribution, au détriment d'autres caractéristiques plus apparentes telles le mode (l'existence d'un sommet dans la courbe), et on doit donner un rôle prépondérant aux lois de Pareto.

P Levy (1925) a développé complètement la théorie statistique de la loi de Pareto et a montré que de façon asymptotique, les lois normales sont des cas particuliers des lois de Pareto.

APPLICATIONS DE LA LOI DE PARETO

La loi de Pareto est couramment utilisée en économie et linguistique.

En économie, elle est reconnue pour fournir une bonne représentation de la distribution des revenus. On l'écrit sous la forme :

$$\text{Proba}(\text{Revenu} > x) = x^{-\alpha-1} \text{ pour } x > 1$$

On a montré (Mandelbrot, 1968) qu'une telle distribution se déduit naturellement, à la fois dans le cas des revenus salariaux et des revenus spéculatifs à partir de l'hypothèse d'une structure hiérarchisée : à chaque agent d'un niveau de revenu donné correspond un nombre précis d'agents subordonnés et il existe un rapport constant entre le revenu d'un agent et le revenu de ses subordonnés; le nombre de subordonnés pour un agent et ce rapport sont des variables aléatoires qui, dans l'intervalle d'observation, ne dépendent ni de l'agent, ni de son niveau de revenu. On considère ainsi que l'ensemble des revenus d'une population est structuré par une propriété d'homothétie interne.

En linguistique, la loi de Pareto se déduit naturellement de la célèbre loi de Zipf qui assure que la fréquence d'un mot dans un texte est liée de façon très simple à son rang parmi tous les mots de ce texte; plus précisément, si l'on classe les N mots d'un texte selon leur fréquence dans ce texte, alors la fréquence du r ^{-ième} est approximativement égale à :

$$N_r = N r^{-d}$$

Là encore, on a donné une explication de cette distribution en terme de structure hiérarchisée de l'ensemble des mots d'un texte: on considère qu'à chaque mot du lexique correspond un nombre fixe de mots qui lui sont associés et que le rapport entre la fréquence d'un mot et celle d'un de ses associés est constant et on en déduit simplement la loi de Zipf. Ces deux hypothèses correspondent en fait à un principe d'optimalité de l'utilisation d'un alphabet fini.

On trouvera une intéressante application de cette théorie dans l'exposé de Yves Lemaître (1989) sur la pharmacopée tahitienne.

PHENOMENES DE PERCOLATION

La théorie de la percolation est à la fois très simple et d'un très vaste champ d'application. Présentons-en très rapidement les grandes lignes dans le cas très suggestif des feux de forêts. Pour un exposé plus général on pourra consulter l'article de Deutcher et al (1983).

La situation que l'on veut formaliser se présente sous la forme d'un réseau maillé

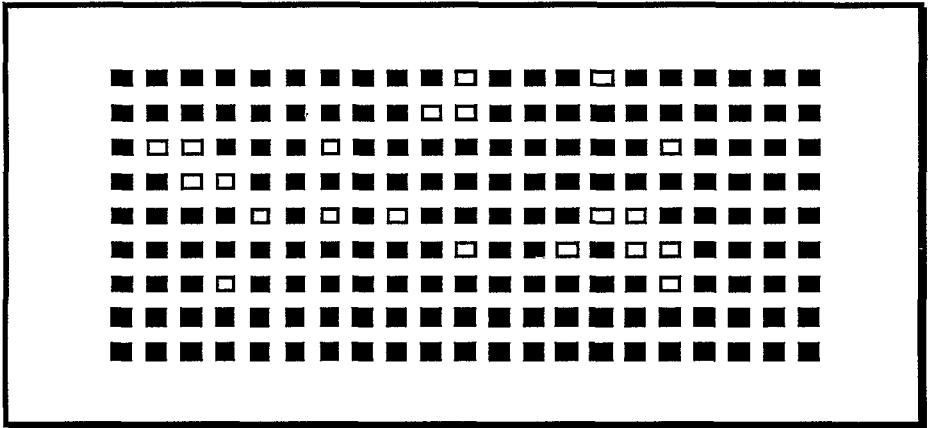


Figure 2 : Réseau de percolation

Chaque point de ce réseau représente un arbre. Parmi les arbres un certain nombre, en blanc sur le schéma, sont inflammables; les autres ne le sont pas. La proportion des arbres inflammables, notée p , est une caractéristique essentielle du réseau; les arbres inflammables sont supposés répartis au hasard dans le réseau. Un arbre est enflammé en bordure de la forêt et le feu se propage de la façon suivante : à chaque pas de temps, tous les voisins inflammables d'un arbre enflammé sont enflammés à leur tour. On conçoit aisément que selon la valeur de la proportion p d'arbres inflammables, le feu se propage de façons très diverses. Les résultats de la théorie de la percolation sont les suivants :

- il existe une valeur de p notée p_0 à partir de laquelle il est à peu près certain qu'un incendie déclenché en bordure de la forêt se propagera jusqu'à la bordure opposée. Cette valeur p_0 est appelée "seuil de percolation". Elle est en fait une caractéristique de la topologie du réseau
- un grand nombre de caractéristiques de la dynamique du système étudié se comportent de façon très particulière autour du seuil de percolation. Ainsi, si nous représentons, la valeur

moyenne de la durée de feux de forêts en fonction du seuil de percolation, nous obtenons une courbe d'équation :

$$D = |p - p_0|^{-\alpha}$$

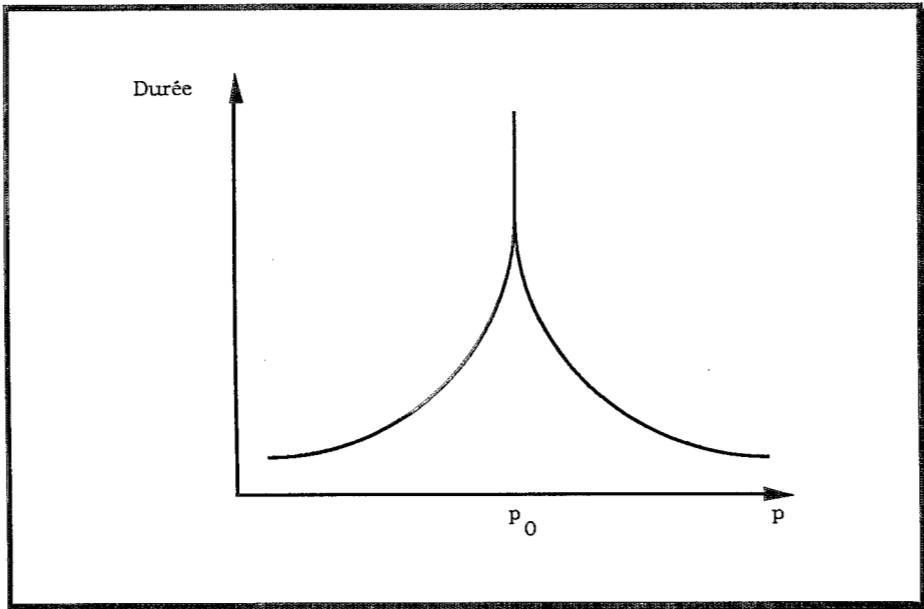


Figure 3: Exposants critiques

α est appelé "exposant critique. C'est également une caractéristique de la topologie du réseau.

Il est alors assez facile de montrer que si l'on est en présence d'un ensemble de forêts réparties autour du seuil de percolation, alors la durée des feux de forêts suivra une loi de Pareto. Et, du calcul des exposants critiques, qui ne dépend que de la topologie du réseau, et en fait principalement de la dimension de l'espace sous-jacent, on peut déduire la valeur de l'exposant de la loi de Pareto et dans de très nombreux cas, le trouver dans la zone [1,2] qui correspond à des lois pour lesquelles on ne peut pas appliquer la loi des grands nombres. Pour la mise en évidence de la relation entre topologie du réseau et valeur des exposants critiques, on pourra consulter l'article de Wilson (1989).

CONCLUSION

Nous avons essayé de montrer dans cet exposé élémentaire que l'emploi trop rapide des outils de l'expérimentation statistique pouvait conduire aux situations paradoxales de la très grande variabilité; il suffit que le phénomène étudié suive une loi dont la

variance est infinie. Nous avons ensuite exhibé une telle loi et essayé de montrer que loin d'être pathologique, elle est assez naturelle et correspond à des situations que l'on peut rencontrer couramment en étudiant un phénomène complexe, possédant une propriété structurelle d'homothétie interne. Enfin en évoquant le cas des phénomènes de percolation, nous avons indiqué comment cette propriété structurelle pouvait provenir de la seule spatialisation du phénomène.

Les applications pratiques de ces remarques élémentaires sont diverses :

- dans le cas d'une enquête socio-économique, visant par exemple à déterminer un revenu moyen, lorsque l'on veut assurer la pertinence et la stabilité du résultat, la solution est bien connue, même si elle n'est pas toujours justifiée théoriquement : il faut constituer deux strates à partir d'un seuil de revenu et procéder à une enquête exhaustive dans la strate supérieure.
- dans les cas où il n'existe pas de base de sondage finie, par exemple dans l'estimation d'une biomasse, il n'y a pas de solution simple évitant la très grande variabilité, alors inhérente au phénomène. Simplement d'après ce que l'on vient de présenter, la recherche des conditions de spatialisation du phénomène aboutissant à la mise en évidence de seuils de percolation et d'exposants critiques permet d'identifier les situations critiques et d'en proposer une approche séparée.

BIBLIOGRAPHIE

- AHARONY and Stauffer, 1987, Percolation, The Encyclopedia of Physical Science and Technology, n°10, 226-244, San Diego CA Academic
- DEUTCHER G et al, 1983, Percolation Structures and Processes, Annals Israel Physical Society, n°5
- LEMAITRE Yves, 1988, Un modèle cognitif de l'invention dans la pharmacopée tahitienne traditionnelle, in *Seminfor 2*, La modélisation : aspects pratiques et méthodologie, Paris, Editions de l'ORSTOM
- JOHNSON Norman, KOTZ Samuel, 1969, Discrete Distributions, Boston, Houghton Mifflin Company
- JOHNSON Norman, KOTZ Samuel, 1969, Continuous Distributions, Boston, Houghton Mifflin Company
- LEVY Paul, 1925, Calcul des probabilités, Paris, Gauthier-Villars
- MANDELBROT Benoit, 1968, Les constantes chiffrées du discours, in *Le Langage*, Paris, Encyclopédie de la Pléiade

MANDELBROT Benoit, 1984, Les objets fractals, Paris, Flammarion

MANDELBROT Benoit, 1960, The Pareto-Levy law and the distribution of income, International Economic Review, n°1

MANDELBROT Benoit, 1963, The variation of certain speculation price, Journal of Business, University of Chicago, n°36, n°40

WILSON Kenneth, 1989, Les phénomènes physiques et les échelles de longueur, in L'ordre du Chaos, Paris, Pour la Science-Belin

ENQUETE PLURIDISCIPLINAIRE AUPRES DES PECHEURS DU DELTA CENTRAL DU NIGER: PLAN DE SONDAGE ET ESTIMATEURS ASSOCIES.

MORAND P., QUENSIERE J., HERRY C.

RESUME

La réalisation d'une enquête par échantillonnage dans une société de pêcheurs Sahéliens posait des problèmes méthodologiques liés d'une part à l'ampleur et à la complexité de l'univers étudié, d'autre part à l'absence de véritable base de sondage au départ, et enfin à la poursuite d'objectifs multiples, pluridisciplinaires.

C'est pourquoi un plan de sondage assez complexe dû être adopté, combinant diverses méthodes d'échantillonnage.

Conséquence de cette complexité des difficultés statistiques surgissent, notamment lorsqu'il s'agit d'évaluer des variances ou précisions. Pour y faire face, on a utilisé des approches classiques (estimateurs H.T.) ou "modernes"(Monte-Carlo). Quelques résultats numériques inédits sont présentés à cette occasion.

INTRODUCTION

Le progrès dans la compréhension de la structure, du fonctionnement et, à terme, de l'évolution des systèmes pêches (cf. contribution de J. Quensière) passe nécessairement, à certains moments, par l'acquisition de nouvelles données, c'est-à-dire par des études descriptives. Dans ce cadre, un mot s'impose de prime abord dès lors qu'il s'agit du domaine humain: enquête. Mais il recouvre en fait des pratiques différentes, adaptées aux besoins et à la démarche de chaque discipline. La forme décrite ici est bien précise: il s'agit d'une enquête statistique par échantillonnage, faisant appel aux techniques de sondage **aléatoire** (et non pas "raisonné"), lesquelles ont pour principal mérite de permettre une inférence explicite des paramètres de la fraction observée (l'échantillon) à "l'univers" étudié. Après une présentation synoptique du plan de sondage, cet article présente quelques estimations possibles sur la base des données récoltées, ce qui autorise au passage une évaluation de la

qualité de l'enquête, tant du point de vue de sa tractabilité statistique que de sa précision.

I L'ESTIMATION "INFÉRENTIELLE", UN OBJECTIF PARMIS D'AUTRES DANS UNE ENQUÊTE PLURIDISCIPLINAIRE

Au moment de l'élaboration du plan, les objectifs visés deviennent les premières "contraintes" à prendre en compte. Dans cette enquête préliminaire du programme Delta Central du Niger (Quensière, 1988), différentes disciplines étaient impliquées dès le départ et participaient à la définition des objectifs. De l'examen de ceux-ci ressortaient plusieurs axes déterminants pour la suite des opérations:

Tout d'abord, les questions posées concernaient non pas un seul mais plusieurs niveaux (plus ou moins "emboîtés") d'éléments de l'univers Delta: les individus, les familles ("marmites" ou concessions), les agglomérations, ces niveaux constituant autant de populations statistiques échantillonnables.

Concernant ces différents objets, on pouvait dégager deux directions majeures dans la recherche des connaissances:

(1) Principalement, l'enquête devait recueillir une grande variété de renseignements à-propos de chacun de ces types d'éléments. Car, dépassant une simple ambition descriptive, l'enquête se devait d'aboutir à des modèles explicatifs, lesquels ne peuvent naître que de multiples possibilités de croisements entre de nombreuses variables.

(2) Secondairement, il était souhaitable que l'enquête fournisse des estimations régionales de nombre, de quantités ou de proportion, notamment en ce qui concerne les agents de production (individus actifs, ménages de pêcheurs...), car de tels chiffres ne sont pas disponibles sous la forme souhaitable dans les recensements administratifs.

La poursuite conjointe de ces deux directions d'objectifs (relevant respectivement de l'optique "analyse des données" et de la statistique inférentielle) n'allait pas sans difficultés, l'une (1) impliquant une forte taille individuelle des questionnaires, l'autre (2) nécessitant non seulement le recours aux techniques de sondage aléatoire mais aussi une taille d'échantillon respectable pour pouvoir espérer une précision suffisante.

Si les résultats de l'enquête ont fait l'objet de nombreuses publications dans le cadre de la première direction, il n'y a eu, à ce jour, que très peu d'exploitation dans le sens de la seconde.

C'est donc à la préparation de cette tâche que nous nous employons ici, en complétant les outils nécessaires aux inférences (déjà

fournies pour partie dans Morand, 1988) par des évaluations de précision.

II LE PLAN DE SONDAGE: DES CONTRAINTES AUX GRAND~ CHOIX

Mis à part les objectifs de l'enquête, évoqués plus haut, quatre grands types de contraintes ont conditionné la conception du plan:

(1) L'absence de véritable base de sondage au départ, c'est-à-dire de listes exhaustives des éléments les plus fins sur lesquelles on aurait pu effectuer, avant toute phase de terrain, des procédures de tirages aléatoires.

(2) Une structure hiérarchique assez évidente des différents types d'éléments au sein du système étudié, depuis l'individu jusqu'à la concession et à l'agglomération, au-dessus de laquelle on s'accordera à définir la "zone géographique", puis la "sousrégion" (termes provisoires).

(3) Toutefois, une grande hétérogénéité au sein des populations correspondant à un même niveau d'objets: il y a une grande différence entre une agglomération constituée de trois cases de paille et une véritable ville comme Djenné, entre une sous-région dunaire traversée de quelques marigots et une autre s'étendant le long du fleuve Niger, englobant ses bras et ses plaines inondables.

(4) Enfin, des contraintes de terrain sévères: dispersion des éléments, distances à parcourir, absence de véritable réseau de communication.

Le premier point (1) rendait nécessaire la construction d'un plan d'échantillonnage à plusieurs degrés.

Le second (2) fournissait un support naturel pour cette construction.

Le troisième (3) a suggéré l'adoption, à divers niveaux, de l'échantillonnage par strates, permettant une modulation de l'effort ou des méthodes d'enquête selon les portions du système.

Enfin, le quatrième point a limité la taille de l'échantillon, compte-tenu d'un budget donné.

Finalement, le plan adopté reposait en premier lieu sur un découpage du Delta en deux sous-ensembles: d'une part la macrostrate "villes", regroupant les 34 agglomérations de plus de 2000 habitants (recensement 76, réactualisé 86) à l'exception de la ville même de Mopti (où n'habitent que très peu de pêcheurs), et d'autre part la macrostrate "rurale", comprenant le reste du Delta.

Il était prévu dès le départ d'enquêter deux fois (à l'étiage et en hautes eaux 1987) cette macrostrate rurale, de façon à disposer d'observations factuelles, et non pas seulement déclaratives, sur les changements saisonniers. Quant au sous-ensemble "villes", il ne devait être visité qu'une seule fois, à l'étiage, l'année de réalisation finalement retenue (pour des raisons contingentes) étant 1989.

Pour les buts visés ici, qui sont d'estimer des nombres ou des quantités à l'échelle régionale, il est préférable de se limiter aux données des deux phases réalisées à la même saison, même s'il s'agit d'années différentes: enquête rurale étiage 87 et enquête "villes" étiage 89. En effet le cycle saisonnier des déplacements de pêcheurs est un phénomène de telle ampleur que l'on ne peut pas réunir l'échantillon de la phase rurale "hautes eaux 87" avec celui observé en étiage dans la même macrostrate. Par contre, on considérera que ce cycle est suffisamment reproductible d'une part, et que la dérive générale interannuelle de 87 à 89 est suffisamment faible d'autre part, pour pouvoir traiter les deux phases d'étiage (rurale 87 et villes 89) comme si elles avaient été réalisées simultanément, c'est-à-dire en additionnant simplement leurs résultats.

III DE LA STRUCTURE DU PLAN SONDAGE AUX ESTIMATEURS STATISTIQUES

Dans la macrostrate "villes", on a effectué un tirage aléatoire simple de $a (=12)$ agglomérations dans la liste exhaustive qui en totalise $A (=34)$. A l'intérieur de chacune de ces 12 agglomérations, une liste exhaustive des C concessions reconnues comme ayant des membres pratiquant peu ou prou la pêche a été établie auprès des "vieux" du village, et un tirage aléatoire systématique (sans remise) de c d'entre-elles a été effectué. Le taux d'échantillonnage (c/C), non constant, varie de 20% à 85%; il est d'autant moins élevé que C est grand. Toutes les concessions tirées ont été visitées et ont été décrites de façon exhaustive, tant au niveau de leurs ménages que de leurs individus.

Il s'agit donc d'une forme banale de plan à 2 degrés, la seule sophistication résidant dans l'emploi du tirage systématique (et non pas aléatoire simple) au niveau ultime.

Cependant, nous considérerons par la suite, comme beaucoup d'auteurs, que l'échantillonnage systématique est simplement une forme de tirage aléatoire sans remise, dans la mesure où la liste des concessions ne se présente pas sous un quelconque ordre corrélé aux variables étudiées - mise à-part la première concession citée qui est toujours plutôt grande, puisqu'il s'agit très généralement de celle du chef de village. Au pire, les variances d'estimation seront un peu surévaluées, d'où une légère sous-estimation de la précision de l'enquête (Anonyme, 1974).

Le caractère très vaste de la macrostrate rurale du Delta a conduit à l'utilisation d'un plan plus complexe que celui adopté pour la macrostrate "villes". Il consiste tout d'abord dans la division du Delta en 9 strates géographiques, de surfaces variées, correspondant à des sous-ensembles régionaux reconnus par les études sociologiques préliminaires et présentant une certaine identité en termes de géographie physique.

Chacune de ces strates a été divisée en un certain nombre Z de petites zones géographiques (8 à 67), d'importances relativement homogènes (du moins à l'intérieur d'une même strate) tant du point de vue du nombre de villages englobés que de la surface. Un tirage aléatoire simple sans remise a été effectué dans chaque strate pour définir l'échantillon des z zones à visiter, avec un taux (z/Z) variant de 7 à 47% selon l'hétérogénéité et l'intérêt supposés de la strate. Dans chaque zone ainsi désignée, on a visité toutes les A agglomérations, en établissant dans chacune la liste des C concessions reconnues comme ayant des membres pratiquant peu ou prou la pêche. Tout comme dans l'enquête "villes", un tirage systématique dans cette liste a fourni l'échantillon des c concessions qui allaient être visitées - en employant un taux (c/C) décroissant en fonction de C , de telle façon que l'on puisse compter sur une précision par agglomération approximativement constante (Herman, 1986, p. 82). Ainsi, pour avoir un intervalle de confiance (risque admis: 0,05) de 15% autour d'une proportion type de 50%, il faut échantillonner 10 concessions lorsqu'il en y en a 177 ou plus, 9 quand il y en a 57 à 76, 8 quand il y en a 30 à 56 (etc . . .) et évidemment une quand il n'y en a qu'une !

Il s'agit donc d'un cas particulier de plan à 4 degrés, comportant 2 recensements (pour le 1er et le 3e degré) et 2 tirages aléatoires, respectivement simple et systématique, pour les 2e et 4e degrés.

A un plan de sondage donné correspond un ensemble de calculs qui permettent de dégager les statistiques souhaitées pour décrire les populations d'éléments. Ces statistiques estimées (ou "estimateurs") peuvent être de plusieurs nature: dans le cas le plus fréquent, la variable est un descripteur quantitatif des éléments ultimes échantillonnés (ici, ce sont les concessions), ce qui conduit à rechercher un estimateur "quantité totale" et un estimateur "moyenne par élément" aux niveaux supérieurs (ici: strate, macrostrate ou Delta). Outre la valeur même de ces estimateurs, on est intéressé par leur précision, ce qui nécessite l'estimation de leur variance. On fournira ici les estimateurs "nombre total", "quantité totale", "ratio (rapport)" et "moyenne", ainsi que l'estimateur de variance du second et du troisième, pour chacun des deux plans. Les estimateurs proposés étant sans biais ou presque (ce sont ceux de Horvitz-Thompson, 1952), les variances fournies conduisent directement à la définition d'intervalles de confiance correspondant à l'erreur d'échantillonnage. A noter que l'erreur d'observation, très difficilement évaluable, n'est pas prise en compte ici.

l) Cas de la macrostrate "villes": plan à 2 degrés

A : nombre total d' agglomérations (= 34)

a : nombre d' agglomérations échantillonnées (=12)

C_i : nombre total de concessions de pêcheurs de l'agglomération i.

c_i : nombre de concessions échantillonnées dans l'agglomération i.

$Y_{ii,j}$: quantité y pour la concession j de l'agglomération i.

n_i : nombre d'éléments (c.à.d. de concessions) d'une certaine catégorie observés dans l'échantillon de l'agglomération i.

la - Estimation d'un nombre total

(nombre de concessions d'une certaine catégorie)

$$\hat{N} = \frac{A}{a} \sum_{i=1}^a \frac{c_i}{C_i} n_i$$

lb - Estimation d'une "quantité totale"

(ex.: nombre d'individus, nombre de ménages)

Quantité estimée dans une agglomération:

$$\hat{Y}_i = \frac{C_i}{c_i} \left(\sum_{j=1}^{c_i} Y_{ij} \right)$$

Quantité estimée dans la strate ville:

$$\hat{Y} = \frac{A}{a} \left(\sum_{i=1}^a \hat{Y}_i \right)$$

lb' - Estimation de la variance $\sigma^2 \hat{Y}$ de l' estimateur quantité totale
(Gourieroux, 1981)

$$\hat{\sigma}^2_{\hat{Y}} = \frac{A(A-a)}{a} \frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a (\hat{Y}_i - \frac{\hat{Y}}{A})^2 + \frac{A}{a} \sum_{i=1}^a \frac{C_i(C_i-c_i)}{c_i} \frac{1}{c_i-1} \sum_{j=1}^{c_i} (Y_{ij} - \frac{\hat{Y}_i}{c_i})^2$$

Remarque: A chaque ligne apparait un facteur de type $\frac{(N(N-n))}{N}$, où N est le nombre total d'éléments et n le nombre d'éléments échantillonnés. Dans la littérature, on trouvera souvent ce terme présenté d'une façon un peu différente [$\frac{N^2(1 - \frac{n}{N})}{n}$] (par ex. dans Scherrer - 1983), ce qui a l'avantage de mieux mettre en évidence la présence de la "correction pour population finie": $(1 - \frac{n}{N})$.

lc - Estimation d'une variable ratio (ou rapport, ou quotient).(ex.: nombre d'individus par ménage, sex-ratio, effort de pêche par homme actif)

Lorsque l'on veut estimer le rapport moyen entre deux variables quantitatives y et y' observées sur chaque élément, on doit employer l'estimateur ratio. [A noter que la plupart des proportions, ainsi que certaines moyennes, se ramènent à des ratios.]

$$\hat{R} = \frac{\hat{Y}}{\hat{Y}'}$$

où \hat{Y} et \hat{Y}' sont les deux estimateurs de quantité. (cf. 1b)

Cette estimateur est légèrement biaisé, mais le biais est négligeable si l'effectif de l'échantillon est grand (cas présent).

lc'- Estimation de la variance $\hat{\sigma}^2_{\hat{R}}$ de l'estimateur ratio

Les formules d'estimation sont plus complexes que dans le cas d'une quantité simple. Cochran (1977) décrit un estimateur approché, que nous ré-écrivons ici en adoptant le type de présentation de Gourieroux (1981):

$$\hat{\sigma}_{R}^{2\wedge} = \frac{1}{\hat{Y}^2} \frac{A(A-a)}{a} \frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a (\hat{Y}_i - \hat{R} \hat{Y}_i)^2$$

$$+ \frac{A}{a} \frac{1}{\hat{Y}^2} \sum_{i=1}^a \frac{C_i (C_i - c_i)}{c_i} \frac{1}{c_i - 1}$$

$$\sum_{j=1}^{c_i} [(\hat{Y}_{ij} - \hat{R} \hat{Y}_{ij}) - (\hat{Y}_i - \hat{R} \hat{Y}_i)]^2$$

Id - Estimation d'une quantité moyenne par élément (ex.: nombre d'individus par concession)

Si l'on disposait d'une base de sondage complète, c'est-à-dire de listes exhaustives des populations d'éléments (et ce jusqu'au niveau le plus fin: la concession), on pourrait écrire de véritables estimateurs de moyenne en divisant simplement les estimateurs de quantité par les nombres totaux N d'éléments correspondant:

$$\hat{\bar{Y}} = \frac{\hat{Y}}{N}$$

Et l'on aurait comme variance pour cet estimateur

$$\hat{\sigma}_{\bar{Y}}^2 = \frac{\hat{\sigma}_Y^2}{N^2}$$

Malheureusement, et c'est d'ailleurs là une raison majeure du recours à l'échantillonnage à multiples degrés, on ne dispose ni d'une base de sondage ni d'une connaissance exacte de ce nombre N, mais seulement d'une estimation N issue de l'enquête.

On estimera donc la moyenne comme s'il s'agissait d'un rapport, avec un estimateur de quantité au numérateur et un estimateur de nombre total au dénominateur:

$$\hat{\bar{Y}} = \frac{\hat{Y}}{\hat{N}}$$

2) Cas de la macrostrate "rurale" : plan à 4 degrés

On conviendra tout d'abord des notations suivantes:

indices: i: n° de strate;

j: n° de zones;

k: n° d'agгло;

m: n° de concession;

S : nombre total de strates (=9)

Z_i : nombre total de zones de la strate i

z_i : nombre de zones échantillonnées dans la strate i

$A_{i,j}$: nombre total d'agglomérations de la zone j de la strate i

$a_{i,j}$: nombre d'agglomérations échantillonnées de la zone j de la strate i (ici, on aura toujours: $a_{ij} = A_{ij}$)

$C_{i,j,k}$: nombre total de concessions de l' agglomérations k de la zone j de la strate i.

$c_{i,j,k}$: nombre de concessions échantillonnées dans l'agglomération k de la zone j de la strate i.

$Y_{i,j,k,m}$: quantité y pour la concession m de l'agglomération k de la zone j de la strate i.

$n_{i,j,k}$: nombre d'éléments (c.à.d. de concessions) d'une certaine catégorie , observés dans l'agгло. k de la zone j de la strate i.

2a - Estimation d'un nombre total

$$\hat{N} = \sum_{i=1}^S \frac{Z_i}{z_i} \sum_{j=1}^{z_j} \frac{A_j}{a_j} \sum_{k=1}^{a_j} \frac{C_k}{c_k} n_{i,j,k}$$

2b - Estimation d'une quantité totale Y.

Quantité estimée dans une agglomération :

$$\hat{Y}_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{c_{ijk}} \left(\sum_{m=1}^c Y_{ijkm} \right)$$

Quantité estimée dans une zone j :

$$\hat{Y}_{ij} = \sum_{k=1}^a Y_{ijk}$$

Quantité estimée dans une strate i :

$$\hat{Y}_i = \frac{Z_i}{z_i} \left(\sum_{j=1}^z \hat{Y}_{ij} \right)$$

Quantité estimée dans la macrostrate:

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^S \hat{Y}_i$$

2b' - Estimation de la variance de l'estimateur quantité totale

(Gourieroux, 1983)

$$\begin{aligned} \sigma^2 \hat{Y} &= \sum_{i=1}^S \frac{Z_i(Z_i - z_i)}{z_i} \frac{1}{z_i - 1} \sum_{j=1}^z (\hat{Y}_{ij} - \frac{\hat{Y}_i}{Z_i})^2 \\ &+ \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^z \frac{z_i}{z_i} \frac{A_{ij}(A_{ij} - a_{ij})}{a_{ij}} \frac{1}{a_{ij} - 1} \sum_{k=1}^{a_{ij}} (\hat{Y}_{ijk} - \frac{\hat{Y}_{ij}}{Z_{ij}})^2 \\ &+ \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^z \sum_{k=1}^{a_{ij}} \frac{z_i A_{ij}}{z_i a_{ij}} \frac{C_{ijk}(C_{ijk} - c_{ijk})}{c_{ijk}} \frac{1}{c_{ijk} - 1} \sum_{m=1}^c (Y_{ijkm} - \frac{\hat{Y}_{ijk}}{C_{ijk}})^2 \end{aligned}$$

La seconde ligne étant forcément nulle (puisque $a_{i,j} = A_{i,j}$), le calcul de cette variance se limite à l'addition de deux termes: l'un (première ligne ci-dessus) résulte de l'échantillonnage et de la variabilité des zones dans chaque strate, le second (troisième ligne) provient essentiellement de l'échantillonnage et de la variabilité des concessions dans les agglomérations visitées (bien qu'il contienne aussi un facteur de dilatation égal à l'inverse du taux d'échantillonnage des zones correspondantes).

2c - Estimation d'un quotient ou ratio (cf. lc)

2c' - Estimation de la variance de l'estimateur ratio.

En partant de la variance de l'estimateur quantité, on obtient la variance de l'estimateur ratio de la même façon que pour la macrostrate "villes" (cf. & lc'), c'est-à-dire en appliquant un facteur général $\frac{1}{Y^2}$ d'une part et d'autre part en remplaçant, lors des calculs des moments à chacun des niveaux, les valeurs

$$Y_{\text{indices}} \text{ par } (Y_{\text{indices}} - \hat{R} Y_{\text{indices}})$$

2d - Estimation d'une moyenne par élément

Concernant cet estimateur, les mêmes considérations que celles faites à propos de la macrostrate "villes" s'impose (cf. ld).

3) Combinaison des estimateurs de quantité des deux macrostrates

Pour estimer une quantité totale sur l'ensemble du Delta, on se contente de sommer les deux estimateurs de quantité obtenus sur chacune des macrostrates. De même, les variances issues des deux macrostrates seront simplement additionnées puisqu'elles sont indépendantes.

IV QUELQUES ESTIMATIONS NUMERIQUES ET LEUR PRECISION

1) Macrostrate "villes"

Estimations de quantités (Y), avec leur variance d'estimation

($\hat{\sigma}^2$) et leur précision ($1,96\frac{\hat{\sigma}}{\hat{Y}}$), cette dernière étant définies sur la base d'un intervalle de confiance représentant 95% de la distribution (définition conservée tout au long de ce travail):

Tableau I

variable	estimat \hat{Y}	terme 2 (eq.lb')	terme 1 (eq.lb')	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\sigma}$ $(1,96\frac{\hat{\sigma}}{\hat{Y}})$
Population pech. (nb total indiv.)	33663	434868	48,8 10 ⁶	49,25 10 ⁶	7017 (40%)
Hommes 'actifs' (12 < âge < 65)	8829	39138	3,47 10 ⁶	3,51 10 ⁶	1874 (41%)
Population Bozo	18918	305669	39,3 10 ⁶	39,6 10 ⁶	6291 (65%)
nb de ménages	3612	1293	510694	511987	715 (39%)

Estimations de ratios:

ex.: le nombre d'individus par ménage.

Soit \hat{Y} l'estimation du nombre d'individus et \hat{Y}' celle du nombre de ménages:

$$\text{On a: } \hat{Y} = \frac{\hat{Y}}{\hat{Y}'} = \frac{33663}{3612} = 9,32$$

En appliquant l'estimateur de variance décrit plus haut (lc'), on obtient:

$$\hat{\sigma}^2 R = 0,1405 \quad , \text{ d'où une précision de } (1,96\frac{\hat{\sigma}}{\hat{Y}}) = 7,8\%$$

Il apparaît que l'estimation du ratio, variable de structure, est beaucoup plus précise que celles des deux quantités qui le constituent. On retrouve ici une constatation générale en matière de résultats de sondage.

2) Macrostrate rurale

Estimations de quantités (Y), avec leur variance d'estimation ($\hat{\sigma}^2$) et leur précision ($1,96 \frac{\hat{\sigma}}{\hat{Y}}$):

Tableau II

variable	estimat \hat{Y}	terme 2 (eq.2b) :	terme 1 (eq.2b)	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\sigma}$ $(1,96 \frac{\hat{\sigma}}{\hat{Y}})$
Population pech.	191271	$4,2 \cdot 10^6$	$273 \cdot 10^6$	$277,2 \cdot 10^6$	16650 (17%)
Hommes 'actifs' (12 < âge < 65)	52905	468046	$8,5 \cdot 10^6$	$18,9 \cdot 10^6$	4355 (16%)
Population Bozo	104640	$2,2 \cdot 10^6$	$131 \cdot 10^6$	$133 \cdot 10^6$	11531 (21%)
nb de ménages	26392	41446	$6,74 \cdot 10^6$	$6,78 \cdot 10^6$	604 (19%)

3) Delta global

A partir des résultats sur les deux macrostrates (Tab.I et II), on obtient, par sommation, des chiffres pour le Delta global (Mopti exclu). La population totale de pêcheurs est ainsi estimée à $(191271 + 363603 =) 224874$ individus, avec une variance de $(277,2 \cdot 10^6 + 49,2 \cdot 10^6 =) 326,4 \cdot 10^6$, ce qui définit une précision de 15,7%.

De même, on peut ainsi estimer:

- le nombre de Bozos à 123558 (précision: 20,8%)
- le nombre de ménages (en étiage) à 30004 (précision: 17,6%)
- le nombre d'hommes actifs à 61734 (précision: 15,1 %)

A noter, pour comparaison avec ce dernier résultat, le chiffre de 54112 pêcheurs fourni par Konare (1977), sur la base d'une opération de recensement de la pêche menée en 1973-74.

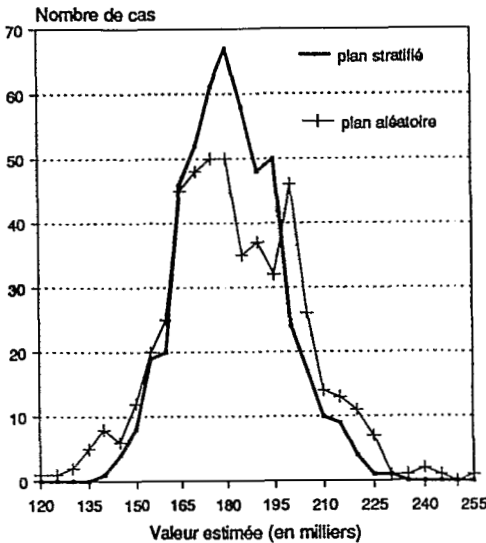
Des chiffres plus nombreux seront fournis dans une publication ultérieure (Herry et Morand, en préparation).

V SIMULATION DE LA PRINCIPALE SOURCE DE VARIANCE. EVALUATION A *POSTERIORI* DE L'APPORT DE LA STRATIFICATION

En observant les résultats intermédiaires des calculs de précision, on peut voir apparaître la principale source de variance pour l'estimation des quantités totales sur le Delta: elle se situe sur le premier terme de la variance d'estimation de la macrostrate rurale (cf. 2b'), lorsque, à partir des estimations des différentes quantités par zone (lesquelles sont généralement précises), on passe à l'estimation des quantités par strate. [Remarque: le passage au niveau macrostrate rurale n'est ensuite qu'une simple somme et ne "produit" donc pas d'imprécision spécifique.] Deux facteurs peuvent jouer ici: un nombre trop faible de zones échantillonnées par strate et/ou une variabilité inter-zones intrastrates élevée.

Ce dernier point pouvait laisser croire que l'utilisation d'une stratification géographique n'a pas eu les effets bénéfiques escomptés. Nous avons voulu approfondir cette question, c'est-à-dire évaluer l'apport de la stratification à la précision en ce qui concerne la macrostrate rurale - qui, par son poids dominant, conditionne largement la précision des résultats globaux. On a procédé par simulation. Le principe de cette méthode est de disposer d'un univers fictif qui, tout en présentant des propriétés d'hétérogénéité semblables à celles de l'univers réel, puisse subir un nombre illimité d'échantillonnages, en supportant l'utilisation de différentes sortes de plan. Comme il s'agit ici d'étudier le seul effet de la stratification pour ce qui concerne l'échantillonnage des zones, on se contentera de re-crée une population de zones et non pas un univers complet jusqu'au niveau individu. La façon la plus simple de construire cette population est de répliquer l'échantillon des zones, strate par strate, selon un nombre de fois inverse du taux d'échantillonnage, de la même façon que dans une procédure de "Bootstrap" (Deville, 1987). On obtient ainsi une population de zones ayant des variances interstrate et intra-strate quasi conformes à celles de l'échantillon observé par l'enquête. [La seule inexactitude est liée au fait que l'inverse du taux pratiqué dans l'enquête n'est pas toujours un entier, ce qui oblige à un arrondi pour obtenir le nombre de réplifications à effectuer. C'est aussi ce qui explique que la macrostrate rurale ainsi reconstruite ne comporte que 242 zones au lieu de 247 - et ne totalise que 183712 habitants concernés par la pêche - et non pas 191271 comme l'a estimé l'enquête.]

Nous avons donc effectué deux séries de 500 simulations d'échantillonnages, l'une selon la méthode du tirage aléatoire simple sans remise, l'autre selon le plan stratifié analogue à celui employé lors de l'enquête. Le résultat calculé est l'estimation du nombre total d'individus. Voici la distribution de ce résultat dans chacune des deux séries:



plan aléatoire simple sans remise:

$$\hat{Y} = 184232$$

$$\hat{\sigma}^2 Y = 436,6 \cdot 10^6$$

(précis: 22,2%)

plan stratifié:

$$\hat{Y} = 183446$$

$$\hat{\sigma}^2 Y = 233,4 \cdot 10^6$$

(16,3 %)

(on notera que cette variance empirique est bien du même ordre que celle estimée analytiquement à partir de l'enquête: cf. terme 1 Tab II)

On conclura sans hésiter à l'utilité de la stratification adoptée lors de l'enquête de la macrostrate rurale.

CONCLUSIONS

Tout d'abord, on a montré que cette enquête pluridisciplinaire autorise des estimations statistiques de quantités, de ratios et de nombres totaux. Quant aux précisions obtenues, s'il faut reconnaître qu'elles sont tout juste convenables pour les quantités (de l'ordre de 15% dans les meilleurs cas), elles semblent nettement meilleures si l'on s'intéresse aux structures, notamment aux ratios. Cette constatation doit à l'avenir inciter à une utilisation combinée des résultats de l'enquête (fournissant de bons ratios intercatégoriels) et des statistiques administratives (plus précises, car il s'agit de recensements, mais très globales), ceci dans le but d'obtenir de bons chiffres concernant les "nombres de ménages par catégorie". Rappelons que de telles valeurs constituent la base indispensable

pour l'extrapolation des résultats de l'enquête halieutique en cours (Laé et Bousquet, 1990) -

Du point de vue des méthodes, il faut reconnaître que ces résultats n'ont pu être obtenus que par le recours à un plan de sondage sophistiqué, lequel a conduit à des formules d'estimateurs parfois très lourdes, prohibant dans certains cas l'expression des variances. Certes, la complexité du plan était justifiée: la stratification s'avère efficace, l'échantillonnage par zones géographiques, c.à.d. par grappes d'agglomérations, était incontournable (eu égard aux contraintes logistiques), l'échantillonnage à taux variable des concessions dans les agglomérations de même. Mais il nous semble cependant que l'on a approché les limites de ce qu'il est raisonnable de concevoir en matière de plan de sondage. Ceci est d'autant plus vrai que les conséquences de cette complexité ne se limitent pas aux difficultés d'inférence: les développements selon l'approche dite de l'analyse des données (analyses factorielles, classifications) doivent aussi être menées avec une attention très particulière pour ne pas conduire à des résultats biaisés.

On a donc quelques raisons de conclure sur la difficulté qu'il y a à concilier des objectifs différents dans une même enquête. On peut se demander si, à l'avenir, il ne serait pas préférable de séparer l'effort d'obtention des connaissances quantitatives "absolues" (nombre totaux, quantités totales) de celui visant la description fine des structures ou la compréhension des phénomènes. Une stratégie judicieuse pourrait ainsi consister, après une phase exploratoire d'identification des objets et catégories pertinentes, à procéder en deux temps:

- Effectuer tout d'abord un sondage aléatoire à fort taux d'échantillonnage (mais petit questionnaire), conçu pour une tractabilité statistique inférentielle parfaite, et visant uniquement des estimations précises de nombre ou quantités par catégorie ou type d'objet.

- Puis développer, au fur et à mesure des besoins, des enquêtes "sur mesure" répondant aux différentes problématiques (pluri)disciplinaires. En précisant que, dans ce cas, l'échantillonnage représentatif raisonné (*par quotas* par exemple, en se basant sur les estimations issues du sondage aléatoire) sera souvent beaucoup plus pratique, tout en satisfaisant aux exigences d'une "analyse des données" multivariée.

REMERCIEMENTS

Il nous est agréable de remercier ici Melle Habibatou NDiaye, qui nous a été d'un grand secours pour le traitement informatique des données.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME (1974): 'Manuel des enquêtes démographiques par sondage en Afrique'. Nations Unies. 263 pp.
- COCHRAN W.G. (1977): 'Sampling techniques'. John Wiley ~ Sons . 428 PP -
- DEVILLE J.C. (1987): 'Replications d'échantillons: demiéchantillons, jackknife et bootstrap'. in 'Les sondages', Dreesbeke, Fichet et Tassi eds . Economica . pp. 147-171.
- GOURIEROUX C . (1981): ' Théorie des sondages' . coll . "Economie et Statistiques Avancées". Economica. 270 pp.
- HERMAN J. (1986): 'Analyse de données qualitatives. 1. Traitement d'enquêtes, échantillon, répartitions, associations.' Masson. coll. 'Méthodes + Programmes'. 183 pp.
- KONARE A. (1977): 'Collecte, traitement et commercialisation du poisson en plaines inondables', in CIFA Working Party on River and Floodplain Fisheries, contributions by members of the Working Party, pp. 32-45
- LAE R. et BOUSQUET F. (1990): 'Définition d'une procédure d'échantillonnage des pêches artisanales dans le Delta Central du Niger'. Séminaire et Rapport d'étape INRZFH-ORSTOM: Nov. 90. A paraître.
- MORAND P. (1988): 'Méthodologie de traitement des données d'enquêtes'. in 'INRZFH-ORSTOM: Etudes halieutiques du Delta Central du Niger: Enquête Statistique auprès des Pêcheurs. Premiers résultats . 'pp. 3-1 à 3-10 .
- QUENSIERE J. (1988) : 'Etudes halieutiques du Delta Central du Niger. Enquête statistique auprès des pêcheurs. Premiers résultats: Introduction'. doc. INRZFH-ORSTOM. pp. I-I à I-V
- QUENSIERE J. (1990): 'Systémique et pluridisciplinarité: l'exemple du programme d'étude de la pêche dans le Delta Intérieur du Niger.' Semifor 1990.
- SHERRER B. (1983): 'Techniques de sondage en écologie', in Stratégies d'échantillonnage en Ecologie. S. Frontier ed. Masson. 494 pp.

METHODE POUR LE CROISEMENT DE VARIABLES QUALITATIVES DANS LES ENQUETES A PLUSIEURS NIVEAUX

PIRON M.

RESUME

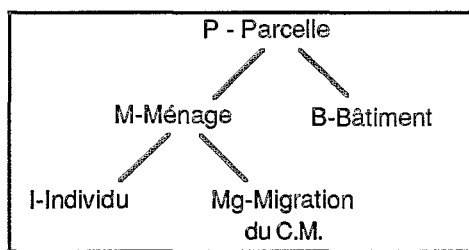
Une enquête comportant plusieurs niveaux de collecte emboîtés fournit un ensemble d'informations hiérarchisées. C'est sur le croisement des informations et l'étude simultanée des niveaux que repose la richesse de l'enquête. L'exploiter, c'est :

- Concevoir un tableau rectangulaire qui croise l'ensemble des variables définies à plusieurs niveaux et qui traite une même population statistique. Pour cela, il s'agit de pondérer toutes les unités statistiques et nous mettons en évidence un système de pondération cohérent donné par une population statistique de référence.
- Envisager l'étude d'un ensemble des niveaux emboîtés qui constitue un système d'échelles. Il s'agit de dégager les structures spécifiques de chaque niveau et celles que l'on perd dans le transfert d'échelle. Nous proposons une méthode basée sur l'analyse des correspondances et qui consiste en une succession d'analyses inter-classes et intra-classes qui jouent le rôle d'aide à l'interprétation du système d'échelles.

INTRODUCTION

Il est fréquent de réaliser des enquêtes qui font intervenir différents niveaux de collecte ; par exemple, la parcelle, les ménages, les individus composant le ménage, les bâtiments obtenus à partir d'un plan de sondage à plusieurs degrés (stratifié, en grappe).

SEMINFOR IV



Ces niveaux sont emboîtés et l'on arrive alors à une "structure hiérarchique" de l'information: chaque individu est inclus dans un ménage, chaque ménage dans une parcelle.

L'objectif est de dégager les structures de cet univers composite. Autrement dit, on désire croiser les variables définies à plusieurs niveaux afin de conserver et de confronter toute l'information contenue à tous les niveaux. Pour cela, l'analyse multivariée et en l'occurrence l'analyse des correspondances multiples est adaptée puisqu'il s'agit, ici, de traiter des variables qualitatives issues de données d'enquête. Pour mettre en route une analyse multivariée, une grande partie du travail réside dans la conception du tableau qui doit d'une part être un tableau rectangulaire de données homogènes (travailler sur une même population statistique) et d'autre part respecter la structure hiérarchique de l'information.

Par ailleurs, on dispose de plusieurs échelles de perception de l'information et l'on peut envisager une approche ascendante (de l'individu à la parcelle), ou au contraire descendante (de la parcelle à l'individu) en considérant l'échelle intermédiaire (le ménage). Autrement dit, décrire un ensemble de variables définies à plusieurs niveaux revient à comprendre le système d'échelles que constitue l'univers d'enquête.

Deux questions sont alors posées et structurent l'exposé :

- Comment croiser des variables se trouvant à des niveaux différents et qui correspondent à des populations statistiques différentes ?

Ce qui revient à se demander quelle structure donner au tableau traitant d'une information hiérarchisée ?

- Comment observer les modifications de la perception d'un phénomène d'un niveau à un autre ?

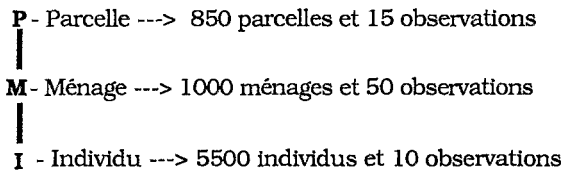
Autrement dit, comment étudier un système d'échelles défini comme un ensemble de niveaux emboîtés ?

1 LA STRUCTURE DU TABLEAU

Dans le cadre d'une enquête à plusieurs niveaux, on définit plusieurs types d'unités statistiques, sur lesquelles sont effectuées des observations. Il s'agit alors de gérer et de traiter la complexité des relations entre ces unités. Le traitement statistique impose de travailler sur un tableau rectangulaire et sur une population homogène. A partir de là on cherche à croiser les variables définies à différents niveaux. On précise qu'il s'agit de variables qualitatives.

1.1. Le problème :

Nous nous plaçons dans le cadre de trois niveaux consécutifs d'observations :



A un niveau correspond une population statistique. Par conséquent, nous avons trois populations d'étude possibles: les Parcelles ou les Ménages ou les Individus, et trois séries d'observations effectuées sur chaque population c'est-à-dire trois groupes de variables J_P , J_M , J_I qu'il s'agit de croiser entre eux.

Soit trois variables prises sur les différents niveaux :

- au niveau Parcelle ; ELC, l'électricité éclatée en deux modalités suivant si elle est installée ou non sur la parcelle : "elect" et "non el" On a le tableau logique noté KP traitant la population Parcelle :

identificateur n°parc.	var. Parcelle : J_P		...
	ELC		
	elect	non el	
1	1	0	...
2	0	1	
3	0	1	
...		...	

SEMINFOR IV

* au niveau Ménage ; STOC, le statut d'occupation ayant trois modalités : "propriétaire", "locataire" et "hébergé". On a le tableau logique noté KM traitant la population ménage :

n°mén.	var. Ménage : J_M			n°parc.
	STOC	pro	loc heb	
1	1	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	1
4	1	0	0	2
5	0	0	1	2
6	0	1	0	3
...	...			

* au niveau Individu ; Sexe, le sexe ayant deux modalités : "masculin" et "féminin". On a le tableau logique noté KI traitant la population Individu :

n°ind.	var. Individu : J_I		n°parc.mén.	n°
	SEXE			
	mas	fem		
1	1	0	1	1
2	1	0	1	1
3	0	1	1	2
4	1	0	1	3
5	0	1	1	3
6	0	1	2	4
7	1	0	2	4
8	1	0	2	4
9	0	1	2	5
10	0	1	3	6
...	...			

On se rend compte que, face à la structure des données, **on dispose de plusieurs populations statistiques potentielles et de plusieurs échelles de perception de l'information**. Par exemple, si on choisit de travailler sur la population Ménage, on peut exploiter les variables définies à tous les niveaux à l'échelle du Ménage mais aussi à celle de la Parcelle ou de l'Individu.

Suivant les objectifs de l'étude, il convient alors de se demander sur quelle population statistique et à quelle échelle le traitement des variables doit être effectué. Compte tenu des choix à faire, il s'agit de construire un tableau juxtaposant l'ensemble des variables définies à plusieurs niveaux. Pour cela, nous allons explorer la structure hiérarchique de l'information.

1.2.Principe de la construction des tableaux :

Il existe deux types de tableaux pour exploiter des variables qualitatives:

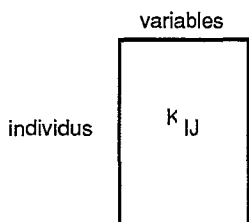


tableau juxtaposant les variables

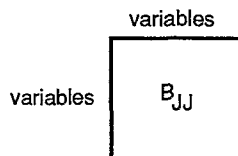


tableau croisant les variables

- Soit un tableau (individus, variables) qui juxtapose les variables tels que les tableaux disjonctif complet ou de correspondances.
- Soit un tableau (variables, variables) qui croise les variables entre elles tel que le tableau de Burt. Ce sont ceux là que l'on utilise généralement pour les traitements classiques d'enquête.

On passe du premier au deuxième par la formule :

$$B_{jj'} = \sum_i \frac{K_{ij} K_{ij'}}{K_i}$$

C'est-à-dire on comptabilise le nombre d'individus qui ont répondu à la fois à la variable en ligne et à la variable en colonne.

1.3.La structure hiérarchique de l'information :

Les niveaux sont emboîtés : une parcelle p définit un ensemble de ménages m et un ensemble d'individus i ; un ménage m définit un ensemble d'individus i :

$$\forall i \in I, \exists m \in M \text{ et } p \in P \text{ tel que } p \supset m \supset i$$

Si n est le nombre d'individus, n_m le nombre d'individus dans le ménage m et n_p le nombre d'individus résidant sur la parcelle p alors:

$$n_m = \sum_{i \in m} 1 ; n_p = \sum_{m \in p} n_m$$

et l'on a naturellement

$$n_p = \sum_{i \in p} 1 = \sum_{m \in p} \sum_{i \in m} 1 .$$

Par conséquent,

$$n = \sum_p n_p = \sum_m n_m = \sum_i n_i = \sum_p \sum_{m \in p} \sum_{i \in m} n_i .$$

On a de la même manière, pour m désignant le nombre de ménages et m_p le nombre de ménages résidant sur la parcelle p :

$$m_p = \sum_{m \in p} 1 \text{ et } m = \sum_p m_p$$

Le lien entre les informations est traduit par l'emboîtement entre les niveaux et est matérialisé par un identificateur affecté à chaque unité statistique p , m ou i . Un niveau est, ici, assimilé à une partition ce qui nous amène à considérer **une série de partitions emboîtées** engendrées par les populations des niveaux les moins fins sur les populations des niveaux les plus fins.

1.4. La population statistique :

Afin de travailler sur une population homogène, il est nécessaire de pondérer toutes les unités statistiques. La méthode proposée consiste à se fixer une population statistique de référence R parmi I , M , P , et on donne la pondération p_r à chaque unité de cette population ($p_r = 1$ s'il n'y a aucun redressement à faire). Compte tenu de l'emboîtement des unités statistiques, la pondération des unités des autres populations dépend de la pondération de référence et l'on doit avoir :

- si l'étude porte sur les Individus, $R=I$, on pose $p_r = p_i$ et l'on a :

$$p_p = \sum_{i \in p} p_i \text{ et } p_m = \sum_{i \in m} p_i$$

- si l'étude porte sur les Ménages, $R=M$, on pose $p_r = p_m$ et l'on a :

$$p_p = \sum_{m \in p} p_m \quad \text{et} \quad p_t = \frac{p_m}{\sum_{i \in m} 1}$$

- si l'étude porte sur les Parcelles, $R=P$, on pose $p_r = p_p$ et l'on a :

$$p_m = \frac{p_p}{\sum_{m \in p} 1} \quad \text{et} \quad p_t = \frac{p_m}{\sum_{i \in m} 1}$$

où $\sum_{i \in m} 1 = n_m$ et $\sum_{m \in p} 1 = m_p$. On vérifie que

$$\sum_r p_r = \sum_a p_a = \sum_b p_b = \sum_c p_c$$

et est égale à l'effectif de la population de référence si $p_r = 1$.

On met ainsi en évidence **un système de pondération** cohérent pour toutes les unités statistiques emboîtées de la hiérarchie et qui dépend :

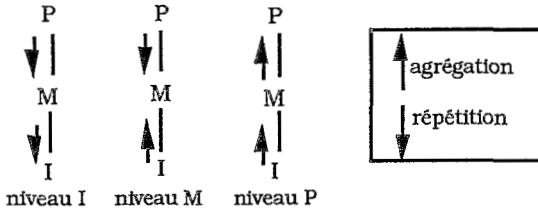
- de l'unité statistique de référence
- de l'emboîtement de niveaux.

1.5.L'échelle de perception :

Une fois fixée la population d'étude, il s'agit de construire à chaque échelle un tableau rectangulaire juxtaposant l'ensemble des variables. Pour cela, nous avons deux cas de figures :

- lorsque l'échelle de perception est plus fine que le niveau de définition des variables, ces variables sont répétées. Il y a **répétition** des informations des unités supérieures sur les unités inférieures qu'elles définissent.

- lorsque l'échelle de perception est moins fine que le niveau de définition des variables, celles-ci sont cumulées, autrement dit, elles sont agrégées. Il y a **agrégation** des informations des unités inférieures appartenant à une unité supérieure qui sont assimilées au centre de gravité de la classe définie par cette unité supérieure. Par conséquent, il y a une perte d'information.



On arrive alors à une structure de tableau hiérarchisé qui consiste en une série de tableaux HP, HM, HI, définis par chaque échelle et qui abordent une même population statistique donnée par un système de pondération défini précédemment.

Afin de minimiser la perte d'information, il est naturel d'examiner les phénomènes au niveau le plus fin et de "remonter" l'information vers les niveaux les moins fins.

- **à l'échelle de l'Individu**, on construit d'abord le tableau disjonctif complet pondéré $HI(I,J)$ défini sur I^*J :

$$HI_{ij} = \begin{cases} p_i KI_{ij} & \forall j \in J_I \text{ et } \forall i \in I \\ p_i KM_{mj} & \forall j \in J_M \text{ et } \forall i \in m \\ p_i KP_{pj} & \forall j \in J_P \text{ et } \forall i \in p \end{cases}$$

Et l'on a par cumul les tableaux de correspondances suivants :

- **à l'échelle du Ménage**, le tableau $HM(M,J)$ défini sur M^*J par:

$$\forall j \in J: \quad HM_{mj} = \sum_{i \in m} HI_{ij}$$

- **à l'échelle de la Parcelle**, le tableau $HP(P,J)$ défini sur P^*J par:

$$\forall j \in J: \quad HP_{pj} = \sum_{i \in p} HI_{ij} = \sum_{m \in p} \sum_{i \in m} HI_{ij} = \sum_{m \in p} HM_{mj}$$

A trois populations statistiques potentielles correspondent par conséquent trois séries de trois tableaux données par la figure n°1.

SERIES DE TABLEUX JUXTAPOSANT DES VARIABLES DEFINIES A PLUSIEURS NIVEAUX

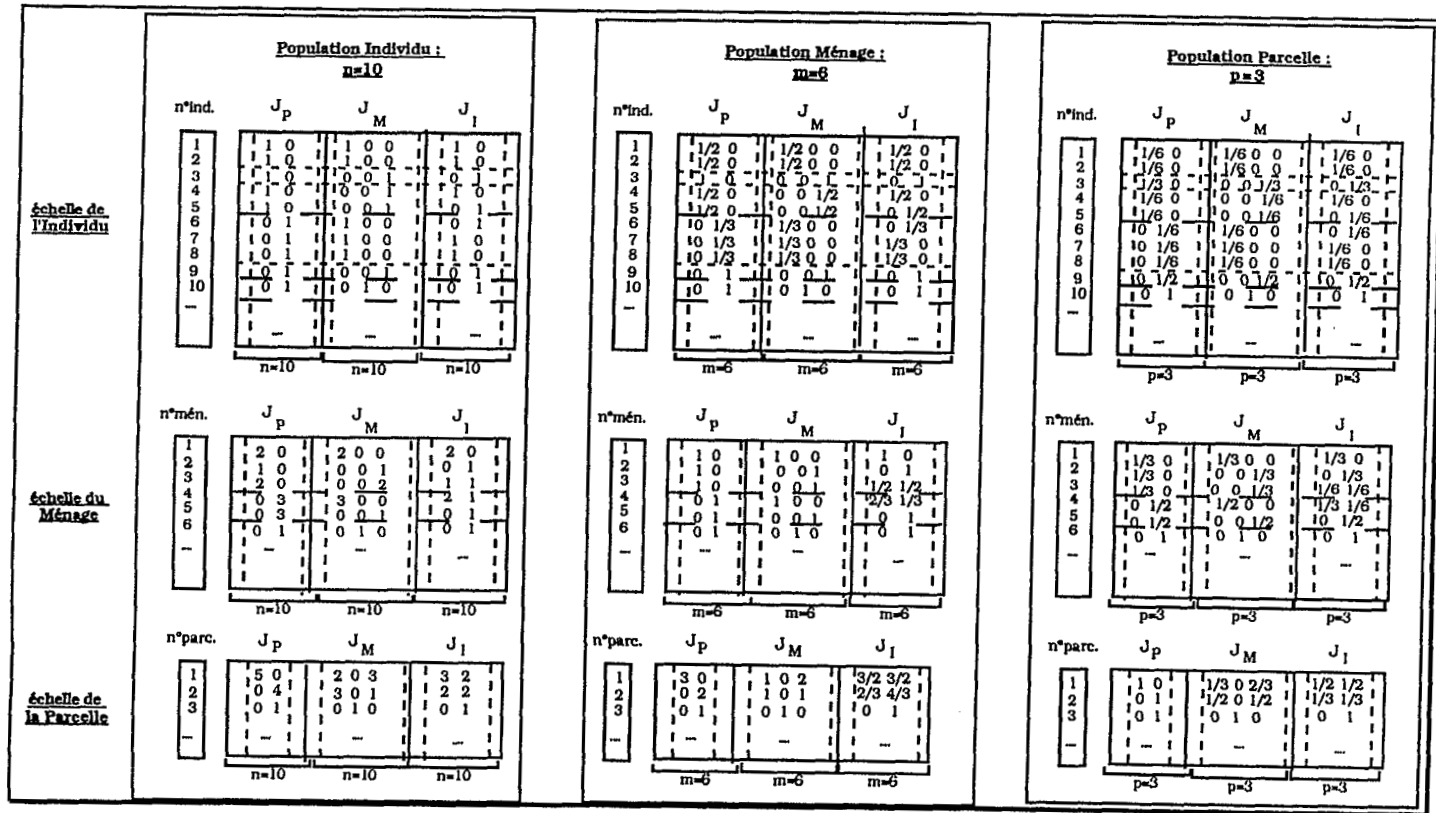
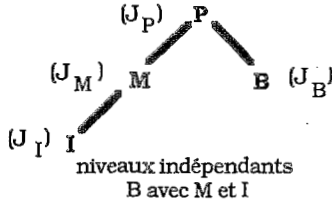


Figure n°1

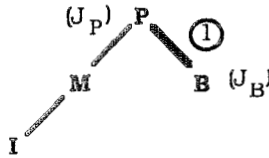
1.6.Des niveaux indépendants :

Nous avons envisagé jusqu'à présent des niveaux emboîtés mais l'on peut également concevoir des niveaux indépendants schématisés par:

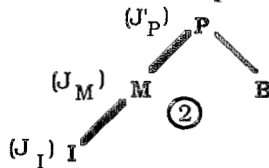


où B est l'ensemble des bâtiments de la parcelle et il n'y a pas de relation directe entre un ménage et un bâtiment. Les niveaux M et B ou I et B sont indépendants. Dans cette situation on procède en deux étapes qui nécessitent deux systèmes de pondération:

- On agrège l'information d'un des niveaux indépendants (Bâtiment par exemple) au niveau supérieur commun, la Parcelle. On augmente les variables de P et l'on pose alors $J'_P = J_P \cup J_B$:



- On se ramène au cas précédent des niveaux emboîtés en considérant la structure hiérarchique suivante :



et l'on aboutit à la série de tableaux hiérarchisés suivante :

	J_P	J_B	J_M	J_I
P		agrégation au niveau P		

échelle de la Parcelle

	J_P	J_B	J_M	J_I
M		agrégation au niveau P		agrégation au niveau M
I		répétition au niveau P		

échelle du Ménage

	J_P	J_B	J_M	J_I
I		agrégation au niveau P		
M		répétition au niveau P		

échelle de l'Individu

1.7. Un exemple sur deux niveaux :

L'exemple suivant considère les variables définies aux niveaux Parcelle et Ménage. Nous avons le choix de travailler soit sur la population des Ménages soit sur celle des Parcelles.

1.7.1. La population des Ménages :

L'unité statistique de référence est le Ménage. On comptabilise le nombre de ménages et l'on a le système de pondération :

$$p_m = 1 \text{ et } p_p = \sum_{m \in p} 1.$$

• A l'échelle du Ménage :

On construit un tableau à l'échelle la plus fine compte tenu des variables c'est-à-dire au niveau Ménage. On ne perd pas d'information. Les variables Parcelle sont répétées autant de fois qu'il y a de ménages sur la parcelle.

n°mén.	var. Parcelle			var. Ménage			n°parc.
	elect	non el	...	prop	loc	héb	
1	1	0		1	0	0	1
2	1	0		0	0	1	1
3	1	0		0	0	1	1
4	1	0		0	0	1	2
5	0	1		0	1	0	3
6	1	0		1	0	0	3
7	1	0		0	1	0	3
8	0	1		0	0	1	3
9	0	1		0	0	1	4
10	0	1		0	0	1	4

	var. Parcelle			var. Ménage		
	elect	non el	...	prop	loc	héb
var. Parcelle	elect	6	0	2	1	3
	non el	0	4	0	1	3
var. Ménage	prop			2	0	0
	loc			0	2	0
	héb			0	0	6

A l'examen du tableau croisé, on obtient, au croisement des deux modalités "elect" et "heb", le nombre de ménages hébergés qui ont l'électricité sur la parcelle.

On réalise une analyse des correspondances sur ce tableau.

• A l'échelle de la Parcelle :

Mais on peut aussi concevoir une exploitation des variables à l'échelle de la Parcelle. Par exemple si l'on veut cartographier les résultats. On agrège alors l'information et on recrée un tableau (Parcelle, Variables) où ce sont les variables descriptives du ménage et de la parcelle.

n° parc	var. Parcelle		var. Ménage		
	elect	non el	prop	loc	heb
1	4	0	1	0	3
2	0	1	0	1	0
3	2	0	1	1	0
4	0	3	0	0	3

	var. Parcelle		var. Ménage		
	elect	non el	pro	loc	heb
var. Parcelle	6	0	2	1	3
var. Ménage	0	4	0	1	3
			0,8	0,5	0,7
			0,5	1,5	0
			0,7	0	5,3

Au croisement des modalités "elect" et "heb", on a comme précédemment le nombre de ménages hébergés qui ont l'électricité sur la parcelle. Mais au croisement des modalités "prop" et "heb", on a le nombre de ménages propriétaires et hébergés sachant qu'ils résident sur une même parcelle. Il s'agit d'une moyenne conditionnelle.

Réaliser une analyse des correspondances sur ce tableau revient à effectuer une analyse inter-classes où les classes sont les parcelles.

1.7.2. La population des Parcelles :

On envisage, maintenant l'étude à partir de la population des parcelles qui devient la population de référence. **On compte ici des parcelles.** Le système de pondération est le suivant :

$$p_p = 1 \text{ et } p_m = \frac{1}{\sum_{m \in p} 1} . \text{ Les tableaux sont construits comme }$$

précédemment et l'on obtient.

• A l'échelle du Ménage :

n° mén.	var. Parcelle		var. Ménage			n° parc.
	elect	non el	prop	loc	heb	
1	1/4	0	1/4	0	0	1
2	1/4	0	0	0	1/4	1
3	1/4	0	0	0	1/4	1
4	1/4	0	0	0	1/4	2
5	0	1	0	1	0	3
6	1/2	0	1/2	0	0	3
7	1/2	0	0	1/2	0	3
8	0	1/3	0	0	1/3	3
9	0	1/3	0	0	1/3	4
10	0	1/3	0	0	1/3	4

	var. Parcelle		var. Ménage		
	elect	non el	pro	loc	heb
var. Parcelle	2	0	0,7	0,6	0,7
var. Ménage	0	2	0	1	1
			0,75	0	0
			0	1,5	0
			0	0	1,75

Au croisement des deux modalités "elect" et "heb", on a le nombre de parcelles qui ont l'électricité et qui abritent des hébergés.

• A l'échelle de la Parcelle:

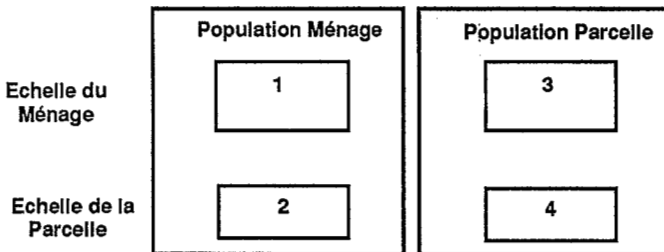
n° parc	var. Parcelle			var. Ménage		
	elect	non el	...	prop	loc	heb
1	1	0		1/4	0	3/4
2	0	1		0	1	0
3	1	0		1/2	1/2	0
4	0	1		0	0	1

	var. Parcelle		var. Ménage		
	elect	non el	pro	loc	heb
var. Parcelle	2	0	0,7	0,6	0,7
	0	2	0	1	1
var. Ménage			0,3	0,25	0,2
			0,25	1,2	0
			0,2	0	1,6

Au croisement des modalités "prop" et "heb", on compte le nombre de parcelles qui abritent en même temps des propriétaires et des hébergés. Il s'agit d'une moyenne conditionnelle.

1.8. Conclusion :

Pour deux niveaux, on a deux populations possibles pour exploiter les variables. Une fois fixé la population de référence, on a au moins autant de tableaux qu'il y a de niveaux.



On aboutit à la construction de quatre tableaux qui croisent l'ensemble des variables définies à plusieurs niveaux ce qui élargit les possibilités d'analyse puisqu'en général on étudie la population correspondant au niveau le plus fin compte tenu des variables considérées. C'est le premier tableau que l'on exploite pour le traitement de données d'enquête ou le second dès que l'on veut cartographier des résultats. Les analyses sont effectuées séparément les unes des autres.

2. L'ETUDE DU SYSTEME D'ECHELLES

L'analyse d'un des tableaux décrit précédemment permet l'étude d'une population à une échelle de perception donnée. Il est intéressant de savoir ce qui se passe dans le transfert d'échelle. Par conséquent, l'idée, ensuite, n'est pas de travailler sur un niveau mais sur tous les niveaux envisagés dans l'étude et d'une manière simultanée. Il s'agit d'expliquer la formation des niveaux et les passages entre les

niveaux. C'est ce qui contribue à mettre en évidence toute l'organisation du système d'information.

2.1. le principe :

Un système d'échelles se compose d'une part d'un ensemble de niveaux et d'autre part d'un lien entre ces niveaux qui est traduit par une série de niveaux emboîtés. On l'aborde par :

- Une analyse par niveau, c'est-à-dire l'exploitation du premier élément du système, qui donne la structuration du phénomène étudié sous des formes différentes. Chaque niveau fournit un point de vue particulier sur cette structuration.
- Une analyse du passage, c'est-à-dire l'exploitation du deuxième élément du système, qui établit la jonction entre ces différents points de vue. Elle fournit les structures que l'on perd dans le transfert et complète ainsi la connaissance.

Cette étude doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- Quel niveau choisir, autrement dit, quelle est l'influence du découpage, géographique ou non, sur la perception d'un phénomène donné ?
- A quel niveau une variable n'intervient plus ? Trouve-t-on les mêmes facteurs aux différentes échelles ? Si oui, quels sont-ils suivant l'échelle considérée ?

Ce qui nous amène également à définir des niveaux d'intervention des variables et à réfléchir sur un critère d'homogénéité des niveaux.

2.2. La décomposition de l'inertie pour une série de partitions emboîtées:

Pour comprendre le système d'échelles, on va utiliser la décomposition de l'inertie suivant le principe de Huygens : l'inertie d'un nuage de points I muni d'une partition se décompose en inertie inter-classes et en inertie intra-classes. On démontre alors que, lorsque le nuage est muni d'une série de partitions emboîtées (P et M), cette décomposition devient :

$$In(I) = Inter(P) + Intm(MP) + Intra(M)$$

où $Inter(P)$ = inertie inter-classes associées à la partition P sur I
 $Intra(M)$ = inertie intra-classes associées à la partition M sur I
 $Intm(MP)$ = inertie intra-classes pour la partition engendrée par P sur l'ensemble des centres de gravités des classes associées à la partition M sur I.

Et l'on a :

$$In(I) = \underbrace{In.inter(P)} + \underbrace{In.intm(MP)} + \underbrace{In.intra(M)}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{In.inter(M)}$$

On généralise cette formule en considérant l'inertie inter-classes associées à la partition P sur I, ($Inter(P)$), comme l'inertie intra-classes associées à la partition réduite à une seule classe {I} sur A. La décomposition de l'inertie peut être envisagée comme la somme des inerties intra-classes entre deux niveaux, et l'on a pour une série de partitions emboîtées (P_0, \dots, P_N), $P_0=I$ et $P_N=\{I\}$:

$$In(I) = \sum_I^N In.intm(P_{n-1}P_n)$$

2.3.L'analyse des niveaux :

L'analyse des niveaux revient à réaliser **une succession d'analyses inter-classes** et à dégager les structures induites par niveau. On saisit ainsi l'influence des niveaux sur la perception des phénomènes.

L'analyse inter-classes étudie l'écart entre le profil moyen d'une classe et le profil moyen du nuage. Un individu i d'une classe (d'une parcelle) p est assimilé au centre de gravité de p et n'est étudié qu'au travers de celui-ci. Elle traduit la dispersion inter et est réalisé sur l'ensemble des barycentres des classes (ce qui est équivalent à l'analyse du cumul de l'information par classe). On réalise par conséquent une analyse des correspondances sur les tableaux HM (ou BM) et HP (ouBP) pour les analyses des niveaux respectivement Ménage et Parcelle.

2.4.L'analyse des passages entre les niveaux :

L'analyse inter-classes examine les structures communes aux classes. Par conséquent, les variations internes aux classes données

par l'analyse intra-classes sont éliminées. Ce sont les structures perdues dans le transfert vers un niveau supérieur. Elles définissent les caractéristiques du passage d'un niveau à un autre et donnent les éléments qui diffèrent entre eux et se regroupent dans les mêmes classes au niveau inférieur. Il s'agit d'une analyse intra-classes à partir du niveau inférieur c'est-à-dire d'une analyse inter-classes. L'analyse des passages revient alors à réaliser une succession d'analyses intra-classes associées à la partition définie par le niveau le moins fin sur l'ensemble des classes défini par le niveau le plus fin.

L'analyse intra-classes étudie la dispersion des éléments à l'intérieur des classes. De ce fait, les profils sont analysés non pas par rapport au profil moyen du nuage mais par rapport au profil moyen de leur classe. On réalise alors une analyse des correspondances sur les tableaux :

- pour l'analyse du passage entre les niveaux Individu et Ménage

$$HI^* = HI - HM + (\text{produit des marges})$$

- pour l'analyse du passage entre les niveaux Ménage et Parcelle

$$HM^* = HM - HP + (\text{produit des marges})$$

2.5. L'analyse du système d'échelles :

Effectuer des analyses inter ou intra-classes permet **d'identifier ce qui est conservé (analyse inter) ou ce qui est perdu (analyse intra) dans le transfert d'échelle.**

Intuitivement, pour un nombre d'individus donné, plus une partition est fine, plus le nombre de classes d'une partition est élevé (faible effectif d'individus dans les classes) et plus ces classes sont homogènes.

On sait que si les classes sont homogènes, pour une partition donnée, c'est-à-dire s'il existe un regroupement d'éléments distributionnellement proches, il est sensiblement équivalent de réaliser l'analyse à un niveau supérieur déterminant ces classes. En effet, partant du principe de l'équivalence distributionnelle, on peut alors agréger les éléments d'une même classe, autrement dit effectuer un changement d'échelle, sans que l'analyse soit trop perturbée : *"l'intérêt de l'analyse des correspondances est que, du fait de l'équivalence distributionnelle, cette méthode est peu sensible au détail de la partition adoptée"*¹.

¹BENZECRI et coll, 1973, L'analyse des données, Tome IIA n°1 p21.

ANALYSE DU SYSTEME D'EHELLES

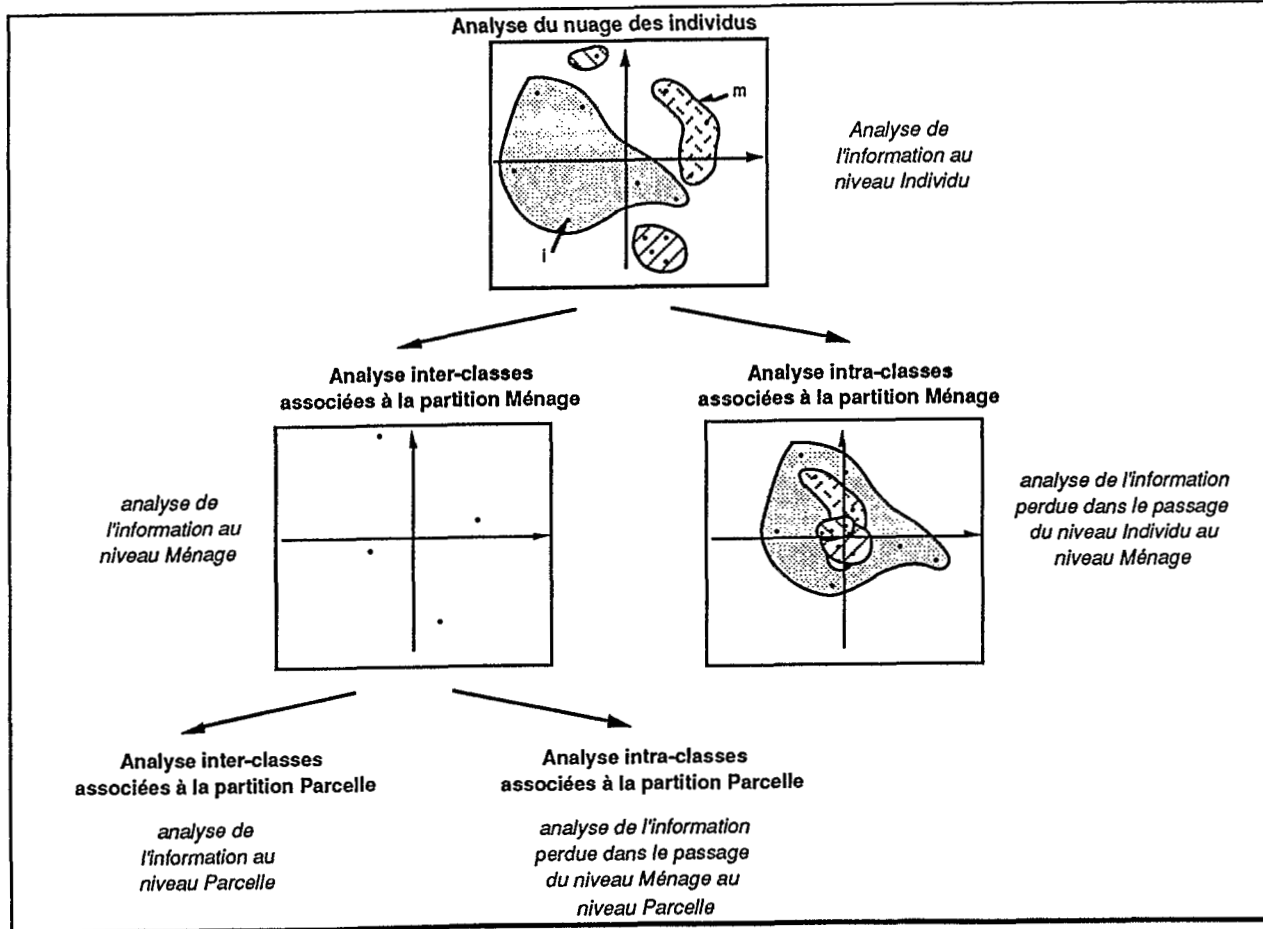


Figure n°2

Mais, la démarche d'un système d'échelles suppose que les classes soient déjà établies. Par conséquent, on ne cherche donc pas, comme pour une classification, à construire des classes ne comprenant que des individus semblables entre eux, suivant des critères d'agrégation restant à définir (pour un tableau de correspondances, celui-ci maximise l'inertie inter-classes). Ici, ce critère est imposé "naturellement" par le lien hiérarchique et une classe constitue alors un agrégat d'individus plus ou moins homogène.

Par conséquent, si l'inertie intra-classes définie entre deux niveaux est faible (peu de variation dans le passage), on peut ramener l'étude au niveau supérieur d'agrégation qui conserve alors la stabilité du phénomène observé au niveau inférieur. Les classes sont globalement homogènes par rapport aux classes du niveau inférieur.

De plus, le choix de l'échelle n'est pas neutre. Pour deux systèmes d'échelles de découpage en niveaux identiques, on peut avoir des comportements différents : les classes définis par niveau sont globalement plus ou moins homogènes et une variable peut intervenir pour un seul des niveaux. Mais il est délicat de fixer un critère d'homogénéité à partir des taux d'inertie.

On peut, cependant, donner une importance d'homogénéité du niveau par l'examen des deux séries d'analyses : l'analyse inter-classes c'est-à-dire l'analyse des niveaux et l'analyse intra-classes c'est-à-dire l'analyse des passages entre les niveaux. En effet :

- Si l'analyse du niveau le moins fin rend compte au mieux des mêmes structures que celle du niveau le plus fin alors l'analyse du passage entre ces deux niveaux dégage une perte d'information due à l'agrégation mais qui ne bouleverse pas l'organisation des données : l'inertie intra-classes est faible et le niveau le moins fin est globalement homogène (il rend compte de classes homogènes).

- Si l'analyse du niveau le moins fin, par contre, ne se structure pas comme celle du niveau le plus fin alors l'analyse du passage rend compte d'une même organisation des données que celle du niveau inférieur : l'inertie intra-classes est élevée et le niveau le moins fin est globalement hétérogène. Il s'est passé quelque chose dans le transfert d'échelle qu'il peut être intéressant de connaître

L'analyse de l'inertie la plus faible rend compte au mieux, de structures qui ne peuvent apparaître dans les autres analyses et complète ainsi la connaissance du phénomène étudié.

La figure n°2 représente la décomposition de l'inertie pour une série de partitions emboîtées (Parcelle et Ménage) à partir du nuage d'individus N(I).

2.6. Niveaux d'intervention des variables :

Sachant que l'inertie du nuage est la somme des inerties des variables, on décompose l'inertie d'une variable, v , suivant le même principe de la décomposition pour une série de partitions emboîtées :

$$In(v) = Inter(v,P) + Intm(v,MP) + Intra(v,M)$$

En relativisant ces formes d'inerties à l'inertie totale de la variable, on obtient la contribution de l'inertie décomposée de la variable v à l'inertie de la variable. Par exemple :

- pour le passage des niveaux Ménage et Parcelle,

$$CTR(v,MP) = \frac{Intm(v,MP)}{In(v)}$$

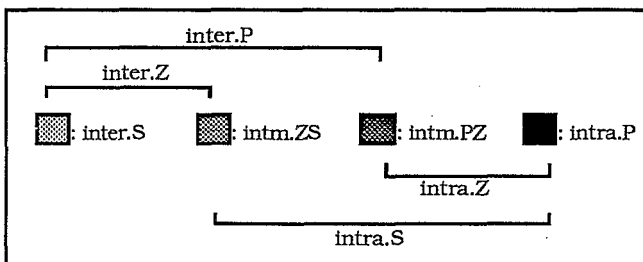
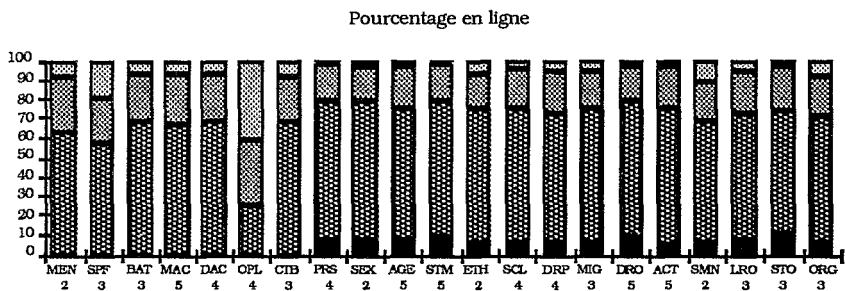
- au niveau M,

$$CTR(v,M) = \frac{Inter(v,M)}{In(v)}$$

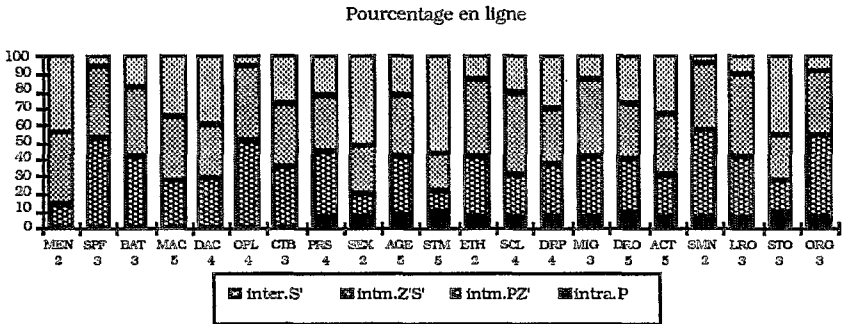
Cela nous autorise à construire un graphique qui permet une lecture simultanée des différents niveaux d'intervention des variables.

Nous présentons deux graphiques issus d'une étude urbaine sur Ouagadougou au Burkina Faso.

Le premier graphique est issu d'un système d'échelles Ménage-Parcelle-Zone de dénombrement-Secteur :



Le deuxième est issu d'un système d'échelles dont les niveaux ont le même nombre de classes que le système d'échelle précédent mais il est obtenu à partir d'une classification ascendante hiérarchique dont le critère d'agrégation est fondé sur la minimisation de l'inertie intra-classes. Par conséquent, ce système d'agrégation rend compte au mieux de niveaux homogènes :



L'allure générale de ces deux graphiques est très différente. Le dernier dénote un nombre plus important de variables qui interviennent aux niveaux supérieurs contribuant alors à enrichir les typologies de ces niveaux. Le premier système d'échelles démontre l'hétérogénéité des niveaux supérieurs Zone de dénombrement et Secteur (forte dispersion entre les niveaux Parcelle et Zone de dénombrement).

Ces graphiques ne permettent pas, évidemment, de donner des associations de variables. Leur intérêt est de définir le niveau d'intervention des variables : plus l'inertie inter-classes associée à une partition est importante, plus la variable contribue à caractériser le niveau correspondant. Inversement, plus l'inertie intra-classes est élevée, plus la variable contribue à caractériser le niveau inférieur considéré dans le passage.

2.7. Conclusion

Décrire un ensemble d'informations hiérarchisées revient à appréhender un système d'échelles comportant un nombre variable de niveaux. Le sens que l'on donne, ici, à l'échelle doit être élargi et relativisé.

Pour exploiter l'information contenue dans un système d'échelles, la démarche à suivre est la suivante :

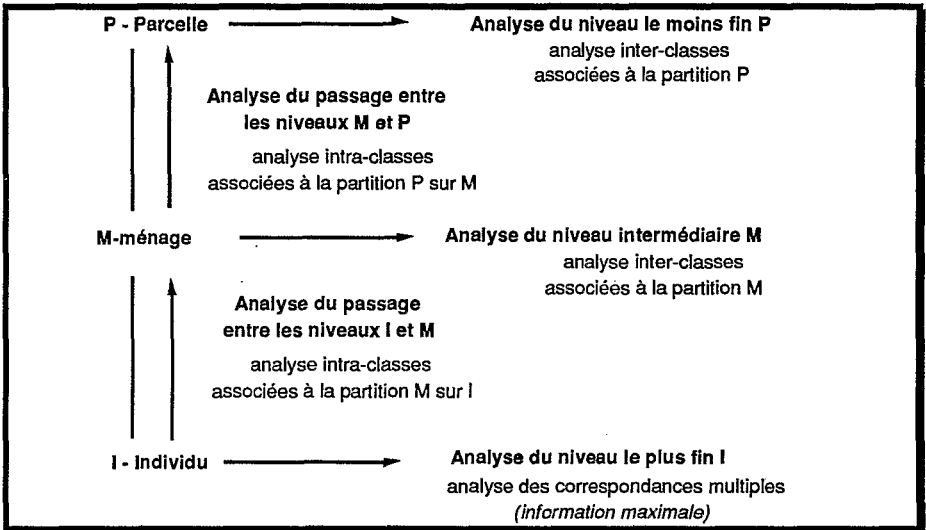
1- on réalise une analyse au niveau le plus fin et on obtient une organisation des données du maximum d'information.

2- puis, au niveau supérieur immédiat on réalise une double analyse :

- l'analyse du niveau qui donne l'organisation des données à ce niveau.
- l'analyse du passage qui donne l'information contenu au niveau inférieur qui est perdue dans le passage et qui rend compte de la variabilité interne de ce niveau.

3- on répète cette série de deux analyses aux niveaux supérieurs suivants .

Le processus de l'analyse d'un système d'échelles revient à faire des "va et vient" d'une échelle à une autre pour comprendre ce qui se passe à toutes les étapes du système. Celles-ci sont schématisées de la manière suivante :



On peut rapprocher le processus d'un système d'échelles de celui d'une classification ascendante hiérarchique mise à part que :

• **La classification ascendante hiérarchique est un processus automatique qui cherche à organiser des données en créant un lien** (défini suivant un critère d'agrégation de la maximisation de l'inertie inter-classes). Le principe est de s'intéresser à un ensemble de classes pour une partition fixée.

• **Le système d'échelles est un processus "naturel" qui explique une organisation des données déterminée par l'existence d'un lien hiérarchique** tel que nous l'avons défini (c'est-à-dire traduit par une série de partitions emboîtées) et auquel il s'agit de donner un sens en terme d'homogénéité. Le principe est de saisir une ensemble de partitions c'est-à-dire de niveaux et à étudier leur influence pour un phénomène donné.

Le rapprochement s'effectue non pas dans la formation des classes mais dans leur interprétation.

**APPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE
D'UN SYSTEME D'ECHELLES
AU TRAITEMENT GEOGRAPHIQUE DES DONNEES
TRAITEMENT DES DONNEES SUR LE LOGEMENT DU
RECENSEMENT 1982 DE QUITO
(EQUATEUR) AU NIVEAU DE L'ILOT**

COURET D. ¹

RESUME

Lors d'une approche géographique dont le principal support est la représentation cartographique, on réalise généralement un **transfert d'échelle**, en associant des données qualitatives collectées à des niveaux non localisés (individu, logement...) aux unités d'un découpage de l'espace (parcelle, îlot...). On montre ici comment il est possible d'utiliser la "**méthode pour le croisement de variables qualitatives dans les enquêtes à plusieurs niveaux**", présentée par M.Piron, pour comprendre la transformation de l'information qui est alors réalisée et le rapport des phénomènes décrits avec la dimension géographique. Les données sur le logement fournies par le recensement de 1982 sur la ville de Quito (Equateur) traitées au niveau de l'îlot urbain, servent de support à cette démonstration. L'utilisation dérivée de cette méthode d'analyse d'un système d'échelles s'avère alors particulièrement adaptée à la mise en valeur de la structuration de l'espace urbain quiténien.

INTRODUCTION

Dans le cadre de la création d'une Base d'Information Urbaine de la ville de Quito à partir du Système d'Information Géographique "Savane", une intégration des données sur le logement fournies par le recensement national de 1982 a été réalisée. Ces données sont ainsi disponibles au sein de la base en fonction de l'îlot. Il s'agit de la plus petite unité spatiale dont on dispose pour cartographier ces données. Par rapport aux registres originaux il a donc été procédé à une agrégation.

¹Géographe. (Département Orstom S.U.D.- Université de Rouen)

A partir de cette structure le système d'information géographique "Savane" permet toutes les cartographies possibles: variable par variable, combinaisons de variables, etc. Le problème est alors double. D'une part dans le cas d'une cartographie univariée, comprendre le sens des distributions spatiales que l'on obtient. D'autre part dans le cas d'une cartographie simultanée de plusieurs variables savoir comment interpréter les correspondances spatiales obtenues. *"Une belle structure, une belle correspondance spatiale, entre deux ou plusieurs variables, n'est pas nécessairement une explication, c'est-à-dire la preuve d'une relation réelle entre l'espace et le phénomène cartographié"* R.Devauges (1982).

Notre but est donc de distinguer les éléments de connaissance apportés par ces données pour lesquels il existe une dimension spatiale, de ceux pour lesquels la répartition géographique n'a pas de valeur explicative. En bref identifier ce qui participe à l'organisation géographique de l'espace urbain. Pour cela la méthode de description d'un système d'échelles présentée par M. PIRON a été utilisé.

UTILISATION DE L'ANALYSE D'UN SYSTEME D'ECHELLES

1 COMPOSITION DU SYSTEME D'ECHELLES

Quels sont les éléments du système d'échelles dont nous disposons ?

- Une population de référence: **les logements**
- Deux niveaux ou échelles emboîtées pour l'analyse de l'information:

le logement qui est le niveau d'enquête

l'ilot qui est le niveau de traitement géographique

- Trois groupes de variables se rapportant au logement:

modes d'équipement (accès aux réseaux publics, solutions individuelles);

composition physique de l'habitat (type et matériaux de construction, nombre de chambre);

modalités d'occupation (statut d'occupation, taille du ménage)

Ces éléments permettent de construire deux tableaux:

- Le tableau du maximum de l'information fournie par le recensement, réalisé au niveau d'enquête, c'est-à-dire le logement.
- Le tableau de l'information agrégée au niveau de traitement géographique, c'est-à-dire l'îlot.

Ces deux tableaux sont construits à partir de la même unité statistique, c'est-à-dire le logement.

2 APPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE

La démarche est la suivante:

- Une première analyse des correspondances sur le tableau du maximum d'information (composé au niveau logement). Elle fournit les principaux paramètres de l'organisation originelle des données.
- Une seconde analyse à partir de l'inertie interclasse sur le tableau composé au niveau îlot. Elle fournit les principaux paramètres de l'organisation des données en fonction du regroupement des logements en classes-îlot.
- Une troisième analyse à partir de l'inertie intraclasse sur le tableau composé au niveau îlot. Elle fournit les éléments d'organisation originelle qui sont perdus dans le passage de l'échelle du logement à celle de l'îlot.

Les résultats

1° La comparaison de l'analyse au niveau logement et l'analyse au niveau îlot permet de conclure que l'essentiel de l'organisation originelle est retranscrit au niveau îlot. En effet les deux premiers plans factoriels décrivent une organisation très proche :

- les axes factoriels principaux sont dans les deux cas définis par les modes d'équipement (axe 1) et par les caractéristiques composition physique de l'habitat (axe 2);
- la typologie met en valeur dans les deux cas quatre profils d'habitat dont les descriptions sont proches et le positionnement les uns vis à vis des autres globalement similaire.

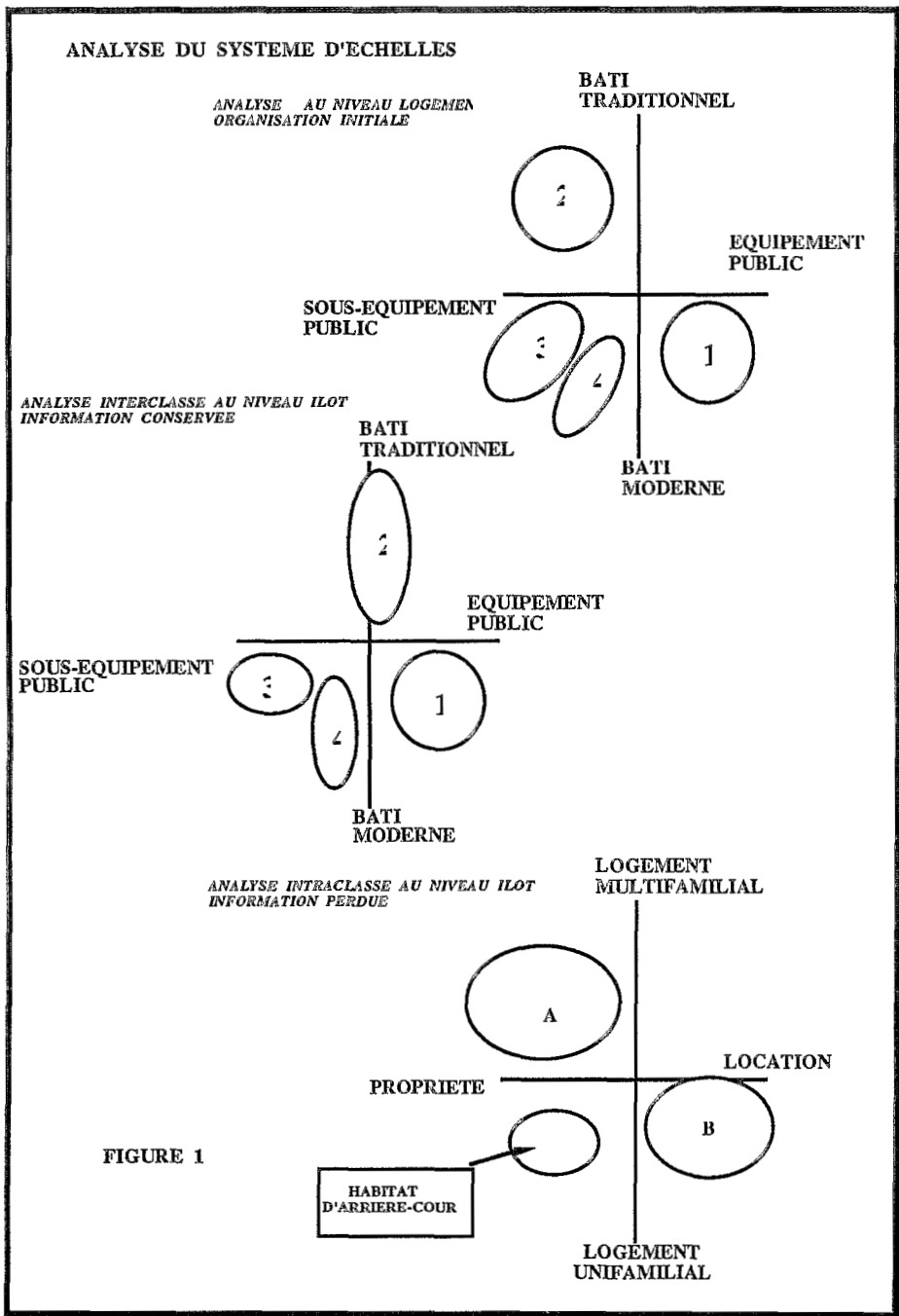


FIGURE 1

Cette première comparaison permet de conclure que le niveau îlot est globalement une unité homogène pour les variables d'équipement et de composition physique de l'habitat. C'est-à-dire que les logements compris au sein d'un même îlot sont généralement uniformes du point de vue équipement et construction. L'îlot est une unité

homogène pour ces caractéristiques, les phénomènes qu'elles décrivent ont une dimension géographique.

Pourtant une différence existe entre les organisations aux deux niveaux. Si la structure globale du nuage est la même, la description des types mis en valeur au niveau logement intègre, en plus des caractéristiques d'équipement et de composition physique de l'habitat, le statut d'occupation (propriété, location, gratuit,...) et la taille du logement (nombre de chambres). Il y a donc une perte d'information dans le passage de l'échelle logement à l'échelle îlot.

2° La réalisation de l'analyse intraclasse permet d'identifier la nature de l'information perdue dans ce passage. Il s'agit principalement du rapport entre le statut d'occupation, la taille du logement et la taille du ménage. Pour ces variables et les phénomènes qu'elles décrivent, les logements compris dans un même îlot ne sont pas similaires mais généralement très divers. Ce sont donc des éléments d'hétérogénéité interne de l'îlot qui qualifient mal cette unité spatiale minimum. Autrement dit l'îlot n'est pas une unité d'analyse significative pour ces éléments.

3° L'autre apport de cette analyse intraclasse est l'identification d'un type d'habitat particulier "l'habitat d'arrière-cour". Il apparaît clairement dès le premier plan factoriel mais ne se définit pas par les critères principaux qui organisent le nuage (statut d'occupation, taille du ménage, taille du logement). Il est décrit par des modalités d'équipement et de composition physique du logement, c'est-à-dire les principaux éléments de l'organisation conservés au niveau îlot. Il ne s'agit donc pas d'un type d'habitat principal qui correspond à un parc de logements uniformes au sein d'un même îlot, mais d'un type diffus peu représenté au sein de chaque îlot mais concernant cependant à un effectif important de logements ainsi essaimés. Ce n'est donc pas un critère d'homogénéité interne de l'îlot. Au même titre que le statut d'occupation ou la taille du ménage ce n'est pas un élément intervenant dans l'organisation géographique de l'espace urbain.

UTILISATION DES RESULTATS DE L'ANALYSE DU SYSTEME D'ECHELLES DANS LE TRAITEMENT GEOGRAPHIQUE

Cette analyse du système d'échelles a donc permis de différencier variables, types et phénomènes pour lesquels il existe une dimension spatiale de ceux pour lesquels la répartition géographique n'a pas de valeur explicative.

1 FORMALISATION DE LA HIERARCHIE DE PARTICIPATION ENTRE LES VARIABLES

En ordonnant les diverses variables impliquées dans le traitement en fonction de leur participation à l'organisation interclasse et intraclasse au niveau îlot on obtient alors une "table" permettant d'organiser le traitement cartographique des données sur le logement (figures 2) . Cette "table" classe les variables en fonction de leur rôle plus ou moins important dans l'organisation au niveau îlot. Le haut de la hiérarchie est tenu par les modalités présentant un fort pourcentage d'inertie inter, c'est-à-dire pour lesquelles l'homogénéité de l'îlot est forte. Le bas de la hiérarchie est occupé par les modalités présentant une forte proportion d'intra, c'est-à-dire pour lesquelles l'hétérogénéité de l'îlot est forte . Le seuil entre homogénéité et hétérogénéité est donné par les proportions inter et intra (respectivement 82 % et 18 %) de l'inertie totale. Ce seuil établit la différence entre les modalités pour lesquelles l'îlot est un niveau d'analyse significatif et celles pour lesquelles le logement est le niveau d'analyse le plus adapté.

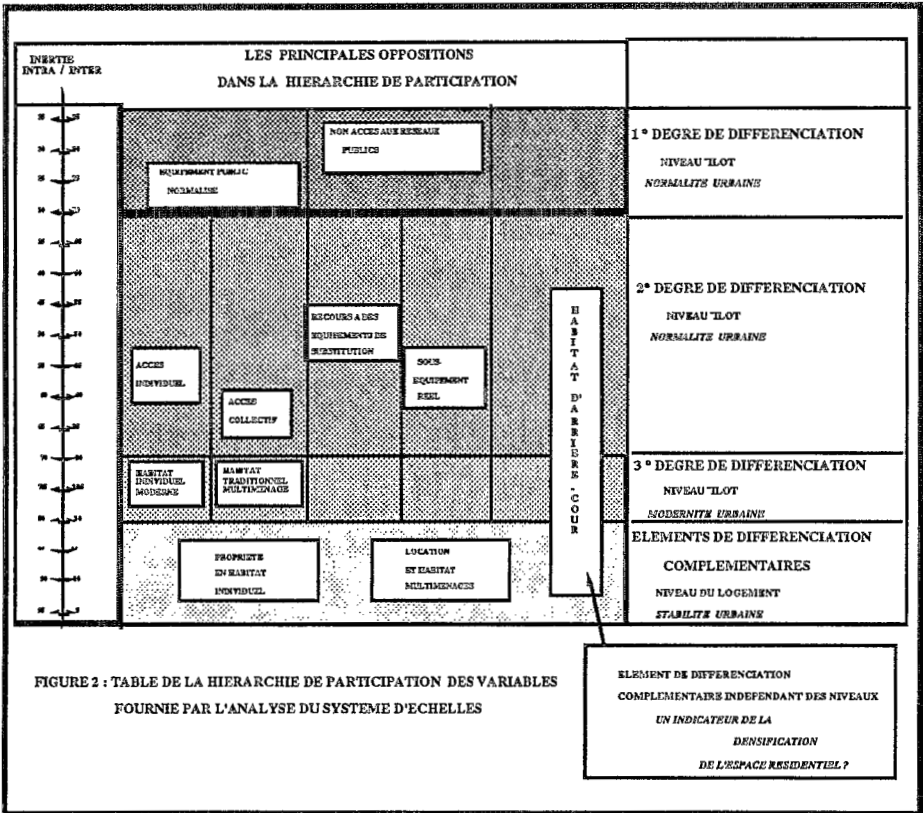


FIGURE 2 : TABLE DE LA HIERARCHIE DE PARTICIPATION DES VARIABLES
FOURNIE PAR L'ANALYSE DU SYSTEME D'ECHELLES

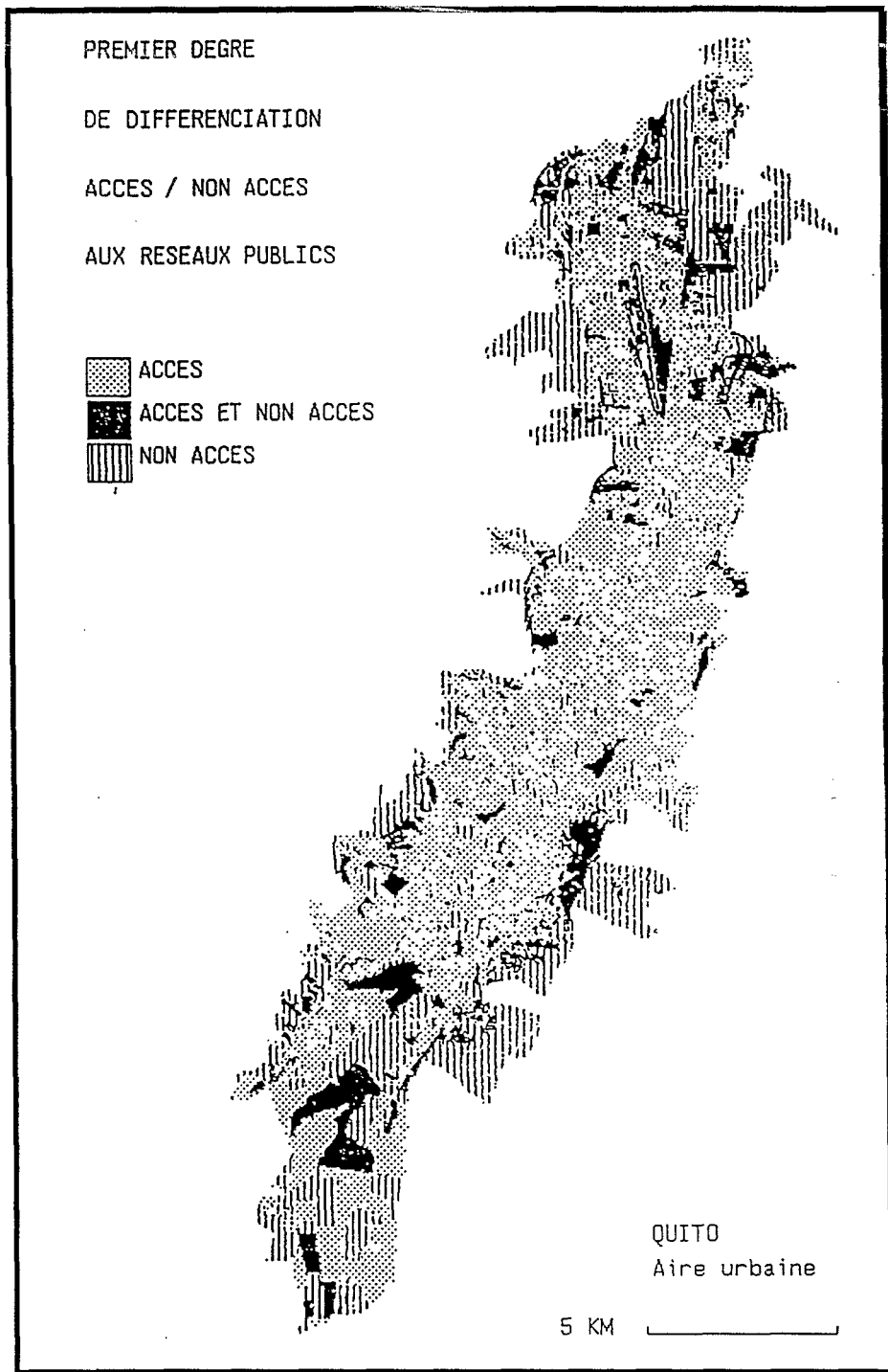


Figure 3

SECOND DEGRE
DE DIFFERENCIATION
ACCES INDIVIDUEL / COLLECTIF
AUX EQUIPEMENTS

■ INDIVIDUEL
▨ INDIVIDUEL / COLLECTIF
▧ COLLECTIF

▩ en dehors de la zone
d'accès aux
reseaux publics

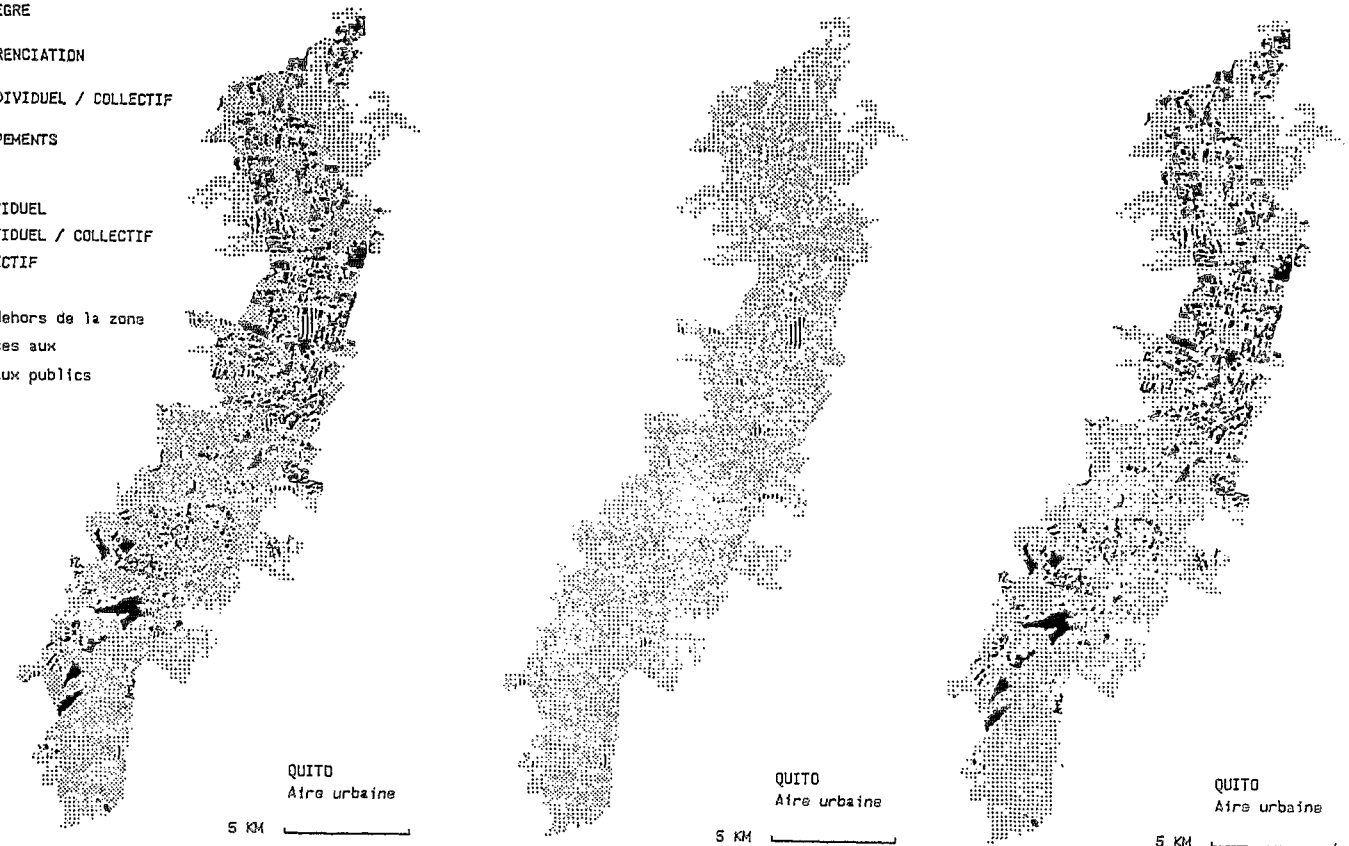
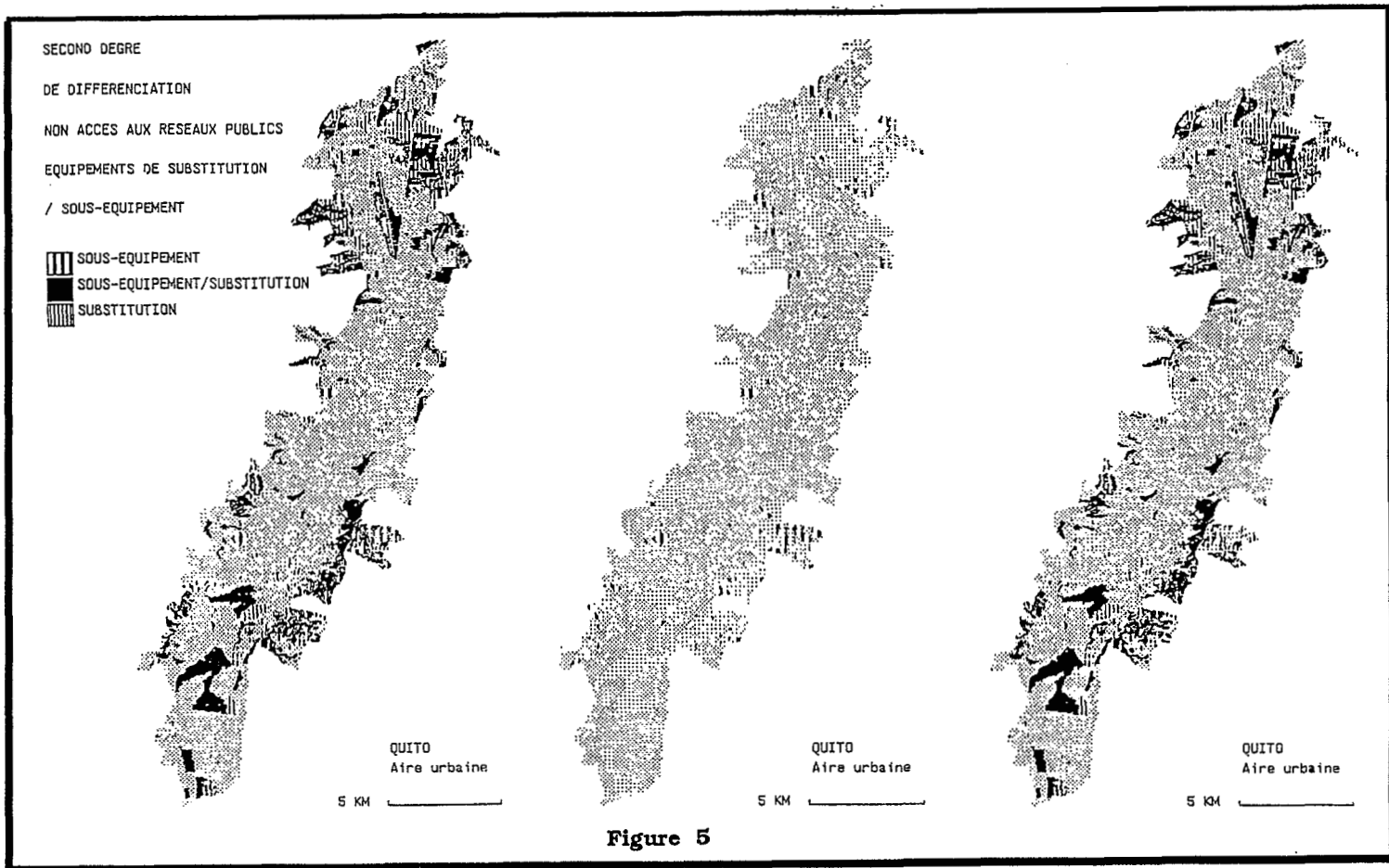


Figure 4



2 INTERPRETATION DE LA REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ELEMENTS SPATIALEMENT SIGNIFICATIFS

Comme exemple d'utilisation de cette hiérarchie, le traitement géographique de deux groupes de variables significatives au niveau îlot est présenté.

Un premier groupe de deux variables descriptives de l'équipement du logement. Elles interviennent en premier dans la définition des types. Elles correspondent à un premier degré dans la différenciation des îlots entre eux sur le critère "accès/non accès aux équipements publics" (figure 3). Leur cartographie montre que **ce phénomène détermine une segmentation nette de l'espace urbain en grandes zones homogènes**. Ce constat permet alors la conclusion suivante: l'accès au réseaux publics est bien un élément participant à l'organisation de l'espace urbain et ce à un niveau de régionalisation supérieur à celui de l'îlot.

Un deuxième groupe composé des autres variables descriptives de l'équipement du logement. Elles interviennent en second dans la définition des types. Elles correspondent à un second degré dans la différenciation des îlots. Les unes subdivisent le groupe d'îlots défini par "l'accès aux réseaux publics" en deux sous-groupes "accès collectif", "accès individuel". Les autres subdivisent le groupe d'îlots défini par le "non accès aux réseaux publics" en deux groupes "sous-équipement réel" et "solutions de substitution".

Les deux cartographies résultantes montrent que les distributions spatiales associées ne définissent pas de grandes zones homogènes (figures 4 et 5). Il s'agit plus de phénomènes géographiquement "dispersés". Par rapport aux variables précédentes ils tendent à "fragmenter" le découpage en grandes zones. Ce constat et le fait qu'ils aient été identifiés comme des critères d'homogénéité interne de l'îlot permet de les interpréter comme des éléments de fragmentation de l'espace urbain.

3 INTERPRETATION DE LA REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ELEMENTS NON SIGNIFICATIFS

La "table" organisant les variables en fonction de leur participation à l'organisation générale permet aussi de traiter de phénomènes particuliers qui ne participent pas à la définition des types au niveau de l'îlot mais sont des éléments de compréhension complémentaires. Un premier exemple est l'habitat d'arrière-cour qui n'est pas une caractéristique dominante de l'espace résidentiel au sein des îlots mais un élément d'accompagnement, présent en petit nombre. Il n'apparaît donc pas comme un élément déterminant dans la typologie de l'habitat au niveau de l'îlot. Cependant il est défini en





L'HABITAT D'ARRIERE-COUR

UN ELEMENT

DE DIFFERENCIATION

COMPLEMENTAIRE

HABITAT D'ARRIERE-COUR

-  AVEC ACCES AUX RESEAUX
-  SANS SYSTEME D'EVACUATION
-  EAU R.P. HORS ED./SANS SYSTEME
-  EAU R.P. HORS EDIFICE

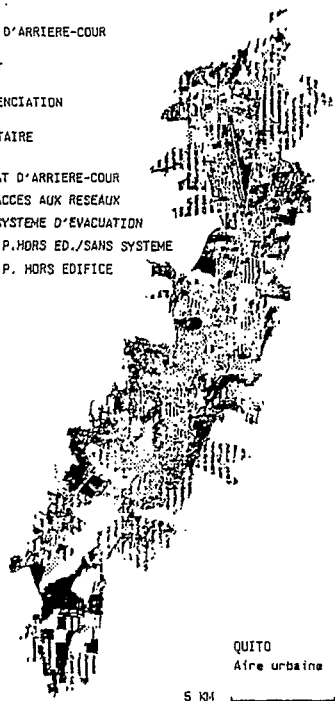
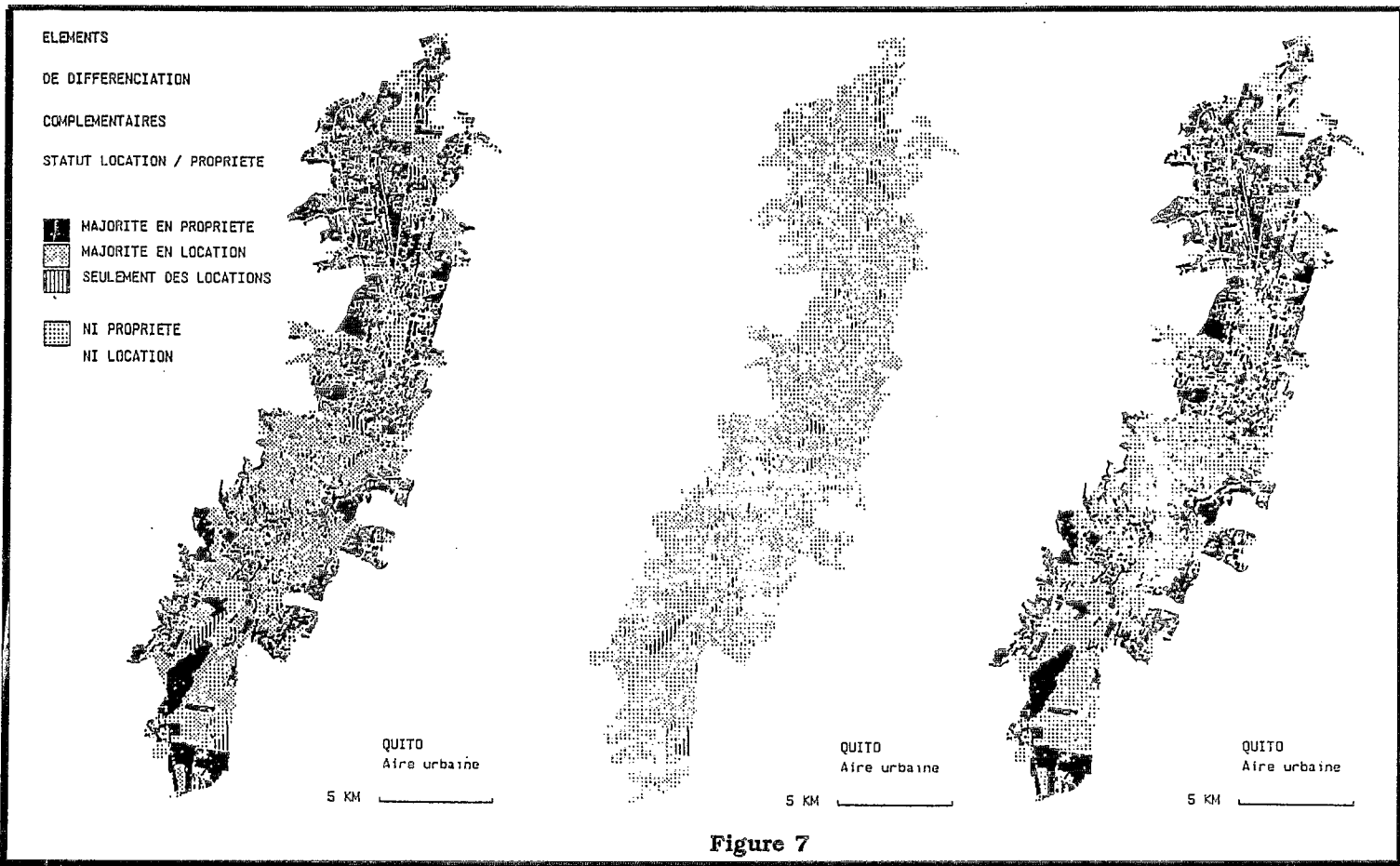


Figure 6



partie par des variables d'équipement qui elles sont significatives au niveau îlot. La représentation géographique de ces différentes variantes fournit un découpage intéressant (figure 6), il identifie entre autre les quartiers en bordure du centre ancien. Ce constat établit sa valeur comme phénomène intervenant dans la structuration de l'espace: **il peut alors être interprété comme un phénomène de densification interne de l'espace.**

Autre exemple, la cartographie des deux types d'habitat définis par l'analyse intraclasse principalement traduits par la forte opposition entre deux statuts d'occupation, propriété et location. Pour ces types l'îlot n'est pas un niveau significatif. Leur distribution spatiale peut être cependant analysée mais ne permet pas une interprétation en terme de participation à l'organisation géographique de l'espace urbain (figure 7).

CONCLUSION

La disposition de deux échelles emboîtées ou niveaux dont l'un est localisé l'autre non, permet d'interpréter les distributions géographiques en termes de structuration de l'espace (segmentation, fragmentation, densification) et de distinguer les éléments intervenant dans la différenciation spatiale des éléments d'accompagnement. L'utilisation de la "**méthode pour le croisement de variables qualitatives dans les enquêtes à plusieurs niveaux**" permet ainsi une analyse qui porte plus sur le rapport entre les variables et les phénomènes que sur leur simple description. Il s'agit pourtant d'une exploitation partielle de la méthode et le système d'échelles analysé est réduit: l'ensemble de variables ont été collectées à la seule échelle du logement et le niveau supérieur a pour seule caractéristique sa nature spatiale. Les résultats sont pourtant particulièrement fructueux en termes d'analyse géographique. Ceci laisse donc présager d'un apport important de cette méthode pour la compréhension de systèmes d'échelles plus complexes, c'est-à-dire où seraient tout à la fois présents plusieurs niveaux géographiques et plusieurs ensembles de données associés aux différentes échelles...

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- PIRON M. (1990) - Structuration de l'information à plusieurs niveaux et analyse des données. Développement méthodologique et application aux données d'une enquête socio-urbaine à Ouagadougou (Burkina Faso) - thèse d'université, Paris VI, 226 p.
- COURET D. (1990) - Modes de différenciation de l'espace urbain. Traitement géographique des données sur le logement du recensement 1982 de Quito (Equateur)- thèse d'université, Rouen, 328 p.

L'EXPLOITATION CARTOGRAPHIQUE DES ENQUETES PAR SONDAGE

VAUGELADE J.

RESUME

Les enquêtes par sondage sont habituellement exploitées au niveau des strates, et les représentations cartographiques sont limitées à ce niveau. Une autre approche consiste à utiliser les valeurs locales pour extrapoler en construisant des plages de valeurs. Les exemples exposés sont pris dans l'enquête par sondage sur les migrations au Burkina exploitée par strate et par village. Ceci a permis au Géographe (J.Y. MARCHAL) de régionaliser les phénomènes d'une façon plus précise que la stratification initiale. On fait ainsi apparaître des phénomènes locaux ou des discontinuités qui ne respectent pas le découpage en strates et peuvent être utilisés pour la stratification des études ultérieures.

1 INTERET

L'intérêt des représentations cartographiques n'est plus à démontrer, outre le rôle d'illustration, la visualisation globale rend possible la mise en relation spatiales de phénomènes.

Une carte peut être représentée de deux façons :

- par les densités moyennes sur chaque zone,
- par les densités locales.

Le choix de la représentation dépend des données disponibles et de leur représentativité selon le niveau choisi, zone ou local.

Nous allons montrer comment ces deux approches peuvent être utilisées à partir d'une enquête par sondage, et étudier leur intérêt respectif.

2 L'EXTRAPOLATION DANS LES ENQUETES PAR SONDAGE

La plupart des enquêtes par sondage sont basées sur un sondage avec des unités aréolaires (localisées géographiquement). Ces unités sont le plus souvent des localités, cependant pour obtenir des grappes dont l'effectif ne soit pas trop variable, on peut soit considérer des parties de localité quand la localité est trop importante, soit un regroupement de localités géographiquement voisines en cas de petites localités.

Le sondage peut être à un seul degré, les localités tirées avec équiprobabilité sont alors enquêtées exhaustivement. Dans le sondage à deux degrés, les localités tirées ne sont alors enquêtées qu'en partie.

Dans ce cas, deux modes de tirages sont fréquemment utilisés :

- soit un tirage équiprobable des localités puis un tirage d'une fraction constante des unités du deuxième degré dans chaque localité,
- soit un tirage des localités avec des probabilités proportionnelles à la taille des localités et un tirage d'un nombre fixe d'unités du deuxième degré dans chaque localité.

Le premier degré est le tirage des localités, le deuxième degré le tirage des unités enquêtées (unités d'habitation, exploitations agricoles, individus,...) à l'intérieur des localités.

Le tirage de l'échantillon qu'il soit à un degré ou à plusieurs degrés est réalisé indépendamment dans chaque strate. La stratification a deux objectifs. Le premier est de "constituer des groupes homogènes à l'intérieur de cet univers avant d'y prélever l'échantillon afin d'amortir les fluctuations que le hasard peut apporter à sa composition. (THIONNET cité par DESABIE 1971). Plus précisément on découpe l'univers étudié en groupes homogènes appelés strates".

Le deuxième objectif, moins important est la nécessité d'avoir un découpage des strates qui puissent également être utilisées comme domaines d'études et de présentation des résultats.

En effet, les résultats ne peuvent être extrapolés qu'au niveau d'une strate ou d'un groupe de strates. Il est exclu qu'une partie de strate constitue un domaine d'études.

L'utilisation cartographique des résultats des enquêtes par sondage se limite souvent aux résultats par domaine d'études qui sont le plus souvent des domaines géographiques. De plus la nécessité de présenter les résultats au niveau des circonscriptions administratives conduit à utiliser un découpage en strates qui respecte ces circonscriptions. Cependant, si les informations

préalables le permettent les circonscriptions peuvent aussi être découpées en strates.

3 L'EXTRAPOLATION EN GEOGRAPHIE

En géographie, on ne peut se contenter de la représentation moyenne par domaine géographique qui peut cacher des disparités sous-régionales. Il faut donc changer d'échelle quant à la présentation des données et utiliser les données au niveau local.

A partir des valeurs localisées, l'extrapolation consiste à définir des zones correspondant à des plages de valeurs limitées par des isolignes. Cette représentation suppose pour être valide que le phénomène étudié ait une signification spatiale c'est-à-dire que la distribution spatiale des valeurs n'est pas due au seul hasard.

A partir d'une enquête par sondage il faut disposer des résultats au niveau local, les résultats locaux sont soit obtenus par enquête exhaustive dans le cas d'un sondage à un degré, soit extrapolés dans le cas d'un sondage à deux degrés.

4 UTILISATION GEOGRAPHIQUE DES RESULTATS D'UNE ENQUETE PAR SONDAJE

Une enquête par sondage réalisée en 1972-73 dans la zone mossi du Burkina a touché 98 localités rurales, c'est-à-dire des villages. Six strates géographiques basées sur le découpage administratif et un zonage ethnique avaient été déterminées. Ce découpage en six strates, pertinent a priori, a servi à la publication de tous les résultats.

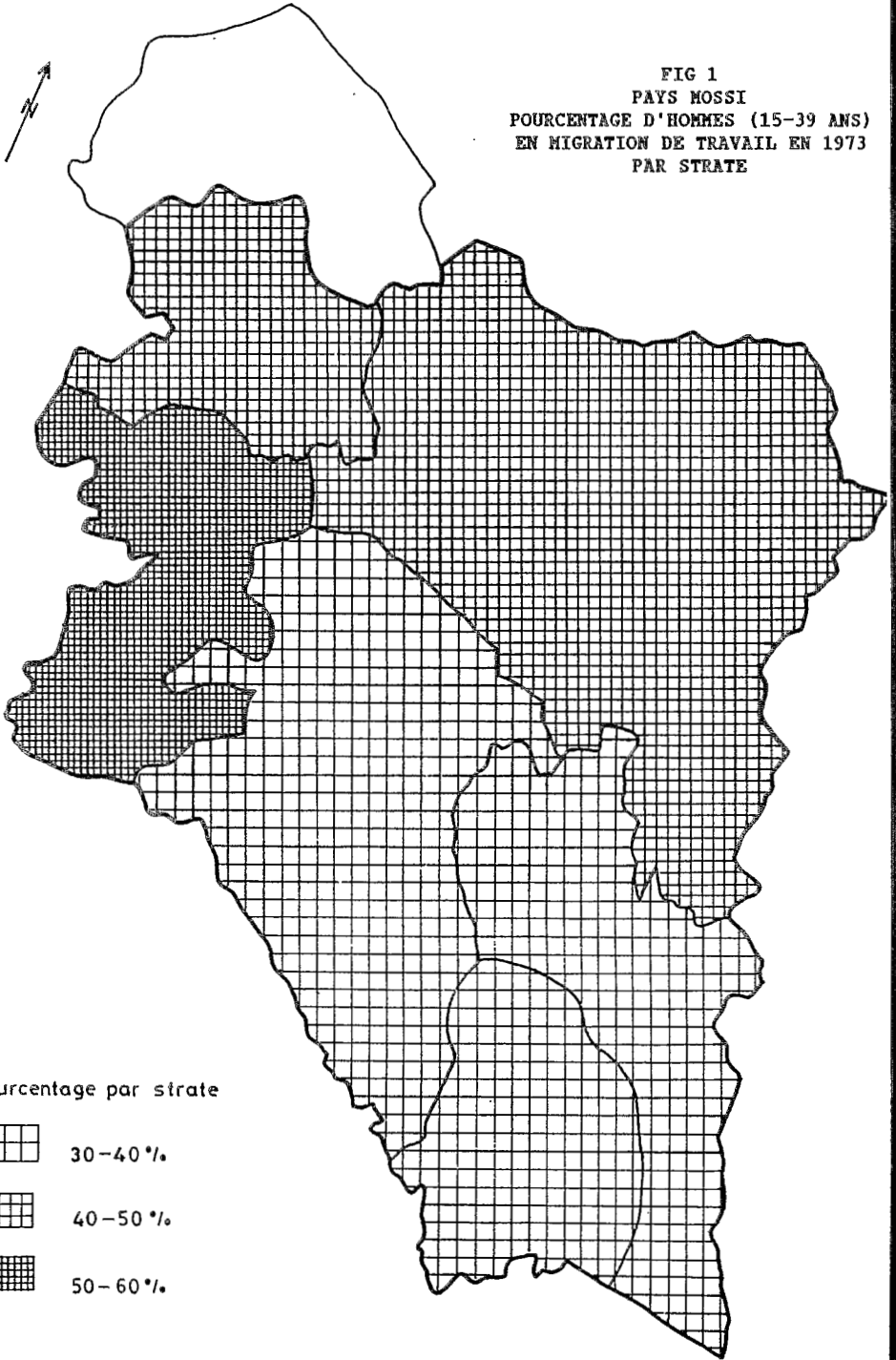
J.Y. MARCHAL (1975) a appelé notre attention sur l'intérêt d'une cartographie des résultats en utilisant les résultats au niveau des localités.

Le dépouillement réalisé et la cartographie des principaux phénomènes observés permettent d'affiner l'image dont les résultats au niveau des strates ne fournissent qu'une image grossière. L'effet obtenu est analogue à celui qui résulte de l'utilisation d'une loupe.

Un exemple (cartes 1 et 2) permet de mettre en évidence cet apport. Ainsi la strate "Kaya" comprend une zone proche du Yatenga qui a des forts taux de migration comme le Yatenga, et une zone qui a des taux de migration beaucoup plus faibles.

L'ensemble avec un taux de migration intermédiaire donne une image "moyenne" d'une région qui peut être utilement décomposée en deux zones différentes.

FIG 1
PAYS MOSSI
POURCENTAGE D'HOMMES (15-39 ANS)
EN MIGRATION DE TRAVAIL EN 1973
PAR STRATE



Pourcentage par strate



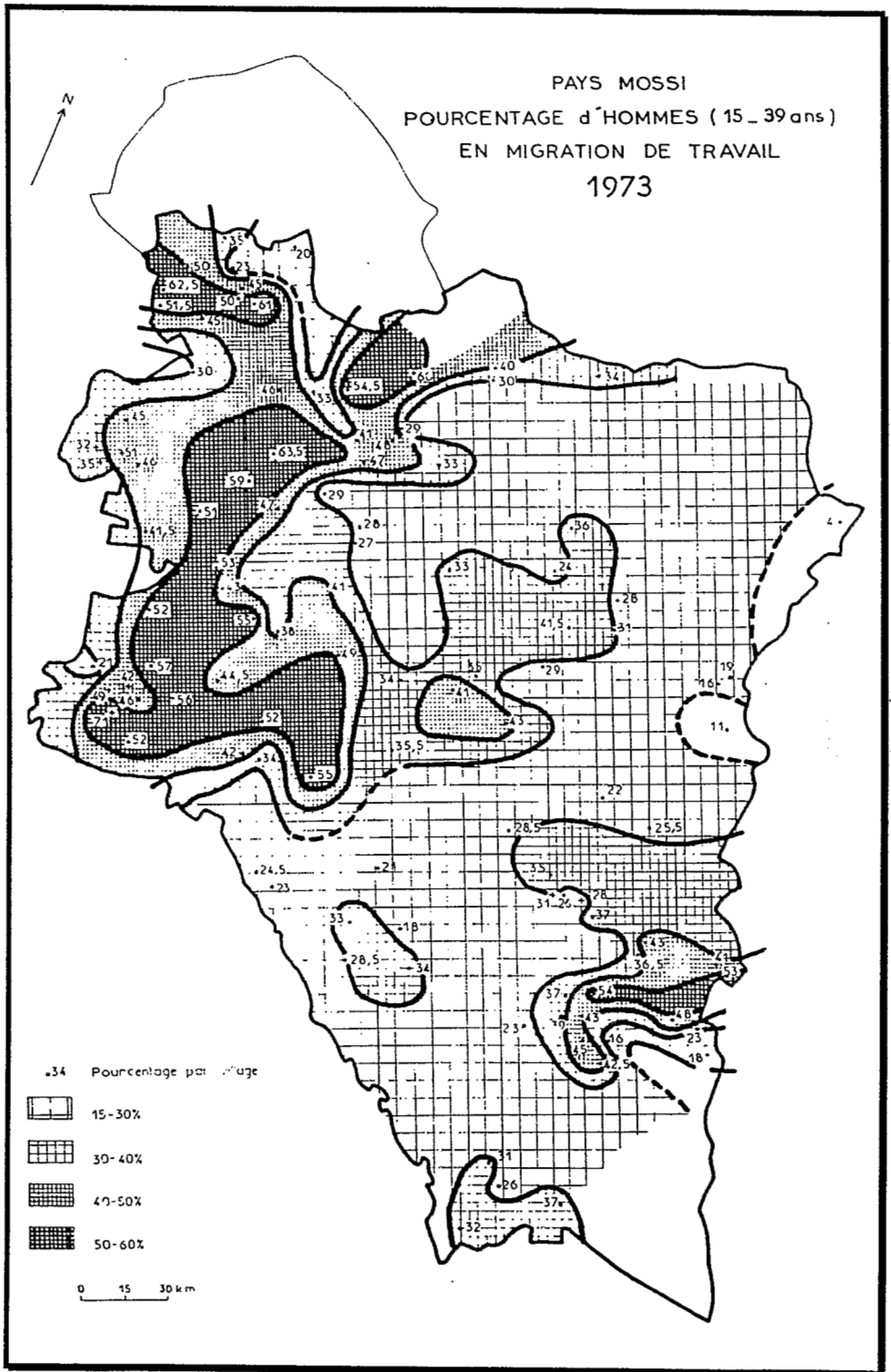
30-40 %



40-50 %



50-60 %



L'apport de l'exploitation par localités d'une enquête par sondage permet donc de confirmer ou d'infirmer la pertinence des strates définies à priori, avant obtention des résultats. Les strates peuvent ainsi être modifiées pour des études ultérieures, éventuellement pour une stratification à posteriori en recalculant de nouveaux coefficients de pondération.

L'examen des seuls résultats par strate n'aurait évidemment pas permis pas d'affiner le découpage en strates.

Un autre apport peut être d'articuler les résultats de l'enquête avec des résultats provenant d'autres sources. Le cadre géographique étant un référent commode pour comparer diverses variables.

CONCLUSION

L'extrapolation par strate des données issues d'une enquête par sondage est la seule façon d'obtenir des effectifs avec le maximum de précision au niveau des strates.

Les résultats par localités permettent un autre type d'extrapolation géographique à posteriori qui permet d'affiner l'analyse et de modifier pour une étude ultérieure le découpage de l'univers étudié en strates.

BIBLIOGRAPHIE

DESABIE J. (1971). - Théorie et pratique des sondages, Dunod. 483 p.

MARCHAL J.Y. (1975). - Géographie des aires d'émigration en pays Mossi. In "les migrations de travail Mossi" T.II, ORSTOM, Ouagadougou, fasc. 3 p. 29-71, 26 fig.

DEMOGRAPHIE ET SYSTEMES AGRAIRES UN EXEMPLE D'INFERENCE STATISTIQUE DANS UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

DELAUNAY D.

RESUME

Les Systèmes d'Information Géographique autorisent une analyse à géométrie variable des données territoriales. Le choix d'échelle y est à la discrétion de l'observateur qui dispose de couvertures géographiques diversifiées : statistiques administratives, usage du sol, climat, altitude... Car les capacités d'agrégation et de superposition des Systèmes d'Information Géographique autorisent de cheminer entre les différents niveaux d'une réalité complexe, d'extrapoler l'information d'une couverture à toutes les autres. L'outil est transdisciplinaire.

INTRODUCTION

Les Systèmes d'Information Géographique ont d'abord permis la cartographie automatique que l'étude, comme la communication, réclamaient sans délais. Une carte produite en quelques minutes autorise de rechercher les configurations spatiales d'une information diversifiée. La surprenante commodité de l'outil enrichit la cartographie statistique de nouvelles pratiques : représentation d'axes factoriels, de classifications hiérarchisées, mise en évidence des lieux qui s'écartent d'un modèle établi.

Avec le perfectionnement des "Systèmes de Gestion de Base de Donnée" (SGBD) et l'irrésistible perfectionnement du matériel informatique, il devient possible d'embrasser dans un même Système d'Information Géographique toute l'information relative à un espace donné. La précision et bien des problèmes d'échelle. Le cheminement entre les divers niveaux d'une réalité complexe enrichit les choix de l'observation qui se voient ouvrir des perspectives pluridisciplinaires : un pont statistique est lancé entre les sciences sociales et celles de la terre. L'application ici présentée est un transfert d'échelle qui tire avantage des capacités d'agrégation et de superposition offertes par les Systèmes d'Information

Géographique, des fonctions plus rarement employées que la cartographie automatisée.

En Equateur, une étude minutieuse de la transition démographique¹ m'avait convaincu d'en poursuivre l'analyse dans le contexte des paysages agraires et du milieu naturel. Une telle curiosité m'obligeait à mettre en relation deux ensembles de phénomènes aux échelles différentes. Il me fallait donc concevoir une méthode pour extrapoler l'information démographique donnée par division administrative vers un nouvel espace qui ne la contenait pas, celui des systèmes agraires. Le transfert d'échelle supposait une localisation précise -monographique- des données censitaires, vitales et agraires qui fut obtenue par traitement infographique grâce au logiciel Savane² développé par l'Orstom sur station Sun. Le procédé élémentaire employé démontre qu'il est possible de compléter un inventaire par tous les autres et donc d'ouvrir le champ de nos études et de notre réflexion. L'outil et le procédé libèrent l'information prisonnière de cartographies ou de disciplines compartimentées.

TRANSFERT D'ECHELLE : L'EQUATEUR

L'hypothèse de travail concernait la configuration spatiale de la transition démographique : se conformait-elle à l'espace agricole, aux formes sociales et techniques de la production agricole ? La difficulté était de fonder l'analyse sur une base statistique ; en effet, l'information censitaire et les registres de l'état civil étaient détaillés selon un découpage administratif (les paroisses) étranger au phénomène étudié. Or il serait fondamentalement contestable de déduire de la division paroissiale des résultats concernant, par exemple, l'usage du sol. Ce "sophisme écologique" est reconnu, les relations mesurées sont modifiées quand le découpage spatial ou l'échelle changent. Pour examiner la transition démographique, il convenait de se régler sur l'échelle de la géographie naturelle et agricole, plus pertinente que la division administrative.

Un autre inventaire, celui des ressources renouvelables en Equateur³, témoignait de l'utilisation du sol et des paysages

1 Transition, ou explosion, démographique qui, ces dernières décennies dans les pays peu industrialisés, résulte de la baisse de la mortalité. Elle se traduit par une croissance inhabituelle des populations, jusqu'à ce qu'elles ajustent leur fécondité aux nouvelles forces vitales. La notion de transition démographique désigne surtout la théorie qui cherche à expliquer ces bouleversements et comprendre les nécessaires adaptations des familles et des peuples à cette révolution démo-économique.

2 Les fonctions employées pour adapter les échelles d'observation sont décrites par leur auteur (Marc Souris) dans une communication au présent séminaire.

3 Un inventaire réalisé par des chercheurs de l'ORSTOM (GONDARD, 1983-1985, Mapas de uso actual del suelo y formaciones vegetales. Quito, MAG/ORSTOM, 10 feuilles en couleur (1/200 000^e), 85x60 cm. WINCKELL (A.) & ZEBROWSKI (C.) -1977-1986- Cartes morpho-pédologiques, d'utilisation actuelle et des paysages végétaux, d'utilisation potentielle. 14 x 3 cartes MAG/ORSTOM. Quito, 1977-1986). Le travail a été réalisé en coopération avec le MAG, ministère équatorien de l'agriculture et de l'élevage. Ces chercheurs sont les auteurs de la carte d'utilisation du sol intégrée.

agraires. Les formes sociales de la production étaient même susceptibles d'être déduites de cette géographie : les cultures vivrières signalaient l'espace agraire de la production familiale, l'aire de son extension... De même que les haciendas andines, qui employaient une main-d'oeuvre salariée, se reconnaissaient à leur spécialisation pastorale ou à la taille des parcelles. Les plantations industrielles se démarquaient par leur production (banane, palme africaine...), on sait que l'arboriculture paysanne (café, cacao) est destinée au marché, de même que le produit du maraîchage ou des vergers.

Les deux cartographies, démographique et agraire, présentaient des similitudes structurelles qu'il convenait d'apprécier. Fut d'abord expérimenté le montage manuel des secteurs censitaires pour quelques regroupements d'usage du sol. La tâche s'avéra démesurée, la finesse des contours et la masse de l'information, une trentaine de variables pour 850 paroisses et près de 1200 zones d'usage du sol, imposaient une gestion infographique.

C'est moins la cartographie automatique qui ici était requise que la superposition chiffrée de géographies différentes : chaque système agraire composait une fenêtre au travers de laquelle il était instructif d'observer l'espace démographique cartographié selon la division administrative.

Le changement d'échelle est primordial pour une analyse multivariée conçue pour déceler l'impact des systèmes agraires, afin d'écarter le biais contenu dans le découpage administratif. Furent menées autant d'analyses factorielles que de systèmes agraires sélectionnés, sur la base des unités élémentaires obtenues par superposition de la géographie administrative et agraire (cf. infra). De sorte qu'une corrélation entre la mortalité et la fécondité, par exemple, n'est donnée et ne vaut que pour l'espace agraire examiné, telle la production vivrière indigène. Il sembla instructif de tirer leçon de l'agencement des variables dans chacun d'eux, d'en étudier les variations.

LA METHODE

L'inférence des données censitaires d'une échelle à l'autre requiert deux procédures propres aux Systèmes d'Information Géographique : l'agrégation et la superposition géométriques. Dans le cas particulier de l'Equateur, trois cartographies furent appliquées.

AGREGATION ET SUPERPOSITION

Un Système d'Information Géographique opère l'agrégation des objets spatiaux sur des critères de voisinage (d'un lieu, d'un réseau) ou sur une même valeur d'attribut. L'échelle pertinente de chaque phénomène examiné peut ainsi être recherchée. Le démographe, par

exemple, retiendra les unités spatiales où l'inertie des grands nombres rend possible une interprétation libérée du hasard¹. L'économiste choisira un pôle de développement, l'hydrologue un bassin versant.

La superposition offre de puissantes perspectives à l'observation trans-disciplinaire. Plusieurs ensembles d'objets spatiaux, soit des géographies différentes (le climat, la pédologie, une division administrative), peuvent être superposés de manière à obtenir une partition plus fine qui va réunir toutes les informations (les attributs dans une base de données) de chaque couverture de départ. Ces nouvelles unités, plus fidèles et plus fines qu'un classique carroyage, s'offrent alors à l'observation ou à l'analyse des données.

LES CARTOGRAPHIES

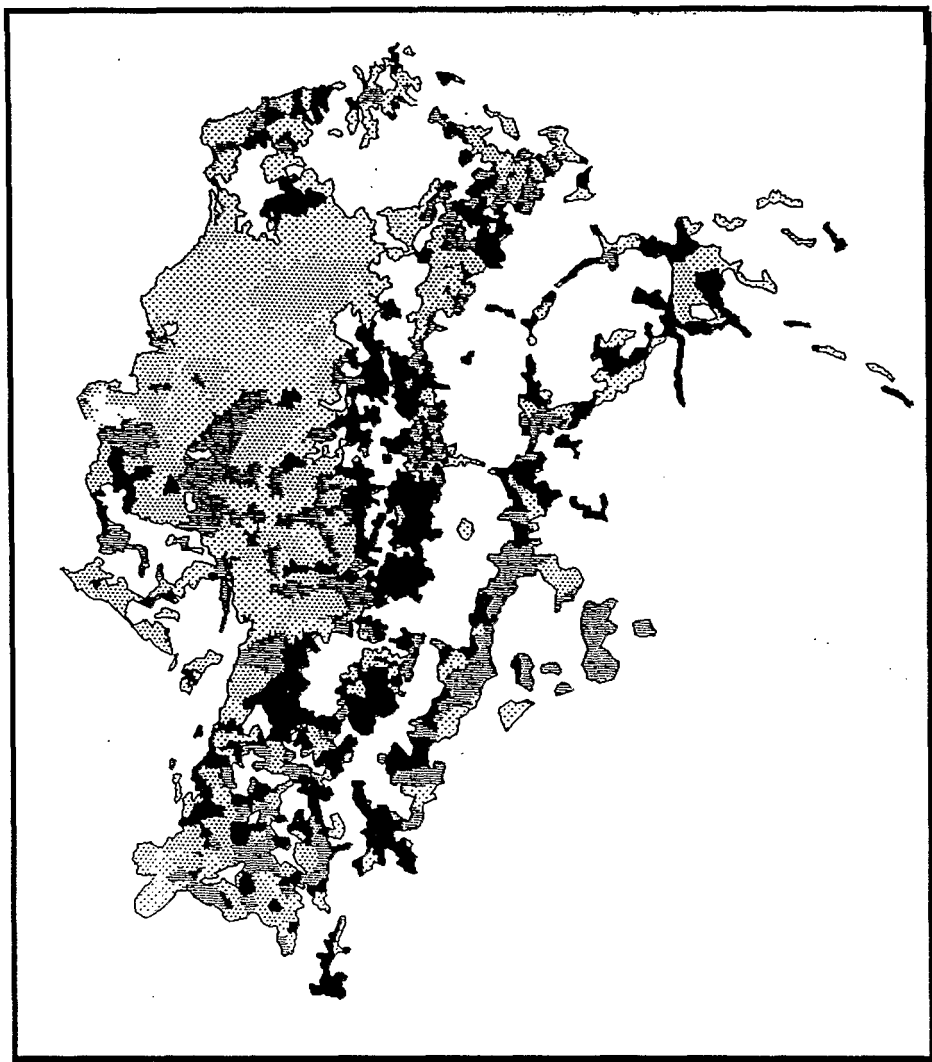
La géographie de base était démographique (carte n°1): une caractérisation des populations rurales des 850 paroisses du pays en une trentaine d'attributs rendant compte de la mortalité, de la fécondité, des migrations, de l'état matrimonial,... sur trois décennies.

La seconde cartographie délimitait les paysages agraires et distinguait plus de 1200 zones selon l'usage agricole du sol, la pente, la taille des parcelles, la présence ou non d'irrigation. Elle était, cela est important, d'une précision comparable à celle du découpage paroissial. Une illustration est présentée pour l'espace des cultures indigènes andines (carte n°2)

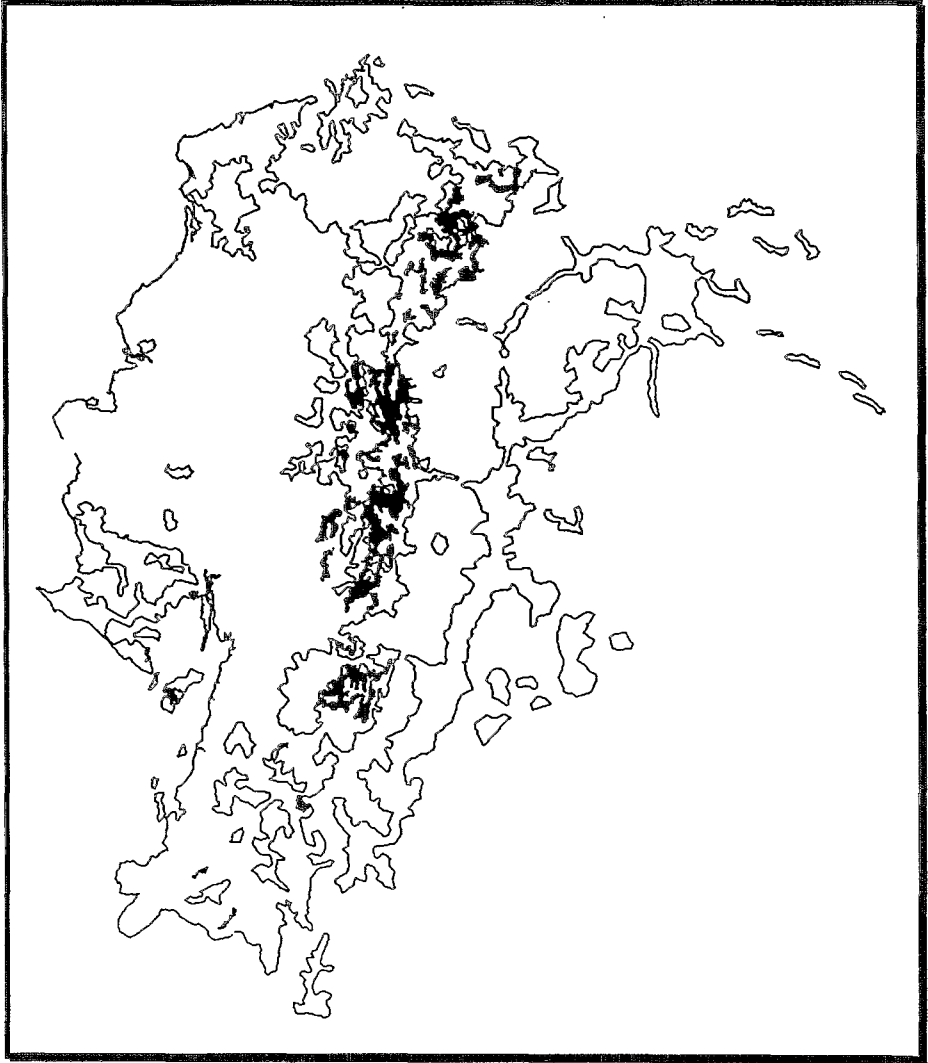
La troisième carte² restitue, en 25 000 points la précise localisation des populations dispersées ; en fait rurales.

1 Cette condition n'est pas remplie pour toutes les paroisses équatoriennes. Certaines trop petites, ou situées en zones de faible peuplement, connaissent un nombre erratique d'événements démographiques. Mais la finesse du découpage paroissial était indispensable pour approcher les divisions de l'espace naturel, il ne convenait donc pas de passer à la division cantonale. Pour minimiser le facteur aléatoire, nous avons systématiquement préféré des indicateurs structurels, mettant en rapport des sous-ensembles comparables de la population. Ainsi le rapport femmes-enfants résiste-t-il mieux au hasard de la procréation que le taux de natalité (mais il amalgame plusieurs phénomènes, dont la mortalité juvénile).

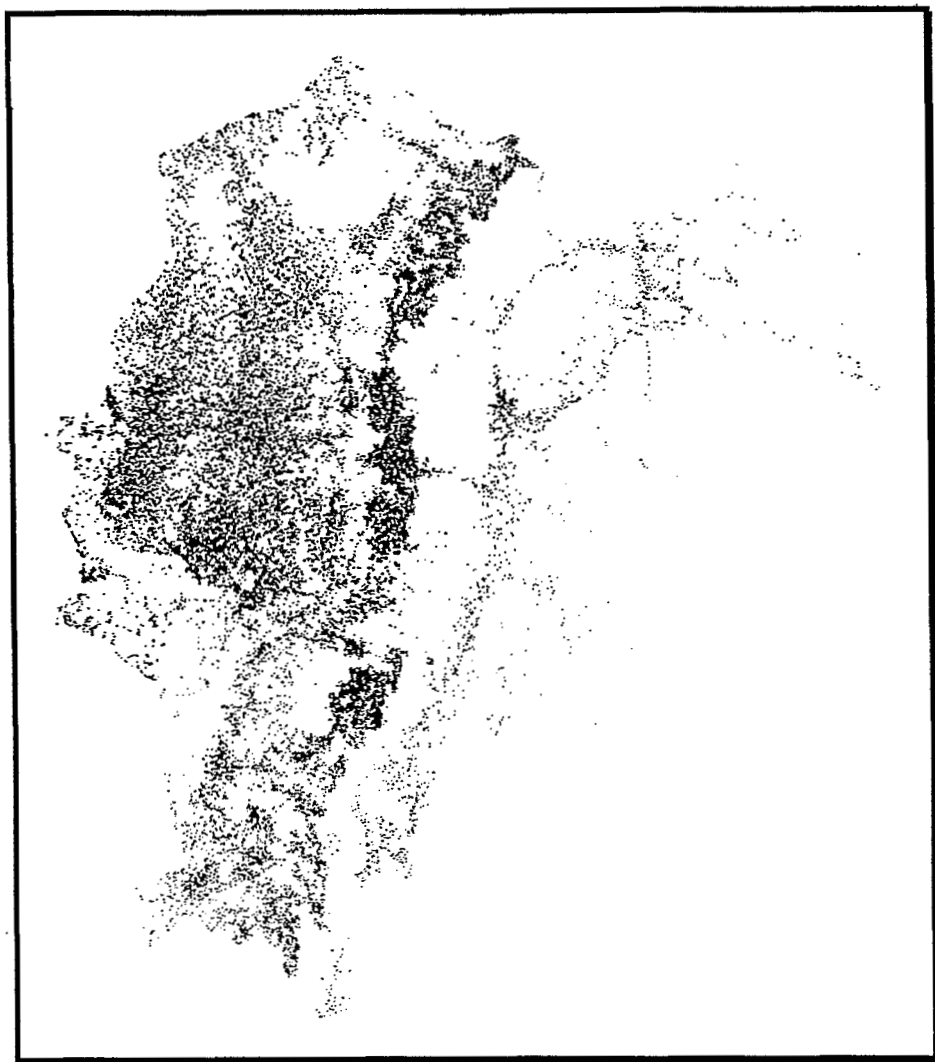
2 Cette carte diffère de celle établie au Cedig (CARRERA et PORTAIS, Documentos de Investigación n°3, Cedig/Orstom, Quito) où étaient écartées les populations résidant dans un chef-lieu de paroisse à vocation agricole.



Carte n°1 Un attribut démographique dans l'espace habité:
la mortalité en 1985



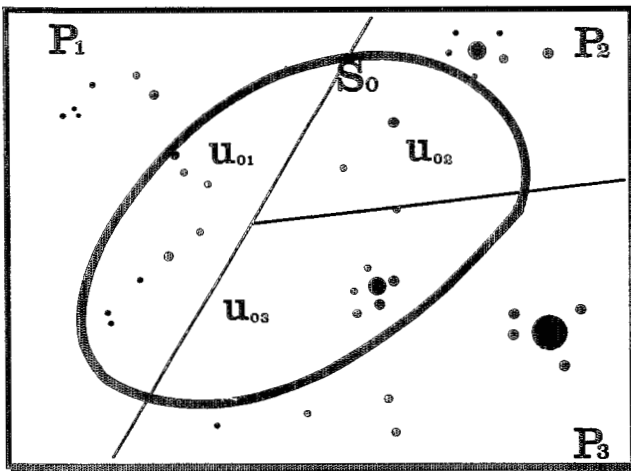
Carte n°2 L'espace des cultures indigènes andines



Carte n°3 La population rurale équatorienne

LE CHANGEMENT D'ECHELLE

Le graphique n°1 schématise la méthode d'inférence utilisée. Les unités P_1 de la première couverture, ici les paroisses P_1, P_2, P_3 , sont combinées avec un autre espace, les systèmes agraires S_j , dont nous retenons l'un d'eux S_0 . La superposition des deux délimitations découpe (n) unités spatiales élémentaires dont trois ici nous intéressent : U_{01}, U_{02}, U_{03} . Dans la cartographie équatorienne, du croisement des divisions administrative et agraire, il résulte environ quatre mille polygones, soit une mosaïque de populations dont on décrit tant la démographie que l'usage du sol.



Graphique n° 1 L'extrapolation de la composante démographique des systèmes agraire.

Pour chacune de ces unités élémentaires, la population est agrégée sur la base de la carte par point de la population dispersée. Dans le graphique n°1, le peuplement est représenté par des points de taille que l'on représente proportionnelle à la population fictive. Il est important de tenir compte de la précise localisation des populations car l'on ne peut miser sur l'homogène distribution des phénomènes démographiques dans l'espace. Les regroupements des polygones élémentaires appartenant à un même système agraire sont alors opérés (l'ensemble des U_{0i}). Les indicateurs démographiques sont alors estimés par agrégation quand il s'agit d'effectifs, par pondération pour les taux. Il est évidemment nécessaire d'attribuer le poids des effectifs introduits au dénominateur du taux afin de reconstituer la population de référence du nouvel espace. Un rapport de masculinité¹ sera pondéré selon la population féminine, un indice de fécondité par l'effectif par âge des femmes en âge de procréer... Quand cette information n'est pas disponible, il faudra se

¹ Nombre d'hommes pour cent femmes.

contenter d'une mesure approchée, telle la population totale qui, hélas, biaise légèrement l'extrapolation des indicateurs.

Le calcul pour tous les attributs des quatre mille zones, les tests statistiques correspondants, furent exécutés à l'aide de la bibliothèque statistique SAS, en interface avec Savane. Le vrai travail d'analyse pouvait commencer puisqu'il était donné de comparer les densités, la fécondité et la migration des populations qui cultivent le maïs et de celles qui se dédient aux cultures froides (orge, pomme-de-terre), de suivre la dynamique migratoire des fronts pionniers, de rechercher l'influence de l'altitude dans la mortalité...

PROMESSES ET RIGUEURS

La transposition des statistiques démo-économiques à des espaces redéfinis par l'utilisateur constitue un procédé précieux pour une reconnaissance géographique alors affranchie des biais imposés par des échelles inadéquates. La qualité de l'inférence dépend évidemment de la finesse des découpages ; si cette précision est obtenue, l'extrapolation vaudra bien les mesures d'une enquête non exhaustive.

Et la précision requise pour l'observation d'une réalité complexe, sur la base de couvertures diverses, oblige à une vigilance assidue de la qualité des fonds cartographiques et des données, de leur cohérence. Ce minutieux travail de contrôle et de correction de l'information est une discipline fructueuse des Systèmes d'Information Géographique qui exigent cette rigueur tout en facilitant les révisions.

**APPROCHE GEOGRAPHIQUE
DE L'ESPACE**

VERS UN LANGAGE DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

JEANSOULIN R.¹

ABSTRACT

Pour l'expression et la modélisation des phénomènes spatiaux, on gagnerait beaucoup à n'avoir qu'un seul ensemble d'opérateurs pour les données spatialisées, et par suite un seul langage. En particulier, on oppose souvent les modes «vecteur» et «raster» lorsqu'on utilise à la fois des images et de tracés. De même, on ne voit guère d'analogie possible entre un SGBD et un système de traitement d'image. Nous étudions dans cet exposé l'apport de l'approche "Orientée Objet" dans la représentation et la manipulation de données spatiales multisources. En particulier, on montre l'équivalence des notions d'objet spatial, de variable spatiale échantillonnée et de table relationnelle spatiale. On termine avec l'utilisation d'un "SQL-topologique" comme langage de requêtes spatialisées.

1 MODELES DE DONNEES

1.1 Diversité des représentations

On parle d'information spatiale si une information de nature alphanumérique est localisée dans l'espace. C'est le couple (contenu, région). Il y a au moins trois approches simples de modélisation de ce couple d'information:

1.1.1 L'approche objet

L'objet spatial est pris comme un tout. Pour les objets naturels, le contenu définit le contenant: par exemple une forêt définit ses propres limites. Pour les objets culturels, le contenu est recueilli

¹L.R.P. - tour 66 - Jussieu - 75252 PARIS cedex 05 - France - tel: 43.54.69.73 fax: 43.54.71.70- mail: jeansoul@inria.inria.fr

dans des limites artificielles: par exemple la population est compté à l'intérieur des frontières d'un pays.

La représentation "orientée objet" est caractérisée par: l'association d'une structure de données complexe à une identité unique d'objet, méthodes opératoires attachées à cet objet, les propriétés d'héritage et de surcharge entre les méthodes d'objets dérivés les uns des autres par spécialisation de leur structure.

Notation:

$$O_{id} \stackrel{def}{=} [a,r],$$

avec $a \in A_{id}$ (contenu), $r \in R$ (contenant), $id \in ID$ (index). R est l'ensemble des parties de R^2 voir 2.2.

Nommons "carte-objet" un ensemble de tels objets:

$$M_{obj} \stackrel{def}{=} \{ O_{id} \mid id \in ID \}$$

Notons que R étant obligatoire, on peut dire que A_{id} est le type de O_{id} . Bien sur, plusieurs O_{id} peuvent avoir le même type A_{id} . Si dans une même "carte-objet" ces types sont tous égaux à A , on dit que cet ensemble est homogène sur A et on le note $M_{obj}(A)$.

1.1.2 L'approche relationnelle

C'est une approche collectiviste alors que la précédente était individualiste. Au sens ensembliste une relation est une partie du produit cartésien $A \times R$ (contenu \times contenant). De nouveau, à cause du caractère obligatoire de R , le type A détermine complètement la relation, c'est son schéma.

Nommons "carte-relation" une telle relation, avec son extension, c'est à dire l'ensemble des tuples qui lui appartiennent:

$$M_{rel}(A) \stackrel{def}{=} \{ [a,r], a \in A, r \in R \}$$

Dans ce cas les tuples ne sont pas individualisés, mais on peut les sélectionner par leur contenu.

1.1.3 L'approche analytique

Considérons maintenant l'information spatiale non plus comme un couple, mais comme une propriété de l'espace. On peut alors la représenter par une fonction analytique: $f_A : \mathbb{R}^2 \rightarrow A$

Nommons "carte-analytique" sur le domaine A la connaissance d'une telle fonction analytique:

$$M_{ana}(A) \stackrel{def}{=} f_A$$

Trois remarques:

-c'est une définition extensive de l'information spatiale:

$$\forall (x,y) \in \mathbb{R}^2, \exists a \in A, f_A(x,y) = a$$

- les contenants (régions) sont implicites:

$$\forall a \in A, r = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, f_A(x,y) = a\}, r \in \mathcal{R}$$

- sur l'espace continu \mathbb{R}^2 , il faut restreindre tout "signal" f_A à une bande passante finie, par définition (ex.: on ne compte pas la population par mètre carré), ou par échantillonnage (ex.: modèle numérique de terrain). De même, le domaine d'un type A quelconque doit être fini.

1.2 Démonstration de l'équivalence des approches

Essayons de trouver les conditions de l'équivalence de ces trois approches, et les moyens de passer de l'une à l'autre:

1. de l'objet à la relation:

une "carte-relation" est un ensemble d'objets du même type, ce qui est la définition d'une "carte-objet" homogène sur A:

$$if(\forall id \in ID, A_{id} = A)$$

$$then M_{rel}(A) = \{O_{id}, id \in ID \text{ and } O_{id}.a \in A\} = M_{obj}(A)$$

2. de la relation à l'objet:

un objet est un tuple identifié d'une "carte-relation", l'identifiant unique pouvant être: $id = (M, n)$, avec $M =$ nom de la relation, et $n =$ numéro de séquence du tuple, sous l'hypothèse que ces numéros ne changeront plus (pas de tri sur la relation), sinon il faut introduire explicitement ce numéro dans le schéma: $AxIDxR$:

if $M_{rel}(A) = \{[a, id, r]\}$ *then* $O_{id} = [a, r]$ (*id unique*)

3. de l'objet ou de la relation à la fonction analytique:

supposons que pour une $M_{rel}(A)$ ou une $M_{obj}(A)$ homogène, deux régions soient toujours disjointes. En d'autres termes, un point (x, y) de l'espace appartient au plus à un seul objet de type A. On peut parler de non-ubiquité vis à vis du type A. Dans le jargon relationnel on parle de dépendance fonctionnelle de la région sur son contenu. Avec cette contrainte, plus l'existence d'une valeur nulle (par défaut $a = \text{null}$), on peut construire une fonction constante par morceaux f_A à partir de $M_{rel}(A)$:

$\forall (x, y) \in R^2$, *if* $\exists (a, r) \in AxR, [a, r] \in M_{rel}(A)$ *then* $f_A(x, y) = a$

else $f_A(x, y) = \text{null}$

4. de la fonction analytique échantillonnée à l'objet ou relation:

dans le cas échantillonné il est toujours possible, bien que fastidieux, de calculer les régions:

$r(a) = \{(x, y) \in R^2, f_A(x, y) = a\}, \forall a \in A$ ($a \neq \text{null}$)

Dans le pire des cas, $r(a)$ est réduit à un intervalle d'échantillonnage de R^2 . Alors:

$M_{rel}(A) = \{[a, r(a)]\}$

Heureusement, pour de nombreuses opérations (voir 2.2), le calcul explicite des régions est inutile.

1.3 Information spatiale bien conditionnée

Nous parlerons d'information spatiale bien conditionnée, ou tout simplement de carte, si les équivalences ci-dessus peuvent être appliquées, c'est à dire si les hypothèses suivantes sont vérifiées:

unicité: une carte $M(A)$ est définie par un domaine unique A , que ce soit son type, son schéma ou le domaine de définition de sa fonction.

non ubiçuité: un point (x, y) de l'espace ne peut prendre deux valeurs différentes sur un même domaine A , ou encore, ne peut appartenir à deux tuples d'une même carte $M(A)$.

- Exemples:

relation "plan d'occupation du sol" de la BD carto de l'IGN:

POS=[num.parcelle, code landuse, région].

relation "communications terre et air de la BDcarto de l'IGN:

CTA = [num. tronçon, largeur, code fonction, revêtement,
région]

relation "image multispectrale XS" de Spot Image:

SPOTXS = [green, red, nearir, région].

2 OUTILS ALGEBRIQUES POUR UN LANGAGE SPATIAL

2.1 Les cartes algébriques

Considérons l'ensemble des cartes:

$$M = \{M(A) = M_{obj}(A) = M_{rel}(A) = M_{ana}(A), A \in \mathcal{R}\}$$

et cherchons à construire un langage logique pour les mots de M . Un moyen rudimentaire, mais non ambigu, d'y parvenir, est de construire une algèbre et d'appeler phrase toute expression algébrique.

La forme relationnelle de $M(A)$ nous fait penser aux cinq opérations de l'algèbre relationnelle: union, différence, produit cartésien, sélection, projection.

Des travaux précédents ([Scholl 89],[Jeansoulin 89c]) ont montré comment redéfinir la sémantique de ces opérations pour former une vraie algèbre de M.

Nous rappelons ici la définition des opérations du sous ensemble sélection, projection, jointure, qui est à la base de toute émulation du langage SQL:

$$\mathbf{M-sélection:} \sigma_{A_k=a_k \text{ and } R\theta r}^{(M(A))} = r\sigma_{\Phi(R\theta r)}^{(R\sigma_{A_k=a_k}^{(M(A))})}$$

$$\mathbf{M-projection :} \pi_{A_k}^{(M(A))} = M(A_k)$$

$$\mathbf{M-jointure:} (M(A)) \otimes_{\theta}^{(M(B))} = \sigma_{\Phi(R_{M(A)}\theta R_{M(B)})}^{(M(A \times B))}$$

Notes complémentaires:

- soit $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$
- l'opérateur $r\sigma()$ est la sélection relationnelle,
- le prédicat $\Phi(R) \stackrel{\text{def}}{=} (R \neq \emptyset)$
- l'opérateur générique θ est décrit ci-dessous. Par la suite nous noterons souvent A au lieu de M(A).

2.2 Opérations sur les régions

Toute opération de l'algèbre topologique s'applique sur:

$R = P(R^2)$ (ensemble des parties de R^2):

\cup (union), \cap (intersection), $or-$ (différence).

mais il est nécessaire d'indiquer si on les applique aux ouverts (notés O(r)) ou aux bordures (notées B(r)). C'est en fonction de la sémantique des cartes impliquées dans la M-opération, que l'on peut choisir, au niveau région le bon prédicat à vérifier, à l'intérieur du "minimal set of mutually excluding topological relationships" (d'après [Egenhofer 89]):

disjoint, meet, overlap, inside, contains, covers, coveredby, equal.

Alors, l'opérateur générique O sera l'un de ces trois:

$$r_1 \theta_{oo} r_2 = O(r_1) \cap O(r_2)$$

$$r_1 \theta_{bb} r_2 = B(r_1) \cap B(r_2)$$

$$r_1 \theta_{ob} r_2 = O(r_1) \cap B(r_2)$$

Attention: le dernier est non commutatif.

Types de régions:

Jusqu'à présent nous n'avons pas défini en détail la nature des régions. Il peut s'agir de: zones, lignes ou points. Ce niveau de détail n'était pas nécessaire pour la construction de l'algèbre des cartes, et le formalisme est resté plus général. Seule la sémantique des cartes doit être en rapport avec la nature des régions, pas le modèle de données.

Exemple: pour les cartes présentées en 1.3:

relation POS: région= zone,

relation CTA: région= ligne,

relation SPOTXS: région= rang du pixel qui est une zone.

2.3 Opérations sur les cartes (les 5A)

La question est maintenant de savoir si les M-opérations de l'algèbre des cartes permettent une décomposition de toute requête d'un utilisateur sur un ensemble de cartes. Des travaux précédents ([Dueker 87],[Jeansoulin 89b]) ont permis de classer les requêtes possibles dans le groupe des 5A: Acquisition, Archivage, Accès, Analyse et Affichage.

3 REALISATION

3.1 Acquisition et archivage

Ces deux opérations ne relèvent pas directement du langage de manipulation des données. D'importants travaux les concernent, qui convergent aujourd'hui vers un modèle de données topologique appelé DIGEST [CNIG 90]. Ce modèle comporte essentiellement trois couches:

faces: ouverts de \mathbb{R}^2 à 2 dimensions,

arcs: ouverts de \mathbb{R}^2 à 1 dimension, ou bordures de faces,

noeuds: extrémités d'arcs ou points isolés.

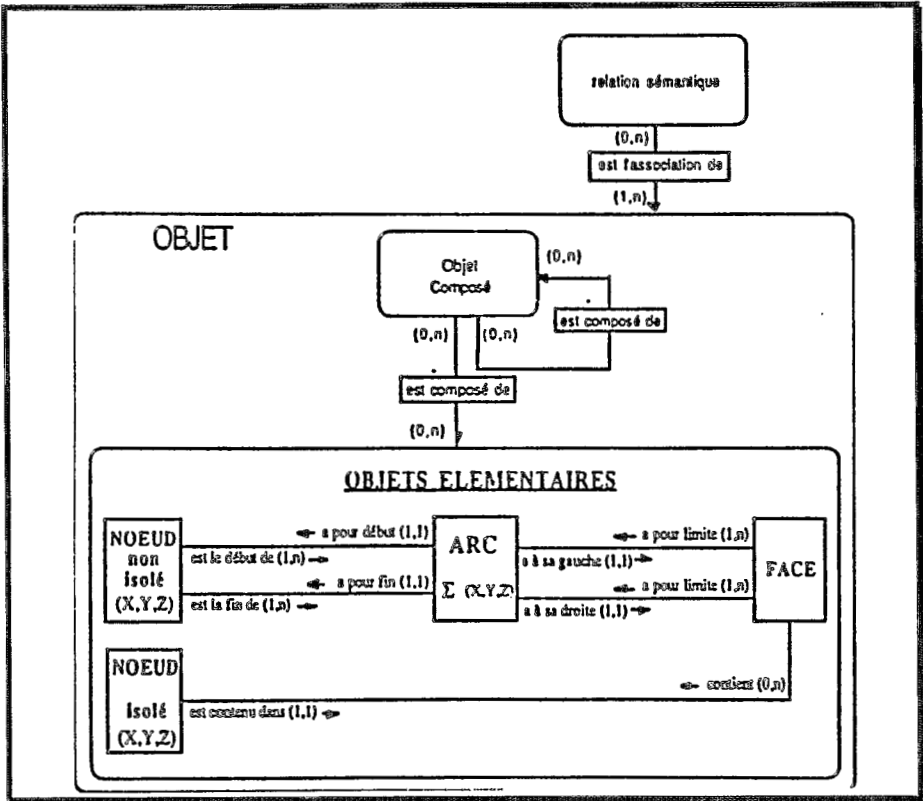


Figure 1: Modèle Conceptuel de DIGEST.

Toute face ayant une bordure, la définition topologique des données est complète si on a les arcs et les relations de contiguïté des arcs constituant la bordure d'une même face. Les noeuds peuvent être des arcs de longueur nulle.

Ce modèle est celui de la BDcarto de l'IGN dont nous voyons un extrait en illustration des possibilités de ce langage (dernière page).

3.2 Accès

Les modèles de données choisis étant algébriques, le seul problème pour cette opération est celui de la performance. Pour fixer les idées (de grandeur), reprenons l'exemple de la BDcarto. L'équivalent

numérique d'une feuille au 1/50000ème comporte environ: 100000 points, 10000 arcs, 2000 faces.

Les deux moyens d'améliorer les performances sont: l'utilisations d'index 2D (R-trees ou assimilés), et la pré-compilation des relations dérivées (par exemple avoir la bordure externe comme un seul arc). Nous ne détaillons pas ces problèmes dans ce papier.

3.3 Analyse

C'est ici que nous attendons le principal bénéfice de la construction de la M-algèbre. Illustrons-le sur certaines requêtes typiques:

3.3.1 Jointure d'intersection

Utilise la M-jointure avec $\theta_{oo} = O() \cap O()$:

$$(M(A)) \overset{cross}{\otimes} (M(B)) = \sigma_{\Phi(O(R_{M(A)}) \cap O(R_{M(B)}))} (M(A \times B))$$

produit la carte des zones communes (non vides) entre les objets de A et ceux de B, i.e.: régions où les deux informations sont connues.

exemple 3.3.1:

$$A = \sigma_{landuse = urban \ || \ periurban(POS)'}$$

$$B = CTA,$$

$$M_{voieurbaine} = (A) \overset{cross}{\otimes} (B)$$

produit la carte des tronçons qui traversent des zones urbaines ou péri-urbaines.

Traduction SQL:

```
Select B.* From A, B
```

```
Where (A.landuse = urban||periurban) and (A.r  $\theta_{oo}$  B.r)
```

3.3.2 Jointure d'adjacence

Utilise la M-jointure avec $\theta_{bb} = B0 \cap B0$

$$(M(A)) \overset{\text{border}}{\otimes} (M(B)) = \sigma_{\Phi(B(R_{M(A)}) \cap B(R_{M(B)}))} (M(A \times B))$$

aproduit la carte des frontières (éventuelles) entre les objets de A et ceux de B, associant les informations de part et d'autre.

exemple 3.3.2:

$$A = \sigma_{\text{landuse} = \text{urban or perturban(POS)'}}$$

$$B = \sigma_{\text{landuse} = \text{forest(POS)'}}$$

$$M_{\text{adj}} = (A \text{ border } B) :$$

zones forestières cotoyant l'urbain

Traduction SQL:

```
Select A.*, B.* From A, B
```

```
Where (A.landuse = urban) and (B.landuse = forest) and (A.r  $\theta_{bb}$  B.r)
```

3.3.3 Traitement d'image

Toute image numérique est une carte dans l'approche analytique (voir 1.1.3), c'est à dire M_{ana} (A). De nombreux traitements d'image peuvent être ré-écrits dans le langage des M-operations:

exemple 3.3.3(a): extraction de classes radiométriques:

$$M_{\text{eau}} = \sigma_{\text{nearir} \leq 40} (\text{SPOTXS})$$

classe de réflectance de l'eau (proche infrarouge faible).

```
Select * From SPOTXS Where (nearir ≤ 40)
```


exemple 3.3.3(b): détection de contour:

$$M_{rive} = M_{eau} \otimes^{border} (\sigma_{nearir} \leq 40^{(SPOTXS)})$$

donne la limite entre l'eau et le reste (les rives).

Select milieu(r1, r2) From SPOTXS, SPOTXS

Where (nearir₁ ≤ 40) and (nearir₂ > 40) and (A.r₁ θ_{bb} B.r₂)

r₁ donne le rang du pixel, et l'opérateur θ_{bb} doit indiquer si les deux rangs sont adjacents: abs(r₁ - r₂) = 1.

3.4 Affichage

Cette opération est triviale dans les bases de données alphanumériques. Par contre elle est cruciale en cartographie et compliquée du fait: des deux dimensions: le support d'affichage sert alors d'espace de projection (attention aux transformations de coordonnées, apr exemple le zoom), de la couleur: qui est presque toujours préférée à l'affichage textuel des valeurs. Se pose alors le problème de l'affectation des couleurs. Nous proposons la réponse suivante:

Histogramme Généralisé: dans le cas où la carte est une image, l'utilisation de l'histogramme pour le choix des couleurs d'affichage est bien connu (linéarisation, égalisation, seuillage ...). Il suffit donc de construire un histogramme quel que soit le type de la carte. Pour un attribut donné du schéma, on calcule le domaine de variation, puis on normalise ce domaine sur un intervalle fixé, par exemple [0, 255] afin d'avoir toujours le même genre d'histogramme à traiter. On affecte enfin les valeurs aux couleurs par table de codage, au moment de l'affichage: par exemple, on notera SPOTXS.nearir l'affichage des pixels de SPOTXS avec calcul de l'histogramme sur nearir pour la couleur, et CTA.largeur l'affichage des lignes de CTA avec calcul sur largeur pour l'épaisseur.

REFERENCES

- [Dueker 87] K.J.Dueker: Geographic Information Systems and Computer Aided Mapping, 1987, *Journal of the American Planning Association*, 5 ~
- [Scholl 89] M.Scholl & A.Voisard: Modelisation of Geographic Databases, application to Thematic Maps, *ICGIS, Santa Barbara, august 1989*.

- [Egenhofer 89] M.J.Egenhofer: A Formal Definition of Binary Topological Relationships. *June 1989, 3rd Intl. Conf. on Foundations Of Data Organization, Paris.*
- [Jeansoulin 89a] Robert Jeansoulin: GOODIES: Geographic Object Oriented Data Information and Edition System. *Urban Data Management Symposium (UDMS-89J) Lisbon, PORTUGAL, may 1989.*
- [Jeansoulin 89b] Robert Jeansoulin: Le Concept Objet et les Systèmes d'Information Géographique. *2eme Colloque SIG'eo (SIGEO 89), Rouen, oct. 1989.*
- [Jeansoulin 89c] Robert Jeansoulin: Le S.I.G. Orienté Objet GOODIES. *7eme Congrès AFCET-RFIA, Paris, nov. 1989.*
- [CNIG 90] JP.Chretien, J.Flochel, JY.Prioux: Elaboration d'une méthodologie de référence, analyse comparative des modèles internationaux. *3eme Journée Nationale de la Recherche Géographique (CNIG), 22 mai 1990, Paris.*



Figure 2 : Affichage en zoom 4 de SPOTX. nearir et de CTA.largeur

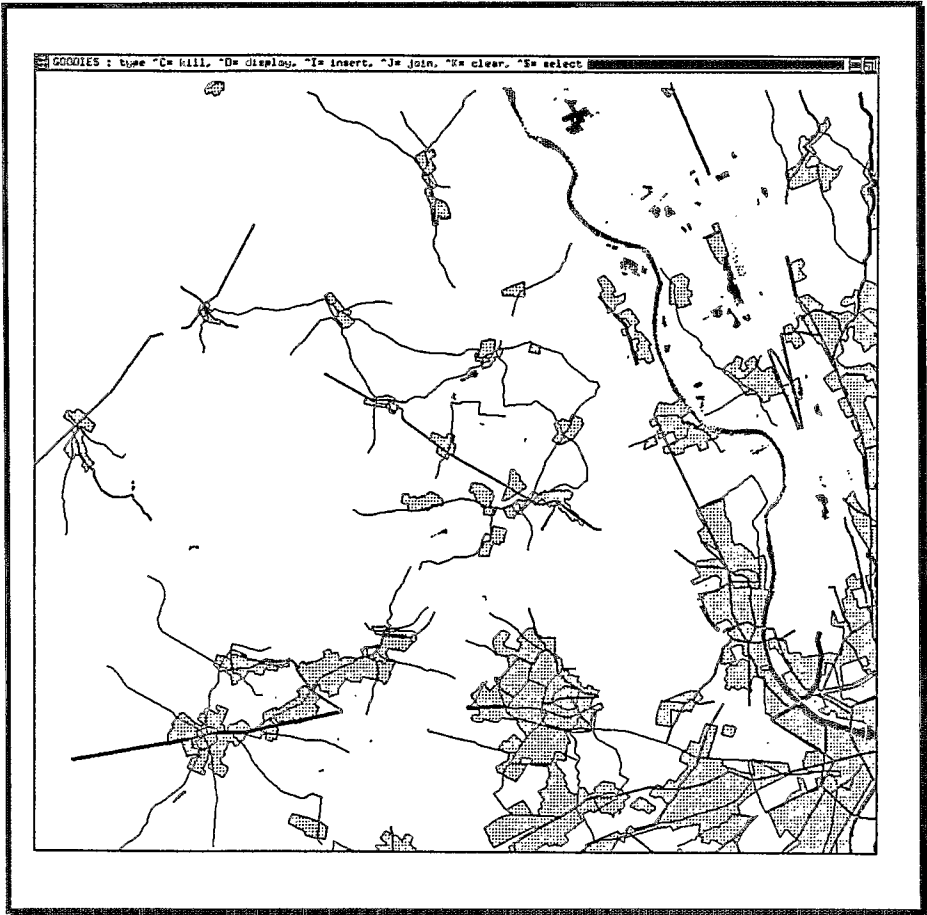


Figure 3 : Affichage de M_{voie urbaine}-largeur de M_{eau}-nearir

TRANSFERT D'ECHELLE ET ORGANISATION SPATIALE.

CAMBREZY L.

RESUME

Une branche de la géographie fait de l'étude des organisations spatiales son principal objet de recherche. dans cette perspective les problèmes liés aux changements d'échelle sont essentiels, tant dans leurs dimensions spatiales et cartographiques que dans l'aspect temporels et dynamiques. Sans prétendre à l'exhaustivité on relevera, parmi les questions qui se posent aux chercheurs:

- Le problème des niveaux hiérarchiques et de leur pertinence.
- Le passage du local au global lorsque le tout n'est pas la somme des parties.
- La question des limites et des espaces tampons.
- Les relations complexes entre phénomènes ponctuels linéaires et aréolaires sachant que tous peuvent présenter des effets diffusants

TRANSFERT D'ECHELLE ET ORGANISATION SPATIALE.

Pour situer le champ de cette intervention, je précise qu'il s'agit d'aborder ici quelques uns des problèmes de changements d'échelle qui posent question dans la pratique de l'analyse géographique et de sa représentation cartographique.

A ce propos, le fait que cette question, pourtant essentielle, n'ait jamais fait jusqu'à ce jour l'objet d'un débat aussi ouvert, du moins à l'ORSTOM, mérite réflexion. La difficulté qu'on éprouve à poser correctement le problème participe sans doute du silence jusqu'à présent de rigueur. D'un autre côté, que l'initiative de ce débat revienne aux animateurs d'un séminaire d'informatique constitue un événement lourd de sens. Il montre bien qu'en la matière aucune discipline n'a l'exclusivité.

Pendant de nombreuses années, et entre autres disciplines en géographie, la question du passage du local au global, ou du global au local, (question éminemment brûlante dès lors qu'on souhaite vérifier la validité de nos analyses à d'autres échelles) a alimenté d'innombrables discussions et débats informels; c'est donc une vieille histoire, mais il aura fallu attendre 1988 pour que des aspects aussi essentiels que "l'articulation des différents niveaux d'analyse spatiale" ou celle de "la position relative, l'ici et l'ailleurs" fasse l'objet d'une véritable discussion scientifique de haut niveau (GEOPOINT 88)¹.

LES PROBLEMES DE CHANGEMENT D'ECHELLE AU QUOTIDIEN.

Changement d'échelle ou changement d'objet ?

Une pratique qui a fait ses preuves en géographie agraire et régionale consiste à "prendre du champ" par rapport à l'espace qui fera l'objet d'une étude détaillée - région, terroir villageois, etc; concrètement, cela signifie qu'on analyse à travers une série de cartes thématiques ou de photographies aériennes les principaux traits de l'activité humaine et des conditions du milieu naturels dans l'espace environnant. Ce faisant on observe ce qui se passe autour de l'espace d'étude de façon à le situer dans un contexte plus englobant. L'espace couvert étant plus vaste, on utilise souvent des cartes de plus petite échelle; les contours des plages sont donc moins précis et l'information est le plus souvent regroupée en grandes catégories thématiques. Les publications orientées dans ce sens offrent au lecteur une série de cartes ou de croquis, présentant successivement l'espace d'étude dans le pays, puis la grande région, la région, pour enfin aboutir à l'espace objet de la recherche qui sera lui traité à plus grande échelle. Dans ce cas précis, il faut bien voir qu'on change certes d'échelle cartographique mais on change aussi d'objet puisque l'espace d'étude n'étant plus le même, les questions se posent différemment.

Supposons maintenant que l'on se limite au seul objet de l'étude

- un terroir inscrit dans une savane très homogène par exemple- et qu'on se place au dessus de celui-ci dans un ballon qui s'élèverait progressivement. On imagine facilement que l'information livrée à l'oeil sera de plus en plus **globale** à mesure qu'on prendra de la hauteur. Du détail des cultures aux formes de l'habitat en passant par les troupeaux dans les prairies, on ne retiendra bientôt plus que les grandes taches de couleur et les principaux éléments structurants du terroir(chemins, bas fonds humides, marigots, ...); plus haut, le

¹(Groupe Dupont, GEOPOINT 88, Ecrire de la Géographie sur le monde. L'approche régionale aujourd'hui, Avignon, 1989. 182 p.

village n'est plus qu'un point et le terroir une petite trouée dans la savane.

Dans ce dernier cas, l'information n'est plus la même par la seule opération de l'élévation en altitude (changement d'échelle), alors que l'objet reste invariant.

Les opérations sur cartes

La disparité de l'information oblige souvent le chercheur à des manipulations, pas toujours très orthodoxes, lui permettant de traiter celle-ci à une seule et même échelle; c'est en effet le premier pas avant la création de quelques fonds de carte de synthèse (paysages agraires, unités naturelles, systèmes sociaux, etc..) permettant la recherche de corrélations significatives.

D'un coté les statistiques sont élaborées selon un découpage administratif ou censitaire, souvent peu fiable, qui peut être très éloigné de la réalité agraire et sociale comme des contraintes du milieu naturel. De l'autre, la cartographie relative à l'activité agricole (lorsqu'elle existe) comme au support écologique, souffre d'un manque total de cohérence, aussi bien dans les catégories employées que dans les échelles de représentation. L'information doit donc être "travaillée" aussi bien dans ses aspects thématiques que cartographiques. Il convient cependant de prendre quelques précautions qui sont justement fonction des opérations de transfert d'échelle.

Passage de la petite échelle à la grande échelle

Pour prendre des exemples simples l'agrandissement au 1/50 000 d'une partie de carte pédologique (la partie correspondant à un terroir) publiée au 1/250 000, en toute rigueur, est inacceptable puisque le tracé des contours se trouve entaché d'une grande imprécision et que le contenu thématique, valide à petite échelle, devient si générale au 1/50 000 qu'elle n'apporte rien à la connaissance et ne justifie donc pas ce changement d'échelle. On peut en outre ajouter que le document auquel on aboutirait par ce procédé ne serait d'aucune utilité pour la suite de la recherche. D'ailleurs, la même opération réalisée sur une carte des isohyètes donne encore une meilleure idée de l'ampleur de la gaffe que l'on risquerait de commettre. En effet, s'agissant de données pluviométriques stationnelles interpolées, les limites de précipitations ne présente qu'un valeur indicative, et il serait bien sûr ahurissant d'avancer qu'au delà de telle limite (reportée sur une carte topographique au 1/50 000), les précipitations passent de 500 mm à 750 mm !

De la grande échelle à la petite échelle

L'opération inverse de la précédente consiste à réduire la carte (échelle plus petite). S'agissant d'un mouvement comparable à une élévation en altitude, les plus petits détails ne peuvent plus apparaître à la fois parce que l'information zonale devient si petite qu'elle se transforme en une donnée ponctuelle, mais aussi parce que l'échelle employée ne justifie pas que l'on se perde dans ce qui devient accessoire. Une réduction de l'échelle conduit donc le plus souvent à une transformation (plutôt que perte) de l'information, aussi bien du fait de la simplification des contours que par la globalisation des catégories retenues dans la légende.

Cette représentation macro d'une certaine réalité a rarement les faveurs du spécialiste, surtout lorsqu'elle a pu être réalisée grâce à la ténacité de chercheurs micro qui retrouvent dans ces travaux ce qui leur semble être une caricature de leurs recherches. Pourtant ce passage à de plus petites échelles est essentiel si l'on veut bien admettre qu'il s'agit moins de simplifier ou de généraliser abusivement que de tenter de répondre à de nouvelles questions. On imagine bien par exemple que la carte mondiale de la végétation publiée par l'UNESCO n'apprendra rien au botaniste travaillant en Amazonie ou dans la forêt congolaise. Cette carte est pourtant le produit d'une longue compilation de travaux réalisés à beaucoup plus grande échelle.

ORGANISATION SPATIALE ET TRANSFERT D'ECHELLE

Les limites cartographiques dans leurs relations avec nos grilles de pensée

Qu'il s'agisse des faits de répartition de l'activité humaine ou des divers facteurs intervenants dans la dynamique des milieux naturels, il est finalement rare de pouvoir distinguer des limites précises ne prêtant à aucune discussion. En effet, surtout lorsqu'il s'agit d'identifier des ensembles complexes, on a le plus souvent affaire à des zones de transition, des "espaces tampons" ¹ qui indiquent beaucoup plus un continuum horizontal et vertical que de véritables ruptures; ces espaces de transition se présentent d'abord comme des zones de mouvements et de passages entre des systèmes spatiaux ouverts. Ce n'est donc pas la moindre des contraintes de l'exercice cartographique que de nous obliger à "faire passer la limite", c'est à dire à distinguer plus ou moins empiriquement le "dedans" du "dehors".

¹ CAMBREZY, L. 1989. L'espace d'un instant, les espaces d'un lieu :Marges et transitions régionales au Mexique., in Tropiques, Lieux et liens. Editions de l'ORSTOM. Paris.

En géographie, on peut avancer que la question du transfert d'échelle se pose de deux manières. L'une renvoie à nos grilles de pensée, typologies, hiérarchies et construction du savoir; l'autre, à la division spatiale et cartographique du territoire. Si l'on considère que la seconde est une forme de modélisation de la première, il est évident que ces deux aspects sont intimement liés. Une carte thématique résulte d'une classification et donc, d'un découpage permettant d'identifier des seuils et des limites.

A l'image de la carte, la partition du savoir procède habituellement de niveaux emboîtés; c'est le cas des taxonomies employées par les naturalistes - cela a été aussi longtemps le cas en géographie. Cette hiérarchisation du savoir s'apparente à l'organisation territoriale d'un pays; dans le cas de la France, la ferme ou le hameau le plus isolé relève d'une commune et d'une seule, dépendant elle-même d'un canton, puis d'un département, d'une région, et enfin d'un pays aux limites clairement établies. Tout le territoire est ainsi couvert; il n'existe ni "blancs" ni superpositions. Les frontières sont étanches, on ne peut sauter le niveau englobant immédiatement supérieur .

Le problème est que, pour pertinente et efficace qu'elle soit en terme de contrôle et d'administration du territoire, cette forme de partition constitue une gêne dès lors qu'il s'agit de mettre en évidence des espaces organisés, non plus en fonction des lois de l'administration, mais plutôt en fonction des moteurs de l'activité économique et sociale, des flux, des systèmes de relation, des phénomènes de centre et de périphérie, des forces de polarisation, ou l'inverse, de marginalisation.

D'ailleurs, on peut parier que si la connaissance du tout pouvait se réduire à la somme des parties (villages ou communes) cela aurait fini par se savoir et l'exercice de la géographie se résumerait alors à un exercice, ennuyeux mais simple, de compilation d'études monographiques.

A mesure que le local se trouve immergé dans le mondial, les organisations spatiales échappent de plus en plus à ces modèles emboîtés. La zone frontalière entre les Etats Unis et le Mexique constitue à cet égard un véritable cas d'école. En effet, si on aborde la question de l'organisation spatiale du seul point de vue d'une des deux parties (Mexique ou USA), il est évident que l'on passera à côté de l'essentiel puisqu'on aura omis le plus important, a savoir que la véritable région économique et culturelle, celle qui définit le système, se situe de part et d'autre de la frontière; *la limite frontalière*, au centre, à l'origine de la rente différentielle de situation, crée l'espace économique et social.

A travers cet exemple, on voit bien que les divisions administratives en vigueur, et c'est dans ce cadre que les données statistiques sont élaborées, permettent, au mieux, une description sommaire des principales caractéristiques sociales et économiques de l'entité spatiale considérée, mais n'autorisent en aucune façon une compréhension du rôle et du fonctionnement de cette unité par

rapport à l'ensemble des champs spatiaux avec lesquels elle entre en interaction. On pourrait d'ailleurs multiplier les exemples: de la frontière franco-suisse en passant par de nombreux villages sur les rives du fleuve Sénégal dont l'avenir se joue autant à Paris qu'en Afrique ...

Tout ceci pour dire que ces hiérarchies, ces corps emboîtés, aussi peu opératoires qu'incontournables (toujours les données) doivent être remis à leur juste place. En géographie, et notamment en "analyse régionale", ces formes spatiales emboîtées ont longuement pesé sur le développement de la discipline. Il a fallu l'apport de l'analyse systémique, et plus récemment la vigueur des recompositions spatiales, dont l'actualité se fait l'écho, pour s'apercevoir que les choses n'étaient décidément pas si simples.

La banalisation des concepts d'interaction et d'interdépendance apparaît d'ailleurs comme une des grandes nouveautés de cette dernière décennie; ce qui, soit dit en passant, porte à croire que les problèmes de transfert d'échelle sont devenus les problèmes de tout le monde ... En terme d'organisation de l'espace, cela signifie qu'un lieu (exploitation agricole, usine, village, ville, ...) se trouve en prise avec d'autres lieux qui ne sont pas nécessairement proches, et d'autres espaces qui ne sont plus forcément englobants.

Espaces aréolaires et espaces réticulaires: questions de perception ou systèmes spatiaux en interaction ?

Face à la complexité de ces espaces, enchevêtrés, mouvants, aux limites de plus en plus floues nous pourrions penser que les travaux de zonification et de régionalisation, bref, de partition de l'espace, touchent à leur fin. De fait, c'est ce que pourrait indiquer l'engouement renouvelé, voire la fascination, pour les analyses en terme de réseaux et de flux. Il est vrai que ceux ci, se prêtant fort bien aux représentations linéaires ou sous forme de graphe, pourraient passer pour une solution élégante, dans un monde décidément bien compliqué, aux questions des limites, limites qu'on peut d'autant moins facilement représenter qu'elles sont floues.

Tenter d'opposer les espaces aréolaires aux réseaux et aux espaces réticulaires n'est pourtant pas exempte de dangers et cela pour plusieurs raisons¹. On a en effet du mal à admettre que les espaces aréolaires, qui seraient le produit des sociétés précapitalistes et traditionnelles, doivent être rangées au musée des antiquités, et qu'à l'inverse, les espaces réticulaires porteraient la marque de sociétés étatisées intégrées dans un système d'économie marchande. Il semble que cette succession dans le temps, telle qu'elle est proposée, grossit (à propos ?) les traits, car les sociétés nomades, mais pas

¹ ANTHEAUME, B., DELAUNAY, D., PORTAIS, M. 1987. *L'abeille et l'araignée : de l'autonomie territoriale à l'interdépendance réticulaire.*, in ESPACE ET TERRITOIRES. ORSTOM, Paris, pp. 3-6.

seulement elles, certes aujourd'hui bien mal en point, ne datent pas d'hier et apportent, s'il en fallait la preuve, que les organisations réticulaires ne sont pas une nouveauté de cette fin de millénaire ¹.

Que les flux et les réseaux soient de plus en plus complexes et qu'ils couvrent des distances de plus en plus importantes, personne d'en doute, mais l'emploi d'une opposition aussi tranchée, justement contraire à cette notion d'échelle, pourrait s'annoncer dangereuse. D'abord parce que le monde ne se résume pas, il s'en faut de beaucoup, à une toile d'araignée, constituée de routes, de villes et de câbles téléphoniques. Ensuite, parce que les espaces réticulaires impliquent une "épaisseur" qui déborde plus ou moins largement - selon les lieux, les milieux et les époques- la limite de la ville ou de la route asphaltée.

Les espaces réticulaires présentent un effet diffusant qui, en définitive, nous renvoient à des configurations spatiales surfaciques ou aréolaires. Et le plus intéressant dans tout cela est bien de **mesurer et localiser la vitesse** de ces phénomènes de diffusion (des biens, des services, des idées, etc).

Pour académiques que puissent paraître ces remarques, le problème est bien de savoir si le réseau n'est que cela ou si au contraire il produit un espace qui lui est indissolublement lié. On peut sans doute ergoter et se demander si l'araignée contrôle seulement les fils de sa toile, ou bien aussi l'espace que ceux-ci délimitent, mais il reste qu'en terme de développement, même lorsqu'il s'agit d'infrastructures - éléments ponctuels ou linéaires par excellence- la prise en compte des espaces interstitiels reste primordiale. Il suffit de penser aux critères de distance, de charge de population et de topographie qui commandent à la mise en place d'un réseau de centres de santé ou d'écoles pour admettre qu'on ne peut séparer les réseaux de l'espace qu'ils définissent. En définitive, les fils ou la toile..., c'est bien une question de **point de vue**.

"L'ENVIRONNEMENT EST INTRINSEQUE"²

Preuve que les systèmes spatiaux sont ouverts et que les limites ne sont pas étanches, on sait qu'une région se définit tout autant par ce qui l'entoure que par des critères d'homogénéité interne, d'ailleurs souvent contestables . Ce qui vaut pour ce niveau d'analyse vaut sans doute tout autant pour les autres catégories topologiques habituellement analysées en géographie (terroirs, systèmes agraires, ...). C'est là une des difficultés majeure à laquelle se trouvent confrontés les chercheurs puisqu'ils doivent avoir en même temps ce double regard qui seul permet d'être à la fois "dedans" et "dehors". Quelle image pourrait-on donner de la France si on se limitait à ne

¹BONNEMAISON, J. 1986. La dernière île. *arléa* - ORSTOM, Paris, 404 p.

²BRUNET, R. 1972. *Pour une théorie de la géographie régionale*. Travaux de l'institut de géographie de Reims, N° 11, pp 3-14.

l'envisager que du seul point de vue des limites de l'hexagone ? Dans le meilleur des cas il ne pourrait s'agir que d'une description partielle et tronquée pour la simple raison qu'il ne s'agit pas d'un caisson étanche mais qu'au contraire les lieux et les régions qui la composent entretiennent des relations variées avec d'autres lieux et d'autres régions, aussi bien avec les pays voisins qu'avec ceux d'autres continents.

C'est là un principe qu'on suppose bien connu; il reste qu'on devrait avoir à coeur, si cela n'a pas déjà été tenté (mais on doit s'en préoccuper dans les ministères), d'étudier la France du dehors, en s'attachant à mesurer ses "effets", en termes économiques et culturels, dans le monde; outre que nous serions certainement surpris du résultat, nul doute que cette étude contribuerait efficacement à la connaissance de notre territoire.

DES METHODES ET DES IDEES...

On s'interrogeait plus haut sur l'avenir d'une représentation graphique des organisations spatiales. Nous voici partiellement rassurés; pour peu qu'on sache s'attaquer aux vraies questions. Si les limites sont floues c'est parce qu'il ne s'agit plus de limites mais d'espaces tampons, qu'il faut apprendre à traiter en tant que tels. Mais c'est aussi parce qu'on se rend mieux compte aujourd'hui que le monde se recompose en permanence, que les centres de gravité se déplacent ou disparaissent, et que les régionalismes s'affirment au moment où l'on pensait que le monde, gouverné par le monstre froid de la technique et d'un "libéralisme planétaire", allait sombrer dans l'ennui de l'identique. Avant de baisser les bras, il faudrait pouvoir affirmer que tout a été fait pour maîtriser le flou et représenter graphiquement le mouvement, c'est à dire à la fois l'espace *et* le temps. Si l'on pense à la carte traditionnelle, ces propos risquent fort de passer pour de la provocation, car si le flou peut encore être correctement simulé sur papier par d'habiles traitements en couleur (Cf. les compositions colorées de J.BERTIN), on voit mal comment représenter le mouvement sur ce type de support. On entend bien sûr par "mouvement" un *déplacement visible* et non pas une vague figuration, plus ou moins heureuse, à l'aide de flèches d'épaisseur variable, comme on le fait habituellement parce qu'on n'a pas trouvé mieux. La question des transferts d'échelle serait donc affaire d'interactions et de mouvement, donc d'espace et de temps. Le problème est maintenant de savoir si nos méthodes et nos outils sont appropriées à ce qu'on est tenté de considérer comme de nouvelles questions.

L'informatique graphique offre en la matière de nouvelles possibilités, encore qu'elles aient été très peu développées, au moins dans ce domaine d'application. Avec la mise en oeuvre des systèmes d'"information géographique nous n'en sommes encore qu'aux balbutiements de ce renouvellement de nos méthodes. En effet, si les développements de ces dernières années, permettent de gérer correctement toutes les opérations relatives au croisement de

données de nature et d'échelle variée, il reste encore beaucoup à faire en matière d'études des interactions comme des phénomènes dynamiques.

Il faut ici distinguer deux aspects: les mécanismes et les moteurs de ces interactions et mouvements d'une part, la simulation ou représentation qu'on peut en donner, d'autre part. A ce propos, certains avanceront sans doute que l'approche spatiale et sa représentation cartographique n'est pas la meilleure entrée pour l'étude des interactions et des mouvements. Pour ce qui concerne la géographie, il nous paraît encore trop tôt pour pouvoir se prononcer car c'est ici probablement moins la technique qui fait défaut que nos propres capacités de renouvellement de nos problématiques de recherche. Il reste que l'espace étant par essence une composante du mouvement, il nous faudra bien envisager celui-ci quelque part ...

Les considérables progrès informatiques réalisés, notamment dans le domaine militaire, laissent présager un bel avenir à la "carte animée", et donc à une certaine "figuration" du mouvement. On peut en effet parfaitement représenter des dynamiques spatiales sur un écran d'ordinateur: circulation urbaine, front de colonisation, expansion d'une culture, déplacement d'un cyclone, etc. En effet, La mise en évidence d'une dynamique spatiale consiste à accumuler de l'information sur une période donnée en fonction d'un certain pas de temps; par exemple des séries statistiques tous les ans ou tous les dix ans. Le volume de données étant considérable, il s'agit donc de procédures très exigeantes. Mais plus grave, ni les unités spatiales employées, dans le cadre desquelles ont été levées les données, ni les catégories et classifications sont comparables; c'est un premier aspect. Le second, plus complexe, est que la vitesse des phénomènes observés est rarement constante sur l'ensemble de la période considérée - il suffit de penser aux rythmes de croissance des villes du Tiers Monde et de leurs différents quartiers - ce qui introduit la notion de variabilité des pas de temps. C'est aussi un problème d'échelle.

ACCIDENTS MORPHOCLIMATIQUES A TRAVERS LA PRESSE QUITO (EQUATEUR) 1900-1988. DE L'INFORMATION QUALITATIVE A LA CARTOGRAPHIE DE FREQUENCES : PROBLEMES D'ECHELLE

PELTRE P.

RESUME

La ville de Quito (altitude 2 800 mètres) subit fréquemment des accidents d'origine morphoclimatiques : inondations, coulées de boue, effondrements de chaussée et éboulements de talus. Une approche historique de ces accidents a été menée par dépouillement du principal quotidien entre 1900 et 1988 pour identifier les zones sensibles de la ville et apprécier à quel rythme ils se produisent.

La méthode mise au point pour analyser et cartographier une information éminemment qualitative est exposée : constitution d'un fichier de 317 résumés d'articles qui permet d'identifier un peu plus de 550 accidents localisés sur l'ensemble de la période, qui sont ensuite cartographiés, analysés en termes de rythme et de fréquence, et rapportés aux grandes étapes de la croissance urbaine. Les principaux résultats sont résumés, puis on examine les problèmes d'échelle dans l'espace et dans le temps qui se sont posés au cours de cette étude.

INTRODUCTION

La ville de Quito subit depuis la fondation de la ville coloniale des accidents liés à la perturbation du drainage naturel par l'urbanisation : inondations, coulées de boue, éboulements et effondrements de voirie, dont un grand nombre est dû au remblaiement systématique du réseau de drainage naturel des *quebradas*¹. La presse de la capitale a décrit 317 de ces accidents pour la période 1900 - 1988, qui constituent un risque certain pour de nombreux quartiers, de même

¹ Ravins à écoulement sporadique, entaillés de 2 à 30 mètres dans les cendres volcaniques.

qu'un sérieux problème de gestion du milieu urbain pour les services municipaux.

La question posée, dans le cadre de l'Atlas Informatisé de Quito, était d'identifier dans la ville les zones les plus sensibles à ces risques morphoclimatiques. Les méthodes prévisionnelles classiques, fondées sur une approche géomorphologique de la stabilité des sols, sont de faible fiabilité dans les cendres volcaniques où les différenciations de structure du sol sont subtiles, et qui plus est difficiles à mettre en oeuvre en milieu urbanisé. Aussi a-t-il semblé préférable de mettre au point une méthode historique, à partir du dépouillement des articles de journaux – seule mémoire disponible de ces événements –, à la manière des études menées sur archives par les sismologues sur les séismes du passé.

L'information de base était donc éminemment qualitative, presque exclusivement composée d'articles ou d'entrefilets décrivant l'accident avec plus ou moins de détail quant à sa gravité, et donnant une localisation souvent approximative; l'extension réelle de la zone touchée a parfois été difficile à cerner avec précision et sera discutée plus loin. Le but recherché étant d'établir une cartographie des zones sensibles de la ville, c'est ce passage d'une information qualitative à son exploitation en termes de localisation et de fréquence d'occurrence que nous discuterons ici.

1- LA METHODE

Les fichiers

A partir du dépouillement systématique du principal quotidien *quiteño*, *El Comercio*, on a constitué sur Macintosh un fichier de 317 résumés d'articles sous 4ème Dimension (fichier "Evénements"). En ce qui concerne les inondations et coulées de boue (accidents de type aréolaire, alors que les éboulements et effondrements de chaussée peuvent être considérés comme ponctuels), chaque article décrit soit un seul accident clairement localisé, soit plusieurs accidents correspondant à différents foyers géographiques pour un même événement pluviométrique, ou encore plusieurs accidents de nature différente survenus un même jour (p. ex. une zone inondée dans le Centre historique, une autre dans le Sud, et un éboulement au Panecillo).

A partir du fichier "Evénements" on a dérivé un fichier directement lié à la localisation : dans l'exemple cité ci-dessus, la fiche correspondante du fichier "Evénements" a été ventilée en trois fiches du fichier "Accidents", dont chaque fiche correspond à une localisation unique d'accident; ce fichier comporte ainsi 567 fiches selon la structure indiquée en figure 1.

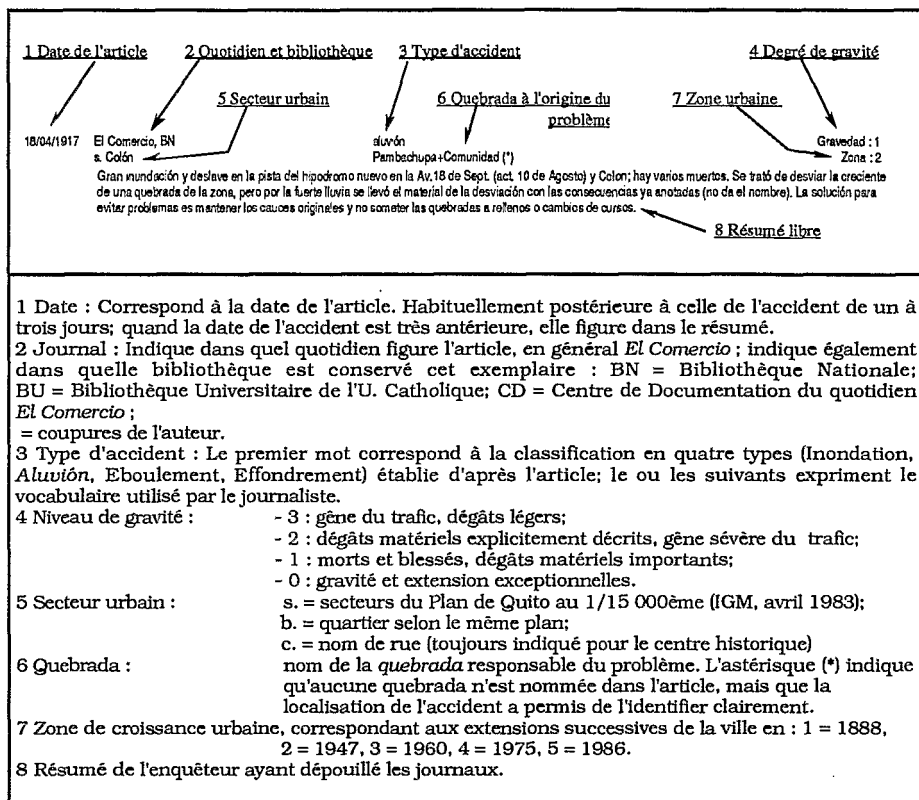


Figure 1 : structure de fiche du fichier "Accidents" ¹

L'exploitation par fréquence

L'étude de fréquence des accidents repose sur le décompte de sélections simples ou combinées effectuées sur un ou plusieurs des 8 champs du fichier. Pour chacun des quatre types d'accident, on a fait le compte des accidents survenus dans l'une des trois zones marquant les grandes étapes de la croissance urbaine depuis le début du siècle (cf. fig. 3). Les résultats de ce traitement sont discutés dans la suite du texte.

La cartographie

Une représentation cartographique analytique de chaque fiche a été tracée sur un plan de la ville au 1/15 000ème, aréolaire pour les inondations et crues boueuses, ponctuelle pour les éboulements et

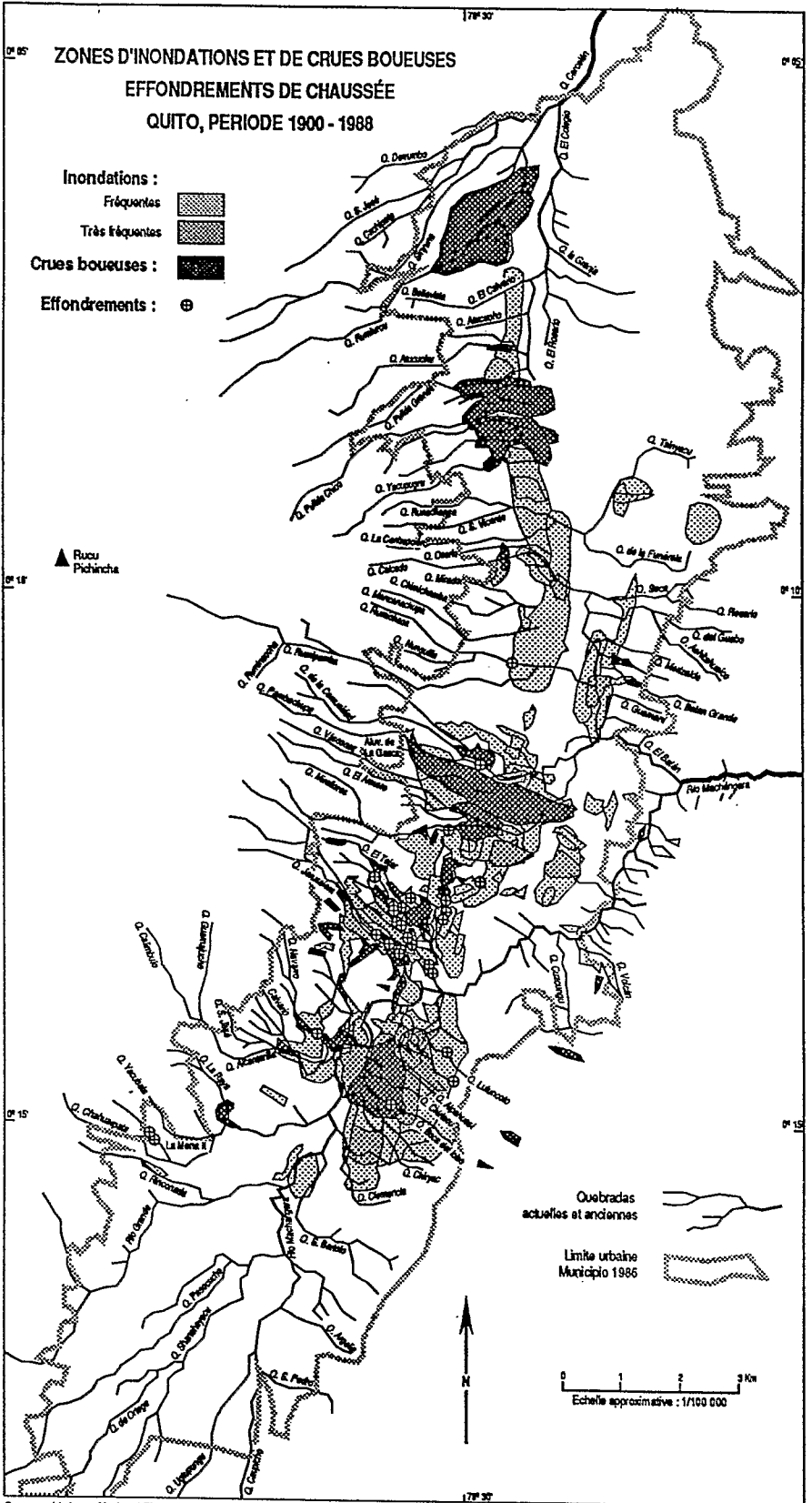
¹ Fichier publié dans Peltre, 1989/B; le total de 517 fiches annoncé dans cet article correspond à une erreur d'impression, au lieu de 567 fiches réellement publiées et utilisées dans les sélections.

effondrements de chaussée. Compte tenu des superpositions fréquentes, trois calques correspondant aux accidents des périodes 1900-1947, 1948-1967 et 1968-1988 ont été dressés, ces périodes correspondant à des phases nettement différenciées de croissance urbaine, et permettant également une ventilation équilibrée du nombre d'accidents dans chaque période.

La localisation de chaque accident, de type aréolaire ou ponctuel, a été tracée manuellement à partir de l'analyse du résumé d'article et de connaissances topographiques et géomorphologiques du secteur, souvent recueillies sur le terrain. Ce travail d'identification géographique des accidents présente des difficultés : les localisations indiquées par le journaliste sont souvent peu précises, constituées de noms de rues, de croisements de rues, ou simplement indication de quartiers plus ou moins bien identifiés par ses habitants, à défaut de l'être correctement sur les plans; mais aussi il a parfois été difficile de déterminer si une zone assez ample, affectée par l'excès d'eau, constituait un seul ou plusieurs foyers d'accidents, amenant à faire des choix selon l'hypothèse la plus vraisemblable. Il est en outre très probable que les journaux n'aient pas toujours rendu compte de façon homogène de ces accidents au cours du temps : par exemple la couverture de l'information internationale au cours de la dernière guerre mondiale semble assez complète, suffisamment en tous cas pour que l'on puisse s'interroger sur la concurrence qu'aurait pu faire cette actualité brûlante aux compte-rendus des faits divers urbains de l'époque, si du moins ils restaient de dimension modeste. D'une façon plus générale on peut soupçonner les journaux du début du siècle, plus faiblement intégrés que maintenant aux réseaux mondiaux des agences d'information, d'avoir rendu compte de nouvelles locales plus minces que celles qui retiennent aujourd'hui l'attention des journalistes.

Cette cartographie analytique constitue donc l'interprétation "au mieux" d'une information obtenue à partir d'un instrument d'observation fort imparfait dans le détail. C'est cependant le seul disponible, et la répétition dans le temps d'accidents selon des localisations approximatives, voisines ou sécantes, restituée aux diverses cartes une fiabilité qui demeure fragile dans le détail de chaque événement. C'est également pour cette raison que l'exploitation par zones de croissance urbaine a été conduite de manière à ne constituer que des groupes géographiques ou chronologiques d'accidents suffisamment importants pour conserver une signification, en regroupant notamment les zones 3, 4 et 5 initialement définies (cf. fig. 1).

Trois cartes des fréquences ont ensuite été dérivées de ce premier jeu analytique, pour les mêmes périodes définies ci-dessus, où chaque zone correspond au nombre d'accidents d'un même type survenus en un lieu.



Carte numérisée sur Macintosh™ sous Carto 2D; écrite sous MacDraw II, imprimée sur LaserWriter +

Figure 1

Ces documents mesurant 1,80 mètre de long à l'échelle du 1/15 000^{ème}, leur édition a été réalisée par numérisation sous Carto 2D en dix fichiers séparés : 1 - fonds urbain de voirie simplifiée; 2 - quebradas; 3 - courbes de niveau; 4 - limites de croissance urbaine; 5- fréquences 1900-1947; 6 - fréquences 1948-1967; 7 - fréquences 1968-1988; 8 - éboulements 1900-1947; 9 - éboulements 1948-1967; 10 - éboulements 1968-1988. La numérisation a été réalisée sur une tablette à digitaliser de 30 X 30 cm, sur des documents d'échelles différentes, en effectuant le repérage précis (et la saisie) de deux éléments communs aux divers documents. A cette étape de numérisation correspond également un processus de généralisation (ou de "lissage" manuel) indispensable à la réduction d'échelle d'un facteur 5 à 10, pour saisir des zones correspondant aux classes de fréquences indiquées en figure 6. Ces dix fichiers ont ensuite été importés sous Mac Draw II¹ pour y être assemblés selon les combinaisons pertinentes pour chaque niveau d'analyse, renseignés (trame et lettre) et imprimés à l'échelle recherchée (figure 2).

2- ENVIRONNEMENT URBAIN ET RISQUE MORPHOCLIMATIQUE

Le site urbain

La ville de Quito est située à 2 800 mètres d'altitude, pratiquement sous l'équateur, au pied du volcan actif Pichincha (alt. 4794 m.). La ville occupe un gradin tectonique qui domine de 300 mètres environ le sillon interandin, vallée nord-sud séparant les Cordillères Orientales et Occidentales. Ceci donne au site l'aspect d'une gouttière étroite de trente km de long sur trois à cinq de large, d'orientation N-S, dont le fond est constitué par les sédiments fluvio-lacustres d'un ancien lac, encore partiellement marécageux à la fin du siècle dernier.

Les versants du Pichincha et le revers de la "pseudo-cuesta" du gradin tectonique sont principalement constitués de laves, de tufs faiblement indurés et de cendres volcaniques, affectés de plusieurs failles importantes; l'ensemble du site est presque uniformément recouvert de cendres volcaniques limoneuses d'origine éolienne - la *cangahua* - qui moulent la topographie ancienne d'une couche de dix à vingt mètres d'épaisseur. Ces formations présentent la

¹ MacDraw II a donc servi d'éditeur graphique perfectionné, essentiellement pour pallier aux limitations d'édition de Carto 2D. Ont notamment été mises à profit les fonctionnalités suivantes de MacDraw II : - non limitation de format, le travail s'étant effectué à une échelle double ou triple de celle de l'impression, puis réduit à la demande lors de l'impression laser ; - travail par calques superposés, permettant de superposer plusieurs fichiers numérisés, de les déformer en homothétie pour les faire repérer, et d'affecter facilement une trame à un ensemble de zones ou au trait; - possibilité d'affecter au trait des épaisseurs variées et une trame, indispensables pour différencier des réseaux distincts superposés (voirie, hydrographie, courbes de niveau, limites de zones); - possibilité d'exploiter de très petits corps de caractères (jusqu'au corps 5 ou 6) et rotation du texte du fait de l'usage de polices vectorisée, alors que le texte est réalisé en mode "paint" sous Carto 2D.

particularité d'opposer peu de résistance à l'érosion fluviale, et de s'indurer légèrement lorsqu'elles sont exposées à l'air, ce qui leur a permis de conserver remarquablement fraîches les vigoureuses incisions de la dernière déglaciation, qui constituent un réseau dense de ravins (les *quebradas*) traversant tout le site urbain.

Le climat de la ville est de type équatorial d'altitude, avec une température moyenne annuelle de 13,5 degrés C et des amplitudes thermiques diurnes très supérieures à l'amplitude annuelle. Le régime pluviométrique est distribué en deux saisons des pluies, d'octobre à novembre et de février à mai (cf. fig. 5). L'intensité des précipitations, facteur essentiel pour ce qui nous occupe, est élevée, atteignant sur 30 minutes 46,3 mm/h (médiane), 58,5 mm/h (fréquence décennale) et 69,2 mm/h (fréquence centennale)¹.

Drainage et croissance urbaine : les *quebradas*

La croissance démographique de Quito s'effectue depuis une trentaine d'années au rythme très soutenu de plus de 4% par an, la population atteignant actuellement 900 000 habitants. La ville a accru sa superficie de près de 40 fois entre 1880 et 1980, et trois étapes successives ont été repérées sur la figure 3. Les *quebradas* se rassemblent toutes, dans les limites mêmes du périmètre urbain actuel, en trois exutoires seulement. Ce sont des torrents de montagne à pente forte, au régime d'oued, qui ne coulent que quelques jours par an en crues brutales et violentes lors des précipitations les plus intenses; seuls les plus importants ont un écoulement permanent.

D'une façon générale leur remblaiement, pratiqué dès l'époque coloniale, se poursuit jusqu'à l'époque actuelle, et c'est donc le réseau d'égouts qui assure maintenant non seulement l'évacuation des eaux usées, mais également celle des eaux pluviales du Pichincha, système montagneux d'un volume considérable dans la tranche d'altitude de 2 800 à 4 700 mètres au-dessus de la ville. Ce réseau est localement insuffisant ou très insuffisant pour évacuer les principales crues, et l'estimation comparée de la capacité d'évacuation des égouts et des débits maxima de fréquence décennale des *quebradas* du Pichincha est éloquent, puisque sur 19 *quebradas* étudiées, 12 présentent un déficit d'évacuation parfois considérable dont les plus importants figurent au tableau 1².

L'EMAP-Quito cherche à contrôler cette situation en aménageant des retenues-tampon autour de certaines des prise d'égout les plus sensibles, permettant de stocker la crête de crue durant 20 à 30 minutes, délai en principe suffisant pour étaler les averses très

¹ Station de Quito Observatoire. Cf. Alulema, Ojeda, Nouvelot, Pourrut, 1985.

² Cf. CMD, 1977, chap. 14

intenses ¹. Ces aménagements étant pour la plupart récents, il est encore très difficile de juger de leur efficacité.

Quebrada	Rumiurc u	Atucuch u	Pulida Chico	Rumipam ba	Manzanachup a	Caiced o
Débit décennal (m ³ /s.)	38,8	11,3	11,7	24,9	4,5	5,7
Capacité d'égout (m ³ /s.)	13,6	3,4	4,0	8,5	3,2	4,5

Tableau 1 : déficit d'évacuation de quelques quebradas

Lorsque les débits de fréquence décennale sont approchés ou dépassés, les eaux et la boue passent par les rues, provoquant inondations et crues boueuses. De ce fait le réseau d'égouts subit en permanence un alluvionnement important, qui réduit encore sa capacité théorique d'évacuation, et nécessite un nettoyage permanent par une équipe de 140 égoutiers (les *sifoneros*). Enfin les têtes du réseau sont toutes en pente forte, ce qui conduit à de fortes mise en charge des canalisations et aboutit parfois à leur rupture, induisant alors des phénomènes d'érosion souterraine qui provoquent à l'occasion des effondrements de chaussée.

Ajoutons que la ville est également menacée par deux risques majeurs, sismique et volcanique, de fréquence faible mais de gravité incomparablement supérieure. Ceci relativise l'ampleur du risque dû au drainage, qui reste limitée à des dégâts localisés par quartier, et de gravité moyenne. Les décès dus à des coulées de boue ou à des effondrements n'ont pourtant pas été rares, et surtout il s'agit d'un risque très fréquent, dont on sait qu'il affectera nécessairement plusieurs quartiers de la ville à l'échéance d'une, ou à coup sûr de quelques années; enfin c'est un risque beaucoup plus accessible à la prévention par l'aménagement de la ville et par la gestion de sa croissance.

Les types d'accidents

Les inondations : Elles traduisent très directement l'insuffisance chronique du réseau de drainage lors des fortes précipitations qui sont de règle en climat équatorial d'altitude. Les averses étant d'autant plus localisées qu'elles sont intenses, ces inondations n'ont

¹ EMAP : Empresa Municipal de Alcantarillas y Agua Potable, agence municipale chargée de la gestion des égouts et de l'approvisionnement en eau. Pour une description de certains de ces aménagements, cf. De Noni, F. de Castro, Peltre, 1988

en règle générale qu'une extension limitée dans l'espace et ne durent guère plus de deux à quatre heures. Les eaux excédant la capacité des égouts empruntent les rues en pente et s'accumulent quelque temps dans les rues transversales et dans les zones basses; elles atteignent couramment 30 à 60 cm de hauteur, et ne dépassent guère un mètre ou un mètre cinquante lors des inondations les plus importantes. L'extension varie de quelques *manzanas* (les pâtés de maisons) au quartier tout entier sur les pentes moyennes, mais l'inondation peut affecter des secteurs plus vastes, dans les zones planes de la "plaine de Quito".

Ces inondations sont fréquemment liées au tracé des anciennes *quebradas*. Elles ne provoquent ordinairement que des dégâts relativement peu importants : inondation des rez-de-chaussées, quelques maisons précaires abîmées ou parfois détruites, et usure accélérée des chaussées, et paralysent dans tous les cas la circulation dans la ville. Elles sont surtout très fréquentes avec 163 événements relevés sur l'ensemble de la période.

Les crues boueuses : Répertoirees par les journalistes comme des *aluviones*, *aludes* et parfois *deslaves*, ces accidents sont moins fréquents mais nettement plus destructeurs que les inondations. Il s'agit soit de coulées de boue, relativement peu liquides, soit plus fréquemment de crues à forte charge solide, allant dans les cas les plus graves jusqu'à charrier des pierres et des blocs. Au plan géomorphologique la coulée de boue correspond au dépassement de la limite de liquidité dans le sol, induisant une loupe d'arrachement et une coulée en aval, généralement assez courte, alors que la crue boueuse résulte de la mobilisation par le torrent de matériaux arrachés à ses berges, ou antérieurement mobilisés par un éboulement ou une coulée de boue dans la partie amont du bassin-versant; elle affecte des distances beaucoup plus importantes, et a tendance à s'étaler lorsque la pente diminue comme c'est le cas à la base de tous les versants qui dominent la ville.

Ce sont des accidents de la périphérie de la ville, bien que les plus graves y pénètrent profondément du fait de son allongement, exclusivement liés au tracé des actuelles *quebradas*, qu'il est presque toujours possible d'identifier même lorsque le journaliste n'en parle pas. L'analyse des compte-rendus indique qu'à leur entrée dans la ville, les flux correspondent dans presque tous les cas à des crues boueuses liées à des averses très localisées, de fréquences relativement rares (décennale ou plus rares).

Plus rares que les inondations (70 accidents relevés), les crues boueuses sont beaucoup plus graves et destructrices : outre la boue déposée sur 30 à 60 cm d'épaisseur, toujours présente, des pierres, blocs et troncs d'arbres sont également entraînés par le flux dans les cas les plus graves. L'extension varie de quelques centaines de mètres de longueur à 3, voire 4 kilomètres sur 100 à 400 mètres de largeur. Les dégâts peuvent être importants, avec destruction partielle de maisons, de voitures et d'équipement de voirie, colmatage du réseau d'égouts sur des superficies importantes, et même parfois pertes de

vies humaines, comme dans l'accident de la Gasca du 25 février 1975, célèbre à Quito, où il y eut deux morts.

Les effondrements : Les *hundimientos*, effondrements de chaussée dus aux égouts défectueux dans le matériau de remblaiement des anciennes *quebradas*, sont des accidents plus rares (36 depuis 1900). Ils sont cependant spectaculaire et frappent l'imagination lorsqu'un véhicule disparaît dans un trou qui s'ouvre subitement sous ses roues, comme c'est arrivé le 3 mai 1978 dans l'Avenida America.

Leur mécanisme est lié à l'érosion souterraine dans des conditions assez particulières : la rupture d'un collecteur d'égout, lors d'une forte précipitation et sous l'effet de la mise en charge des eaux dans ses secteurs pentus, induit un écoulement parallèle au collecteur dans les matériaux peu compacts de remblaiement d'une *quebrada*. Cet écoulement poursuit un lent travail d'évacuation des sables et limons, et creuse progressivement une cavité sous la chaussée; pendant un certain temps cette dernière résiste grâce au compactage des couches superficielles, et passe complètement inaperçue. La voûte cède brusquement, parfois sous le poids d'un véhicule, lorsque la cavité s'est suffisamment agrandie.

Les éboulements : Répertoireés sous les termes de *derrumbe* et parfois *deslave*, mais aussi de *deslizamiento* (glissement de terrain), ce sont des accidents beaucoup plus ponctuels qui affectent les quartiers construits sur des pentes fortes. Il s'agit de morceaux de talus hauts de quelques mètres, d'un volume limité, qui s'éboulent, emportant quelques maisons ou enterrant celles qui se trouvent en aval. Ces accidents sont liés à l'affaiblissement de la cohérence des cendres volcaniques par l'humidité en bordure des talus mal ou pas étayés, et mal drainés; il ne s'agit pas de boue, mais de masses de terre humide qui ne parcourent que de petites distances.

Ce sont des accidents assez fréquents, avec 114 éboulements répertoriés. Pour être très localisés, ils n'en sont pas moins graves puisqu'ils provoquent le plus souvent des destructions de maisons; il s'agit en fait des accidents les plus meurtriers avec plus de 80 morts au cours de la période. La cartographie des éboulements est assez peu significative, exprimant surtout une relation avec les pentes fortes et avec le vieux centre colonial, où les constructions anciennes mal entretenues s'effondrent parfois de simple vieillesse; nous n'avons pas reproduit cette carte ici (voir Peltre 1989/b).

3 - L'ANALYSE DU RISQUE MORPHOCLIMATIQUE

Croissance urbaine et rythme des accidents

A partir du fichier des accidents on a dressé leur histogramme de fréquence (cf. fig. 4) selon trois zones successives de croissance urbaine : le noyau historique existant en 1900, les zones construites

au nord et au sud de ce noyau entre 1900 et 1947, et enfin celles apparues entre 1947 et 1986 ¹ (cf. fig. 3). Pour ce traitement par fréquences, les inondations ont été comptées par *événement pluviométrique* ayant causé des problèmes, et non par foyer géographique. En effet, leur comportement spatial diffère considérablement de celui des trois autres types identifiés; elles constituent toujours les accidents les plus étendus, qui ont en général dû être cartographiés en plusieurs foyers géographiques pour identifier les zones les plus sensibles. En termes de fréquences d'occurrence, une pluie ayant causé par exemple quatre foyers d'inondation dans la ville doit être comptée comme un seul accident pour éviter de donner à cet accident un poids excessif du fait de sa grande extension spatiale, alors que chacun des trois autres types d'accident, plus graves et plus rares, mais surtout beaucoup mieux localisés, seront comptés pour chacun de leurs foyers, même si plusieurs foyers sont dûs à un même orage. Le tableau 2 indique le nombre des accidents survenus depuis 1900 selon ce principe : nombre des *épisodes journaliers* d'inondations, et nombre des accidents *géographiquement localisés* pour les autres types.

Ces fréquences ont été rapportées aux totaux annuels des précipitations, dont la courbe n'indique qu'une corrélation très faible avec le nombre des accidents. Ceci est dû au fait qu'une très forte majorité des accidents - 233 inondations et crues boueuses - est directement liée aux fortes intensités beaucoup plus qu'aux totaux annuels, et il faudrait pouvoir comparer avec les relevés horaires ou au moins journaliers pour obtenir une relation graphique claire. En outre les stations pluviométriques sont toutes localisées dans la "plaine de Quito", alors que l'on sait par expérience que les pluies les plus intenses sont très localisées, et tombent sur les versants qui dominent la ville; nous avons pu constater lors de l'étude de l'*aluvión* de la *quebrada* La Raya², qu'une précipitation très intense, attestée par le limnigramme de crue du Rio Machangara, n'avait pratiquement pas été enregistrée par deux pluviographes proches, qui n'avaient vu passer que la frange de l'orage.

¹ Les limites de plans utilisées ont été rassemblées par O. Lemaire, allocataire MRT à l'Atlas Informatisé de Quito.

² Cf. De Noni, Fernandez de Castro, Peltre, 1988

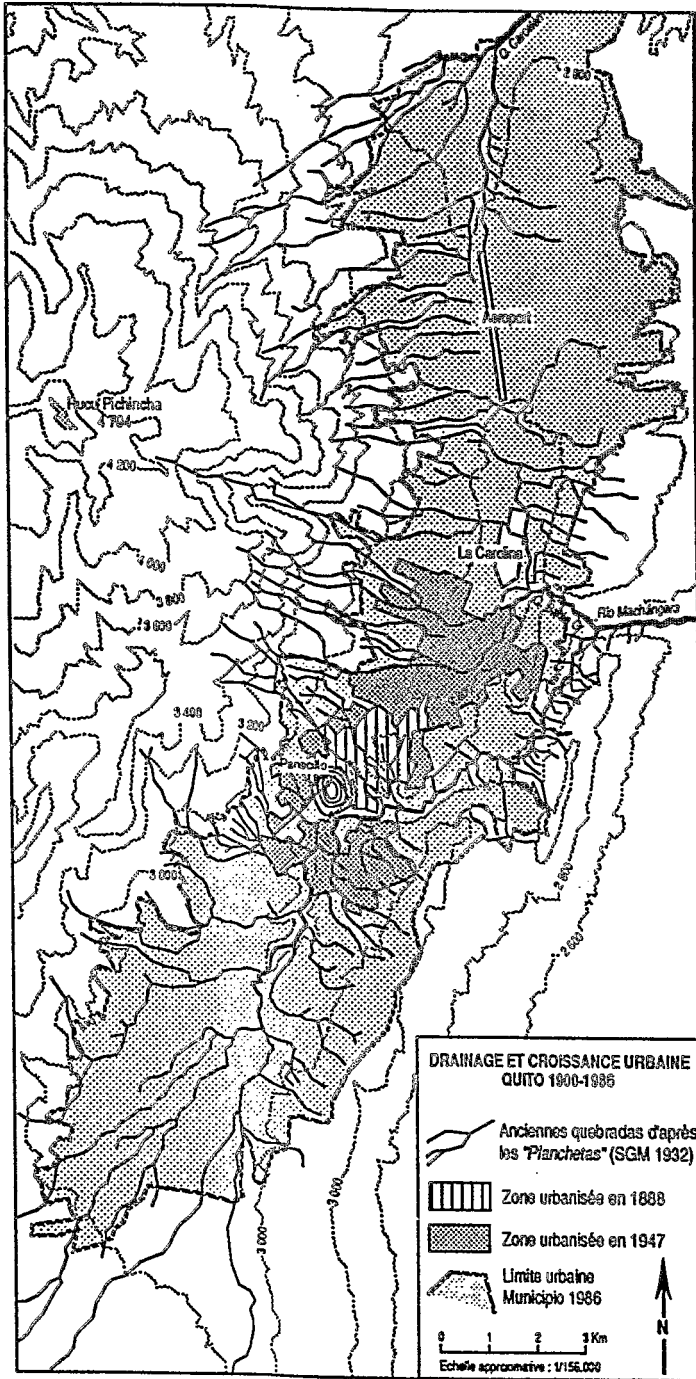


Figure 3

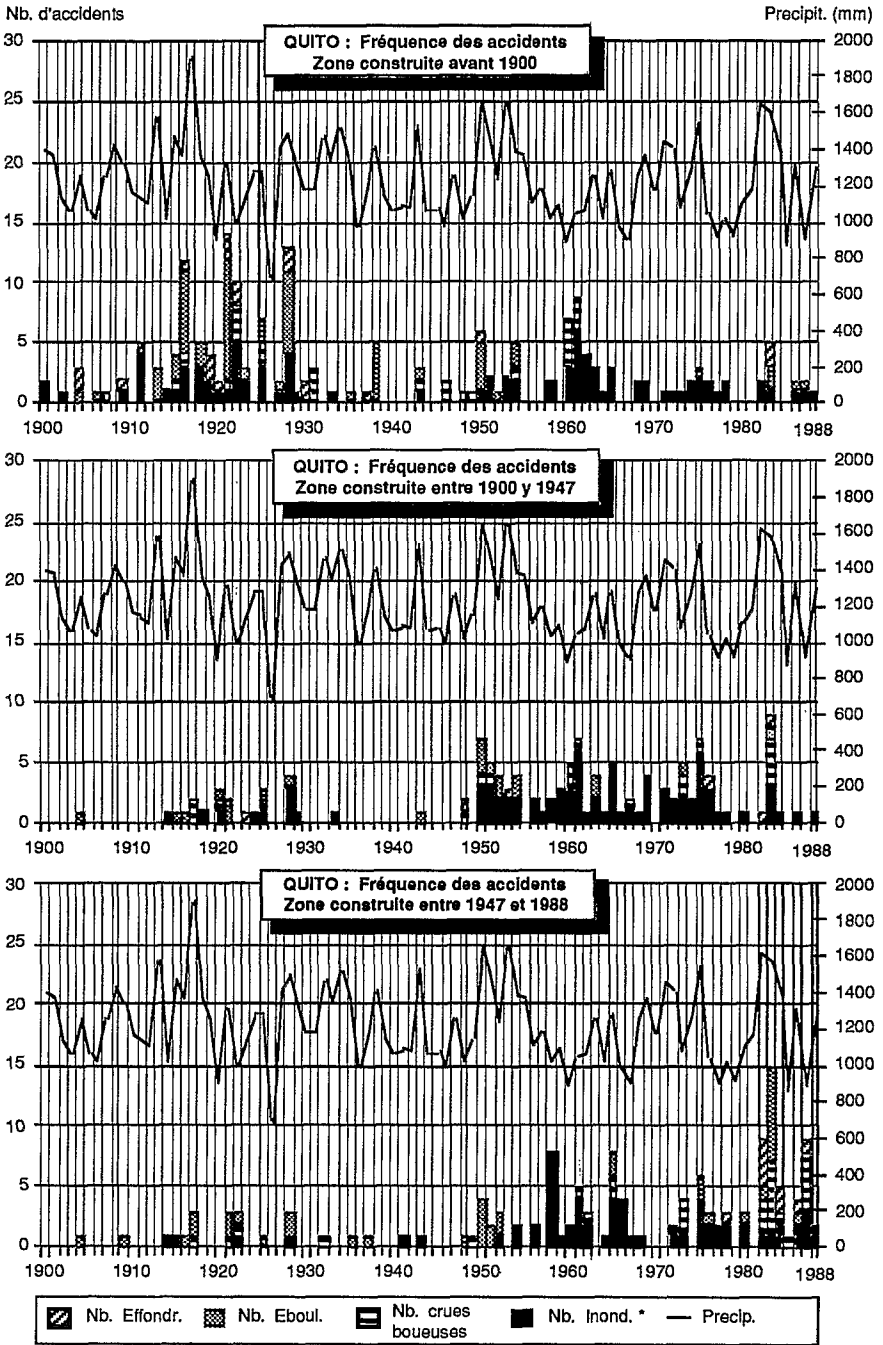


Figure 4

Si la corrélation avec les totaux annuels est mauvaise, celle de la fréquence mensuelle des accidents sur l'ensemble de la période, rapportée à la moyenne mensuelle des précipitation sur 89 années est en revanche très bonne (fig. 5), confirmant que ce sont bien à des accidents du drainage du site urbain que l'on a affaire, dont les modes suivent étroitement ceux des précipitations mensuelles moyennes.

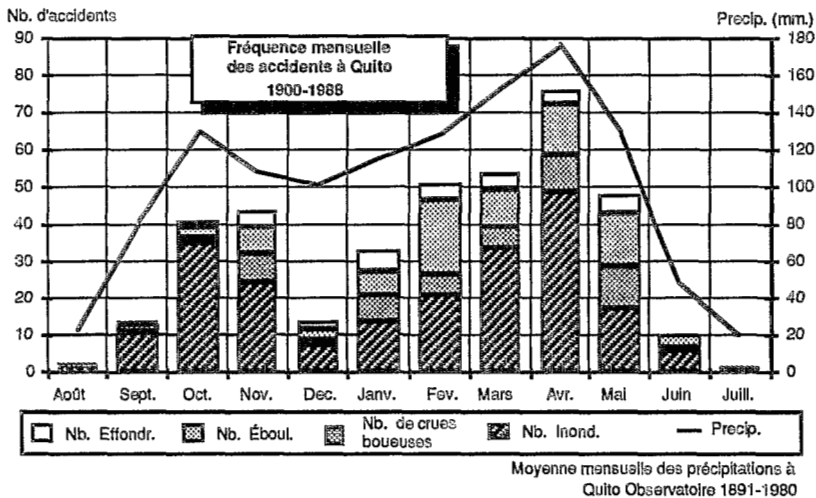


Figure 5. Moyenne mensuelle des précipitations à Quito-Observatoire 1891 - 1980

Le nombre des accidents enregistrés par type et pour chacune des trois zones successives de croissance urbaine est résumé par le tableau 2¹.

La figure 4 indique un déplacement dans le temps des fréquences élevées d'accidents, de la zone bâtie la plus ancienne à la plus récente, conforme à ce que l'on peut attendre : peu d'accidents dans la première moitié du siècle pour les deux auréoles de croissance encore non bâties, et mode principal en 1983, dans la zone la plus récemment urbanisée.

¹Les accidents ont été classés par **zone géographique** quelle que soit leur date, pour pouvoir comparer des fréquences d'occurrence par zone de croissance urbaine. Lorsque des accidents figurent dans une zone avant la période où celle-ci s'est en principe urbanisée, il s'agit alors d'accidents des faubourgs ruraux de la ville : villages, routes et ponts le plus souvent; si des accidents se sont produits dans les champs et les prés, ils n'ont en général pas été relatés : ne gênant pas suffisamment ils ne constituaient pas matière à fait divers dans les journaux de la ville.

Zone construite :	Avant 1900	De 1900 à 1947	De 1947 à 1986	Total**	Total 1900-1988***
	Nombre d'accidents				
Inondations*	89	82	62	233	163
Crues boueuses	24	18	31	73	70
Eboulements	56	21	38	115	114
Effondrements	21	6	9	36	36
Total	190	127	140	457	383

* Nombre d'événements pluviométriques.

** Certains accidents, à cheval sur deux zones, sont comptés à la fois dans l'une et dans l'autre.

*** Dont la première ligne correspond à un nombre d'événements pluviométriques, alors que les trois suivantes comptent tous les foyers géographiques. C'est pourquoi le total de cette colonne ne correspond ni aux nombre de fiches de "Evénements", ni à celui de "Accidents"

Tableau 2 : Nombre d'accidents par zone de croissance urbaine

Ce glissement dans les fortes fréquences annuelles globales s'accompagne d'un déplacement des modes dans la fréquence des éboulements et crues boueuses, dont nous avons vu qu'ils étaient liés : nombreux dans le centre colonial jusqu'en 1930, ils se raréfient ensuite et disparaissent presque après 1963, alors qu'ils sont fréquents dans la zone 1900-1947, et qu'ils constituent le maximum dans celle la plus récemment urbanisée.

La raréfaction des accidents liés à d'importantes mobilisations de terre dans le centre historique doit être mise en relation avec la complète urbanisation de son environnement : les talus, d'autant mieux étayés que l'urbanisation est ancienne, sont plus stables et s'éboulent moins, et les crues boueuses se déclenchent plus haut en amont sur le cours des *quebradas*, là où commence le remblaiement. C'est maintenant la périphérie qui subit ces accidents, caractéristiques de la frange où les bassins-versant voient leur dynamique perturbée par l'urbanisation; certaines parties de la vieille ville ont fait partie de cette frange jusqu'en 1963, mais semblent maintenant à l'abri de ces problèmes.

De plus, même la fréquence des inondations semble régresser dans le centre depuis 1961, dernière pointe enregistrée; dans la mesure où les deux autres zones ont subi en 1982-1984 un nombre important d'inondations et de crues boueuses, il faut sans doute en conclure que l'appareil de drainage du vieux centre a été progressivement amélioré.

La partie de la ville urbanisée entre 1900 et 1947 bénéficie, comme la vieille ville, du calme relatif entre 1930 et 1949, mais connaît ensuite trois décades difficiles. Durant cette période, ce sont surtout des zones plates qui ont été colonisées : ancienne zone marécageuse

de la Mariscal Sucre et replat des anciens quartiers du Sud (Chimbacalle, Villa Flora et La Magdalena), Ceci explique la nette prédominance des inondations et des crues boueuses, le faible nombre d'effondrements, les *quebradas* remblayées dans cette partie de la ville étant peu profondes, ainsi que celui des éboulements, absents des terrains plats.

La zone la plus récemment urbanisée attire l'attention par la forte proportion des crues boueuses et éboulements par rapport à un nombre d'inondations qui reste comparable à celui subi dans les deux autres parties de la ville durant la même période. A cet égard les années 1982 à 84 battent tous les records sur l'ensemble de la période; s'il est vrai que l'année 1983 correspond à un phénomène de *Niño* très accusé et à des inondations catastrophiques dans la région côtière¹, la zone 1900-1947 n'a subi qu'un nombre très moyen d'accidents pour cette période, et le centre colonial en est sorti presque indemne.

Cette forte proportion d'accidents dans les zones récemment urbanisées traduit la colonisation de nombreux versants en pente forte, et l'accélération considérable des travaux de remblaiement des *quebradas* : le début des années 80 voit la construction de l'Avenida Occidental, boulevard périphérique qui contourne la ville par le pied des pentes du Pichincha en coupant 68 de ses *quebradas*, et subit depuis cinq ans une crue boueuse chaque année. Dans le sud de la ville se développent actuellement de nombreux lotissements neufs qui remontent sur les bords de la cuvette, et fournissent également une part appréciable des accidents des dernières années. C'est donc dans la partie la plus récemment urbanisée que le déplacement de la zone sensible du centre vers la périphérie de la ville est le plus net.

La distribution spatiale

La cartographie diachronique des accidents² (fig. 6) confirme cette analyse : les crues boueuses, très présentes dans le centre historique entre 1900 et 1967, y disparaissent ensuite. Au cours de la période 1968-88 elles sont localisées à la périphérie de la ville, ce qui apparaît nettement au sud du Panecillo, alors qu'au nord le phénomène est moins net, masqué par la grande extension des crues boueuses. Pourtant dès le début du siècle on note des crues boueuses au pied des grandes *quebradas* du Pichincha, dans des zones non

¹ *El Niño* correspond à un phénomène océanique sur les côtes du Pérou et de l'Equateur, qui entraîne les années où il se produit des précipitations fortes sur le continent. Sensible dans la Sierra équatorienne de janvier à juin 1983, il a entraîné une hausse du total annuel et une plus forte irrégularité des précipitations, sans toutefois affecter de façon significative l'intensité des averse ni augmenter les totaux journaliers (cf. Nouvelot et Pourrut, 1986).

² Pour la cartographie, les accidents ont cette fois été classés *selon leur date* en trois périodes (48, 20 et 21 années), et non plus par zone comme pour l'étude de fréquence. Maintenir ce dernier type de classement reviendrait en effet à cartographier simplement la croissance urbaine par la localisation des accidents, information de peu d'intérêt.

urbanisées où le drainage naturel a été encore peu touché¹; ces accidents, affectant des ponts, des routes ou des villages de la périphérie rurale de la ville, marquent les zones naturellement sensibles où l'urbanisation n'aurait dû être développée qu'avec des précautions de contrôle morphodynamique du drainage, de préférence maintenu à ciel ouvert.

D'une façon générale les crues boueuses et les effondrements de chaussée apparaissent sur les cartes comme directement liés au réseau de drainage ancien, et il est toujours possible d'identifier clairement pour chacun de ces accidents une *quebrada* responsable. De même les quartiers fréquemment inondés correspondent à des zones de plus faible pente, au pied des versants à forte densité de drainage, comme les secteurs de Chimbacalle, de la Mariscal Sucre, de la Carolina ou de l'aéroport. La superficie de ces zones inondées augmente avec la croissance urbaine, suivant logiquement la détérioration des conditions de drainage du site dans les secteurs peu pentus de la ville.

Enfin les vingt dernières années comportent deux crues boueuses de gravité et d'extension exceptionnelles : l'*aluvión* de La Gasca de 1975 (Q. *Pambachupa*), qui est arrivé jusqu'au quartier de la Mariscal Sucre, et au nord celui de la Q. Rumiurcu de 1983, qui a affecté la nouvelle avenue Occidentale et le quartier de Cotocollao, ancien village de la périphérie, et s'est répété trois fois au cours de la période étudiée sans qu'il soit cependant possible de comparer clairement la gravité de ces récurrences. A en juger par leur extension, et en l'absence de données pluviométriques horaires anciennes, ces deux accidents semblent correspondre à des événements pluviométriques d'intensité exceptionnelle.

¹ Encore que la "plaine de Quito" soit occupée depuis longtemps, et que les documents cartographiques de 1930 y montrent certains tracés de *quebradas* en baïonnette, de toute évidence retouchés pour les besoins de mise en culture des *haciendas*.

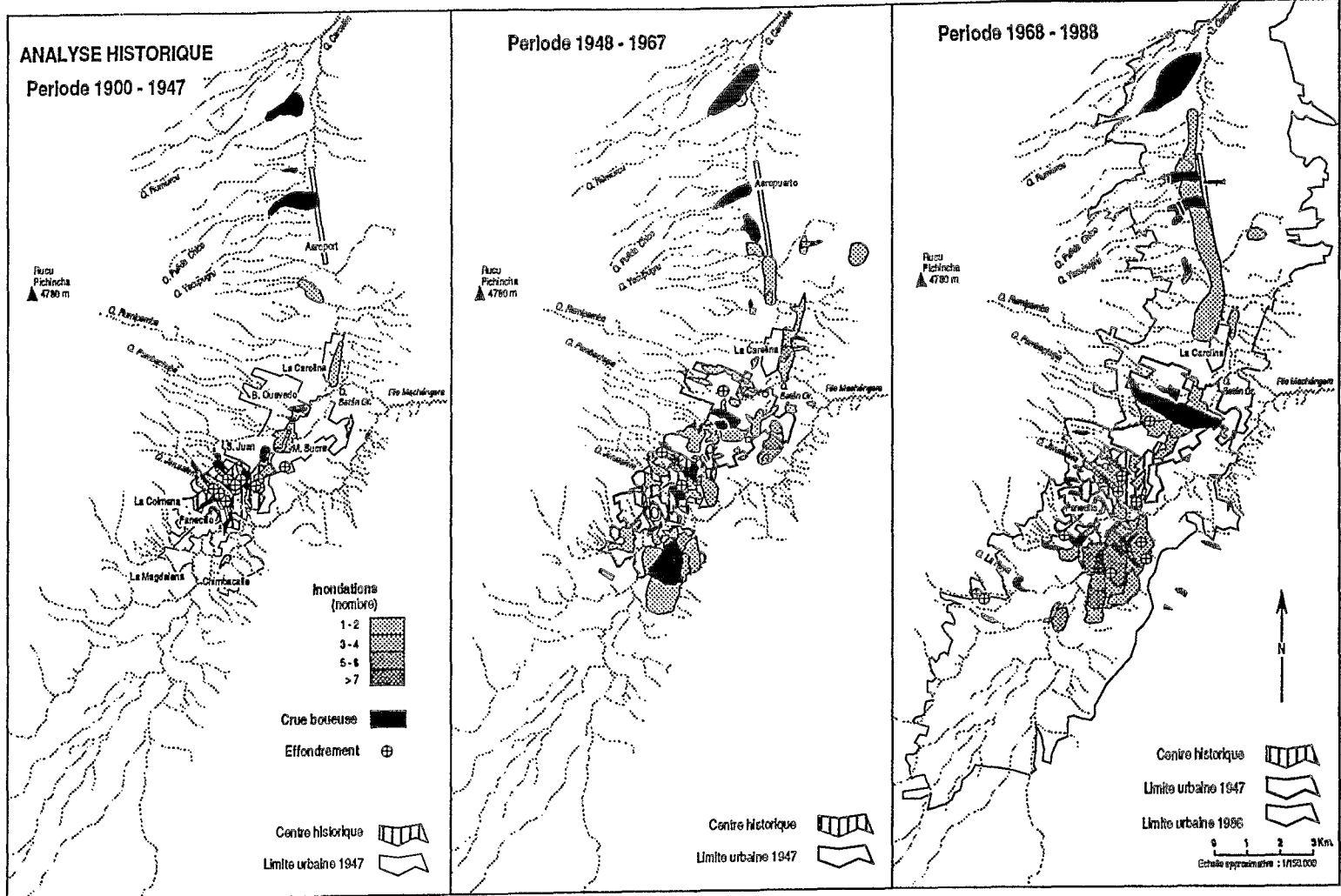


Figure 6

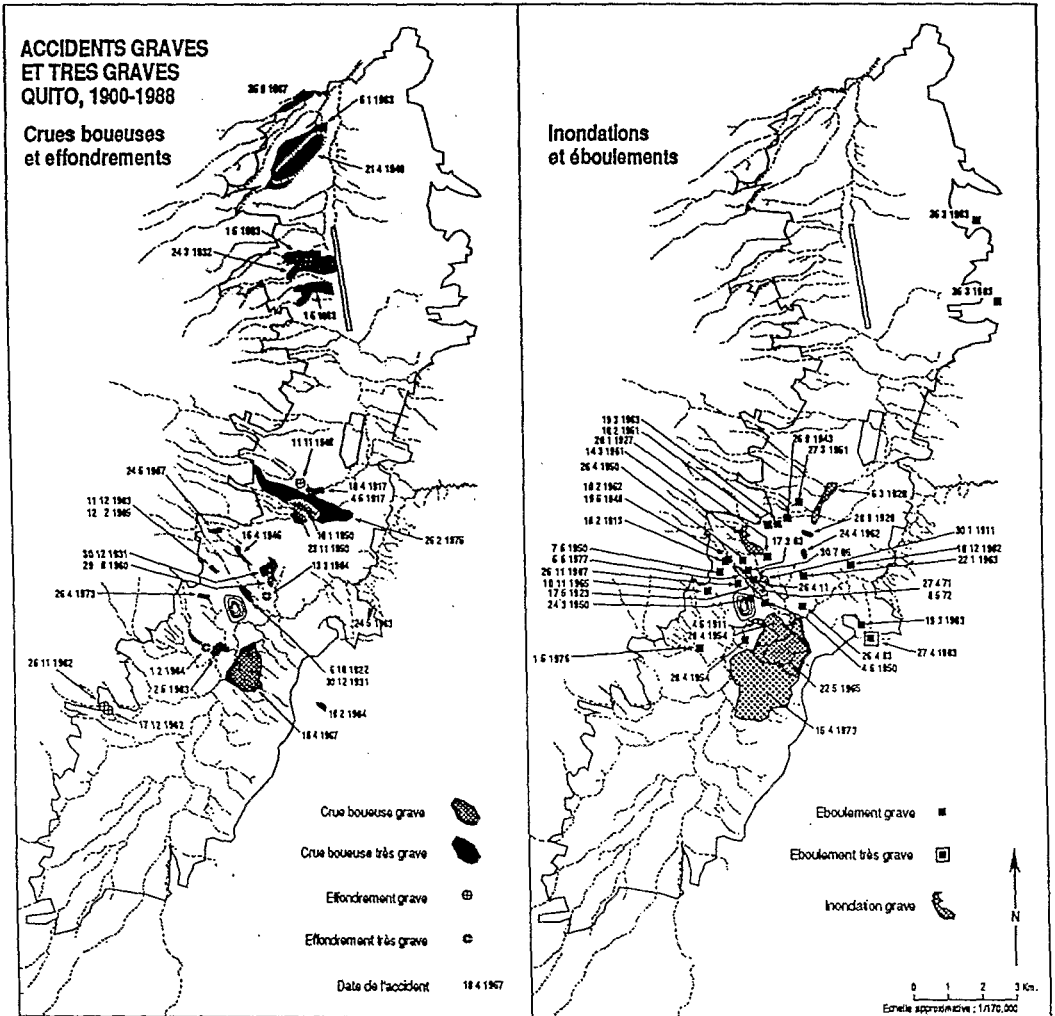


Figure 7

Gravité des accidents

Les zones sensibles aux problèmes du drainage dans la ville identifiées, tous ces événements ne sont cependant pas également destructeurs : nombre d'entre eux ne constituent qu'une gêne passagère alors que d'autres causent des dégâts graves et des pertes en vies humaines, et l'identification des zones réellement menacées par les phénomènes morphodynamiques doit également tenir compte de la distinction du degré de gravité de leurs effets selon le classement indiqué en figure 1.

Au total 71 accidents ont causé des dégâts importants ou très importants et/ou des morts et des blessés depuis 1900, selon la distribution résumée dans le tableau 3. La cartographie de ces accidents graves (gravité 1) et très graves (gravité 0, figure 7) ne change pas significativement la distribution observée en figure 2 et 6, à l'exception du centre historique, surtout touché par des accidents relativement bénins.

Type d'accident	Gravité 0	Gravité 1	Total
inondations	0	15	15
crues boueuses	4	20	24
effondrements	2	3	5
éboulements	1	26	27
Total	7	64	71

Tableau 3

L'analyse de la sélection réalisée appelle deux remarques :

- sur 163 épisodes d'inondations qui affectent la ville, seul un petit nombre d'entre elles sont graves;
- tous les accidents très graves se sont produits entre 1973 et 1984, soulignant une réelle aggravation probablement liée à l'ampleur croissante des grands travaux de l'urbanisation récente.

Une autre sélection réalisée sur le fichier concerne le nombre de morts rapportés par les journaux (accidents de gravité 1), qui fournit le chiffre de 168 morts sur l'ensemble de la période. Il s'agit là d'une estimation approchée, le journaliste n'ayant pas toujours donné le nombre exact des victimes; lorsqu'il n'est mentionné que "*varios muertos*" nous avons supposé 5 victimes correspondant à la moyenne des articles qui fournissent cette précision; enfin le nombre de blessés n'étant que rarement mentionné, il n'est pas possible de traiter cet indicateur. Sur 168 morts, 82 sont dûs aux seuls éboulements, type d'accident le plus meurtrier, et 70 aux crues boueuses; les inondations sont responsables de 14 victimes, et un seul effondrement a fait 2 morts.

Même en supposant que les journaux aient assez souvent sous-estimé le nombre des morts lors d'un accident, voire omis leur existence, on ne dépasse probablement pas le chiffre de 250 victimes des accidents morphodynamiques en 89 années, soit un peu moins de trois par an en moyenne. Il s'agit là d'un chiffre relativement faible, comparé par exemple à l'importance du nombre annuel des victimes d'accidents de la circulation en ville, qui relativise bien la gravité somme toute faible ou moyenne de ce type d'accidents par rapport au danger des risques sismiques ou volcaniques, où le nombre des victimes pourrait se compter par milliers. En ce qui concerne les dégâts matériels les descriptions fournies par les journaux sont trop imprécises pour permettre une estimation, même approchée; notons simplement que les véritables destructions de maisons sont rares hormis lors des éboulements, et que c'est peut-être dans le domaine des réparations de voierie que l'on enregistrerait les coûts les plus élevés.

Croissance urbaine et gestion du milieu

Les problèmes majeurs du site urbain sont directement liés au remplacement du système naturel de drainage des *quebradas* par un réseau d'égouts, lequel ne peut être techniquement dimensionné pour évacuer les crues brutales et violentes de ces torrents lors des précipitations les plus intenses d'un climat équatorial de montagne. Au seul point de vue géomorphologique, prétendre évacuer les débits de pointe des *quebradas* du Pichincha – et la charge solide qui leur est nécessairement associée – par le seul réseau des égouts urbains constitue une gageure. Il est clair que la solution la plus sage aurait été d'aménager à travers la ville des écoulements à ciel ouvert, en assurant la circulation par des ponts; mais l'urbanisation s'est faite – suivant une tradition très ancienne – en remblayant les drains, et la situation est maintenant irréversible, sauf à envisager un utopique remodelage de la ville, politiquement impensable. Les solutions résident en une gestion correcte de l'environnement urbain : amélioration des égouts, stabilisation des versants et *quebradas* à l'amont, et contrôle de la croissance urbaine, en comparant le coût croissant des investissements de protection et celui, économique et social, des dégâts prévisibles.

Nous avons vu cependant que la vieille ville connaît depuis bientôt vingt ans une certaine stabilisation, due peut-être à des travaux d'amélioration du drainage, et plus certainement à la meilleure protection que lui offrent maintenant les nouveaux quartiers développés à sa périphérie. Ce sont ces quartiers des auréoles récentes de la croissance urbaine qui paient actuellement le plus lourd tribut en accidents du drainage proprement dit, ainsi qu'en éboulements dans les zones pentues. Les accidents qui affectent Quito depuis le début du siècle constituent ainsi plus un problème de croissance urbaine mal maîtrisée, en termes d'aménagement et de gestion du milieu, que des accidents d'origine morphoclimatique proprement dits. Ce qui fait problème, c'est moins la dynamique érosive et l'alluvionnement d'un milieu de montagne, qui gênait peu

en environnement rural, que la présence même de la ville sur les lieux où s'exerce cette dynamique, ainsi que la façon de la contrôler.

4. PROBLEMES D'ECHELLE

La première question qui se pose est celle, pratique, du volume des données à recueillir, a priori totalement inconnu, personne n'ayant la moindre idée du nombre des accidents (même approché) survenus dans la ville depuis le début du siècle. Par contre le volume des exemplaires du quotidien à explorer pouvait être estimé : environ 27 800 numéros d'*El Comercio* à parcourir, page par page, pour en extraire tout ce qui touchait au risque morphoclimatique de 1900 à 1985 (la présence sur place de l'auteur ayant permis de suivre en direct les événements des dernières années). Ce travail a occupé un enquêteur à plein temps durant un an et demi¹ pour le seul recueil de l'information de base.

La seconde question d'échelle qui a déjà été évoquée est celle, classique, du passage de l'échelle de travail initiale (1/15 000ème) à celle de publication (1/150 000ème environ), plus complexe qu'elle n'y paraît. C'est à ce stade que les trois cartes de fréquence établies par période ont pu être confrontées entre elles, ainsi qu'au fichier des courbes de niveau et surtout à celui du réseau de drainage, non figuré sur le plan de base. La généralisation de l'information qui intervient à ce stade revêt du reste une signification nettement plus importante que sa classique fonction graphique d'amélioration de la lisibilité : nous avons vu que la cartographie initiale a été construite à partir des imprécisions inhérentes à l'information de base, et que le tracé des limites de chaque accident reste approximatif dans le détail. Leur représentation à l'échelle qui permet de figurer le pâté de maison (1/15 000ème) est donc illégitime, laissant supposer une précision que cette information ne possède pas. Par contre à petite échelle la localisation des points, du "centre de gravité" des taches, de même que leur importance relative restent valides, malgré les approximations et interprétations de la cartographie de base. C'est la perception de la superficie relative des taches et de leur disposition entre elles, ainsi que par rapport au réseau hydrographique, qui est significative en termes d'identification des zones sensibles de la ville, et non leur figuré ou localisation exacts.

Autre question d'échelle plus complexe, celle qui s'est posée pour représenter dans l'espace une série temporelle d'événements, alors que cet espace varie dans le temps. Par la nature même de l'information-source, un accident morphoclimatique n'a été rapporté par la presse que lorsqu'il constituait une gêne pour la collectivité, survenant en milieu construit. A l'exception de quelques accidents graves affectant un village, une route ou un pont, ces accidents sont donc des phénomènes qui n'ont *eu de mémoire*

¹ Que Juan Sarrade soit ici remercié pour la qualité de son travail patient... et souvent insalubre, la poussière des journaux archivés étant redoutable.

qu'urbaine; survenant en plein champ, même s'ils tuaient quelques vaches, ils n'ont pas attiré l'attention de la presse, et ces événements n'ont existé que dans l'enveloppe de la croissance urbaine, mémorisée par les limites d'une série de plans successifs. La représentation de la série des accidents passait donc par une série de cartes exprimant les événements survenus au cours de tranches de temps successives, selon un pas de temps déterminé par la date des plans disponibles qui définissaient six tranches d'inégale durée (plans de 1888, 1922, 1947, 1952, 1968, 1973, 1986); ces périodes correspondaient à un nombre très variable d'accidents pour chaque tranche, ce qui ôtait toute signification à une telle série diachronique de cartes. Sur la base de l'étude de la fréquence annuelle, on n'a donc retenu que les trois périodes (48, 20 et 21 années) qui divisaient le plus également possible l'ensemble de la série (respectivement 175, 219 et 173 accidents).

A noter que lorsque l'analyse de la série temporelle est cartographique, c'est la date des accidents qui pilote logiquement la ventilation selon la tranche de temps considérée, alors que l'analyse du rythme d'occurrence au sein des trois zones de croissance urbaine (correspondant aux mêmes périodes) doit être conduite sur la base de la localisation, par zone de croissance, des accidents quelle que soit leur date. Dans le premier cas la question posée est : où se situent les accidents de telle période ? Dans le second elle est : dans telle zone de croissance urbaine, quel est le rythme d'occurrence des accidents ? Selon que l'échelle d'analyse est spatiale ou dans le temps, l'approche doit être modifiée pour être significative.

Autre cas particulièrement net de variation de la perception selon l'échelle temporelle, celui de la faible corrélation du nombre annuel des accidents avec les totaux annuels des précipitations (figure 4), contrastant avec la très bonne correspondance du nombre mensuel des accidents sur l'ensemble de la période avec la moyenne mensuelle interannuelle des précipitations (figure 5). La série pluviométrique est la même dans les deux cas, de même que les décomptes du nombre des accidents. Mais dans un cas on décrit un rythme sur l'ensemble de la période, année par année et en termes de totaux, alors que dans l'autre on exprime un rythme au sein d'une année moyenne, en comparant moyenne mensuelle interannuelle de pluie et total, mois par mois, du nombre d'accidents au cours de toute la période.

Dernier problème d'échelle enfin : tous les accidents ne sont pas de même nature quant à leur comportement dans l'espace. Les inondations par excès de précipitations (par rapport aux capacités d'évacuation) peuvent couvrir des superficies considérables, contrairement aux trois autres types d'accidents, beaucoup mieux circonscrits. Ceci a justifié un traitement distinct selon qu'il s'agissait d'analyse spatiale ou en termes de fréquence : on a ainsi cherché à identifier les foyers dans des "enveloppes" ayant souvent caractère de continuum pour cartographier les zones les plus gravement (et les plus fréquemment) inondées, ou bien l'on a compté des événements pluviométriques lorsqu'on cherchait à comparer des nombres d'accidents pour en tirer des conclusions quant aux rythme d'occurrence.

REFERENCES

- DE NONI B. et G., FERNANDEZ M.A. et PELTRE P. - 1986 : Accidents climáticos y gestion de las quebradas de Quito. Analisis del "aluvión" de la Raya del 23 de Enero de 1986. pp. 25 - 44, 1 carte coul., *in* : Paisajes geográficos (Revista del CEPEIGE) n° 17, Quito, Juillet 1986.
- DE NONI B. et G., FERNANDEZ M.A. et PELTRE P. - 1988 : Drainage urbain et accidents climatiques à Quito : analyse d'un cas récent de crue boueuse. pp. 225 - 249 *in* : Cahiers des sciences humaines vol. 24 n° 2.
- PELTRE P. - 1989/a : Les accidents du drainage urbain à travers la presse. Quito (Equateur) 1900-1986. pp.318-334 *in* : Tropiques, lieux et liens. Col. Didactiques, ORSTOM, Paris, 1989.
- PELTRE P. - 1989/b : Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988. pp. 45-91 *in* : Estudios de Geografía n° 2, "Riesgos naturales en Quito. Lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi", 92 p., Colegio de Geógrafos y Corporación Editora Nacional, Quito.
- PELTRE P. - 1990 : Risque morphoclimatique urbain. Quito (Equateur) - Période 1900-1988. 22 p., inédit (version française du précédent.)

LIEUX ET ROUTES EN MELANESIE

BONNEMAISON J.

RESUME

De même qu'il existe plusieurs conceptions du monde et de l'histoire, il existe des conceptions différentes de l'espace, qui peuvent être antagonistes et fondées sur des "idéologies géographiques" au sens large. L'idéologie géographique occidentale est fondée sur la spatialité différentielle. Elle repose sur le système de la parcelle et de la frontière, c'est-à-dire sur le découpage du monde en ensemble spatiaux homogènes et séparés. D'autres modèles existent dans l'Océanie traditionnelle, où le monde est perçu comme un archipel animé et réuni par des réseaux. Ce n'est pas la spatialité différentielle qui compte, mais la spatialité réticulée des lieux et des routes. Le modèle des chaînages linguistiques en fournisse un exemple.

INTRODUCTION

Les hommes des îles mélanésiennes ne sont pas d'espace, mais de lieux. Leur regard creuse la terre. Ce sont des arbres aux racines profondes qui creusent vers le bas, vers les assises magiques du monde. La vérité, la croyance de ces hommes se tient là, dans la profondeur vertigineuse du lieu et dans la communion avec les entrailles de la terre, un ventre dont ils sont le sang.

Les lieux mélanésien ne sont donc pas d'étendue, mais de profondeur. L'arbre est la métaphore de l'homme ; il s'élançait vers l'infini du ciel parce que ses racines cheminent dans la profondeur de la terre. L'homme qui se tient droit dans son lieu plonge avec lui dans la profondeur. De même lorsque l'arbre croît verticalement, il ne s'agit pas pour lui de gagner en surface, mais de s'élever, car l'étendue est une valeur horizontale et flottante, seul compte ce qui est vertical : la profondeur prime sur l'étendue.

Le paysage est ponctué d'arbres et de racines, l'espace est parsemé d'hommes-lieux. L'enracinement est sans doute la première des valeurs du peuple mélanésien.

Mais si les lieux font les hommes, ce sont les routes qui font les lieux. Ce peuple insulaire a conservé la mémoire de son origine, il est autant un peuple de voyages que de racines, un peuple de lieux qu'un peuple de routes.

Par des métaphores, la pensée mélanésienne exprime la dualité de l'origine. L'homme est un arbre, la société est une pirogue. L'identité de l'homme est donnée par le lieu, mais sa pirogue le tire vers la route. La pirogue n'existe que grâce à l'arbre où elle est creusée, mais son destin est de s'éloigner, de suivre une route qui mène de lieu en lieu, d'île en île. Elle est donc une valeur-voyage, un "territoire errant", qui tisse un lien entre les groupes locaux enracinés.

De chaque lieu partent en effet des routes dont le tracé en étoile dessine des itinéraires collectifs : si l'homme seul doit rester rivé à ses lieux, il doit en groupe explorer les routes de sa pirogue. L'échange avec l'extérieur est à ce prix et bien souvent l'alliance de mariage. Pas plus qu'il ne peut y avoir de lieu sans route, il ne peut y avoir d'homme sans pirogue. L'homme-arbre ne vit que par le groupe-pirogue qui lui donne les alliances nécessaires à sa survie et à sa reproduction.

Le territoire de la Coutume apparaît comme un segment de route, un nexus de lieux, un système d'arbres et de pirogues. L'espace insulaire est perçu comme la mer, le but n'est pas de le posséder, mais de le parcourir. Les lieux eux-mêmes sont des grappes d'îles égrénées le long des routes que suit la pirogue. Chaque territoire est un archipel de lieux entouré par une étendue mouvante de terre ou de mer que les routes de pirogues parcourent jusqu'à d'autres îles-lieux qui font partie de l'horizon de l'alliance et qui reproduisent plus loin le même système. et l'ouvrent vers d'autres routes

L'image de l'espace insulaire -l'île entourée d'eau que l'on atteint en pirogue- se reproduit dans les métaphores de l'organisation mentale de l'espace. Par la force de cette vision, l'espace déchiré redevient uni : l'homme de la pirogue peut enfin vivre sur l'île, comme s'il n'en était rien, comme si la rupture du lien n'avait jamais eu lieu, comme si "*l'harmonie préétablie*" était enfin retrouvée. Il compense alors le manque d'espace de ses territoires par la profondeur de ses lieux, il oublie la finitude de son espace grâce à l'infinité de ses routes.

La société mélanésienne s'affirme comme une société de racines et de voyages : ses arbres sont des pirogues et ses pirogues sont des arbres. Les territoires mélanésiens sont des réseaux de lieux égaux et interdépendants connectés par des cheminements d'alliance.

S'il n'avait pas gardé au plus profond de son identité cette ambiguïté initiale, l'homme des îles serait peut-être devenu fou. Les îles sont en effet les segments coupés d'un trajet-fondateur ; si le trajet meurt, chaque île revient à la solitude absolue de la déchirure originelle.

La société mélanésienne a cherché constamment à maintenir ouvert le lien qui permet le trajet. Elle a cherché à pallier le confinement de

l'espace en diversifiant son territoire, en l'enrichissant d'autant de signes et de lieux-symboles qu'il lui était possible d'en inventer ; elle a cherché ensuite à en briser les isolements physiques en faisant de chacun de ses lieux un carrefour de routes.

Les sociétés de l'archipel sont donc des sociétés du réseau construites dans un espace de relation aux structures fluides. Elles visent à redonner par la culture un lien que la nature refuse et à recréer un espace d'harmonie et de continuité dans un univers heurté par des ruptures physiques. Peut-être le paradigme de la société traditionnelle tient-il dans cette recherche du lien culturel qui réunit ce que la nature sépare ; peut-être repose-t-il sur la réponse de la culture dans le face-à-face qui la confronte à la nature. Les îles mélanésiennes dans cette perspective ne se sont jamais acceptées comme des îles ; elles restent ce qu'elles ont toujours été depuis le temps des origines, c'est-à-dire des pirogues, qui tissent les formes d'un réseau en toile d'araignée.

La métaphore de l'arbre et de la pirogue participe ainsi à un mouvement de pensée qui crée une vision de l'espace qui produit elle-même une conception de la société. Dans la vision traditionnelle de l'espace, faite d'entrecroisements de routes, d'enracinements de lieux, se succédant les uns aux autres, les territoires sont des grappes de lieux et l'espace lui-même est un système réticulaire, dont les mailles plus ou moins fines ou plus ou moins lourdes visent moins à encadrer l'étendue qu'à l'animer par le parcours.

L'espace réticulaire qui en ressort se construit sur des chaînages de lieux qui forment des routes d'alliance, et sur des territoires qui se succèdent le long d'un itinéraire. Le modèle en est donné par le "tissu de nexus" de l'espace linguistique mélanésien ; les quelques 100 ou 120 parlars de l'Archipel ne correspondent pas à des aires linguistiques, mais à des segments qui s'emboîtent en chaîne, créant ainsi des cheminements d'intelligibilité qui quadrillent l'Archipel. Les groupes mélanésiens sont du même ordre : ce ne sont pas des groupes clôturés par une "frontière", mais des réseaux de petites sociétés locales en communication constante les uns avec les autres selon leurs relations de proximité.

L'espace dans la société mélanésienne traditionnelle n'est donc pas perçu par ses divisions, ou par ses limites, mais par ses relations de route ; certaines routes sont amicales, d'autres sont hostiles. Les lieux eux-mêmes tirent leur justification profonde non pas de leur stabilité, mais de leur position sur la route. On comprend dès lors pourquoi le groupe local se définit à Tanna par la métaphore de la pirogue, car ce n'est pas la terre "possédée", mais la route suivie, c'est-à-dire ses alliances, qui en définitive fonde l'identité du groupe.

L'espace de la pirogue se confond avec le trajet qu'elle parcourt, avec la succession des segments de route mis bout à bout qui composent la route d'alliance. A chacun de ces segments correspond un territoire, c'est-à-dire un nodule, ou encore une maille plus ou moins stable et

plus ou moins lourde, mais qui n'existe que par la relation structurelle qu'elle entretient avec les autres mailles du réseau.

Ici, point de lieux centraux. L'organisation de l'espace selon des coeurs vivants et des périphéries déprimées est une réalité nouvelle issue de la construction étatique coloniale et de l'impact des réseaux modernes de commerce et de production. L'espace de la coutume pose à l'inverse comme axiome que chacun des lieux qui se succèdent sur la route est l'égal des autres. Pour que la relation puisse se poursuivre, l'existence et la bonne entente de chacun des segments de la route est en effet indispensable. Si l'un des chaînons saute, si l'un des lieux meurt, si l'un des lieux fait sécession, la route se brise : chaque lieu est donc l'indispensable complément de l'autre et par là son égal. La société du réseau ne peut fonctionner que par les connections multiples que chacun de ses éléments entretient en ordre topologique successif avec les autres.

Si l'espace réticulaire est une structure nouée par un système fluide en "tissu de nexus", il ne peut admettre de centre, par contre il vit par ses "fondations", les seuls lieux peut-être qui forment dans cet univers mouvant des points véritablement stables. Les routes mélanésiennes convergent vers des carrefours où elles se nouent à d'autres, mais elles remontent aussi vers les lieux de fondation qui sont ceux de leur commencement. En ces lieux de départ, se tiennent les principes fondamentaux de *l'origine*. A la différence du *lieu central* qui fait converger vers lui le reste de la structure, le *lieu de fondation* au contraire rejette vers l'extérieur les forces qui sourdent en lui ; loin de créer des périphéries, il recrée plus loin en d'autres lieux, des "mêmes", qui se succèdent en chaîne et portent son propre pouvoir ou une parcelle de celui-ci. Le lieu d'origine ou "primordial" produit l'espace reticulé et l'anime tout entier de son mouvement.

Du lieu jaillit la route mélanésienne qui continue de proche en proche et de loin en loin. La pirogue mélanésienne a pour destin d'étendre la relation d'alliance jusqu'aux plus lointaines limites de l'infini. Cet horizon ne se boucle pas sur lui-même, le lien qu'il projette est littéralement sans fin.

Cette perception de l'espace saisi comme une route engendre la société du réseau. Ce type de société ne peut exister que parce qu'il repose en sous-jacence et en harmonie avec un espace reticulé. A tout prendre l'espace n'est pas ici un "produit", il représente au contraire ce qui fonde la société et lui permet de se reproduire. En d'autres termes, comme l'écrivent F. Paul-Levy et M. Segaud "*les configurations spatiales ne sont pas seulement des produits mais des producteurs de systèmes sociaux ou, pour faire image, n'occupent pas seulement la position de l'effet mais aussi celle de la cause*" (L'Anthropologie de l'Espace, 1983, p. 19).

**DU 1/50000 AU 1/1000000,
POINTS DE VUE SUR
LES PAYSAGES DE L'EQUATEUR**

GONDARD P.

RESUME

Découper un territoire en zones homogènes d'utilisation du sol revient à délimiter des paysages agraires qui sont, aux différentes échelles de la perception et de la cartographie, des espaces d'égal raisonnement, communs à plusieurs disciplines.

RESUMEN

La división de un territorio en zonas homogeneas de uso del suelo viene a ser la delimitación de paisajes agrarios que son, en las diferentes escalas de percepción y de cartografía, espacios de igual racionamiento, comunes a varias diciplinas científicas.

MOTS CLES

Paysages agraires, utilisation du sol, cartographie, échelles, interdisciplinarité, Equateur.

PALABRAS CLAVES

Paisajes agrarios, uso del suelo, cartografía, escalas, interdisciplinaridad, Ecuador.

Lorsque le ministère de l'agriculture de l'Equateur a signé avec l'ORSTOM la convention qui a lié pendant si longtemps les deux organismes, notre partenaire avait un objectif, la régionalisation agricole, et un des moyens d'y parvenir lui paraissait être de dresser la carte agricole du pays. Nous devons dire pour notre part, ce que pouvait être cette carte, ce qu'elle pouvait contenir et surtout,

comment on pourrait la réaliser ..., comme s'il pouvait y avoir une carte agricole sans en préciser l'objet. Autant d'objets étudiés, autant de cartes possibles. Or toutes les disciplines traitant du milieu et des sociétés étaient conviées à participer à ce "festival de la recherche". Il y avait bien en effet un aspect festif, presque ludique, à démarrer, dans l'enthousiasme de tous les débuts, une recherche aussi ambitieuse sur un territoire aussi vaste et dont nous connaissions... si peu de chose.

Si l'objectif lointain était bien la régionalisation agricole du pays, la tâche immédiate nous paraissait être de répondre à l'exigence de connaissance qu'il nous était demandé de satisfaire. Elle était formulée sous le terme d'"inventaire". Chacune des disciplines aborda le défi avec ses outils les plus familiers et, sans trop schématiser, on vit rapidement se dessiner le groupe des tenants de la carte et celui des enquêtes. Je devais pour ma part prendre en charge la cartographie de l'utilisation du sol.

Sans vouloir réécrire l'histoire et sans la prétention de livrer une réflexion ou une méthodologie définitives, peut-être vaut-il la peine de montrer, comment l'on est passé d'une échelle à l'autre, du 1/50 000 au 1/1 000 000 et, en ces temps d'interdisciplinarité qui se cherche, comment des disciplines de sciences sociales, plus habituées au traitement du nombre et aux enquêtes ou, pour d'autres, à l'analyse de stations et de fouilles, ont pu trouver dans la carte des paysages agraires, à telle ou telle échelle, une nouvelle approche de leur objet.

QUE CHERCHER ?

Je crois qu'une des intuitions essentielles de notre recherche a été de se fixer d'abord sur les éléments déterminant l'utilisation du sol, plutôt que sur l'utilisation elle-même. Nous aurions pu présenter les différents usages, selon les légendes classiques, en terres de labour, prairies, jardins, vergers etc. Nous ne l'avons pas voulu. Dans notre démarche, ce classement est bien sûr possible, mais a posteriori, sur des types d'utilisation originaux, correspondant aux réalités particulières du pays étudié. Au lieu d'appliquer des grilles de lecture préétablies, nous avons cherché à construire notre objet à partir de l'observation directe sur le terrain. La question fondamentale étant alors "qu'est-ce qui fait varier l'utilisation d'un lieu à un autre et non qu'y a-t-il là ?" Le pourquoi de la diversité plutôt que la diversité elle-même.

Au terme d'une attentive observation des lieux et de la variation des mises en culture des vallées et des versants, des pentes les plus abruptes et des plaines, des oasis andines et des terroirs indigènes, des grasses prairies et des cultures sous pluie, dans les limites d'un oekoumène borné par les glaces, la forêt tropicale sempervirente et le désert, la variation des formes d'utilisation du sol nous a paru être toujours liée aux variations des quatre éléments.

L'altitude d'abord. Dans ce milieu montagnard compris entre 300 m., sur les piémonts, et 6310 m. au Chimborazo, l'étagement des formations végétales et des cultures sur le versant est le fait fondamental de variation. Quelle que soit l'exposition, au vent ou sous le vent¹, quelle que soit la situation, dans le couloir interandin ou sur les versants externes, toute variation de l'altitude entraîne une variation des températures et des précipitations, immédiatement perceptible dans la végétation et reflétée dans l'utilisation du sol. A petite échelle, sur l'ensemble de la cordillère, c'est l'élément le plus explicatif.

A grande échelle, dans une même région et dans un même étage climatique la structure agraire, l'irrigation et l'érosion sont déterminantes pour expliquer les variations latérales de l'utilisation du sol. **La structure agraire** n'est bien sûr pas perceptible directement sinon à travers ses effets sur le parcellaire. Nous avons là l'*indicateur* privilégié des composantes socio-économiques des systèmes de production andins. La différence est tellement marquée entre le minifundio et l'hacienda qu'il n'y a pas d'erreur possible. la petite parcelle signe la petite propriété, la grande parcelle signe la grande propriété².

L'irrigation intervient à son tour, dans l'une ou l'autre de ces 2 mailles parcellaires, pour entraîner une variation sensible de l'utilisation du sol, des espèces cultivées, de pratiques culturelles et en fin de chaîne des performances de la production.

L'érosion enfin, qui dans les Andes stérilise des pans entiers de versant. L'érosion est elle-même conséquence de l'action d'agents naturels ou de l'exploitation agropastorale s'exerçant sur des sols fragiles, soit du fait de leurs propriétés particulières, soit parce qu'ils sont soumis à la pression de la gravité sur des pentes extrêmement fortes. L'irrigation et la taille du parcellaire sont aussi des conséquences, formes particulières d'activités et d'aménagements correspondant à des systèmes agraires que nous ne pouvions définir à cette étape d'observation. Nous avons constaté que nous n'avions pas les mêmes cultures dans les grandes parcelles que dans les petites parcelles, dans les zones irriguées que dans les cultures sous pluies, dans les terrains fertiles que dans les zones érodées.

Le croisement de ces 4 facteurs que nous avons appelé déterminants bien qu'ils soient à la fois cause et conséquences, nous permet cependant de rendre compte pour l'essentiel, de la diversité des situations des systèmes de production andins. Ils en constituent comme le cadre ou la matrice, que nous cherchions et qui a guidé la photointerprétation.

¹ Nous reprenons ici le vocabulaire utilisé pour définir l'exposition dans les îles tropicales. Les grandes chaînes montagnardes ne sont-elles pas des îles dressées sur les plaines avoisinantes, d'où elle émergent abruptement... et perturbent le flux des alizés et contre alizés.

² Et la moyenne propriété... s'apparente socialement, techniquement et économiquement à l'hacienda. Celle-ci se subdivise rapidement. Le latifundio a disparu.

CONTENANT ET CONTENU

Dans l'analyse systématique des photographies aériennes qui couvrent les Andes de l'Equateur (de l'ordre de 2.000), nous n'avons pas non plus cherché à déterminer immédiatement les cultures. Les caractères des clichés ne le permettaient pas, qu'il s'agisse de l'échelle ou de l'hétérogénéité des prises de vue. Nous nous sommes contenté de délimiter des enveloppes dans lesquelles nous savions que l'usage du sol serait homogène, puisque les caractères de l'image, et particulièrement les éléments que nous savions déterminants au terme de l'observation, étaient eux mêmes homogènes à l'intérieur du périmètre que nous traçons.

Les travaux de terrain nous ont ensuite permis d'identifier les cultures et les usages du sol particuliers à chacune des zones élémentaires circonscrites.

Les 3 étapes antérieures, observation préliminaire, photointerprétation et travaux de terrain renvoient à ce que l'on appelle généralement l'acquisition des données. Pour le traitement de celles-ci comme pour l'expression des résultats, nous avons privilégié la cartographie.

LES SERIES CARTOGRAPHIQUES

Nous avons dressé trois séries cartographiques. La première série est à l'échelle du 1/50 000; c'est la carte d'inventaire proprement dit. Elle compte 128 feuilles (les zones inoccupées et exclusivement en végétation naturelle n'ont pas été cartographiées à cette échelle). La deuxième série est au 1/200 000. Elle figure analytiquement les éléments déterminants et les principaux usages du sol. Pour chacune des 11 feuilles qui recouvrent les Andes nous avons retenu de 12 à 13 thèmes, soit autant de coupures par feuille, et au total 150 cartes environ. La troisième série est également au 1/200 000. Elle figure les formations végétales et les systèmes de cultures régionaux. Il n'y a bien sûr qu'une coupure par feuille.

A ces trois séries à grande et moyenne échelle, il faut ajouter quatre autres documents:

- a) un croquis de l'utilisation du sol dans les Andes, dressé au 1/1 000 000 pour donner en comparaison cette cartographie somme toute assez classique, face aux résultats de la cartographie réalisée par M.M. Thomassin à partir de la classification hiérarchique ascendante des données de l'inventaire enregistrées dans le cadre des paroisses (communes)¹.

¹ P.G. in M.M. Thomassin 1988, O.C., texte en vol. 1 pp. 341-352 et carte en vol. 2.

- b) La carte des paysages agraires de l'Equateur au 1/1 000 000¹..
- c) Un chorotype de l'organisation structurale des bassins intrandin²,
- d) Une carte des "principaux types d'utilisation du sol" de l'Equateur au 1/4 000 000³.

ECHELLES ET CONTENUS

Dire que des documents à des échelles aussi diverses sont semblables parce qu'ils traitent du même sujet, serait une illusion. La localisation et l'information thématique qui fondent la cartographie, n'ont pas les mêmes caractères aux différents niveaux étudiés. Les points de vue changent considérablement. Les critères pris en compte pour juger de l'homogénéité (ou de l'hétérogénéité) d'une zone varient avec l'échelle observée.

Le trait mais aussi l'information s'épurent des grandes aux petites échelles. Il y a dans la construction de l'objet à différentes échelles des ruptures du même ordre que celles que les biologistes rencontrent dans l'analyse du vivant, entre l'étude des parties élémentaires et celle du tout qu'ils essaient de saisir. Ces sauts conceptuels tranchent avec le continuum mathématique de la relation entre les mesures sur la carte et les mesures sur le terrain. Prenons quelques exemples.

Au 1/50 000, une longueur de 1 cm. sur la carte représente une distance de 500 m. sur le terrain, et 1 cm² figure 25 ha de superficie; au 1 000 000 les mêmes mesures sur la carte représentent 10 000 m. et 10 000 ha. La difficulté pour le cartographe n'est pas de représenter sur un cm² l'accumulation des objets hétéroclites observés sur 100 km², mais simplement de savoir quoi représenter. L'accumulation est la négation même de la cartographie, et à court terme de la géographie, car elle conduirait fatalement vers des échelles toujours plus grandes et la seule satisfaisante dans cette optique serait le 1/1, reproduction exacte de l'original sans réflexion, sans théorisation, ... sans science.

Un extrait de Suarez Miranda de 1658 dit ceci merveilleusement: «... En cet empire, l'Art de la Cartographie fut poussé à une telle Perfection que la Carte d'une seule Province occupait toute une Ville et la Carte de l'Empire toute une Province. Avec le temps, ces Cartes démesurées cessèrent de donner satisfaction et les Collèges de Cartographes levèrent

¹ EN cours de gravure à l'IGM, Quito. Elément central de la géographie agraire de l'Equateur.

² EN collaboration avec J.P. Deler; à paraître in Mappemonde N° 4, octobre décembre 1990

³P. Gondard, A. Winckell, C. Zebrowski, Agricultura, in Ecuador, Col Atlas del Mundo, Jeune Afrique, Paris, 1982, pp. 45-49.

une Carte de l'Empire, qui avait le Format de l'Empire et qui coïncidait avec lui, point par point. Moins passionnées pour l'Etude de la Cartographie, les Générations suivantes réfléchirent que cette Carte Dilatée était inutile et, non sans impiété, elles l'abandonnèrent à l'inclémence du Soleil et des Hivers. Dans les Déserts de l'Ouest, subsistent des Ruines très abîmées de la Carte. Des Animaux et des Mendiants les habitent. Dans tout le Pays, il n'y a plus d'autre trace des Disciplines Géographiques...¹. D'autres l'ont dit plus banalement, l'amoncellement des connaissances peut être fatal pour la connaissance.

Revenons donc à la question que nous nous posions au début de notre recherche, "qu'est ce qui structure l'utilisation du sol dans les Andes de l'Equateur ?" Posée à cette étape, celle de la communication, elle devient "Quelle logique rendra compte des éléments déterminants reconnus dans la première phase de la recherche?"

La carte est un "système logique"² qui veut donner à voir même ce qui n'est pas directement visible sur le terrain³. Les échelles s'emboîtent, selon l'expression classique, et suivant l'escalier qu'elles forment, dans l'étude d'un même sujet, l'abstraction progresse, de la grande à la petite échelle, des objets concrets vers les objets de raisonnement.

Au 1/50 000 nous cherchions à traduire la multiplicité des informations recueillies lors de l'observation de terrain. Repérage et parfois degré d'importance des éléments déterminants d'une part, pourcentage de l'occupation du sol par les différentes cultures d'autre part. Ceci dans le cadre d'une zone homogène, c'est à dire un espace délimité par un périmètre dessiné lors de la photointerprétation et dans lequel l'observation a révélé une faible variation latérale des phénomènes cartographiés. Cette variation interne est en tout état de cause moindre que celle observée entre cette zone et sa voisine la plus proche dont elle est séparée par la limite formelle que nous avons tracée. Le contenu cartographié est donc à ce niveau très concret et exprimé en pourcentages de culture d'orge, de fève, de pomme de terre ou autres, rapportés à la totalité de la zone.

Il y a cependant déjà une première intervention formelle qui donne à voir cette surface comme un ensemble. Ceci se retrouve dans toute délimitation de zones et aux différentes échelles. L'important est moins de dire, me semble-t-il, pour ce qui nous occupe ici, que cette zone est différente de sa plus proche voisine par telle ou telle de ses composantes, que de proposer au lecteur de la considérer comme un tout, comme un "être à part". C'est à dire un lieu homogène, lieu d'égal raisonnement.

¹ Cf. Suarez Miranda, *Viajes de Varones Prudentes*, Lérida 1658, revu par Jorge Luis Borges. *El Hacedor*, 1960 traduit par Roger Caillois, 1964, cité par S. Rimbert 1968, O.C. p. 2.

² Rimbert S., 1968, O.C., p. 63.

³ L'art ne restitue pas le visible, il rend visible. Paul Klee, *Schöpferische Konfession*, 1920, cité par S. Rimbert en exergue de "Leçons de cartographie thématique" O.C.

Sur les cartes analytiques au 1/200 000 l'élimination de toute autre information permet de donner à voir la distribution d'une culture ou d'un élément déterminant l'utilisation du sol. Nous avons choisi d'appauvrir le contenu tout en conservant la précision du contour des zones. Ces cartes sont directement extraites du 1/50 000 aussi simplement que pourrait le faire n'importe quel ordinateur !

Sur les cartes au 1/200 000 des "types d'utilisation du sol", les contours se simplifient, la figuration de certaines zones est omise et la légende ne permet plus de connaître le contenu précis et chiffré de chaque zone. Le sigle renvoie à une définition dans laquelle ne figurent que les éléments les plus stables d'une zone à l'autre.

Au 1/1 000 000 on simplifie encore les contours, on supprime et on regroupe encore plus de zones. La légende ne fait plus référence qu'aux grands usages.

Au 1/50 000 une zone pouvait être définie par "Petites parcelles situées à 3.400 m d'altitude, sans irrigation, avec une faible érosion et cultivées en Orge sur 60% des surfaces de la zone, en pomme de terre pour 20%, en fève pour 15%, en oxalide et alluques pour 5%". Au 1/1 000 000 nous ne disons plus que orge, fève, pomme de terre. Il y a bien un appauvrissement factuel ; l'enrichissement est conceptuel. Nous savons que pour l'essentiel dans toutes les Andes centrales de l'Equateur ce système de culture est la "face visible" du système de production que les économistes dénomment "économie domestique d'altitude". Nous sommes bien là au 1/1 000 000, au niveau d'une vision nationale, de plain pied avec la macro économie et la planification

PONTS INTERDISCIPLINAIRES ET ECHELLES PRIVILEGIEES D'OBSERVATION

On pourra penser que c'est une bien lente progression qui nous a conduit "du champ de pomme de terre à l'économie domestique d'altitude". Sans doute, mais chemin faisant les compagnons de route ont été nombreux et sans vouloir ni pouvoir les nommer tous, quelques exemples permettent de signaler des niveaux privilégiés de communication.

La carte au 1/50 000 était celle qui éveillait le plus la curiosité des pédologues qui travaillaient à cette même échelle, et des agronomes équatoriens, qui y retrouvaient une information satisfaisante. Par ailleurs ce document a servi de base (et parfois a été recopié tel quel) pour d'assez nombreux projets de développement. Les hydrologues et ceux qui étudient l'irrigation ont également trouvé dans la cartographie que nous avons établie de ce phénomène une source d'information utile. D'autres exemples pourraient être donnés mais il s'agit encore d'un apport d'information entre disciplines plus que d'une réelle réciprocité interdisciplinaire.

Le sociologue qui cherchait à cartographier à partir d'enquête ponctuelles des ZSEAH (Zones Socio Economique Homogènes) avait bien vu que la cartographie de l'utilisation du sol telle que je l'avais conduite présentait de nombreux traits de similitude avec ce qu'il soupçonnait du découpage de l'espace. Sur plusieurs exemples nous avons pu établir la pertinence des limites du 1/200 000 pour discriminer spatialement des différentes dynamiques sociales. Avec A. Bernard, économiste, nous avons bien vu également, mais a posteriori, tout l'intérêt qu'il aurait pu y avoir à utiliser les grandes classifications de la carte d'utilisation du sol pour établir le plan de sondage de l'enquête au millième qu'il venait de réaliser sur tout le pays. Nous avons là l'exemple de 2 disciplines qui, procédant par sondage ou enquête, s'interrogent pour savoir jusqu'où étendre dans l'espace, la représentativité de leur échantillon. On reconnaît l'inverse de la démarche que nous présentons dans ces pages qui, partant du contenant s'interroge sur le contenu. Il y a entre les 2 démarches une complémentarité qui nous paraît évidente et qui du reste est mise à profit en Equateur par le SEAN¹.

Le Système des Statistiques Agricoles Nationales a utilisé l'ensemble des cartes d'utilisation du sol produites par le PRONAREG (Programme National de Régionalisation Agricole) et l'ORSTOM, pour réaliser une stratification spatiale, localiser les aires de sondages et connaître leur représentativité territoriale. Ce système de collecte de statistiques agricoles, proposé par l' US AID et que la JUNAC² cherche à développer sur l'ensemble des pays andins est celui qui fournit actuellement en Equateur les plus sûres informations sur la production et les surfaces cultivées.

C'est finalement avec la démo-économie de Daniel Delaunay que la rencontre interdisciplinaire aura pu être vraiment articulée et menée jusqu'à un niveau de transdisciplinarité réciproquement enrichissant. Arrivé alors que l'inventaire se terminait, Delaunay a pu bénéficier d'un acquis qui n'était pas disponible pour d'autres recherches qui s'étaient déroulées en synchronie avec celle sur l'utilisation du sol. Le document au 1/1 000 000 était à l'échelle pertinente pour compter les hommes dans le cadre des systèmes de production agricole. Est-il besoin de souligner combien la recherche sur les systèmes agraires s'en trouve enrichie en retour : connaître ceux qui expulsent leurs surplus de population, et combien; savoir ceux qui retiennent les hommes ou encore ceux qui les attirent et suscitent, à travers les flux migratoires qui parcourent les réseaux, la survie de certains territoires et la création ou la recomposition d'autres ; voir ces mouvements enfin, non seulement pour l'époque la plus récente, celle du dernier recensement de 1982, mais remonter jusqu'en 1960 pour saisir une certaine profondeur historique des mouvements et donc de l'histoire agraire nationale.

¹P.G.1988b, O.C.

²La JUNAC est à l'Acuerdo de Cartagena, l'union des pays andins (Vénézuéla, Colombie, Equateur, Pérou et Bolivie), ce que la Commission est à la CEE.

La saisie informatique des deux documents au LIA de Bondy, cartographie des faits de population d'une part, carte des paysages agraires d'autre part, aura bien facilité cette rencontre.

Dans un autre domaine, c'est à travers la connaissance des paysages actuels et des traces qu'ils portent des anciens aménagements (XIV-XV S.) que nous avons pu reconstituer ce qu'était l'occupation de l'espace et l'organisation territoriale des Andes septentrionales de l'Equateur à la veille des conquêtes incas et espagnole. Pour cette recherche nous avons utilisé trois types de source: la photographie aérienne, la même que pour l'utilisation actuelle du sol; les chroniques espagnoles du XVI siècle; La connaissance du milieu et des lieux, acquise sur le terrain pour la cartographie. Chaque source a donné son apport, la photographie en révélant des objets détonnant avec les pratiques actuelles, les chroniques en rapportant des faits historiques mais c'est dans le paysage que nous avons pu remettre en place ces éléments les uns par rapport aux autres, pour donner une vision de l'organisation précolombienne de cet espace concret. Partage du territoire entre les Caras et les Pastos, spécialisation des productions entre les terres humides et les terres tempérées par l'altitude, société d'éleveurs méprisés qui louaient leur force de travail pour avoir accès à la coca que contrôlaient les groupes mieux organisés dominant les vallées chaudes, dans la même écologie que le coton et le piment. C'est dans ce cadre transformé par la colonisation que l'on voit l'Espagnol, marqué par sa culture méditerranéenne, compter ses plants d'olivier, mesurer ses arpents de vignes ... (cf. Sancho Paz Ponce de Leon, 1582) et apprécier ainsi l'avancement de la civilisation ! C'est encore dans ce cadre que l'esclavage permettra la culture de la canne à sucre et que les transformations du marché lui substituent maintenant l'élevage laitier, dans les haciendas, et la culture de la tomate ou du haricot dans les exploitations familiales. Tout ceci se lit dans le paysage. Tout ceci a laissé des traces dans le paysage¹.

L'INVENTION DU PAYSAGE

Je ne saurai dire à qui je dois ce titre, effet de mémoire, ce qui reste quand tout est oublié. Il y avait bien eu quelque part dans le cursus universitaire la rencontre avec l'ouvrage fameux de A. Meynier, "Les paysages agraires"², mais c'est d'une autre veine que vint l'enrichissement paysagique ou mieux encore la découverte du paysage.

Dans le foisonnement des publications du début des années 80 on ne parle plus de paysage agricole, mais seulement de paysage: "Lire le

¹ P.G., F.L., 1983, O.C. C'est ainsi que nous avons pu également montrer comment les chroniques qui rapportent **la conquête inca** du territoire Cara **par le nord**, doivent être prises au pied de la lettre, malgré l'apparente incongruité, puisque les textes concordent avec les traces paysagères.

² 1^o édition 1958, maintes fois reprise, 5^o édition en 1970

paysage, Lire les paysages", colloque interdisciplinaire 1983¹ ; "Lectures du paysage", agronomes, concepteurs, enseignants, géographes, 1986² ; Milieux et paysage, recherches en géographie, 1986³ ; "Comprendre un paysage", 1987⁴ ; Le paysage, un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux., 1989⁵. La référence n'est plus disciplinaire, elle devient colloque interdisciplinaire, langage transdisciplinaire, et lorsqu'un titre fait référence à la "recherche géographique", on note que les auteurs sont géographes, pédologues, botanistes, agronomes.

La plupart de ces titres insistent sur la lecture du paysage, comme un donné à interpréter, à comprendre. On pourrait reprendre ici la citation de Thornberg à propos de l'espace: "Toutes les disciplines peuvent contribuer à l'étude des lieux mais il n'est pas possible de dire quelle est la plus utile"⁶. Toutes les disciplines concourent à l'explication des paysages car les paysages sont pluriels, et si devant l'un d'eux la démarche est bien celle que décrit Jean François Richard dans l'introduction à sa thèse, "s'arrêter pour regarder, ... contempler pour questionner", on ne peut nier que chaque discipline le fasse avec ses outils et son propre bagage conceptuel. Le paysage n'existe pas en dehors de celui qui l'observe. Pour prendre un exemple trivial on peut douter que le "pittoresque", perçu par le touriste dans une vallée des Cévennes ou des Andes, soit du même ordre que la beauté ressentie par l'indigène d'ici ou l'indien de là-bas. Le paysage est bien construit par l'observateur et renvoie d'abord au sujet qui observe. Le "ouvrez vos yeux et regardez" ne tient pas à l'expérience. Personne ne regarde de la même façon. Peut être cependant certaines formations prédisposent-elles à mieux voir les paysages et donc peut-être aussi à mieux ... les donner à voir.

Le paysage est une image, synthèse des flux qui organisent l'espace. C'est du moins ainsi que je le vois comme géographe, résultat, reflet des forces qui s'exercent en un lieu, à un moment donné, et incluent les héritages. La nature des roches, l'intensité et le volume des précipitations, la température ambiante, ont donné naissance à des sols de caractères différents, qui supportent des flores distinctes dont la variété est soumise à la nature des climats actuels. Ce que nous voyons lorsque nous regardons un paysage, ce ne sont ni l'âge des formations géologiques, ni les totaux pluviométriques, ni les moyennes annuelles de température, ni les propriétés du sol. Nous observons une végétation, une "couverture végétale", qui s'étend sous nos yeux comme le résultat tangible des multiples interactions qui constituent le milieu physique.

¹ Université de ST Etienne OC

² Foucher, Paris, 191 p.

³ Y. Chatelin et G. Riou, Masson, Paris, 154 p.

⁴ B. Lizet et F. de Ravignan, INRA, Paris, 147 p.

⁵ J.F. Richard, OC

⁶ J. Thornberg, Sémiotique de l'espace, in Communications N° 27, 1977, p.17, cité p. 253, in Lire le paysage, lire les paysages, O.C.

Les paysages vraiment naturels sont rares et partout, ou presque, on notera la trace de l'intervention de l'homme. Ces paysages dit anthropiques, parce que plus ou moins modelés ou "artificialisés" par l'homme, sont extrêmement riches d'enseignement. Leur lecture attentive permet de retrouver beaucoup des caractères des sociétés qui les ont façonnés. Grandes parcelles, petites parcelles, terrasses aménagées ou versant érodé, champs ouverts ou clôturés, localisation de l'habitat, forme des maisons, des champs, culture sous pluie et irrigation, etc... tout ou presque tout se lit dans le paysage, parfois directement, mais le plus souvent indirectement. Il faut alors remonter du signe au signifié, de la grande parcelle à la grande exploitation, de la petite parcelle à la petite exploitation. Il en est de même pour les vestiges du passé, encore visibles dans le paysage. Ils marquent aujourd'hui les héritages et sont les témoins des aménagements anciens.

Le paysage est riche d'enseignement pour qui s'arrête et le questionne. Chaque paysage particulier est porteur de sens, et traduit une réalité originale. Notre recherche pour le ministère de l'agriculture de l'Equateur n'aurait-elle pas été, très modestement, qu'un essai de mise à jour de ce qui était caché derrière l'apparence des choses. Abandonner les classifications habituelles des cartes d'utilisation du sol pour remonter aux éléments déterminants... déterminant les paysages bien sûr...

Voilà bien sinon la réécriture, du moins la réinterprétation, d'une démarche cartographique autour de laquelle plusieurs disciplines se rencontrent. Paysages ignorés et méconnus au départ de la recherche, paysages construits et découverts ensuite; paysages homogènes d'utilisation du sol sans doute, mais encore espaces circonscrits, aux caractères particuliers, que plusieurs disciplines concourent à expliquer.

Les zones homogènes d'utilisation du sol ou paysages agraires apparaissent alors comme des enveloppes spatiales, supports matériels et extension localisée des objets construits par plusieurs disciplines parce qu'ils ont été délimités sur la base d'indicateurs pertinents pour les différentes recherches. Ce sont autant de zones communes de raisonnement, aux différents niveaux de la cartographie, suivant les objets propres à chaque discipline et les échelles qui leur sont le mieux adaptées.

BIBLIOGRAPHIE

- BRUNET (R), 1962, Le croquis de géographie régionale et économique, SEDES, Paris, 249p. 1987, La carte mode d'emploi, Fayard/RECLUS, Paris/Montpellier, 269 p.
- COUTY (P) 1990, La pratique multidisciplinaire à l'ORSTOM (version provisoire), 41 p.
- DELAUNAY (D), 1990, Croisements cartographiques d'informations physiques et d'informations démographiques, dans ce même séminaire.
- FAUROUX (E), et al. 1979, Diagnostico socio-economico del medio rural ecuatoriano; Las zonas socio-economicas homogeneas de la Sierra, PRONAREG, MAG-ORSTOM, Quito, 194 p.
- GONDARD (P), 1987, Le zonage paysagique, IAM, Montpellier, 24 p. Dact 1988a, Des cartes, discours pour une méthode. Cartographie de l'utilisation du sol et des paysages végétaux dans les Andes équatoriennes. ORSTOM, Col études et hèses, 156 p. (Thèse soutenue à Paris X Nanterre en 1981, sous la direction de P. Péliissier). 1988b, La estratificacion en el sistema de estadísticas agropecuarias nacionales del Ecuador, SEAN, Quito, 1988, 90 p. Ce texte a été repris in Simposio de Encuestas por muestreo agrícola de áreas en los países andinos, JUN/SIM MUES. AGR. PA/ Informe final Acuerdo de Cartagena, Lima, pp.169-236.
- GONDARD (P) et LOPEZ (F) 1983, Inventario arqueológico preliminar de los Andes septentrionales del Ecuador, Banco central del Ecuador, MAG-ORSTOM, Quito, 273 p.
- GONDARD (P.) et al. 1983-1985 Mapas de uso actual del suelo y formaciones vegetales (Sierra), PRONAREG, MAG-ORSTOM, Quito, 1/200 000
- MEYNIER (A) 1970, Les paysages agraires, col.U, Armand Collin, Paris, 192 p.
- RICHARD (J.F) 1989, Le paysage un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux, ORSTOM, 210 p.
- RIMBERT (S), 1968, Lecons de cartographie thématique, SEDES, Paris, 139 p.
- THOMASSIN (M.M) 1988, La Sierra équatorienne, régionalisation des données. ORSTOM, Vol 1, 626 p., Vol 2 Cartes.
- UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE, 1983, Lire le paysage, lire les paysages. CIEREC, ST Etienne, 314 p.
- WINCKELL (A), ZEBROWSKI (C) et al, 1983-1985, Mapas de formaciones vegetales y uso actual (Costa), PRONAREG, MAG-ORSTOM, Quito, 1/200 000.

**ECO-SYSTEMES
ET SOCIETES**

PROBLEMATIQUES DES ECOSYSTEMES AQUATIQUES

LEVEQUE C.

RESUME

Pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, il est nécessaire de considérer différents niveaux de perception allant du niveau continental au niveau stationnel, et auxquels correspondent des niveaux d'organisation biologique ainsi que des variables et des descripteurs morphologiques, écologiques, climatiques, etc.. La prise en considération des notions d'échelle spatiale doit être complétée par celle d'échelle temporelle, et il existe une certaine relation entre ces deux variables.

Dans le cas des cours d'eau on parle schématiquement des quatre dimensions : longitudinale (axe du fleuve), transversale (lit majeur et annexes), verticale (rapport avec la nappe) et historique.

Les écologues ont également développé la notion d'écologie du paysage qui a pour objectif de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu considérée comme un facteur favorable à la diversité spécifique. D'autre part, certaines approches favorisent actuellement les zones de transitions entre grands types de milieux appelées écotones.

ECOLOGIE DES CORRIDORS FLUVIAUX

Les problèmes méthodologiques liés en partie aux difficultés d'échantillonnage, mais également l'absence de support conceptuel, ont pendant longtemps freiné le développement des recherches sur les cours d'eau (et particulièrement celles sur les grands fleuves), les hydrobiologistes préférant axer leurs efforts sur les milieux stagnants considérés comme plus faciles d'accès. Cette situation évolue rapidement, en partie sous la pression de la demande sociale, dans la mesure où les cours d'eau ne sont plus considérés comme de simples canaux d'évacuation des eaux usées. Pour répondre aux questions posées par l'impact des aménagements et des pollutions, par les projets de réhabilitation ou de conservation, il a été nécessaire de développer des modèles conceptuels expliquant le

fonctionnement des systèmes afin d'envisager à terme de proposer des modèles prédictifs.

En 1975, Hynes faisait remarquer avec quelque peu d'ironie, que l'une des découvertes récentes les plus importantes en hydrobiologie était celle de l'existence des hydrologues, forestiers et pédologues. Il est heureusement maintenant admis que l'étude du fonctionnement d'un système fluvial ne peut se concevoir sans la prise en compte de l'ensemble constitué par le fleuve et son bassin versant, des rapports entre l'homme, le fleuve et les espaces avoisinants, de l'histoire de ces milieux (Décamps & Naiman, 1989). L'écologie des eaux courantes peut donc apparaître comme l'étude des interactions établies entre les différents éléments des paysages fluviaux, s'exerçant selon divers pas de temps, dans les trois dimensions de l'espace. L'étude des systèmes fluviaux est donc le lieu privilégié des recherches multidisciplinaires, ainsi qu'ont pu le montrer les différents programmes développés par exemple dans le cadre du PIREN.

On peut schématiser le fonctionnement d'un système fluvial en considérant qu'il s'inscrit dans quatre dimensions (voir Ward & Stanford, 1989, pour une synthèse):

- dimension longitudinale : les rivières, les fleuves, constituent des systèmes étirés dans l'espace, mais longitudinalement solidaires. Par suite de l'écoulement unidirectionnel des eaux, la dynamique des zones situées en aval est sous l'étroite dépendance des processus physicochimiques et biologiques qui se déroulent en amont. A la différence des milieux stagnants où la chaîne trophique a pour origine la production photosynthétique, c'est à partir du matériel d'origine détritique (feuilles, débris végétaux et animaux) en grande partie d'origine externe au système, que s'organise la chaîne trophique en milieu lotique. Il en résulte que des modifications du milieu terrestre auront des conséquences sur les apports et donc sur le fonctionnement global du système biologique. C'est le cas en particulier lorsqu'on détruit les ripisylves ou les forêts galeries. L'impact le plus important dans le cadre de cette dimension est bien entendu celui des lacs de barrage qui morcellent le cours du fleuve, entravent les migrations des espèces, modifient profondément le régime hydrologique à l'aval.

- dimension verticale : il existe en général des relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines, qui se manifestent par des échanges en eau et en éléments dissous (nitrates, polluants, etc.). Divers travaux ont également montré que la nappe phréatique pouvait servir temporairement de zone refuge à certains invertébrés benthiques. Ces interactions sont bien entendus sensibles aux modifications dans l'intensité des échanges résultant d'un impact climatique ou anthropique.

- dimension transversale : le rôle des plaines inondées et des annexes (bras morts, lacs de varzea) dans le fonctionnement et la productivité des systèmes fluviaux est un phénomène bien connu, notamment par les ichtyologistes (Welcomme, 1979 ; Bravard et al., 1986). Des travaux plus récents ont également montré le rôle important des boisements riverains sur le recyclage, la rétention et le relargage de substances nutritives. Ces zones riveraines fournissent aux eaux courantes l'essentiel de leur alimentation en matière organique, ces substances étant ensuite entraînées vers l'aval. Un certain nombre de travaux ont montré également l'impact de l'utilisation des terres (boisements, cultures, urbanisation) sur le fonctionnement hydrologique et sur les apports en substances particulières (MES) ou dissoutes.

- dimension historique : du point de vue géomorphologique, le fleuve est un héritage de processus géologiques et climatiques qui ont modelé son cours. En ce qui concerne les organismes, la richesse spécifique, la présence des espèces, sont elles aussi le résultat de processus biogéographiques associés à l'histoire physique et climatique des milieux. Mais dans les régions européennes en particulier, les rapports de l'homme et du fleuve sont parfois anciens et peuvent résulter dans des modifications assez profondes du fonctionnement : tentatives de chenalisation, de régulation du débit, de limitation des inondations, etc..

En réalité les actions entreprises pour aménager les fleuves ont très généralement eu pour effet de réduire, voire de supprimer, l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle.

QUELQUES THEORIES ET CONCEPTS UTILISABLES EN ECOLOGIE AQUATIQUE

Biogéographie évolutive et niveaux de perception

Blondel (1986) a défini la biogéographie comme étant l'étude spatio-temporelle des diversités biologiques et de leur régulation dans des milieux hétérogènes et changeants. L'un des principaux objectifs est de rechercher les causes de la diversité des organismes et les mécanismes régulateurs. La biogéographie s'intéresse donc à toutes les échelles du temps et de l'espace, et Blondel (1987) propose une représentation schématique des principaux types de processus biogéographiques en fonction d'une échelle spatio-temporelle, correspondant chacun à différents types d'informations géographique et biologique (fig. 1).

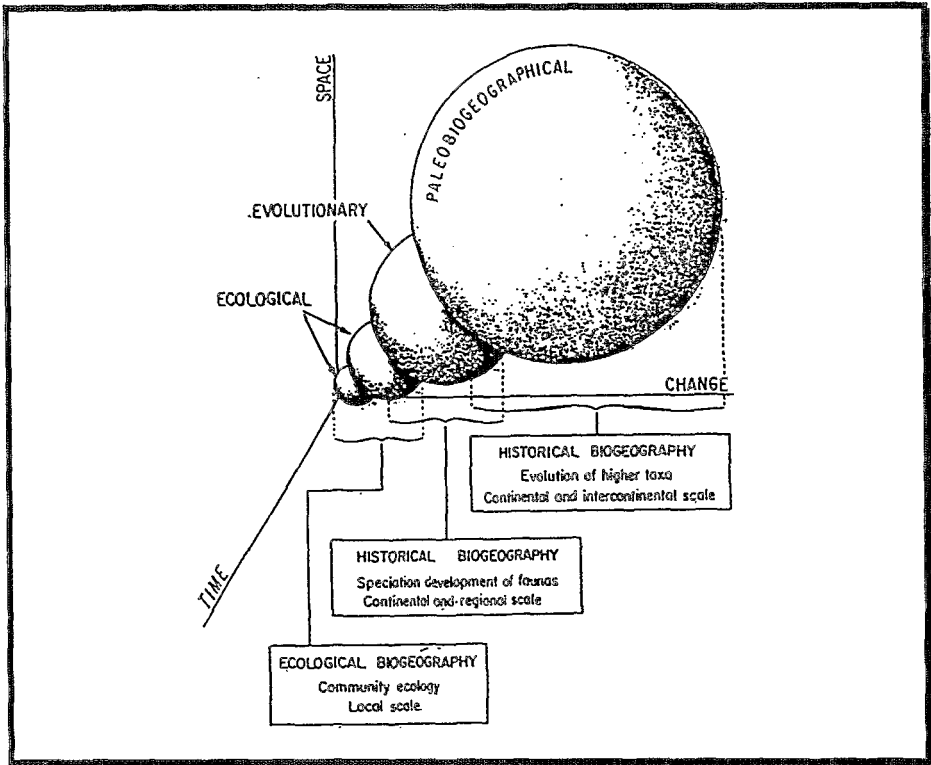


Figure 1. Les processus biogéographiques peuvent être abordés dans le cadre de trois grands ensembles de recherches qui sont fortement intercorrélés le long d'échelles de temps, d'espace et de variabilité
D'après Blondel, 1987

Les espèces (et les écosystèmes qui les hébergent) apparaissent, évoluent, s'éteignent. Les changements géographiques (espace) et évolutifs (réponse des organismes), sont simultanés et indissociables. Dans chaque situation locale, le nombre d'espèces en présence résulte à la fois de la situation écologique actuelle, et de l'histoire évolutive des espèces et des milieux. Il peut donc être utile de pratiquer une démarche interactive entre grands ensemble faunistiques et populations locales, entre vastes espaces et petits territoires, ces différentes approches se complétant et pouvant susciter des hypothèses de recherche dans un niveau à partir des observations faites à un autre niveau. Ici encore, Blondel (1986) a formalisé la démarche en définissant cinq échelles de perception spatiale, les niveaux d'organisation biologique correspondants et les problèmes qu'ils soulèvent (tableau 1).

NIVEAU DE PERCEPTION - D'EXPRESSION	ECHELLE D'EXPRESSION	NIVEAU D'ORGANISATION BIOLOGIQUE	VARIABLES & DESCRIPTEURS	PROBLEMES BIOGEOGRAPHIQUES
<u>Continental</u>	1/10 ⁷	Régions et provinces biogéographiques, ensembles fauniques	Tectoniques, géographiques, paléobiologiques, paléoclimatiques	Biogéographie historique : canaux de distribution, origine, caractérisation et mise en place des faunes, biosystématique, spéciation
<u>Régional</u>	1/10 ⁶	Faunes d'une subdivision biogéographique	Topographiques, géographiques, macroclimatiques, types de végétation	Histoire des peuplements, affinités biogéographiques et taxinomiques, épagement bioclimatique, convergences et divergences éco-morphologiques
<u>Sectoriel</u>	1/10 ⁵	Ensemble de peuplements	Ecologiques, phytologiques, climatiques, unités de végétation, régime de perturbations	Structure et dynamique des peuplements, colonisation-extinction-recolonisation rôle régulateur des perturbations, successions écologiques, dispersion
<u>Du biotope</u>	1/10 ⁴	Peuplement, Populations	Microtopographiques, microclimatiques, édaphiques, structure de la végétation, grain du biotope	Composition et structure d'un peuplement partage des ressources, mécanismes de coexistence, compétition, prédation, parasitisme, dynamique des populations,
<u>Stationnel</u>	1/10 ³	Guildes, populations locales, dèmes	Structure et saisonnalité de l'environnement, contraintes et ressources	Biologie des populations, étude des niches, systèmes "populations environnements", stratégies adaptatives

Tableau 1. Niveaux de perception, échelles d'expression, cartographique et nature de quelques problèmes biogéographiques que le zoologiste peut étudier à ces niveaux. D'après Blondel, 1986

Une telle conception de la biogéographie évolutive permet de prendre du recul par rapport à certains débats qui ont animés les biologistes au cours des dernières décennies pour expliquer les phylogénies et la spéciation: dispersion ou vicariance ? changements graduels ou équilibres ponctués ? Ces théories ou paradigmes ne sont pas réellement contradictoires et dépendent en grande partie des échelles de temps et d'espace considérées.

Actuellement il y a certaines tentatives pour formaliser une théorie générale de l'écologie fluviale, utilisant ce même type de démarche et la prise en compte d'échelles de temps et d'espace (Minshall, 1988).

Relations richesse spécifique-caractéristiques du milieu

On sait depuis Arrhenius (1921) qu'il existe une relation empirique entre la surface d'un territoire et le nombre d'espèces qu'il héberge. Preston (1962) l'a exprimée par l'équation $S = cA^z$, où S est la richesse en espèces, A, la surface du territoire, z, la pente de la droite de régression et c, une constante liée au taxon étudié. C'est sur les îles que ces relations aire-espèces ont été plus particulièrement étudiées. La théorie des équilibres dynamiques proposée par McArthur et Wilson (1963, 1967) dans le cadre de la biogéographie insulaire avait pour but de proposer des explications à cette observation empirique. Elle a suscité de très nombreux travaux et polémiques, et fut d'une grande valeur heuristique, même si l'on considère actuellement que le modèle proposé est trop simpliste et trop général. Dans la mesure où les fleuves sont séparés les uns des autres par des barrières infranchissables pour les poissons, il est justifié de les étudier en faisant référence à la biogéographie

insulaire, mais il n'existe jusqu'ici qu'un nombre limité de tentatives dont celle de Hugueny (1989) sur les rivières ouest africaines (fig. 2). Ce dernier a pu montrer que la richesse spécifique actuellement observée dans 26 bassins, est corrélée à la superficie du bassin et au débit moyen annuel, ces deux variables expliquant 90% de la variance.

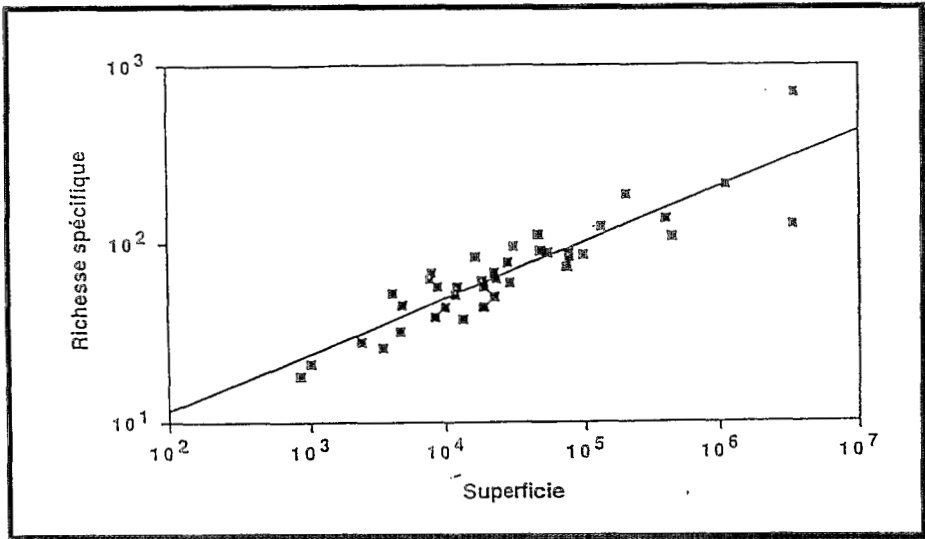


Figure 2. Nombre d'espèces de poissons en fonction de la superficie du bassin versant en km^{-2} pour 39 rivières ouest africaines D'après Hugueny (1989)

L'hétérogénéité et ses développements conceptuels

Pendant très longtemps, les écologistes influencés par la théorie de la niche, ont implicitement considéré des milieux et des populations stables et en équilibre, travaillant le plus souvent sur des biotopes homogènes ou des juxtapositions de systèmes autonomes. Cette idéologie était particulièrement évidente dans la conception du programme PBI réalisé à la fin des années 1960. Progressivement cependant, les idées ont évolué. On a pris conscience que les milieux étaient hétérogènes et changeants. La *variabilité* qui était considérée comme un bruit de fond plus ou moins gênant est devenue un objet de recherche, avec une attention particulière accordée aux facteurs d'instabilité biotique et abiotique des milieux. A l'étude stationnelle des communautés, on substitue la notion d'*hétérogénéité* considérée comme une composante majeure du déterminisme de la distribution des organismes.

L'hétérogénéité existe à toutes les échelles de temps et d'espace, et elle est perçue différemment selon les espèces. Cette hétérogénéité caractérise l'organisation spatiale des systèmes écologiques : structuration en mosaïque, effets d'insularité, lisières, corridors.

Différentes branches de l'écologie se sont développées au cours des dernières années pour prendre en compte ces notions: dynamique des structures spatiales (patch dynamics), écologie du paysage (Forman & Godron, 1981) que l'on essaie d'appliquer aux fleuves (Décamps, 1984), écocomplexes (Blandin & Lamotte, 1985), avec pour certaines d'entre elles des perspectives d'aménagement et de gestion des écosystèmes. Elles ont donné lieu à plusieurs développements conceptuels et nous mentionnerons rapidement certains d'entre eux

- concept de *metapopulation* : une metapopulation est un ensemble de sous-populations interconnectées d'un même voisinage évoluant et fonctionnant de façon asynchrone : certaines sont en déclin, alors que d'autres sont en expansion et réalimentent les premières. La stabilité démographique de l'ensemble résulterait de cette dynamique d'interactions entre les caractéristiques éco-démographiques des populations et les caractères de structure des milieux qui présentent une composante biologique (compétition par exemple) et spatiotemporelle (superficie, hétérogénéité, prévisibilité, longévité, etc..).

- concept de *connectivité* : c'est le processus par lequel différentes sous-populations sont inter-connectées pour former une unité démographique fonctionnelle. Ce sont en fait des éléments de liaison entre des fragments séparés (mosaïque) d'habitats. Cette notion est particulièrement importante dans les paysages fortement anthropisés dont les habitats naturels ont été morcelés, ainsi que dans les travaux de conservation et de réhabilitation.

- concept d'*écotone* : il est utilisé pour définir les zones de transition entre systèmes écologiques qui, à diverses échelles d'espace et de temps, influent sur l'intensité des échanges entre ces systèmes. Dans la problématique de la dynamique des structures spatiales, si les interactions entre les éléments d'un paysage influencent sa dynamique d'ensemble, les écotones constituent les limites entre ces éléments, et sont susceptibles d'en modifier les interactions réciproques. Leur rôle dans les échanges, sur le maintien de la diversité biologique, sur la stabilité des systèmes, sont autant de voies de recherches à développer (Naiman et al., 1989). Dans le cas des systèmes aquatiques les exemples les plus connus sont les zones à ripisylves, et les forêts galeries.

Typologies et River continuum concept

Depuis longtemps, et généralement dans un but de gestion piscicole, on s'est efforcé à rechercher des systèmes simples et généralisables de caractérisation des cours d'eau (on trouvera une revue des ces approches dans Wasson, 1989). L'une de ces démarches consiste à rechercher sur l'axe longitudinal, une succession de zones relativement homogènes, caractérisées par leur peuplement et des paramètres abiotiques simples. Ce sont les zonations dont la plus connue en France est actuellement est la biotypologie de Verneaux.

Plus récemment s'est développé le "River Continuum Concept" qui a pour objectif d'essayer de faire le lien entre un gradient continu de facteurs physiques (géomorphologie et hydrologie notamment), les stratégies biologiques des invertébrés benthiques, la dynamique des éléments nutritifs et leur utilisation par des groupes fonctionnels. Ces idées ont généré de nombreux travaux, mais également de nombreuses critiques et polémiques qui ont permis de faire progresser considérablement les hypothèses un peu réductrices du départ. Si le RCC n'est probablement pas généralisable à l'ensemble des cours d'eau (il présente des faiblesses dans le cas des grands cours d'eau notamment), et à toutes les zones biogéographiques, il présente néanmoins l'avantage d'avoir formé et mobilisé une masse critique de chercheurs dont on peut espérer qu'ils poursuivront la recherche de modèles fonctionnels.

REFERENCES

- BLANDIN (P.) & LAMOTTE (M.), 1985 - Ecologie des systèmes et aménagement : fondements théoriques et principes méthodologiques. pp 139-162 In Lamotte (ed.), Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire. Masson, Paris
- BLONDEL (J.), 1986 - Biogéographie évolutive. Collection d'écologie n° 20, Masson, Paris, 221 pp.
- BLONDEL (J.), 1987 - From biogeography to life history theory : a multithematic approach illustrated by the biogeography of vertebrates. *Journal of Biogeography*, 14 : 405-422.
- BRAVARD (J.P.), AMOROS (C.) & PAUTOU (G.), 1986 - Impact of civil engineering works on the succession of communities in a fluvial system : a methodological and predictive approach to a section of the Upper Rhone River. *Oikos*, 47 : 92-111.
- DECAMPS (H.), 1984 - Towards a landscape ecology of river valleys. In Cooley T.H. and F.B. Golley (ed.), Trends in ecological research for the 1980s. Plenum Pres, New York
- DECAMPS (H.) & NAIMAN (R.J.), 1989 - L'écologie des fleuves. *La Recherche*, vol.20, n° 308 : 310-319.

- FORMEN (R.T.) & GODRON (M.), 1981 - Patches and structural components for a landscape ecology. *Bioscience*, 31 : 733-740.
- HUGUENY (B.), 1989 - West African rivers as biogeographic islands ; species richness of fish communities. *Oecologia*, 79 : 236-243.
- HYNES (H.B.N.), 1975 - The stream and its valley. *Verh. Internat. Vereintr. Limnol.*, 17: 1-15.
- MAC ARTHUR (R.H.) & WILSON (E.O.), 1963 - an equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, 17 : 373-387.
- MAC ARTHUR (R.H.) & WILSON (E.O.), 1967 - The theory of island biogeography. Princeton Uni. Press, N.J.
- MINSHALL (G.W.), 1988 - Stream ecology theory : a global perspective. *J. N. Am. Benthol. soc.*, 7(4) : 263-288.
- NAIMAN (R.), DECAMPS (H.) & FOURNIER (F.), 1989 - Role of land/inland water ecotones in landscape management and restoration : proposal for collaborative research. MAB Digest 4, UNESCO, Paris.
- PRESTON (F.W.), 1962 - The canonical distribution of Commonness and rarity. *Ecology*, 43 : 185-215 et 410-432.
- WARD (J.V.) & STANFORD (J.A.), 1989 - Riverine ecosystems : the influence of man on catchment dynamics and fish ecology. pp 54-64 In D.P. Dodge (ed) Proceedings of the International Large River Symposium. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106.
- WASSON (J.G.), 1989 - Eléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes : 1- Revue critique de quelques approches existantes. *Bull Ecol.*, 20(2) : 109-127.
- WELCOMME (R.L.), 1979 - Fisheries ecology of floodplain rivers. Longman, London, 317p.

LES CHANGEMENTS D'ECHELLE EN HALIEUTIQUE: L'EXEMPLE DES PETITS PELAGIQUES COTIERS

FREON P.¹, GERLOTTO F.², MULLON CH.³

INTRODUCTION

L'halieutique, que l'on définira ici sommairement comme l'étude de la pêche et des ressources aquatiques qu'elle exploite, est un domaine scientifique relativement jeune puisqu'il ne retient l'intérêt de la communauté scientifique que depuis une cinquantaine d'années. Cependant ce domaine scientifique multidisciplinaire s'appuie actuellement sur des connaissances bien antérieure à son émergence, telles que la biologie, l'écologie, l'océanographie physique, l'économie, la sociologie, l'anthropologie, etc.

Historiquement, c'est l'aspect biologique qui a prévalu dans l'approche halieutique. A partir de connaissances générales et antérieures à l'halieutique, portant sur la systématique et la biologie d'une espèce (étudiée bien sûr en un lieu donné mais considérée sur l'ensemble de son aire de répartition géographique à l'échelle d'un océan, d'un continent ou à l'échelle du globe) on s'est orienté très vite vers la notion de population puis de stock, lequel se définit par rapport à l'exploitation qu'il subit. C'est donc rapidement sur des stocks exploités que les halieutes biologistes ont focalisé leur attention, en essayant d'en connaître les caractéristiques propres au niveau des facteurs pouvant intervenir dans la dynamique de leur démographie: migrations, paramètres de croissance, de mortalité naturelle et par pêche, de reproduction, alimentation, etc..

Les limites de l'approche strictement biologique sont apparues vers les années 70, durant lesquelles on s'est rendu compte que les relations entre le stock et le pêcheur n'était pas univoques, mais qu'il s'agissait d'une véritable interaction dans laquelle la réaction des pêcheurs aux modifications naturelles ou induites du stock était tout aussi importante que celle de l'effort de prédation exercé sur le stock par les pêcheurs. Les limites des modèles strictement

¹ORSTOM, BP 8006, 97259 Fort-de-France, Martinique

²ORSTOM, BP 8006, 97259 Fort-de-France, Martinique

³ORSTOM, 70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy

biologiques ayant été reconnues, on a fait appel aux océanographes physiiciens et aux chercheurs des sciences humaines (macro-économistes en premier lieu) pour tenter de résoudre les problèmes en introduisant d'autres variables dans les modèles. On sait aujourd'hui que "le système pêche" est en fait complexe, voire tentaculaire, et qu'il ne se résout qu'à l'aide d'une approche plus large encore, faisant également appel à la micro-économie, à la sociologie et à l'anthropologie, pour ne citer que quelques disciplines.

L'intérêt des changements d'échelle sera ici abordé dans sa dimension temporelle et spatiale, mais aussi en rapport avec le niveau à partir duquel un système est appréhendé. Nous analyserons ici essentiellement le cas des stocks de petits pélagiques côtiers (type sardines, anchois, chinchards ou maquereaux) qui se caractérisent par:

- des migrations côtières de moyenne amplitude (quelques centaines de km) mais pouvant être rapide
- un comportement grégaire très marqué, qui les amène à se regrouper en bancs (essentiellement de jour) ou en couche pélagique (essentiellement de nuit), ces structures agrégatives pouvant présenter divers niveaux d'organisation, parfois complexes (cf. infra),
- une forte fécondité (plusieurs dizaines de milliers d'oeufs par femelle et par an) et donc une nécessaire forte mortalité des premiers stades, cette dernière étant largement liée aux fluctuations du milieu,
- une vitesse de croissance et une mortalité naturelle souvent élevées, en particulier en milieu tropical, et dépendantes elles aussi du milieu,
- en conséquence de ce qui précède, de fortes fluctuations naturelles d'abondance, amplifiées par leur vulnérabilité à l'exploitation, laquelle peut conduire à des effondrements de stocks,
- enfin ces espèces, de par les difficultés qu'entraîne l'évaluation de leurs stocks par des modèles de dynamique des populations, et grâce à leur statut pélagique, ont été les premières à bénéficier de méthodes directes d'évaluation, en particulier par des techniques hydro-acoustiques (écho-intégration)

LES DIVERSES ECHELLES SPATIALES

Aspects généraux

Nous avons vu que, très schématiquement, l'approche de la variabilité chez les poissons avait évolué historiquement du niveau général de la systématique mondiale à celui du stock, en passant par la population. Concernant les petits pélagiques côtiers, on s'est rapidement rendu compte de la nécessité de considérer des sous-stocks géographiques, correspondant soit à des groupes d'âge différents (nourrisseries par exemple) soit à des fractions de stock ayant entre elles un certain taux d'échange mais présentant des caractéristiques biologiques différentes (exemple des sous-stocks de harengs de la mer du Nord dont certains individus ne pondent qu'au printemps et d'autres qu'à l'automne).

La localisation géographique de ces différentes composantes du stock, ou parfois les migrations d'une même composante (en général les individus les moins jeunes) font que leur accessibilité varie en fonction des caractéristiques du bateau de pêche, en particulier de sa taille (autonomie en mer, rapidité de déplacement, etc). De ce fait, la puissance de pêche d'un bateau - qui détermine la mortalité qu'il va exercer sur le stock- ne sera pas la même selon que l'on s'intéresse à l'effet local (une fois arrivé sur les lieux de concentration du poisson) ou à l'effet global (lorsque l'on considère l'ensemble de la zone). Ce type de problème, dont l'importance est souligné par Laurec (1977) et Laurec & Le Guen (1977) amène les halieutes à stratifier les zones de pêche non seulement en fonction de critères écologiques (tel que le type de substrat -mais celui-ci intervient peu pour les poissons pélagiques- ou l'hydrologie des masses d'eau), mais aussi en fonction de la distance du port

Les méthodes directes d'observation ou d'évaluation ont permis d'aborder des structures plus fines que celle du stock ou du sous-stock. La pêche portant sur des bancs ou sur des couches (schématiquement: pêche à la senne tournante pour les premiers et pêche au chalut pélagique pour les secondes), on a tout d'abord cherché à mieux connaître ces entités.

Les premiers travaux sur les bancs ont eu lieu en bassin et ont montré que la structuration spatiale des individus au sein d'un banc était très forte, prenant parfois l'aspect de structures "cristallines" (Wheis, 1973). Cette même échelle d'observation, réduisant à quelques dizaines d'individus la taille du banc observé, a laissé croire que le banc pélagique se comporte souvent comme un individu unique, réagissant en bloc à un stimulus. Des observations à une échelle un peu supérieure, réalisées dans des bassins de quelques m³, ont permis de déceler des comportements de groupe organisé, tels que "l'effet de fontaine", qui permet au banc d'échapper à un prédateur en se divisant devant lui et en se regroupant derrière lui (Pitcher, 1985).

Mais cette échelle n'est pas encore suffisante pour rendre compte de l'ensemble des phénomènes ayant lieu *in situ*; dans le cadre de notre programme d'étude du comportement appliqué à l'halieutique nous avons réalisé *in situ* des observations visuelles et acoustiques de bancs regroupant plusieurs dizaines de milliers d'individus. Ces observations, effectuées simultanément sous l'eau et à partir d'un hydravion ULM, nous ont permis de constater que si la structure cristalline et les réactions de bloc existent bien à l'échelle d'un groupe d'individu (de l'ordre d'une centaine), le banc dans son ensemble présente une structure plus complexe. On observe en effet chez certaines espèces de grands espaces vides (vacuoles) tandis que d'autres espèces s'organisent en grosses colonnes enchevêtrées (Gerlotto & Fréon, 1988). Dans de telles structures, occupant plusieurs centaines de m³, on observe des réponses locales aux stimuli et des phénomènes d'amortissement des réactions. De façon générale, l'originalité du programme EICHOANT (Evaluation de l'Impact du Comportement en Halieutique et sur les Observations Acoustiques en milieu Naturel Tropical) réside en grande partie dans le changement d'échelle d'observation du comportement du poisson (Fréon & Gerlotto, 1988). Il a été en effet constaté que certains comportements (de dominance hiérarchique en particulier) peuvent exister sur une même espèce placée dans des conditions artificielles et disparaître lorsque le nombre d'individus augmente.

Ces bancs sont eux-mêmes rarement isolés et se regroupent en concentrations dans la journée. La nuit ils se dispersent plus ou moins (en fonction de l'éclairement lunaire et d'autres facteurs que l'on ignore encore); alors:

- soit ils occupent de grands volumes en se dispersant dans les trois dimensions,
- soit ils forment des couches homogènes plus denses et situées dans des limites bathymétriques bien déterminées,
- soit ils constituent des structures plus complexes comportant des bancs, des couches et des poissons dispersés. Nos premières observations, bien que limitées, semblent indiquer un gradient de concentration de la périphérie vers le centre de ces macro-structures (Fréon *et al.*, 1988).

Ces modes agrégatifs varient d'une espèce à l'autre, voire d'une fraction de stock à une autre, ce qui parfois permet à un même type de pêche de se développer préférentiellement sur une espèce (ou un groupe d'âge) de jour et sur un(e) autre de nuit. Ainsi les sardiniers dakarois capturent 92% des jeunes sardinelles de jour et 68% des chinchards noirs de nuit (tableau 1) alors que le rapport du nombre de sorties jour/nuit varie de 0.1 à 0.5 selon les années

Lorsque l'on sait que l'une des difficultés majeures de la modélisation des populations exploitées est de connaître la pression de pêche subie par les stocks, en particulier en milieu tropical où les pêcheries sont généralement multi-spécifiques, on voit qu'il peut y avoir là une solution. Cela suppose que le recueil des données permette de descendre à une échelle temporelle aussi fine que la tranche horaire d'activité. L'influence du cycle lunaire apparaît également dans la composition des captures, mais la structuration des données n'est pas suffisamment forte pour permettre une prise en compte systématique de ce facteur dans ce sens (65% des chinchards jaunes sont capturés de nuit en phase lune montante).

ESPECES	PROPORTION DES CAPTURES DE JOUR	NOMBRE TOTAL D'OBSERVATION (JOUR + NUIT)
<i>Sardnella maderensis</i> total	97 %	11 468
<i>Sardinella aurita</i> jeunes	98 %	6 785
<i>Sardinella aurita</i> adultes	44 %	4 363
<i>Caranx rhonchus</i>	44 %	2 561
<i>Trachurus s</i>	32 %	1 008
<i>Scomber japonicus</i>	47 %	997
<i>Pomadasys s</i>	100 %	4 40
<i>Chloroscombrus c</i>	00 %	428

Tableau 1. Proportion des captures réalisées de jour par les sardiniers dakarois de 1967 à 1989, pour les principales espèces (nombre de captures de l'espèce considérée supérieures à 1 tonne ou représentant au moins 40% de la capture totale de la sortie)

L'EXEMPLE DE L'ECHO-INTEGRATION

La méthode d'évaluation des stocks par hydro-acoustique se heurte à ce problème de forte variabilité spatiale (et parfois temporelle). Les travaux de diverses équipes, dont celles de l'ORSTOM, ont montré la complexité du problème, lié à la fois à la structure contagieuse des agrégations et au mode d'échantillonnage qui est pratiquement

continu dans trois dimensions (temps, profondeur et trajet suivi par le bateau de prospection) et fortement discontinu dans la quatrième (distance inter-radiale). Il s'agit d'un cas exemplaire de problématique du changement d'échelle en ce sens que l'unité d'observation élémentaire (l'écho d'une émission sonore intégré dans une couche d'eau de 10 cm d'épaisseur) permet un échantillonnage pratiquement exhaustif dans deux dimensions de l'espace, et que les moyens informatiques actuels permettent actuellement de saisir toute cette information (data-logger) qui est de l'ordre du milliard d'observations pour une campagne ordinaire. Cette saisie totale n'était pas possible il y a quelques années et l'on s'est alors attaché à définir la distance élémentaire d'échantillonnage sur laquelle les échantillons sont regroupés (ESDU en anglais) et secondairement l'épaisseur des couches d'eau à intégrer.

Deux problèmes essentiels se sont alors posés au niveau de l'utilisation de l'écho-intégration appliquée à l'évaluation des biomasses: celui de l'homogénéité intra-ESDU et celui de la corrélation entre les ESDU voisins (autocorrélation) que nous ne développerons pas ici.

a. Dimension de l'ESDU

Laloe (1985) propose un modèle théorique de calcul de la variance à partir des hypothèses de base suivantes:

- pas de corrélation entre densités et erreurs dans un rectangle élémentaire (surface centrée sur un ESDU), ou ESSR (Elementary Sampling Single Rectangle);
- absence de corrélation entre les erreurs commises dans des ESSR différents;
- la covariance entre les mesures de biomasse de deux rectangles est fonction de la distance entre eux (autocorrélation).

Une fois posées ces hypothèses, Laloe présente une discussion sur la longueur optimale d'un ESDU afin de prendre en compte les contraintes énumérées ci-dessus:

- limite inférieure de longueur: elle est responsable de l'indépendance des erreurs de mesure, et pour cela doit être de taille supérieure aux "microstructures" que sont les bancs pélagiques. Dans les régions tropicales, ceux-ci n'atteignent pratiquement jamais le demi-mille, et rarement le quart de mille.
- limite supérieure de longueur: elle doit satisfaire à l'hypothèse d'homogénéité à l'intérieur d'un ESDU. Cela peut

être admis à la condition que la longueur des ESDU soit petite par rapport aux "macrostructures" (concentrations). Celles-ci, en milieu tropical, peuvent être variables, allant dans leur plus courte dimension (direction d'anisotropie maximale) de quelques milles à quelques dizaines de milles.

Il semble dans ces conditions qu'un ESDU doive, dans les zones tropicales, être de taille au moins supérieure à 500-1000 m, et de longueur la plus courte possible au delà de cette limite. C'est pourquoi nous avons réduit la longueur des ESDU, primitivement de 2 milles, à environ 1300 m (6 minutes à 7 noeuds)

b. Calcul des corrélogrammes

Deux méthodes essentielles ont été utilisées, la géostatistique et le calcul des corrélogrammes. Le principe consiste simplement à calculer un corrélogramme pour des ESDU de différentes tailles.

Il semble en règle générale que l'autocorrélation ne soit pas si importante dans les zones tropicales à fortes densités pélagiques que dans les zones tempérées ou froides. Elle s'étend en effet sur une distance maximale d'autocorrélation de 7 ESDU, ce qui correspond, avec nos intervalles, à une distance d'environ 5 milles, mais est en général beaucoup plus réduite (2 milles environ).

c. L'apport de la géostatistique

Le calcul des corrélogrammes ne résout pas tous les problèmes que présente l'autocorrélation. Des méthodes plus complètes ont été adaptées récemment de la géostatistique par divers auteurs. Gohin (1985) propose un modèle mettant en oeuvre le calcul de variogrammes sur les données de densité, en s'inspirant des travaux de base de Matheron (1965).

L'intérêt de l'emploi des variogrammes est double. C'est en effet à la fois:

- un outil performant de calcul de variance, qui tient compte des relations inter-ESDU (en particulier l'autocorrélation) et des lois de distribution des densités. Il devient alors possible d'appliquer les méthodes sur les données brutes, non transformées, ce qui permet une interprétation facile et non biaisée de la variance;

- un outil descriptif d'une population. Il s'agit plutôt ici de tirer des enseignements de l'allure des variogrammes. Ceux-ci fournissent en effet trois informations:

- * une mesure de l'effet de pépite (micro-structures);

- * une mesure de la portée (autocorrélation);
- * une description de la macro-structure (variance) des concentrations.

En outre les méthodes géostatistiques permettent l'application de techniques robustes d'interpolation (krigeage).

Guillard *et al.* (1987) ont également appliqué ces méthodes à des données d'écho-intégration recueillies sur le lac d'Annecy. Ils montrent l'influence de la dimension des ESDU sur les ajustements du modèle, celui-ci étant d'autant meilleur que les ESDU sont courts. Il est certain toutefois que l'on ne rencontre pas de microstructures (bancs) dans le lac, ce qui permet de réduire au maximum la longueur des ESDU.

L'ensemble de ces observations et les analyses de cas d'espèces (Gerlotto, 1989; Simard & Gerlotto, 1990) permettent de tirer des conclusions nettes sur le choix de l'unité d'échantillonnage:

- la longueur optimale des séquences doit se situer entre celle des micro-structures (bancs) et des macro-structures (concentrations). Dans les conditions qui sont les nôtres, cela revient à situer la longueur des séquences dans une fourchette entre 500 m et 3 milles. Nous avons choisi une longueur d'ESDU voisine de 1300 m.

- l'autocorrélation des ESDU, toutes populations confondues, est faible dans la région étudiée, ne dépassant pas 7 séquences (5 milles), et le plus souvent avoisinant 2 à 4 séquences (1.4 à 3 milles).

- cette autocorrélation peut être pratiquement éliminée par le choix d'une stratification appropriée.

LES DIVERSES ECHELLES TEMPORELLES

Si dans les travaux initiaux de systématique, l'échelle temporelle était inexistante (ou reléguée au niveau de l'évolution des espèces), rapidement le problème de l'intervalle de temps d'observation s'est posé dans le recueil des données biologiques puis socio-économiques. En effet, le cas des petits pélagiques côtiers n'a rien d'original en ce sens qu'on observe une variabilité journalière (cf. supra), une variabilité saisonnière (même sous les tropiques) et une variabilité interannuelle.

Jusqu'à ces dernières années, on a cherché à modéliser essentiellement la variabilité inter-annuelle, se contentant de décrire les niveaux inférieurs de variabilité et de les considérer comme un bruit de fond. Plus récemment, on a essayé d'inclure la

saisonnalité dans les modèles (cas de la croissance par exemple). Or on s'aperçoit de plus en plus souvent que la variabilité inter-annuelle des captures des espèces marines est conditionnée par des variations climatiques à une échelle temporelle bien plus fine, en particulier dans les premiers stades de leur vie.

En effet, le succès de la reproduction de beaucoup d'espèces est lié à l'occurrence de certaines conditions (température, turbulence, richesse du milieu) devant avoir lieu dans une "fenêtre" temporelle, voire spatio-temporelle très étroite (Sharp, 1980). Selon les espèces (ou les écoles de pensée) la variabilité de cette mortalité massive est liée soit à la probabilité de rencontre entre les essaims de larves et les essaims de plancton qui constituent leur proie (hypothèse du "match/mismatch"), soit aux conditions de circulation qui font que les larves seront entraînées ou non vers les nurseries qui leur sont favorables (hypothèse du "member/vagrant"). Dans un cas comme dans l'autre ce seront les conditions hydrologiques au cours de quelques jours précis dans l'année qui conditionneront l'abondance d'une classe d'âge pendant plusieurs années. La localisation de cette fenêtre n'est pas toujours facile et l'on devra avoir recours à des méthodes d'analyse des séries chronologiques plus ou moins avancées (cross-corrélation, autorégression, régression optimale, etc) dont on trouvera des exemples d'application aux espèces pélagiques tropicales dans les travaux de Rébert (1979), Fréon (1986, 1988), Mendelsohn & Cury (1987) et Cury & Roy (1990). Une approche empirique intéressante a été proposée récemment par une équipe française dans le domaine terrestre: il s'agit de la recherche automatique du maximum de corrélation entre l'abondance annuelle d'une population et un événement climatique, en fonction de la localisation temporelle et de la durée de ce dernier (Pierre *et al.*, 1986).

Les variations inter-annuelles de mortalité par pêche (qui dépendent à la fois de l'effort de pêche et de la capturabilité) peuvent elles aussi être structurées par des événements climatiques décelables à petite échelle. Ainsi l'arrivée des sardines du stock "A" marocain dans la zone de pêche est liée à la production planctonique locale, laquelle dépend non seulement de l'intensité de l'upwelling mais aussi de sa variabilité. De fait, la productivité primaire nécessite une alternance de périodes fortement ventées permettant la remontée des sels nutritifs (upwelling), et de périodes plus calmes où la faible turbulence du milieu est favorable à la productivité (Bakun *et al.*, 1983; Belvèze, 1980; Roy, 1990). Au Sénégal Laloe et Samba (1989) ont montré que les variations de mortalité par pêche pouvaient être modélisées en distinguant une variabilité de haute fréquence liée aux changements d'espèce cible, une variabilité de moyenne fréquence liée aux saisons climatiques, et une variabilité de basse fréquence issue de changements majeurs tels que la technologie, la tactique de pêche ou la découverte de nouvelles ressources.

On voit donc que la tendance en halieutique est de descendre vers des échelles spatiales et temporelles de plus en plus fines pour mieux comprendre les phénomènes (la trop célèbre expression scolaire:

"aller du général au particulier"). Toute généralisation dans ce sens serait cependant hâtive. Nous donnerons pour preuve quelques contre-exemples, montrant en particulier que parfois la source de la variabilité interannuelle peut se situer au niveau de phénomènes climatiques à long terme, présentant une tendance ou une pseudo-périodicité, même s'il est vrai que l'on est bien souvent incapable d'identifier précisément ce phénomène. L'une des raisons en est la non-indépendance entre les variables de l'environnement (colinéarité ou relation non linéaire).

Le premier concerne les études de sédimentation des débris organiques de poissons (écailles et vertèbres) conservés intacts depuis des siècles dans le sédiment anaérobie des fosses profondes. Cette approche a été initiée par les travaux pionniers de Soutar et Isaacs (1974) en Californie qui ont montré qu'il pouvait exister des effondrements de stocks et des substitutions d'espèces en l'absence d'exploitation. Nous avons utilisé la même approche pour la population pélagique de l'Orient du Vénézuéla (Llano *et al.*, 1990) et observé ici aussi de grandes fluctuations de densité d'écailles et de vertèbres (toutes espèces confondues) correspondant à une époque où l'influence de la pêche pouvait être considérée comme négligeable. Ce type d'étude, également reconduite dans d'autres régions du globe par d'autres équipes, a largement contribué à conforter une révision des thèses conventionnelles qui supposaient que la pêche constituait le facteur essentiel gouvernant les fluctuations d'abondance.

Le second exemple a trait aux études récentes de la variabilité du recrutement à l'échelle séculaire à partir des données historiques quantitatives, ou semi-quantitatives, voire qualitatives. On en trouvera des exemples dans Binet (1988) ayant trait aux sardines et aux harengs d'Europe, et dans Goy *et al.* (1989) quant à une espèce pélagique non exploitée: la méduse urticante.

Ces deux premières séries d'exemples posent le problème de la distinction entre les fluctuations d'abondance qui peuvent être attribuées seulement à une variation de recrutement d'une population, et celles qui correspondent plutôt à l'émergence de nouvelles populations suite à l'influence de tendances climatiques majeures. Ce problème s'est posé aussi bien pour des espèces tempérées (harengs de la Baltique, morues du Groënland) que pour des espèces tropicales étudiés par l'ORSTOM: émergence du stock "C" de sardines au large du Sahara depuis 1974 suite au renforcement de l'upwelling (Fréon & Stéquert, 1979; Sedikh *et al.*, 1979); explosion démographique du baliste le long des côtes ouest-africaines depuis 1979 (Caverivière *et al.*, 1980); extension géographique ou apparition d'un nouveau stock de sardinelles en Côte d'Ivoire depuis 1983 (Binet & Pezennec, 1990).

La troisième série d'exemples concerne la modélisation de la production secondaire dans les systèmes d'upwelling côtiers. On connaît assez bien les mécanismes d'eutrophisation de ces milieux: le vent est le moteur du système, qui entraîne des remontées d'eaux profondes et riches en sels minéraux près de la surface, c'est à dire

dans la zone photique où la lumière permet au phytoplancton de se développer; le zooplancton se développe à son tour à partir de ce phytoplancton et les poissons pélagiques côtiers consomment ce plancton (fig. 1). Il paraissait assez simple *a priori* de modéliser une telle chaîne alimentaire, or toutes les tentatives, même de modélisation de la relation entre deux maillons contigus, ont échoué dès qu'il s'est agi de quantifier les relations. La raison essentielle réside -à notre sens- dans l'énorme variabilité, à la fois spatiale et temporelle, des maillons intermédiaires que constituent le phyto et le zooplancton. En revanche, si l'on ne considère que les deux maillons extrêmes (le vent et la production de poissons) on peut assez facilement mesurer leur variabilité car elle est seulement à dominante temporelle dans le cas du vent, et à dominante spatiale dans le cas du poissons. Les appareils météorologiques enregistreurs d'un côté, et les pêcheurs de l'autre, permettent donc d'obtenir des moyennes saisonnières ou annuelles qui ont un sens, ce qui n'était pas le cas pour le plancton jusqu'à ces dernières années (à présent la télédétection par satellite commence à fournir des indices représentatifs de la richesse en phytoplancton à grande échelle par l'analyse des canaux visibles). Ainsi, dans plusieurs régions d'upwelling, on a donc pu appliquer des modèles globaux de production ne prenant en compte qu'un indice climatique et la pression de pêche exercée sur le stock (Fréon, 1983; 1988; Cury & Roy, 1987; Fréon *et al.*, 1990; Labö, 1989).

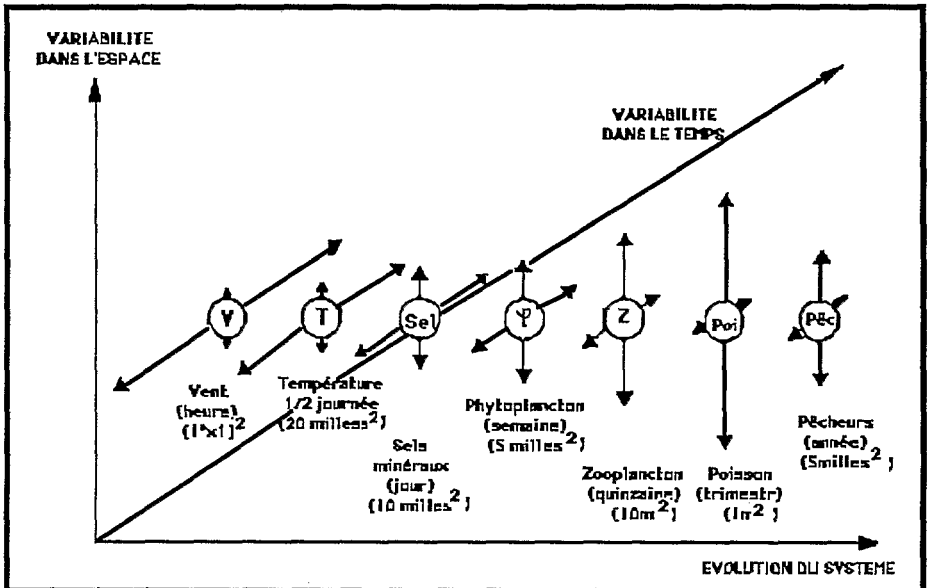


Figure 1. Schématisation de la variabilité des différents maillons du système de production (variables centrées réduites) dans une région d'upwelling côtier

(échelles de variabilité non linéaire; entre parenthèses: durée ou surface de relative stabilité du maillon)

Si l'on pousse encore plus loin l'idée de relier les extrémités de la chaîne de production et que l'on sort du modèle bio-climatique pour s'intéresser à ses conséquences sur l'économie, on s'aperçoit par exemple que le prix moyen annuel des sardinelles au Sénégal est inversement proportionnel à l'indice d'upwelling (Roy, 1990). On n'a pas encore cherché à valider et à modéliser cette relation, mais il est vraisemblable que la loi d'offre et de la demande constituerait une hypothèse sous-jacente à un éventuel modèle global.

L'exemple précédent nous amène à aborder (rapidement car il ne s'agit pas de notre discipline) l'influence des techniques récentes sur l'échantillonnage en océanographie physique. Jusqu'aux années 70, l'océanographe physicien était condamné à effectuer ses échantillonnages en mer à l'aide d'un bateau au cours de campagnes fort coûteuses. Il en résultait des pas d'échantillonnage très lâches dans le temps, si ce n'était également dans l'espace. Les observations par satellite permettent maintenant de réaliser des échantillonnages rapprochés (journaliers lorsque les conditions météorologiques sont favorables) et à grande échelle. De ce changement d'échelle, attendu depuis longtemps, a résulté un bouleversement des approches et des connaissances. Pour ne citer qu'un exemple en relation avec les poissons pélagiques côtiers, nous allons voir comment la formation et la disparition des upwellings côtiers a reçu un nouvel éclairage inattendu. On croyait en effet que l'arrivée et la disparition de l'upwelling le long des côtes de la Mauritanie et du Sénégal suivait un schéma linéaire de déplacement spatio-temporel, lié à la progression d'un front thermique. Les images de Météosat ont montré au contraire qu'il se forme tout au long de la côte des "poches" d'upwelling (dont l'apparition suit bien sûr une progression linéaire nord-sud) qui se rejoignent plus ou moins en milieu de saison, et qu'à la fin de la saison c'est par la disparition progressive de ces poches que l'upwelling "migre" vers le nord. La conséquence de ces mécanismes sur le piégeage éventuel des poissons est en cours d'étude (Demarck et Samb, 1990).

Les images satellitaires présentent l'inconvénient de n'intéresser que la couche superficielle et d'être tributaires (pour la plupart des canaux) des conditions atmosphériques. Cet handicap n'existe pas avec les appareils enregistreurs qui se sont développés récemment: bouées de surface émettant vers les satellites ou appareils totalement immergés et localisables par hydro-acoustique). En parallèle à ces nouvelles possibilités technologiques, un réseau de collecte des informations météorologiques et hydrologiques s'est mis progressivement en place sur les navires marchands croisant sur tous les océans du globe. La conséquence de toutes ces innovations a été une vision planétaire et sur le long terme des phénomènes climatiques et des liaisons océan-atmosphère. Une conséquence pratique pour l'halieute a été la découverte de "téléconnexions" dans le système, qu'elles soient d'origine atmosphériques ou liées à l'existence d'ondes internes de basse fréquence (Merle, 1980; Servain *et al.*, 1982). Ces couplages trans-océaniques du climat sont toujours associés à des décalages temporels qui peuvent permettre un certain degré de prédiction. Cet avantage est intéressant pour utiliser

certains modèles bio-climatiques à des fins prédictives (Mendelssohn & Roy 1984).

Une autre retombée de la connaissance des téléconnexions climatiques réside dans l'éclairage qu'elles apportent sur l'étude à l'échelle mondiale du synchronisme des variations d'abondance des stocks de petits pélagiques côtiers. En effet l'analyse des séries temporelles de captures annuelles des grandes pêcheries mondiales de sardines (et autres clupéidés) sur plus d'un demi-siècle, montre des variations relativement synchrones ou décalées d'un nombre d'années correspondant aux différences d'âge moyen d'exploitation, ce qui laisse supposer que leur recrutement serait influencé par des phénomènes climatiques globaux (Crawford *et al.*, 1990). On a là un autre exemple de l'intérêt d'un élargissement de l'échelle spatio-temporelle d'analyse.

Dans le même ordre d'idée, l'étude comparative des stratégies démographiques connaît un certain renouveau. Après une approche globale visant à établir une classification écologique générale dans le règne animal, on s'intéresse maintenant de plus en plus aux différences subtiles entre différents stocks mondiaux d'une même espèce, ou entre espèces proches par leur phylogenèse, ou encore entre des espèces différentes occupant des niches écologiques similaires. Cette approche permet de mieux comprendre les phénomènes régissant la régulation des stocks et leur occupation de l'espace. On trouvera des exemples chez Sainclair & Iles (1989) pour le hareng et à l'ORSTOM pour les sardinelles (Fréon, 1986; Cury & Fontana, 1989) ou d'autres espèces pélagiques côtières (Cury, 1989). Ce dernier travail aborde également l'influence comparative des pressions sélectives du milieu sur des espèces numériquement dominantes ou dominées.

LE POIDS DES TRADITIONS

Que ce soit au niveau de la collecte de l'information de base ou au niveau de l'analyse statistique, le choix de l'échelle spatiale ou temporelle est trop souvent conservateur, guidé par des traditions ou de vieilles habitudes héritées d'autres disciplines.

On notera à ce propos qu'en l'absence d'analyse préalable les regroupements de données se font en utilisant des échelles temporelles calendaires (semaine ou quinzaine, mais plus souvent mois et année) et que l'on reste ensuite souvent prisonnier de ce choix initial. Or l'analyse objective des données montre bien souvent que, non seulement ces échelles ne conviennent pas, mais de plus que leur point d'origine (le premier jour du mois ou de l'année par exemple) se situe au milieu d'une période homogène. Ainsi au Sénégal la période d'upwelling commence début novembre et se termine fin juin, mais les données biologiques sont rarement analysées selon ce découpage.

Dans le même ordre d'idée, on constate trop souvent que la saisie informatique des données est encore effectuée en gardant en tête le schéma des imprescriptibles 80 colonnes des cartes perforées et des limites de l'informatique des années 60. De là résulte peut-être la persistance des pré-codages ou des regroupements des informations saisies, qui interdisent ensuite tout recodage ou analyse plus fine. Ainsi dans le cas des collectes de statistique de pêche la profondeur exacte est souvent codée en tranches bathymétriques, de même l'heure de pêche pourra être codée par tranches horaires, la zone de pêche est saisie sous la forme d'un numéro de carré statistique dont les limites ont été fixées arbitrairement (alors que la position exacte est disponible), les prises de divers coups de filet seront additionnées et regroupées sur un même enregistrement, etc.. Parfois des informations disponibles mais jugées d'intérêt secondaire ne seront pas saisies afin de ne pas "alourdir" le fichier (caractéristiques physiques des embarcations non immatriculées, état de la mer, turbidité, présence de bioluminescence, présence d'oiseaux de mer ou de bois flottants, prix de vente du poisson, destination, etc.).

Le matériel informatique actuel et les logiciels disponibles autorisent une saisie rapide (parfois automatique) et presque exhaustive de l'information puis une analyse à divers pas de temps et d'espace. Certains outils permettent d'ailleurs de définir de façon optimale ces pas, pour le jeu de données considéré. Trop souvent c'est encore l'outil statistique disponible qui définit le pas d'étude, si ce n'est l'échelle. En hydro-acoustique par exemple, on a pendant longtemps considéré que la variabilité intra-radiale était faible et homogène par rapport à la variabilité inter-radiale censée représenter l'essentiel de la source de variation, uniquement en raison de la disponibilité de formules adaptées à ce cas ("collapsed strata"), lequel semble être exceptionnel, comme le montre maintenant l'utilisation de la géostatistique (cf supra). De même nous avons vu qu'il était indispensable de définir le pas d'observation, permettant de regrouper le milliard d'observations correspondant à une campagne d'écho-intégration, en distance unitaire (ESDU). Or celle-ci a varié historiquement de 5 à 0.7 milles nautiques. Il est vraisemblable que le choix initial des pionniers norvégiens était lié à la graduation des cartes marines par 5 minutes d'arc de latitude. Cette distance est rapidement apparue trop élevée en milieu tropical, et les chercheurs FAO l'ont diminué de la moitié (2 milles pour faire un compte rond) à une époque où la saisie des données était manuelle. Ensuite la saisie automatique sur ordinateur a permis de ramener cette valeur à 0.7: cette réduction d'un facteur trois ou sept (pour 5 milles) ,s'il a pu être démontré *a posteriori* qu'elle améliorerait la qualité des résultats, est en fait encore quelque peu arbitraire

LE NIVEAU D'APPREHENSION DES SYSTEMES

Les problèmes de changement d'échelle spatiale ou temporelle rejoignent en fait le niveau à partir duquel on cherche à appréhender un système: celui du poisson individuel ou celui d'un groupe d'individus pouvant aller du banc à la population, voire à une communauté écologique multispécifique; celui du pêcheur individuel ou celui d'une communauté (qui sera définie par rapport à un armement, un village, une ethnie, etc); celui des poissons ou celui de l'ensemble du système pêche; etc. Nous illustrerons encore ces niveaux d'appréhension par quelques exemples spécifiques, relativement indépendants des échelles spatio-temporelles.

Jusqu'à ces dernières années, les pêcheurs n'étaient inclus dans les modèles biologiques, bio-climatiques ou bio-économiques, que sous la forme d'un ou plusieurs groupes d'individus représentés par des variables décrivant leur effort de prédation sur le stock en fonction de divers paramètres liés à la puissance de pêche qu'il pouvaient développer. Des travaux récents ont montré que, aussi bien pour la pêche industrielle que pour les pêches artisanales, des stratégies individuelles de pêche existent, ou que les unités de pêche s'organisent en meutes pour prospecter le milieu et partager les risques de façon plus ou moins optimale. Ces différentes stratégies conditionnent fortement l'évolution de l'effort de pêche, son allocation spatio-temporelle et même le choix des engins et espèces cibles dans le cas complexe des pêches multispécifiques et multi-engins (Allen, 1990; Laloe et Samba, 1989). Dans le cas de la pêche artisanale du Congo, la stratégie de prospection est associée à une forte périodicité du nombre de sorties à l'échelle de la semaine: les ours de faible effort étant en priorité consacré à la prospection (Gobert, 1990).

On retrouve ces mêmes disparités au sein du groupe des pêcheurs lorsque l'on considère les conditions socio-économiques des différentes unités de pêche. Dans le cas de la pêche artisanale à la senne tournante au Sénégal, grâce à des enquêtes individuelles on a pu montrer qu'en dépit d'une très forte variabilité des revenus globaux des différentes unités de pêche, leurs "armateurs" étaient toujours en situation favorable pour réinvestir, même dans les cas où les revenus des pêcheurs étaient ridiculement bas. Ceci ne pouvait être perçu par une étude macro-économique qui montrait que le secteur était en crise (Fréon & Weber, 1983).

Au départ, les modèles structuraux de dynamique des population ne prenaient en compte que les valeurs moyennes des paramètres du stock. En raison des incertitudes sur l'estimation de ces paramètres - liées à leur variabilité- on a vu se développer ces dernières années des modèles de simulation de stocks et des études de sensibilité visant à mieux appréhender l'importance relative des différentes erreurs (Pereiro & Pallares, 1984; Laurec & Mesnil, 1985). Mais parfois ce progrès n'était pas suffisant pour rendre totalement

compte des phénomènes observés. Il est alors paru nécessaire de modéliser non plus l'ensemble du stock, mais les individus qui le composent. Ainsi dans le cas des sardinelles du Sénégal, aucun modèle général ne pouvait expliquer comment une espèce à croissance rapide pouvait présenter pendant plusieurs mois consécutifs des modes stationnaires de distribution de fréquences de taille, dès lors que l'hypothèse d'un arrêt total de la croissance ne pouvait être retenue pour la saison considérée. On a dû alors avoir recours à une modélisation "individuelle" du stock (Fréon, 1986). En pratique on a considéré que le stock était constitué de plusieurs cohortes annuelles (2 à 4) constituées chacune de 300 "individus types" présentant des caractéristiques individuelles de croissance et de mortalité distribuées selon une loi statistique prédéfinie, et effectuant leur migration en fonction de leur âge. Chacun de ces individus type avait dans le modèle plusieurs centaines de milliers de "jumeaux homozygotes" afin d'obtenir une simulation d'une population grandeur nature. Cette approche a permis de reconstituer par essais successifs la stabilité modale observée sous certaines hypothèses, dont certaines ont été vérifiées directement (Fontana, com. pers.) pour l'existence d'une reproduction dans une strate temporelle non observée jusqu'alors), ou indirectement (Kroger & Guthrie (1973) pour l'hypothèse d'un schéma de migration lié au stade de développement des individus sur une autre espèce de clupéidé marin).

Ces réflexions débouchent naturellement sur ce qui est supposé être à la base de toute la variabilité biologique, directement ou indirectement: la structure des populations. Les études d'identification des stocks par électrophorèse des enzymes ou par étude de l'ADN mitochondrial indiquent que dans bien des cas la variabilité inter-individuelle est au moins aussi importante que la variabilité inter-stock. Cela est le cas par exemple de l'anchois de Californie, étudié par Hedgecock *et al.* (1989). Toutefois ces mêmes auteurs donnent le contre-exemple de la sardine du Pacifique qui présente une faible variabilité, aussi bien intra que inter-stocks, en dépit de l'existence de fortes différences dans les tailles maximales observées dans ces différents stocks (de 17 à 25 cm). Ceci donne à penser que dans ce dernier cas la différenciation est directement induite par l'environnement, et non déterminée par la structure, contrairement à ce qui est généralement admis

CONCLUSION

Les exemples précédents ont montré qu'en halieutique et dans les disciplines qui s'y rattachent, on a toujours gagné, en termes de connaissance, en changeant d'échelle, que ce soit en allant plus dans le détail dans l'étude de l'une des composantes du système, ou au contraire en prenant du recul par rapport à l'objet de recherche en le situant dans un ensemble plus vaste. Ces "effets de zoom" concernent aussi bien la dimension spatio-temporelle que la diversité des champs disciplinaires dans le cas de l'halieutique.

Dans un domaine où de longues séries chronologiques sont la plupart du temps nécessaires pour aboutir à une analyse pertinente, se pose le problème du type d'échantillonnage à mettre en place et de son pas spatio-temporel. Bien souvent il s'agit d'un problème de coût, et des efforts ont été fait depuis les années 70 pour chercher à optimiser l'allocation de l'échantillonnage (voir par exemple l'échantillonnage des tailles et des âges dans les captures; Abramson, 1971; Laurec, 1979; Fréon, 1985). Dans d'autres cas au contraire, une information relativement bon marché et détaillée est disponible, grâce à des appareils d'enregistrement en continu ou grâce à l'existence de catégories socio-professionnelles réalisant directement ou indirectement un travail d'échantillonnage volontaire (services administratifs des douanes, des pêches, etc) ou non (pêcheurs). Malheureusement cette mine d'information est parfois sous-exploitée du fait que la saisie de l'information ne se fait pas avec le pas spatio-temporel convenable.

Les raisons de cette sous-exploitation tiennent parfois à des habitudes héritées d'une époque durant laquelle les problématiques étaient différentes (souvent monodisciplinaires), et/ou les outils nécessaires à cette analyse étaient peu disponibles ou mal adaptés.

Parfois la période critique est difficile à déterminer, *a priori*, en particulier pour ce qui est de l'influence du climat sur l'abondance ou sur la capturabilité, et une approche exploratoire modélisatrice est nécessaire, faisant parfois appel au domaine non-linéaire. On aura alors recours à des techniques d'analyse des séries chronologiques suivies de simulations. On soulignera toutefois le risque que présentent ces techniques si elles sont mal maîtrisées (non prise en compte de la colinéarité des variables, de leur autocorrélation, de leur saisonnalité, etc).

De façon très générale le problème du changement d'échelle est étroitement lié au problème central de la plupart des sciences de la nature: identifier les sources de variabilité. L'exemple des stocks pélagiques côtiers montre qu'il ne faut pas nécessairement chercher cette source de variabilité à la même échelle et dans le même domaine (biologique) que celui où elle est observée. On a vu ainsi que les facteurs climatiques à petite échelle spatiale et surtout temporelle peuvent structurer l'abondance d'une classe d'âge sur plusieurs années, ou encore que des facteurs anthropiques peuvent être responsables des modifications des captures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient D. Binet et Ph. Cury pour leurs suggestions.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRAMSON (N.J.), 1971.- Computer programs for fish stock assessment. FAO Fish. Tech. Pap. 101 : 1-154.
- ALLEN (P.), 1990. Influence of individual fishing strategy on fishing effort allocation (provisional title). in Impact des fluctuations environnementales sur la dynamique des stocks pélagiques côtiers en Afrique de l'Ouest, Ed. by Ph. Cury. ORSTOM, Paris (sous presse).
- BELVEZE (H.), 1984.- Biologie et dynamique des populations de sardine *Sardina pilchardus* Walbaum peuplant les côtes atlantiques marocaines et proposition pour un aménagement des pêcheries. Thèse Université Bretagne Occidentale, Brest, France : 532 p.
- BINET (D.) MARCHAL (E.) et PEZENNEC (O.), 1990.- *Sardinella aurita* de Côte d'Ivoire et du Ghana: Fluctuations halieutiques et changements climatiques in Impact des fluctuations environnementales sur la dynamique des stocks pélagiques côtiers en Afrique de l'Ouest, Ed. by Ph. Cury. ORSTOM Paris (sous presse).
- BINET (D.), 1982.- Influence des variations climatiques sur la pêche de *Sardinella aurita* ivoiro-ghanéennes : relation sécheresse surpêche. Océanologica Acta 5 (4) : 443-452.
- BINET (D.), 1983.- French sardine and herring fisheries: a tentative description of their fluctuations since the eighteenth Century In: Int. Symp. Long Term Changes Mar. Fish Pop., Vigo, (Spain) (T. Wyatt and M.G. Larrañeta, Eds), Consejo Superior de Investigaciones Cientificas: 253-272.
- CAVERIVIERE (A.), GERLOTTO (F.) et STEQUERT B.), 1980.- *Balistes carolinensis* nouveau stock africain. La Pêche Maritime n° 1229-20 août 1980 : 466-471.
- CRAWFORD (R.J.M.), UNDERHILL (L.G.), SHANNON (L.V.), LLUCH-BELDA (D.), SIEGFRIED (W.R.) and VILLACASTIN-HERERO (C.A.), 1990.- An empirical investigation of trans-oceanic linkages between areas of high sardine abundance. in Proceedings of the International Symposium on the Long-term Variability of Pelagic Fish Populations and their Environment, 14-17 Nov. 1989, Sendai, Japan (under press).
- CURY (Ph.), 1989.- Pressions selectives et nouveautes évolutives: une hypothèse pour comprendre certains aspects des fluctuations a long terme des poissons pélagiques côtiers. in Approches modélisatrices des relations à court, moyen et long terme entre la dynamique des stocks de poissons pélagiques côtiers et les fluctuations climatiques. Thèse de doctorat. Université de Paris 7: 197-242.

- CURY (Ph.) and ROY (C.), 1987.- Upwelling et pêche des espèces pélagiques côtières de Côte-d'Ivoire: une approche globale. *Oceanol. Acta*, 10 (3): 347-357.
- CURY (Ph.) and ROY (C.), 1989.- Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 670-680.
- DEMARCO (H.) et SAMB (B.), 1990.- Influence des variations rapide de l'upwelling sénégalais et de ses variations interannuelles sur la répartition des poissons pélagiques au Sénégal. in *Impact des fluctuations environnementales sur la dynamique des stocks pélagiques côtiers en Afrique de l'Ouest*, Ed. by Ph. Cury. ORSTOM, Paris, 21 p. (sous presse).
- FREON (P.), 1983.- Production models as applied to sub-stocks depending on upwelling fluctuations, in : G. D. Sharp and J. Csirke (eds.). *Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*, FAO, FIRM/R 291 (3) : 1047-1064.
- FREON (P.), 1985. - La variabilité des tailles individuelles à l'intérieur des cohortes et des bancs de poissons ; II : application à la biologie des pêches. *Océanol. Acta*, 8 (1): 87-99.
- FREON (P.), 1986.- Réponses et adaptations des stocks de clupéidés d'Afrique de l'Ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation : Analyse et réflexion à partir de d'exemple du Sénégal. Thèse de doctorat d'état. Université Aix-Marseille : 287 p.
- FREON, P. (1988).- Introduction of environmental variables into global production models. In: *Int. Symp. Long Term Changes Mar. Fish Pop.*, Vigo, (Spain) (T. Wyatt and M.G. Larrañeta, Eds), Consejo Superior de Investigaciones Cientificas: 481-528.
- FREON (P.) and (F.) GERLOTTO - 1988a. Methodological approach to study the biases induced by the fish behaviour during hydro-acoustic surveys. Communication to ICES annual meeting, Bergen Sept. 1988, C.M. 1988/B:52:16p.
- FREON (P.) and (F.) GERLOTTO - 1988b. Influence of fish behaviour on fish stock abundance estimations. ICES, Working group on Fisheries Acoustic Science and Technology, Ostende, Belgique, mai 1988. 7p.
- FREON P., MULLON C. and PICHON G. - 1990. CLIMPROD: a fully interactive expert-system software for choosing and adjusting a global production model which account for changes in environmental factors. *International Symposium on the Long-term Variability of Pelagic Fish Populations and their Environment*. 14-18 nov. 1989, Sendai, Japan.
- FREON, (P.), (M.) SORIA and (F.) GERLOTTO, 1989. Short-term variability of *Sardinella aurita* aggregations and consequences on acoustic survey results. ICES/FAST Work. Group Meet. Dublin, Ireland, 26-28 april 1989: 16

- FREON, (P.), (M.) SORIA and (F.) GERLOTTO, 1990. Changes in the fish school structure according to external stimuli. ICES/FAST W.G., Rostock, april 1990: 10p.
- FREON (P.) et STEQUERT (B.); 1979. - Note sur la présence de *Sardina pilchardus* (Walb.) au Sénégal : étude de la biométrie et interprétation. *Cybiurn*, 3 (6) : 65-90.
- FREON (P.) et WEBER (J.), 1985. - Djifère au Sénégal : la pêche artisanale en mutation dans un contexte industriel. 1ère partie : le milieu, la senne tournante, son impact national. 2ème partie : conséquences d'une innovation technique sur l'organisation économique artisanale. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 47 (3-4), 1983 : 261-304.
- GERLOTTO, F., 1989. Choix d'une stratégie d'échantillonnage et de stratification en écho-intégration. ICES/FAST Work. Group Meet. Dublin, Ireland, 26-28 april 1989: 38
- GERLOTTO F. and P. FREON - 1988. Influence of the structure and behaviour of fish school on acoustic assessment. ICES, annual meeting, Bergen, Sept. 1988, C.M. 1988/B:53 : 28P.
- GOBERT (B.), 1990.- Variabilité de l'activité de pêche aux filets maillants de surface par les pêcheurs artisans béninois de Pointe Noire (Congo). in *Impact des fluctuations environnementales sur la dynamique des stocks pélagiques côtiers en Afrique de l'Ouest*, Ed. by Ph. Cury. ORSTOM, Paris (sous presse).
- GOHIN (F.), 1985.- Geostatistics applied to fish distribution as derived from acoustic surveys. ICES/FAST Working Group Meet., Tromso, May 22-24 1985: 6
- GOY (J.), MORAND (P.) and ETIENNE (M.), 1989.- Long-term fluctuations of *Pelagia noctiluca* (Cnidaria, Scyphomedusa) in the western Mediterranean Sea. Prediction by climatic variables. *Deep-Sea Research*, 36 (2): 269-279.
- GUILLARD (J.), GERDEAUX (D.) and CHAUTRU (J.M.), 1987.- The use of geostatistics for abundance estimation by echointegration in lakes: the example of lake Annecy. *Int. Symp. Fish. Acoustics*, June 22-26, 1987, Seattle, USA: 17
- HEDGECOCK (D.), HUTCHINGSON (E.S.), LI (G.), SLY (F.L.) and NELSON (K.), 1989.- *Genetic and morphometric variation in the Pacific sardine, *Sardinops sagax caerulea*: Comparison and contrasts with historical data and with variability in the Northern anchovy, *Engraulis mordax**. *Fish. Bull. U.S.*, 87: 653-671.
- KROGER (R. L.) et GUTHRIE (J. F.), 1983.- Migrations of tagged juvenile Atlantic Menhaden. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 102 (2): 417-422.
- LALOE (F.), 1985.- Contribution à l'étude de la variance d'estimateurs de biomasse de poissons obtenus par écho-intégration. *Océanogr. Trop.* 20 (2): 161-169.

- LALOE (F.), 1989.- Un modèle global avec quantité de biomasse inaccessible liée aux conditions environnementales: application aux données de la pêche ivoiro-ghanéenne de *Sardinella aurita*. Aquat. Living Resour., 1: 289-298.
- LALOE (F.), et SAMBA (A.), 1989.- La pêche artisanale au Sénégal: ressource et stratégies de pêche. Thèse doctorat, Université de Paris-sud: 461 et annexes.
- LAUREC (A.), 1977.- Analyse et estimation des puissances de pêche J. Cons. int. Explor. Mer, 37 (2); 173-185.
- LAUREC (A.), 1979.- Analyse des données et modèles prévisionnels en écologie marine. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille: 248 p. et annexes.
- LAUREC (A.) et LE GUEN (J.C.), 1977.- c.p.u.e. des senneurs et abondance; impact des structures fines. Rec. Doc. Sci. ICCAT, 8 : 30-54.
- LAUREC (A.) et MESNIL (B.), 1985.- Rendement par recrue et analyse des cohortes de Jones: étude de sensibilité. Cons. Int. Explor. Mer C.M. 1985/G: 23 p. (mimeo).
- LLANO (M.) CARDENAS (J.), MAYZ (L.), GUEVARA (P.), ARMAS (A.), FREON (P.), KIMBERLEY (M.) y ABU-JABER (N.) - 1990. Elementos biogénicos de los sedimentos de la fosa de Cariaco y los recursos icticos del Nororiente Venezolano. In: Congreso Latinoamericano sobre ciencias del mar, Cumana, Octubre 1989 (sous presse).
- MATHERON (G.), 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Masson et Cie, Paris: 305
- MENDELSSOHN (R.) and CURY (Ph.), 1987.- Fluctuations of a fortnightly abundance index of the Ivoirian coastal pelagic species and associated environmental conditions. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 44 : 408-421.
- MENDELSSOHN (R.) and ROY (C.), 1984.- Remote forcing of sea surface temperature and tuna fishery variations in the gulf of Guinea. Tropical ocean-atmosphere newsletter, 26: 5-7.
- MERLE (J.), 1980.- Variabilité thermique annuelle et interannuelle de l'Océan Atlantique Equatorial Oriental, l'hypothèse d'un El Niño atlantique. Océanol. Act., 3 (2) : 209-220.
- PARRISH (R.A.), BAKUN (A.), HUSBY (D.M.) and NELSON (C.S.), 1983.- Comparative climatology of selected environmental processes in relation to eastern boundary current pelagic fish population in : G. D. Sharp and J. Csirke (eds.). Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources, FAO, FIRM/R 291 (3) : 731-777.

- PEREIRO (J.A.) and PALLARES (P.), 1984.- Consequences of introducing errors in the value of input parameters in the length distribution analysis (R. Jones), as applied to the northern stock of hake. Cons. Int. Expl. Mer C.M. 1984/G 61: 17. (mimeo).
- PIERRE (J.S.), GUILLOME (M.) et QUERRIEN (M.T.), 1986.- Une méthode statistique et graphique de recherche des périodes de l'année où les populations animales sont particulièrement sensibles à une composante donnée du climat (périodes critiques): Application au cas des pucerons des céréales. Acta Oecol. gener. 7 (4): 365-380.
- PITCHER (T.J.), 1985.- Functions of shoaling behaviour in teleosts. in: The behaviour of teleosts fishes (Pitcher T.J. ed.), Croom Helm, London: 294-337.
- REBERT (J.P.), 1979.- Un essai d'interprétation de l'influence des conditions de milieu sur les rendements de la pêche industrielle dakaroise de *Sardinella aurita*, in : Rapport du groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques côtiers ouest-africains de la Mauritanie au Libéria (26° N à 5° N). COPACE/PACE Series/78/110 (F) : 165 p.
- ROY (C.), 1990.- Vous avez-dit upwelling? in Impact des fluctuations environnementales sur la dynamique des stocks pélagiques côtiers en Afrique de l'Ouest, Ed. by Ph. Cury. ORSTOM, Paris (sous presse).
- SEDYKH (K.A.), et al. 1979.- Etude de l'upwelling près de la côte de l'Afrique du nord-ouest par l'Institut Atlantique de Recherches Scientifiques de l'Industrie de la Pêche et de l'Océanographie, in : Rapport du groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques côtiers ouest-africains de la Mauritanie au Libéria (26°N à 5°N). COPACE/PACE Series 78/10.
- SERVAIN (J.), PICAUT (J.) et MERLE (J.), 1982.- Mise en évidence d'un couplage à longue distance entre le vent et la température de surface dans l'Atlantique Equatorial. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 294 : 4 p.
- SIMARD (Y.) and (F.) GERLOTTO, 1990.- Exploration of the applicability of geostatistics in fisheries acoustics. CIEM/ICES Working group on Fisheries Acoustic Science and Technology Rostock, April 1990: 27 p.
- SINCLAIR (M.) and ILES (T.D.), 1989.- Population regulation and speciation in marine teleosts. Journal du Conseil 45 (2): 165-175.
- SHARP (G.D.), 1980.- Workshop on the effects of environmental variation on the survival of larval pelagic fishes. Lima, 29 april-5 may 1980. IOC-UNESCO Workshop Report, 28 : 323 p.
- SOUTAR (A.), and ISAACS (J.D.), 1974.- Abundance of pelagic fish during the 19th and 20th centuries as recorded in anaerobic sediment off the Californias. Fish. Bull. U.S., 72 (2) : 257-273.
- WEIHS, (D.), 1973. Hydromechanics and fish schooling. Nature, London, 241: 290-291.

TRANSFERTS D' ECHELLES EN OCEANOGRAPHIE

FRONTIER S.

Le problème des échelles dans la description et la modélisation des phénomènes s'est toujours révélé crucial en océanographie en raison du caractère continu du milieu liquide, et de la **continuité d'échelle de la turbulence hydrodynamique**.

Les effets de celle-ci conditionnent en effet les phénomènes océanographiques depuis l'échelle de la planète, jusqu'à l'échelle moléculaire à laquelle cette turbulence se résout en viscosité. A toute échelle la turbulence conditionne le brassage et le mélange entre éléments du milieu marin entrant en interaction. Les phénomènes concernés vont des processus physico-chimiques (propriétés dépendant de l'homogénéisation du milieu, ou au contraire de la permanence d'une hétérogénéité) à la dynamique et au comportement des populations de poissons, en passant par production planctonique.

1 - INVENTAIRE DES ECHELLES SIGNIFIANTES ET OCEANOGRAPHIE PHYSIQUE ET BIOLOGIQUE

Pendant de nombreuses années l'océanographie physique s'est focalisée sur la description des grandes masses d'eau et des grands courants, c'est-à-dire sur une description (et une compréhension) des phénomènes à l'échelle planétaire ou sub-planétaire pour l'espace, et pour le temps à une échelle incluant le rythme des marées, les périodicités saisonnières, et les vitesses de déplacements des courants transocéaniques.

Plus récemment l'intérêt s'est étendu, d'une part, aux phénomènes de plus longue durée, incluant par exemple le rythme solaire de 11 ans mais aussi des dérives climatiques à plus longue échéance ; d'autre part, à des phénomènes à plus "petite" échelle spatio-temporelle¹ incluant par exemple les mouvements tourbillonnaires, les

¹On adopte souvent, en océanographie et en écologie, une terminologie différente de celle des Géographes concernant les échelles d'espace et de temps : les phénomènes à "petite échelle" sont ceux qui intéressent des domaines d'espace petits ("échelle d'une baie") et des intervalles de temps petits ("échelle de la semaine, de la journée"), au contraire les phénomènes à "grande échelle" impliquent des domaines d'espace et des intervalles de temps grands ("échelle d'un océan", "échelle de l'année ou du siècle")

phénomènes côtiers etc. Cette évolution de la problématique est principalement liée :

(1) à l'intensification des études et à leur répétitivité, mettant en évidence l'existence de fluctuations à grande échelle, et leurs liaisons mutuelles jusqu'ici insoupçonnées (on s'est **rendu compte par exemple** que l'apparition du phénomène *El Nino* en hiver au large des côtes du Pérou, l'apparition des cyclones, et certaines caractéristiques des grands courants équatoriaux, était liés entre eux à l'échelle planétaire) ;

(2) a la mise en oeuvre de techniques nouvelles aptes à nous donner une vision renouvelée du milieu marin dans sa complexité : (i) télédétection, montrant l'existence d'un régime tourbillonnaire absolument général - les tourbillons les plus spectaculaires ayant un diamètre de l'ordre de la centaine de km et une durée de vie de l'ordre du mois. Notre vision de la Méditerranée en a été récemment complètement bouleversée par rapport à la vision antérieure, héritée d'une description au moyen stations océanographiques espacées ; (ii) *acquisition de données en continu*, soit grâce à des appareils enregistreurs manoeuvrés depuis le bateau, soit grâce à des stations fixes enregistreuses - les données recueillies n'étant exploitables que grâce aux moyens informatiques actuels. Le milieu marin est alors apparu hautement hétérogène, véritablement "feuilleté" le long de la verticale, et fluctuant dans le temps selon des rythmes plus nombreux qu'on ne le pensait.

Pour les biologistes, le grand intérêt de cette multiplication des échelles d'observation, *donc de cette multiplication des phénomènes décrits*, a été de démontrer que les phénomènes biologiques sont davantage liés aux phénomènes physiques à petite et moyenne échelles, qu'aux phénomènes d'échelle planétaire et annuelle jusqu'ici trop exclusivement envisagés. Une nouvelle océanographie biologique en émerge actuellement, très attachée aux réactions des populations vivantes et des écosystèmes aux phénomènes à "meso-échelle".

En même temps, notons-le, les variations à long terme (siècle) des caractéristiques biologiques des masses d'eau, en même temps que celle du climat, sont l'objet de recherches fondées, entre autres, sur l'historique des pêcheries industrielles et à plus long terme sur l'étude des séries stratigraphiques récentes.

Les océanographes ont dressé la liste des échelles spatio-temporelles auxquelles peuvent être décrits les phénomènes les plus déterminants du milieu marin. Dès 1978, HAURY et al. dressent un inventaire détaillé des différents processus et structures trouvés dans le plancton aux différentes échelles d'espace et de temps. LEGENDRE & DEMERS (1984) donnent le tableau récapitulatif suivant :

Echelle spatiale	Echelle temporelle	Phénomènes hydrodynamiques	Phénomènes biologiques
Moyenne échelle	Saisons	Advection, Tourbillons	Structure des communautés
Kilomètres	Jours	Diffusion turbulente	Biomasse, Taux de croissance
Petite échelle	Court terme	Mélange turbulent	Physiologie

et LEGENDRE et al. (1986)

	Phytoplancton	Zooplancton	Poissons	Moules
Echelle temporelle : temps moyende doublemen de la biomasse	1jour	10-40 jours	100-900 j.	120-500j.
Echelle horizontale : dimensios caractéristiques des taches, essaims, bancs etc.	0,1-1km	0,1-1km	1-100km	
Echelle verticale : extension du contrôle par les phénomènes physique	5-50m			0,5m

Précédemment LEGENDRE (1981) avait donné le tableau plus détaillé, reproduit ci-après, liant les phénomènes physiques et biologiques observés à des échelles variées dans le Golfe du Saint Laurent. Ce tableau montre de façon saisissante, concernant la production primaire phytoplanctonique, l'importance de la fenêtre d'observation sur la nature et la dynamique des phénomènes décrits.

On a donc vu apparaître en océanographie biologique des dimensions bien plus proches des micro et meso-échelles, que de l'échelle des grandes masses d'eau de l'océanographie physique classique (encore que la dimension verticale dans l'océan stratifié révélait plus fréquemment des coïncidences : les migrations verticales du zooplancton et des poissons se réalisent souvent sur des distances du même ordre de l'extension verticale des principales masses d'eau).

FACTORS	OBSERVATION SCALE		OBSERVATION SCALE		FACTORS
	Month 10-50 km	Week	Hour 10-50 m	Minute ±5 m	
LARGE SCALE FACTORS					LARGE SCALE FACTORS
Seasonal variations Salinity gradients	CELLS (Cardinal and Bérard-Therriault, 1976; Cardinal and Lafleur, 1977)				Seasonal variations Salinity gradients
Circulation	CHLOROPHYLL (Platt, 1972; Sinclair, 1978)				Circulation
Nutrients	PRODUCTION (Sevigny et al., 1979; Steven, 1974)				Nutrients
Vertical stability	CHLOROPHYLL and ATP (Sinclair, 1978)				Vertical stability
Turbulence			CHLOROPHYLL (Denman, 1976; Denman and Platt, 1975, 1976)		Turbulence
H ₂ VARIATIONS					H ₂ VARIATIONS
Vertical stability	CHLOROPHYLL and PRODUCTION (Sinclair, 1978)		PHOTOSYNTHETIC CAPACITY (Demers and Legendre, 1979)	CHLOROPHYLL (Demers et al., 1979)	Vertical stability
Critical depth	CHLOROPHYLL and PRODUCTION (Sinclair, 1978)		CHLORO. and PHOTOS. CAPACITY (Fortier and Legendre, 1979)		Critical depth
Tidal incursion			CELLS (Demers and Legendre, 1979; Lafleur et al., 1979)		Tidal incursion
H ₂ VARIATIONS					H ₂ VARIATIONS
Vertical stability			PHOTOSYNTHETIC CAPACITY (Fortier and Legendre, 1979)		Vertical stability
T and S gradients			CELLS (Fortier et al., 1978)		T and S gradients
Internal waves			CELLS (Lafleur et al., 1979)	CHLOROPHYLL (Denman, 1976; Denman and Platt, 1975, 1976)	Internal waves
SLACK WATER VARIATIONS			PHOTOSYNTHETIC CAPACITY (Fréchette and Legendre, ms)		SLACK WATER VARIATIONS
Vertical stability			CHLOROPHYLL (Auclair et al., ms)		Vertical stability
LIGHT					LIGHT
Vertical distribution			PHOTOSYNTHETIC EFFICIENCY (Roy and Legendre, 1980)		Vertical distribution
High frequency variations (>1 Hz)			PHOTOSYNTHETIC CAPACITY (Fréchette and Legendre, 1978)		High frequency variations (>1 Hz)
PHYTOPLANKTON					PHYTOPLANKTON
Endogenous rhythms			PHOTOSYNTHETIC CAPACITY (Demers and Legendre, 1979) CHLOROPHYLL (Auclair et al., ms)		Endogenous rhythms
Carboxylation pathways			PHOTOSYNTHETIC CAPACITY (Fréchette and Legendre, 1978)		Carboxylation pathway
Growth			CHLOROPHYLL (Fortier and Legendre, 1979)	CHLOROPHYLL (Denman, 1976; Denman and Platt, 1975, 1976)	Growth
Senescence			CHLOROPHYLL (Demers et al., 1979)		Senescence

Conclusion schématiques de 19 études sur le phytoplancton de l'estuaire du Saint Laurent (Canada). D'après LEGENDRE, 1981.

2 - TRANSFERTS D'ECHELLES.

Il ne suffit pas d'inventorier les échelles : encore faut-il faut voir comment elles interagissent. C'est l'objet des études de *transferts d'échelles* au sens de ce Colloque.

Diverses modalités apparaissent. Un cas simple et admis depuis longtemps est l'effet *de seuil* : un phénomène macroscopique apparaît quand les phénomènes microscopiques ont évolué suffisamment dans un même sens pour changer les conditions et provoquer un "basculement", un "point de non-retour" dans la dynamique globale (cf. *théorie des catastrophes*). Un autre cas, plus récemment considéré (et sans doute pas complètement indépendant du premier), est constitué par les **phénomènes de résonance** entre rythmes différents.

Des transferts d'échelles ont été considérés en océanographie physique, en océanographie biologique, et dans l'interaction entre physique et biologie.

2.1 - Transferts d'échelles en océanographie physique.

Ils reflètent essentiellement le phénomène physique de *turbulence*, qui se concrétise par l'apparition de tourbillons de diverses tailles au sein de toute masse d'eau en mouvement. Il se caractérise par une distribution de fréquence des tailles et des énergies des tourbillons, qui vont du grand tourbillon de 100 km de diamètre (décrit localement comme une *advection* d'eau d'origine externe), aux tourbillons de très petite taille assurant l'homogénéité locale de composition du milieu, en passant par toutes les tailles intermédiaires ayant suscité des descriptions particulières ("circulation de Langmuir" etc.).

L'énergie transite d'une taille de tourbillons à une autre. Ce transit donne les caractères de la masse d'eau, qui n'atteint jamais un "état stable" ¹. Lorsqu'un vent s'exerce sur une surface marine, il ne repousse pas uniformément cette surface mais fait apparaître des tourbillons d'une certaine extension verticale. Ces tourbillons, par frottement contre les couches d'eau sous-jacentes, mettent celles-ci à leur tour en mouvement, en suscitant des tourbillons plus petits qui s'enfoncent à leur tour et ainsi de suite. L'énergie se dissipe au cours du processus, se distribuant entre des tourbillons de plus en plus petits et de plus en plus nombreux. On peut dire que la turbulence est une dégradation de l'énergie cinétique, depuis l'advection suscitée par la source initiale d'énergie, jusqu'à la dissipation par viscosité moléculaire : il y a *transfert d'échelle* dans le continuum physique..

¹L'importance fondamentale des *régimes transitoires* dans les propriétés phénoménologiques des systèmes sera dans la deuxième note

Cependant la forme des bassins océaniques (fond océanique et côte : phénomènes de couches limites) donne généralement une importance particulière à la "vorticité" dans certains intervalles de tailles des tourbillons, qui alors s'identifient comme des phénomènes reconnaissables à une certaine échelle. En d'autres termes, il y a des sauts dans la distribution de l'énergie par tailles de structure : tourbillons de grande taille distincts au sein d'un milieu globalement turbulent (on décrit alors localement ce milieu turbulent d'une part, plus des tourbillons surimposés.

En conclusion, le transfert d'échelle en matière de mouvements des masses d'eau est parfaitement maîtrisé en tant que phénomène physique. Il n'en est pas de même lorsque l'intérêt se porte sur les variations à long terme : la variabilité des caractères des grands bassins océaniques à l'échelle de temps des changements climatiques (variations pluriannuelles et dérives à long terme) échappe encore à une analyse déterministe ¹. En outre, des phénomènes à très grande échelle de temps, comme l'alternance des phases glaciaires et interglaciaires, semblent bien impliquer l'action des phénomènes biologiques (blooms agissant sur l'albedo).

2.2 - Transferts d'échelles dans les phénomènes biologiques.

Ici encore, l'interaction entre échelles est envisagée depuis longtemps, au moins de façon conceptuelle. On sait qu'un système vivant est organisé hiérarchiquement : la physiologie des cellules "s'intègre" dans le fonctionnement des organismes, la physiologie des organismes "s'intègre" dans le fonctionnement des populations, ces dernières dans le fonctionnement et l'évolution de l'écosystème. En outre, le fonctionnement et l'évolution d'un élément ou d'un sous-système ne sont pas les mêmes s'il est isolé (à supposer qu'il puisse vivre isolé...) ou s'il est plongé dans un système plus vaste d'interactions - et dans ce cas, ils dépendent du système. Le transfert d'échelles se produit donc, en biologie, sans aucune exception et dans les deux directions.

En dynamique des populations, on constate souvent des phénomènes différents à l'échelle locale et à court terme, et à une échelle spatiale plus vaste et sur le long terme. En effet, une population peut se trouver localement (et temporairement) épuisée, ou au contraire surabondante, alors que sur l'ensemble de son territoire et à long terme, en raison des déplacements incessants des individus, elle se maintient à une densité conforme à ses ressources. Le transfert d'échelles peut également se réaliser dans l'ordre de l'organisation: deux populations (une proie, un prédateur) subiraient, si elles étaient séparées l'une de l'autre, des évolutions exponentielles, l'une négative vers l'extinction, l'autre positive vers

¹On y voit aujourd'hui les effets d'une *dynamique chaotique* : cf, deuxième note,

l'explosion démographique. Réunies, elles interagissent : elles oscillent en décalage de phase (ce qu'elles ne faisaient pas isolées), et l'ensemble acquiert une stabilité du non pas aux propriétés particulières des deux populations, mais à leur interaction. Au delà du couple d'espèces, l'augmentation de la *diversité spécifique* aboutit dans **certaines conditions** à une augmentation de la stabilité et de la résilience du système entier, en raison des solutions alternatives que cette diversité autorise dans les cas accidentels. Il y a transfert des propriétés des éléments vers ceux du système, et transfert des propriétés de l'ensemble vers celles des éléments, avec *transformation* de ces propriétés due à l'existence du réseau d'interaction. Il s'agit d'un **transfert d'échelle dans l'ordre des complexités** - avec un aspect métrique puisque la diversité est une propriété fractale (voir seconde note et FRONTIER, 1987).

On note une organisation hiérarchique de l'écosystème lui-même, les sous-systèmes stables interagissant. Des écosystèmes ~ou sous-écosystèmes, qu'importe le vocabulaire : il est relatif~ en contact l'un de l'autre interagissent au niveau de l'interface, un sous-système à organisation développée pouvant consommer la production d'un autre, moins organisé et plus productif (FRONTIER, 1978, 1986 ; FRONTIER & VIALE, 1990). Un ensemble d'écosystèmes en interaction constitue un nouveau système, à un niveau d'appréhension supérieur ; ce système de plus grande taille a des propriétés nouvelles : il y a eu transfert d'échelle.

2.3 - Transferts d'échelles entre physique et biologie : théorie des ergoclines

Depuis SVERDRUP (1953), on sait que l'action du milieu physique sur les caractéristiques et l'évolution des populations vivantes marines ne ne limite pas, tant s'en faut, à l'établissement de l'ambiance nécessaire au maintien de la vie. L'auteur met en effet en évidence une ~profondeur critique" a l'intérieur de laquelle, *pour des raisons dynamiques*, la couche homogène doit être confinée pour que le bloom phytoplanctonique printanier puisse se produire. Plus récemment les travaux de DENMAN & PLATT (1975, 1976), DENMAN (1976), concernant l'interaction entre l'écophysiologie des cellules phytoplanctoniques et l'hydrodynamisme, confirment ce couplage entre hydrodynamique et dynamique des populations. L'énergie mécanique injectée dans le milieu aquatique pilote, par les rythmes auxquels elle l'atteint, la productivité biologique. La raison en est maintenant bien comprise.

Le milieu marin se caractérise en effet, du point de vue de sa capacité de produire de la matière vivante, par un handicap tenant à la localisation différente des éléments nécessaires à la synthèse de la matière organique. En effet la lumière n'atteint que les couches supérieures. Au contraire les réserves de sels nutritifs (phosphates, nitrates) sont localisées en profondeur car la matière organique, légèrement plus dense que l'eau de mer, a constamment tendance à

sédimenter, étant en même temps la proie d'une attaque bactérienne qui régénère, à terme, les sels minéraux - mais en les libérant dans les couches , cependant que les couches supérieures en ont été épuisées par la photosynthèse. En conséquence, la production végétale est strictement liée aux remontées d'eau profonde, susceptibles de ramener les sels nutritifs dans les couches éclairées, ou les cellules végétales pourront les utiliser à nouveau.

Cette remontée d'eaux profondes se fait soit grâce à des turbulences plus ou moins sporadiques qui érodent la réserve sous-jacente de sels nutritifs et, par les tourbillons évoqués au ~ 2.1, la répartissent dans la couche supérieure ; soit par des phénomènes océanographiques plus permanents, liés à la circulation générale et à la climatologie, comme les upwellings et les dômes. Quelle que soit la taille du phénomène, il demande une énergie qui a été appelée par MARGALEF (1978) *énergie auxiliaire de l'écosystème, ou encore énergie de covariance* - puisqu'elle a pour effet de remettre en présence (de faire "covarier") les éléments devant entrer en interaction pour qu'une photosynthèse puisse avoir lieu : lumière, sels nutritifs et cellules chlorophylliennes.

Cette énergie étant largement d'origine solaire (échauffement différentiel des masses d'eau et d'air, provoquant vents et courants), on doit dès lors considérer qu'une partie de l'énergie solaire est stockée dans la biomasse au terme du phénomène de photosynthèse, mais à condition qu'intervienne une autre partie de l'énergie solaire pour permettre la "covariance". Dans les cas où cette énergie auxiliaire a pu être évaluée, on s'est aperçu qu'elle était 20 à 30 fois plus importante que l'énergie proprement photosynthétique.

En fait, ce n'est pas la quantité *d'énergie auxiliaire*, qui compte ici, mais la *précision d'ajustement* du lieu de l'injection (la même quantité d'énergie apportant des sels nutritifs là où ils ne peuvent pas être utilisés ne produirait pas d'effet biogène), et également le rythme de cette injection, comme les exemples suivants vont permettre de le faire comprendre.

Supposons qu'un temps calme ait duré un certain temps en été, de sorte que la masse d'eau se trouve stratifiée et stable ¹ : de l'eau réchauffée se trouve en surface, séparée des eaux plus froides sous-jacentes par une thermocline peu profonde. Dans ces conditions le phytoplancton, bien illuminé et à une température favorable, se multiplie intensément. Ce faisant, il épuise la couche d'eau de surface en sels nutritifs et son développement cesse, car la diffusion des sels nutritifs depuis la profondeur est arrêtée par la thermocline.

Si un vent assez fort s'installe, il va mettre l'eau de surface en mouvement et, grâce à la turbulence évoquée ci-dessus, va rompre la thermocline, et homogénéiser et déstabiliser la couche supérieure

¹ Une nasse d'eau stratifiée est stable verticalement en raison des différences de densité si elle s'homogénéise, elle devient instable c'est-à-dire que tout élément de la couche est en équilibre indifférent à n'importe quel niveau

sur une profondeur importante (fonction de la force du vent). La réserve de sels nutritifs est ainsi renouvelée, et les cellules végétales peuvent recommencer à se multiplier. Toutefois, ces dernières sont dispersées dans l'épaisseur de la couche homogène au même titre que toutes les autres substances dissoutes ou en suspension. De ce fait, elles se trouvent dans des conditions moyennes de luminosité moins favorables, étant sous illuminées une bonne partie du temps : leur multiplication s'en trouve ralentie.

Les océanographes s'étaient depuis longtemps rendus compte d'une relation entre la production primaire d'une couche d'eau de surface et son état de stratification (ou de stabilité). Mais les résultats étaient contradictoires. Un régime longtemps calme et un régime longtemps venté sont l'un et l'autre défavorable ~ la production primaire ; la situation la plus favorable est au contraire une *alternance de périodes calmes et de périodes ventées, c'est-à-dire de périodes de stabilité et d'instabilité, selon un rythme favorable*. Dans ces conditions optimales, les cellules voient leur réserve en sels nutritifs périodiquement renouvelée, et se trouvent suffisamment longtemps en luminosité favorable pour pouvoir les utiliser. Le meilleur rythme dépend des circonstances concrètes (forme et taille du bassin concerné etc.) ; des périodicités favorables ont été signalées allant selon les cas de quelques heures à un an. Des coups de vents séparés de 5 ou 6 heures et séparées par des périodes calmes (conditions rencontrées aux inter-saisons) se sont montrés corrélatifs d'une forte production primaire dans le golfe du Saint Laurent (FORTIER LEGENDRE, 1979 ; LEGENDRE, 1981). A l'échelle d'un upwelling se reproduisant chaque année à une certaine saison, ou permanent, la biomasse phytoplanctonique maximale coïncide avec le ralentissement des vents, qui permet une certaine stratification des eaux remontées de la profondeur avec leurs sels nutritifs, et l'illumination optimale des cellules aptes à utiliser ces derniers (WROBLESKI, 1977 ; BELVEZE, 1984~. Pour des raisons voisines, lorsqu'un *front* sépare une masse d'eau stratifiée d'une masse d'eau verticalement homogène, la production se déplace du côté stratifié (PINGREE et al., 1976, 1978). Etc. Des revues très documentées sur le contrôle de la production primaire par les phénomènes physiques dans l'eau de mer, avec influence des échelles, seront trouvés dans DENMAN & POWELL (1984), LEGENDRE & DEMERS, (1984), LEGENDRE et al. (1986), HOEPFFNER et al. (1989), et dans le volume des *Proceedings* du Colloque international "*Toward a theory on biological-physical interaction In the world ocean*" (ROTHSCHILD edit., 1988).

La dépendance de la biologie des masses d'eau vis-à-vis de l'injection d'énergie mécanique "auxiliaire" à un rythme convenable s'est imposée ces dernières années non seulement comme une cause de l'augmentation locale de production primaire, mais comme une exigence fondamentale : les variations observées de la production marine dépendent beaucoup plus de la répartition de l'énergie auxiliaire dans le milieu, que de celle de l'énergie "primaire". Cette généralisation a donné lieu à une *Théorie des ergoclines* dont nous

allons donner les grandes lignes, en suivant LEGENDRE & DEMERS (1985), LEGENDRE et al. (1986).

Le point fondamental de la théorie est que **la production primaire se développe essentiellement au niveau des transitions spatio-temporelles entre des conditions de stabilité et d'instabilité** : fronts hydrologiques, gradients abrupts de teneur en sels nutritifs, interface eau-sédiment, transition temporelle entre périodes de stabilité et d'instabilité verticale de la colonne d'eau, etc. Ces structures ont en commun l'existence d'un **gradient spatial et/ou temporel intense d'énergie auxiliaire - nommé ERGOCLINE**.

L'hypothèse explicative est la suivante : **une augmentation de production a lieu au niveau d'un ergocline comme conséquence d'une "résonance" ("matching" ou "tuning") entre les échelles physiques et les échelles biologiques**.

Cette "résonance" est particulièrement évidente lorsqu'on se réfère au phénomène de turbulence hydrodynamique, où le *transfert d'échelles* est évident physiquement (cf. ~ 2.1) : la turbulence est une dégradation de l'énergie cinétique en tourbillons de tailles de plus en plus petites, à partir de la source d'énergie initiale. Cette dégradation se fait au contact d'instabilités, dont il résulte des phénomènes dont les dimensions spatio-temporelles peuvent devenir compatibles avec celles des phénomènes biologiques. Ainsi, au voisinage d'un front hydrologique, des cisaillements et des cellules de convection suscitent des apports de sels nutritifs dans la couche éclairée, et il s'ensuivra une intensification de la production primaire, pour autant que le rythme de ces apports soit compatible avec le rythme de la biosynthèse - comme il a été observé dans le cas des alternances de vent et de calme.

A noter encore que cette "résonance" entre phénomènes physiques et biologiques ne se limite pas à la production primaire, mais intéresse l'ensemble de la chaîne trophique, puisque les maillons herbivores et carnivores devront aussi trouver des ressources à un rythme compatible avec leur biologie. LE FEVRE et FRONTIER (1988~) font une comparaison suggestive entre plusieurs situations d'enrichissement en sels nutritifs dans une même région marine. Au large des côtes de Bretagne, trois phénomènes physiques contribuent à l'enrichissement des couches superficielles en sels nutritifs.

L'un de ces mécanismes est un *upwelling côtier saisonnier*, persistant assez longtemps pour qu'une chaîne alimentaires à copépodes et à poissons planctonophages s'établisse et se maintienne. Un autre mécanisme, de constante de temps bien plus courte, est une *onde interne* d'une quinzaine d'heures de période, qui s'approfondit en arrivant sur le plateau continental et érode la réserve profonde de sels nutritifs. Le phytoplancton est parfaitement capable d'intégrer sa réponse selon ce rythme de courte période ; il se maintient à partir de cet approvisionnement rythmique et, là encore, suscite l'apparition d'une chaîne à crustacés et poissons.

Le troisième mécanisme d'enrichissement est un *front dû à la marée* (front d'Ouessant). Il érode la réserve sous-jacente de sels nutritifs aux marées de vive-eau, c'est-à-dire avec une périodicité de 15 Jours, suscitant des blooms phytoplanctoniques selon cette périodicité. Or le temps de développement des populations de crustacés planctoniques est généralement de l'ordre de la dizaine de jours : ce décalage fait que les populations zooplanctoniques suscitées par le bloom coïncident à brève échéance avec la phase de raréfaction phytoplanctonique suivant l'interruption des apports nutritifs, et qu'elles ne peuvent se maintenir. La chaîne alimentaire à poissons ne peut s'établir, et elle est remplacée par une "chaîne à microhétérotrophes" constituée des bactéries décomposant la matière organique morte, de Protozoaires qui les consomment, et d'Appendiculaires.

Ainsi, face à des flux comparables de sels nutritifs vers la surface, la production de matière animale peut ou ne peut pas se réaliser selon la périodicité de ces apports, strictement liée à celle des phénomènes mécaniques moteurs. La condition limitante est, là encore, une "résonance" entre phénomènes physiques et biologiques.

Au total, l'interaction physique-biologie dans l'océan se réalise par un *changement d'échelle* des phénomènes hydrodynamiques, ces derniers devant coïncider avec les échelles biologiques pour pouvoir les piloter.

REFERENCES

- BELVEZE (H.), 1984 - Biologie et dynamique des populations de sardine *Sardina pilchardus* peuplant les côtes atlantiques marocaines et propositions pour un aménagement des pêcheries. Thèse Univ. Bretagne Occidentale (Brest), 532 p.
- DENMAN (K.L.) & PLATT (T.), 1975 - Coherences in the horizontal distributions of phytoplankton and temperature. *Mém Soc R Sci Liège*, 7 19-30
- DENMAN (K L.), 1976 - Covariability of chlorophyll and temperature in the sea. *Deep Sea Res*, 23 : 539-559
- DENMAN (K.L.) & PLATT (T), 1976 - The variance spectrum of phytoplankton in a turbulent ocean *J. mar. Res*, 34 : 593-601
- DENMAN (K L) & POWELL (T.M), 1984 - Effects of physical processes on planktonic ecosystems in the coastal ocean. *Oceanogr. mar, Biol ann Rev*, 22 : 125-168
- FORTIER (L.) & LEGENDRE (L.), 1979 - Le contrôle de la variabilité à court terme du phytoplancton estuarien : stabilité verticale et profondeur critique. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 36 : 1325-1335

- FRONTIER (S.), 1978 - Interfaces entre deux écosystèmes : exemples dans le domaine pélagique. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris, 54 : 95-106
- FRONTIER (S.), 1986 - Studying fronts as contact ecosystems. 55-66 in J. Nihoul edit., *Marine interfaces ecohydrodynamics*. Elsevier, Amsterdam.
- FRONTIER (S.) & VIALE (D.), 1990 - *Structure, fonctionnement et évolution des écosystèmes*. Masson, Paris, sous presse.
- HAURY (L.R.), Mc GOWAN (J.A.) & WIEBE (P.H.), 1978 - Patterns and processes in the time and space scales for plankton distribution 237-327 in J. H. Steele edit., *Spatial patterns in plankton communities*. Plenum Press, London
- HOEPPFNER (N.), SATHYENDRANATH (S) & PLATT (T), 1989 - La productivité des mers : vers une approche dynamique pluridisciplinaire 339-366 in M. Denis edit., *Océanologie, actualité et prospective*. Centre d'Océanologie de Marseille.
- LE FEVRE (J.) & FRONTIER (S.), 1988 - Influence of temporal characteristics of physical phenomena on plankton dynamics, as shown by North-West European marine ecosystems 245-272 in B J Rothschild edit , *Toward a theory on biological-physical interaction in the world ocean* Kluwer Acad Publ , Dordrecht
- LEGENBRE (L), 1981 - Hydrodynamic control of marine phytoplankton production : the paradox of stability 191-207 in J Nihoul edit , *Ecohydrodynamics*. Elsevier, Amsterdam.
- LEGENBRE (L.) & DEMERS (S), 1984 - Towards dynamics biological oceanography and limnology *Can J Fish Aquat Sci* , 41 : 2-19
- LEGENBRE (L) & DEMERS (S), 1985 - Auxiliary energy, ergoclines and aquatic biological production *Nat canad* , 112 : 5-14,
- LEGENBRE (L.) , DEMERS (S) & LEFAIVRE (D), 1986 - Biological production at marine ergoclines 1-29 in J Nihoul edit , *Marine interfaces ecohydrodynamics* Elsevier, Amsterdam
- MARGALEF (R), 1978 - What is an upwelling ? 12-14 in R Boje & M Tomczak edit , *Upwelling ecosystems* Springer Verlag, Berlin
- PINGREE (R D), HOLLIGAN (P.M), MARDELL (G T) & HEAD (R N), 1976 - The influence of physical stability on spring, summer and autumn phytoplankton blooms in the Celtic Sea *J mar biol Assoc U. K.*, 56 : 845-873.
- PINGREE (R.D.), HOLLIGAN (P.M.) & MARDELL (G.T.), 1978 - The effect of vertical stability on phytoplankton distributions in the summer on the north-west European Shelf. *Deep Sea Res* , 25 : 1011-1028
- ROTHSCHILD (B J.) edit., 1988 - *Toward a theory on biological-physical interaction in the world ocean* NATO Advanced Research Workshop, Bonas (France), 1-5 juin 1987. NATO ASI series, Series C, vol 239, 650 p Kluwer Acad Publ., Pays-Bas.

SVERDRUP (H.U.), 1953 - On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *J. Cons. Perm. Explor. Mer*, 18 : 287-295.

WROBLESKI (J.S.), 1977 - A model of phytoplankton plume formation during variable Oregon upwelling. *J. mar. Res.*, 35 : 357-394.

LES OUTILS MATHÉMATIQUES NOUVEAUX DU TRANSFERT D'ECHELLE. GEOMETRIE FRACTALE, RELATEURS ARITHMETIQUES, THEORIE DES CATASTROPHES, DYNAMIQUE CHAOTIQUE, ANALYSE NON STANDARD

FRONTIER S.

1 - LES MATHÉMATIQUES STANDARDS ET LE TRANSFERT D'ECHELLES.

Jusqu'à un passé récent, il semble que les seuls *transferts d'échelle* dont aient exactement rendu compte les mathématiques aient été le passage de l'"infiniment petit" à l'"infiniment grand". D'un système d'équations différentielles décrivant l'évolution "ponctuelle" et "instantanée" d'un objet, on déduit par intégration le comportement global de la totalité de l'objet jusqu'à la fin des temps. Ou d'une équation matricielle aux différences finies décrivant une transition pendant un pas de temps, on déduit le comportement vers un état soit stationnaire, soit perpétuellement oscillant¹.

Cette mathématique a longtemps fait merveille dans la prévision des systèmes de type "mécanique" - en fait, nous y reviendrons, pour celle de certains systèmes mécaniques seulement : les plus simples. Dès que des simulations et des théories ont commencé à cibler des objets complexes (en fait, des *système*, c'est-à-dire des ensembles d'interactions entre objets distincts), force a été de constater que de nombreuses propriétés échappaient à la prévision mécaniste. Or ces propriétés étaient, malheureusement, les plus fondamentales au plan de la compréhension de ces objets et de leur maîtrise pratique.

¹ Des pratiques décrivant la variabilité à différentes échelles d'observation, classiques comme applications de la statistique; analyse de la variance, analyse des signaux) sont des descriptions purement phénoménologiques. On distribue empiriquement la variance (ou la puissance) en fonction des causes de variabilité, notamment de l'échelle d'observation quand la partition des cas possibles est hiérarchique, ou entre les longueurs d'onde au terme d'une analyse de Fourier. Ces descriptions ne disent rien sur la façon dont le déterminisme à un niveau devient le déterminisme à un autre niveau. Du reste les variances des différents niveaux sont, dans le principe-même du calcul, considérées comme indépendantes (orthogonales), ce qui élimine le problème du transfert de causalité entre échelles !

Les modèles mécanistes (ceux, répétons-le, représentés par des systèmes d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles et d'équations aux différences finies) étalent, par essence, déterministes, c'est-à-dire que la connaissance d'un ensemble fini d'hypothèses de départ permettait de prévoir rigoureusement l'état de l'objet à n'importe quel instant ultérieur (et même antérieur dans le cas des phénomènes réversibles).

Cependant la première entorse à ce dogme est déjà ancienne, puisqu'il date des travaux de Poincaré au début de ce siècle : dans le *problème des trois corps*, l'auteur démontre que le comportement d'un système mécanique composé de plus de deux corps en interaction gravitationnelle n'est pratiquement prévisible que pour un laps de temps limité, définissant son "horizon temporel", et qu'au delà, d'infimes variations des conditions initiales font diverger exponentiellement les trajectoires dans l'espace de phase. Partant de deux états initiaux aussi proches qu'on peut l'affirmer, on trouvera des états finaux aussi éloignés que l'on veut. Puisque, dans la pratique, l'état initial d'un système mécanique n'est pas connaissable avec une précision infinie, cela revient à établir mathématiquement l'imprévisibilité, et l'indéterminisme à une échelle d'observation globale, d'un système mécanique quelconque...puisque un système réel comprend "en général~ plus de deux corps !

Ce principe a été appelé *sensibilité aux conditions initiales*. Il n'équivaut pas à un constat d'échec quant à la prévision des états macroscopiques car il a en même temps été démontré que pour une trajectoire s'éloignant indéfiniment d'un phénomène moyen, une autre, venant d'ailleurs, se rapproche du phénomène moyen, de sorte que celui-ci reste reconnaissable et prévisible à condition de ne pas s'en tenir aux détails.

Il reste à comprendre le microscopique aboutit à un macroscopique reconnaissable en dépit de la sensibilité aux conditions initiales. On a l'impression qu'une certaine autonomie est accordée à l'objet macroscopique vis-à-vis des fluctuations microscopiques, et ceci est typiquement un problème de *transfert d'échelles*. Jusqu'à un passé récent, la seule interprétation de ce phénomène était *statistique* c'est-à-dire faisait appel aux lois du hasard - expliquant par exemple pourquoi, à partir d'une dynamique très simple, mais répétée des milliards de fois, des chocs moléculaires, on obtenait macroscopiquement la loi de Marlotte ¹.

¹ La loi de Marlotte est retrouvée sur ordinateur dès qu'on simule 200 ou 300 molécules nombre infime par rapport à ceux qui interviennent dans la moindre vérification expérimentale. Les lois macroscopiques des gaz sur réseaux (voir communication de E. PERRIER, ce Colloque) apparaissent à partir de quelques dizaines de "molécules" simulées.

Le phénomène de *sensibilité aux conditions initiales* est depuis quelques années étudié de façon approfondie et la constatation de sa très grande généralité dans les systèmes réels se révèle d'une grande fécondité, puisqu'il a abouti à la récente *Théorie du chaos*.

Nous ne pouvons, dans cette note, d'exposer ces questions en détail et nous renvoyons le lecteur à quelques excellents ouvrages et articles récents, élémentaires tout en allant au delà de la vulgarisation car ils s'attachent à l'épistémologie et à la signification et philosophique profonde de cette nouvelle réflexion : EKELAND (1984), DE GENNES (1987), GLEICK (1987), CRUTCHFIELD *et al.* (1987), OTTINO (1989), pour nous en tenir à des textes en langue française.

La deuxième notion qui s'est imposée lorsqu'on a voulu modéliser des systèmes réels, est la *multiplicité des échelles signifiantes* dans l'appréhension d'un même phénomène.

Les mathématiciens ont été, sous cet aspect, largement précédés par les spécialistes des divers phénomènes (physiques, biologiques, sociaux...) qui de tout temps se sont attachés à décrire des phénoménologies à *différentes échelles d'espace, de temps et de complexité*, à voir dans toute structure une hiérarchie, et à rechercher des liens entre les phénomènes de différentes échelles. Malgré cela la modélisation des phénomènes a été ~et est toujours actuellement, à part quelques avancées très récentes, plus conceptuelles que pratiques) la modélisation d'une description à une échelle bien déterminée. Pour un phénomène complexe justiciable de plusieurs échelles d'observation - qui sont en même temps des échelles fonctionnelles, mais nous ne soulèverons pas ici cette question d'épistémologie - il y a autant de modélisation, et même de "théories" du phénomènes, que d'échelles de perception. On se s'aviserait pas d'extrapoler un modèle de productivité végétale valable sur un cycle de 24 heures, à une évolution séculaire : il s'agit de "phénomènes différents" bien qu'ils concernent les mêmes objets concrets (les végétaux), le même fonctionnement (la photosynthèse), et qu'ils soient simultanés (l'évolution séculaire étant la succession de dizaines milliers de jours successifs).

Les transferts d'échelles n'ont pas encore été modélisés.

Bien entendu les "phénoménologues" se penchent sur les interrelations entre phénomènes d'échelles différentes : évolutions distinctes selon des pas de temps différents ; dynamiques variées dans la hiérarchie des complexités, comme dans les structures observées à différents niveaux d'organisation d'un objet vivant (de la cellule à l'écosystème ou à la société). *L'interaction entre phénomènes d'échelles distinctes* reste une des questions scientifiques les plus épineuses posées aux spécialistes de toutes les disciplines : on peut dire qu'elle est aujourd'hui l'un des problèmes scientifiques les plus fondamentaux, avec la Relativité et la Mécanique quantique. Elle féconde aujourd'hui la réflexion dans tous les domaines scientifiques.

Notre propos est de montrer que des développements récents en épistémologie et théorie et systèmes et le développement de certains outils mathématiques nouveaux semblent aujourd'hui donner un espoir de solution la modélisation des transferts d'échelle. Certes le problème n'est pas encore vraiment résolu, et la vision actuelle est encore très philosophique ; cependant on commence, semble-t-il, à ton à savoir "où regarder" et "comment regarder".

2 - LE TRANSFERT D'ECHELLE DANS CERTAINS OUTILS MATHÉMATIQUES NOUVEAUX

On trouve des références implicites ou explicites aux transferts d'échelles dans plusieurs domaines récents des mathématiques.

Tout d'abord, la *Théorie des catastrophes* (THOM), si elle ne se réfère pas explicitement aux transferts d'échelle, donne un outil conceptuel où les phénoménologues reconnaîtront le "saut~ entre un déterminisme microscopique et un comportement global.

Puis la *Théorie des fractales* (MANDELBROT) et la théorie des *Relateurs arithmétiques* (MOULIN et Groupe SYSTEMA) formalisent des structures par niveaux, avec ou sans invariance d'échelle.

La *Dynamique chaotique*, qui introduit des *attracteurs étranges* ayant une dimension fractale, démontre l'existence d'un niveau macroscopique autonome, conséquence d'une itération poursuivie très loin d'un déterminisme microscopique en général très simple.

Les *Mathématiques non standard* (ROBINSON) ouvrent des perspectives qui nous semblent avec quelque rapport avec les précédentes, puisqu'elles recherche des structures apparaissant lorsqu'on itère un grand nombre de fois un processus microscopique, mais "avant d'arriver à l'infini".

La *Théorie des ensembles flous* (ZADEH) semble également fournir des concepts en rapport avec l'autonomie d'un niveau macroscopique, puisqu'elle part d'une valuation non manichéenne de l'appartenance d'un élément à un ensemble.

Nous allons passer en revue ces outils récents - très rapidement, et en renvoyant le lecteur à des ouvrages et articles de base pour plus de détail -, pour considérer leur pertinence vis-à-vis des problèmes de transferts d'échelles.

2.1 Théorie des catastrophes. Bifurcations

Dans les sciences concrètes, une échelle macroscopique apparaît lorsqu'un phénomène global, tel qu'un changement de dynamique, apparaît suite à une évolution continue du niveau microscopique,

dont les effets additifs atteignent un *seuil*. Ainsi, des variations climatiques lentes vont se répercuter de façon non linéaire sur la biologie ; la prolifération du phytoplancton marin va modifier l'albedo de la planète, en même temps que se modifie la répartition et l'importance des masses de glace, jusqu'à un point de non retour au niveau duquel se déclenche une nouvelle glaciation. Les phénomènes à la surface de la Terre sont alors rapidement modifiés, et pour longtemps. On a montré qu'une nouvelle glaciation s'installait en quelques centaines d'années, ce qui est faible par rapport à la durée des phases glaciaires et interglaciaires. L'évolution climatique a subi une **bifurcation**, de sorte que l'histoire du climat peut désormais se décrire à deux échelles de temps :

(1) l'échelle des variations interannuelles ou interséculaires, caractérisés par des dérives lentes, des périodicités etc. ; et

(2) l'échelle du million d'années à laquelle *de bifurcation en bifurcation* peut être décrite une histoire macroscopique.

La théorie des catastrophes de THOM est une topologie - et une topologie *différentielle*, c'est-à-dire qu'à l'instar des théories mécaniques, elle part de propriétés géométriques différentielles (locales) et les intègre afin de mettre en évidence des **singularités** de part et d'autres desquelles une dynamique peut être "qualitativement différente", et éventuellement se diriger vers des états stables distincts. La "catastrophe" est le fil du rasoir de part et d'autre duquel les trajectoires de l'espace de phase vont se diriger vers un attracteur ou un autre.

La classification topologique des catastrophes et leur représentation géométrique ("fronce", "papillon" etc.), ainsi que l'évocation par des représentations mécaniques des attracteurs et des "fils de rasoir" (limites entre bassins d'attraction) : positions d'équilibre de billes au fond d'une série de godets etc. - sont aujourd'hui répétés ad nauseam dans tous les textes traitant des catastrophes dans les différents domaines de la science. Je ne donnerai qu'un exemple de modélisation, moins souvent utilisé mais évoquant très bien la notion de *bifurcation*.

Supposons qu'une bille se trouve dans une gouttière dont l'axe longitudinal soit courbé, de sorte que, la gouttière étant posée immobile sur un plan, le point d'équilibre la bille se trouve au point le plus bas du dispositif. Supposons maintenant que cette gouttière soit complexe, composée de deux rainures longitudinales parallèles A et B (Fig. 1). D'autre part ces rainures sont dissymétriques, sauf au milieu de la gouttière où elles ont toutes deux la même profondeur. Quand on va du milieu de la gouttière à une de ses extrémités, une des rainures s'approfondit, tandis que l'autre diminue pour finir par disparaître et n'être plus marquée que par un point d'inflexion. La rainure A est donc seule présente à une extrémité de la gouttière cannelée, et la rainure B à l'autre extrémité.

La gouttière a deux cannelures est, nous l'avons dit, courbée et peut se balancer sur le plan, Le point le plus bas du dispositif varie quand la gouttière se balance, Il est évident qu'à une extrémité de la gouttière, une bille n'a qu'une position d'équilibre, qui est le fond de la rainure A ou de la rainure B selon la position instantanée de la gouttière oscillante, vers le milieu de la gouttière il V a au contraire deux positions d'équilibre, elles sont équivalentes lorsque la gouttière est posée sur son milieu ; dans le cas contraire, une des positions d'équilibre est plus stable qu' une autre celle correspondant à la rainure la plus profonde localement, car il faudra une quantité de mouvement plus grande pour faire sauter la bille de ce logement,

Les profils transversaux de la gouttière à ses différents niveaux sont représentés sur la Figure 1,

Deux types de mouvements peuvent faire changer la bille de place:

(1) un mouvement brownien imprimé à la bille peut la faire sauter fortuitement d'une rainure à une autre ~d'autant plus facilement qu'elle se trouve dans une partie peu profonde d'une des rainures) ,

(2) un mouvement de balancement de la gouttière cannelée qui, rappelons le, est arquée et peut se balancer sur le plan, modifiant ainsi la position d'équilibre de la bille à l'intérieur de la cannelure où elle se trouve,

Ces deux types de mouvements, combines, aboutissent à *deux échelles de phénomènes* concernant les déplacements aléatoires de la bille.

Quand la gouttière cannelée se trouve dans une position extrême de son balancement, une seule des deux cannelures correspond à une position stable de la bille armée d'un mouvement brownien, Quand la gouttière revient vers sa position médiane, la probabilité de présence de la bille dans l'une ou l'autre cannelure s'équilibre progressivement.

Supposons que la position de la gouttière par rapport à son mouvement de balancement potentiel soit elle aussi aléatoire, et indépendante du mouvement brownien de la bille Si la gouttière reste un certain temps dans une des deux positions excentrées, la bille aura de fortes chances de rester dans la même cannelure, soit A soit B, Il en est de même si la gouttière passe d'une position excentrée à la position médiane (les deux bassins d'attraction sont alors équiprobables, mais il faut une forte quantité de mouvement pour que la bille saute d'une cannelure à l'autre vers le milieu de la gouttière). Au contraire, si la gouttière se balance davantage, passant d'une position excentrée a une autre, la bille a de plus en plus de chances de changer de rainure, Cette "bifurcation" s'étant réalisée, quand la gouttière reprend une position plus centrale, la bille reste dans la cannelure où la précédente fluctuation l'avait placée.

Si les mouvements de basculement de la gouttière sont aléatoires, d'amplitude tantôt faible, tantôt forte, la bille va osciller de façon également aléatoire entre une position d'équilibre dans A et une position d'équilibre dans B, On pourra faire une distinction, n entre

(1) les mouvements aléatoires de la bille à l'intérieur d'une même rainure (ces mouvements étant dus à la fois au mouvement brownien de la bille et aux balancement de faible amplitude de la gouttière), et

(2) les passages sporadiques d'une rainure à une autre, c'est-à-dire les bifurcations successives

Le premier type de mouvements correspond à une vision microscopique, temporairement locale, de l'évolution du système, En revanche, de bifurcation en bifurcation se décrit une "histoire" du système, à une échelle de temps macroscopique, Le transfert de causalité d'une échelle de temps à une autre a été réalisé par un effet de seuil, lié à l'existence d'un point de catastrophe.

Ce système fournit le principe d'une *dynamique à deux niveaux d'appréhension* que l'on pourrait appeler la "dynamique proximale" et la "dynamique historique". La bille symbolise, par exemple, une population multispécifique subissant des fluctuations plus ou moins aléatoires dues à sa dynamique interne et à son couplage avec l'environnement. Les mouvements de la gouttière cannelée évoquent, elles, les variations de l'environnement, selon un rythme indépendant du premier. Ces dernières peuvent susciter des variations importantes, par exemple, des proportions d'espèces, au point parfois qu'un changement de dominance s'établit et persiste (passage de la bille d'une "rainure" à l'autre) jusqu'au prochain changement de même ampleur.

Les bifurcations et les instants où elles se produisent ne peuvent pas être prévues exactement; seules leurs probabilités sont éventuellement calculable à partir de caractères statistiques des dynamiques sous jacentes. PRIGOGINE (1979, 1980, 1988), au terme d'une réflexion sur la récente *Thermodynamique des phénomènes dissipatifs* dont il est le promoteur, parle d'une "réhabilitation du temps" en physique au sens où celui-ci cesse d'être un simple contenant des phénomènes physiques comme l'espace ¹, mais redevient *devenir* et *histoire* : de bifurcation en bifurcation se décrit une histoire irréversible.

¹ Une "révolution" similaire devrait avoir lieu pour la notion d'espace, c'est à-dire que l'on devrait, dans l'analyse des systèmes, introduire le temps et l'espace comme des facteurs ou des variables explicatives, et pas seulement servir de cadre (de récipient) aux dynamiques, Ce point de vue commence à prévaloir en l'Analyse des Données ; certaines techniques numériques introduisent en effet le temps et l'espace comme des variables s'ajoutant aux autres variables mesurées,

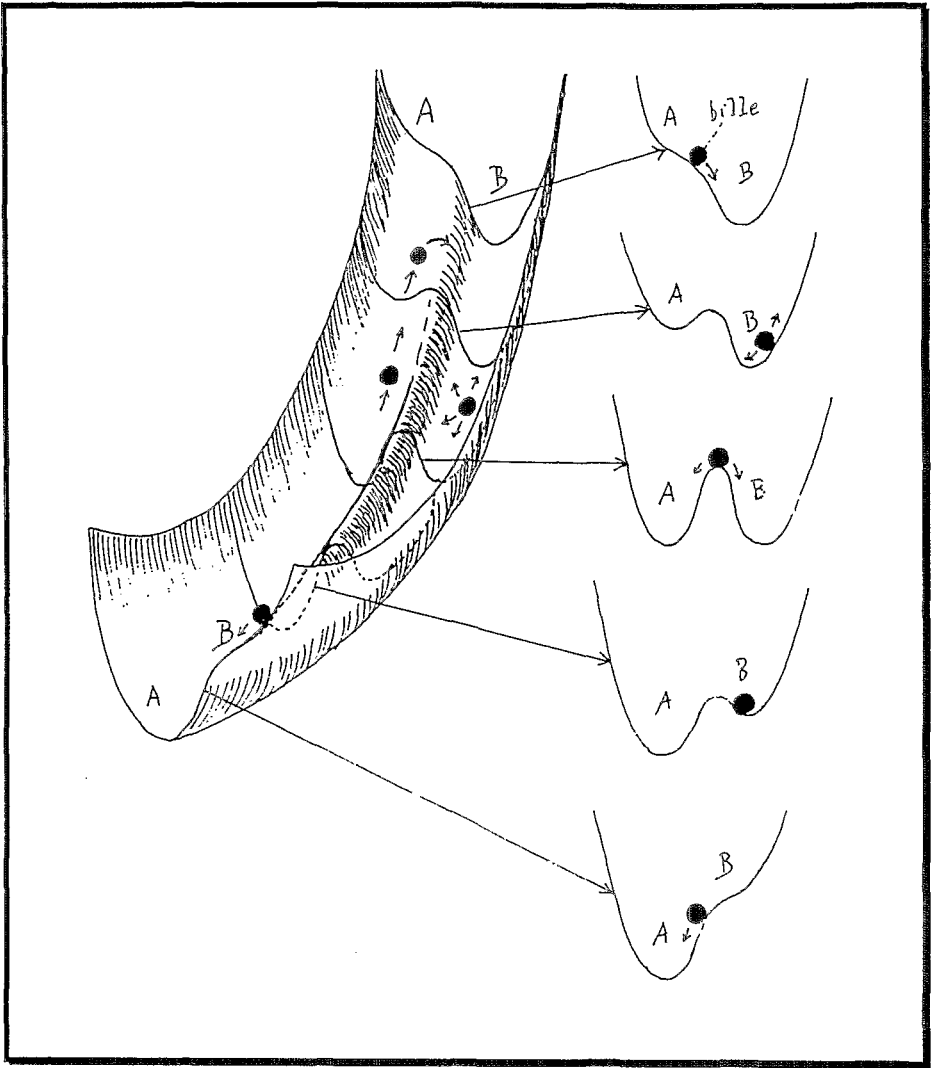


Figure 1 - 5 profils transversaux de la fonction potentiel

En écologie, dans les sciences sociales, etc., une telle dualité a toujours été prise en compte : les facteurs expliquant l'état actuel d'un système doivent être recherchés à la fois dans sa dynamique d'interaction avec le milieu (présence de facteurs limitants etc. : les "facteurs proximaux"), mais aussi dans le "facteur historique". Un écosystème n'est pas immuable mais passe par des phases juvénile, de maturation, de sénescence. Cette évolution est due à sa dynamique interne, qui n'est pas toujours continue mais montre des sauts, au niveau desquels des bifurcations apparaissent, provoquées aussi bien par cette dynamique interne que par des événements extérieurs. Et "de bifurcation en bifurcation" une histoire se décrit, que l'on doit connaître pour comprendre le présent, tout comme dans l'Evolution des organismes.

La Théorie des catastrophes de THOM aide donc puissamment à comprendre la théorie de bifurcations, qui explicite un transfert d'échelles. On passe par un transfert d'échelles de *l'ensemble des fluctuations proximales* à *l'ensemble des bifurcations* : bifurcations successives dans le temps, donnant une "histoire", mais aussi tout ensemble de bifurcations dans l'espace, ou simplement conceptuelles (dans le continuum des complexités par exemple), faisant passer d'une échelle d'appréhension à une autre.

Toutefois cette théorie reste une théorie différentielle, analogue aux théories de la Mécanique, avec la seule différence qu'elle explicite et montre l'importance des ensembles de points singuliers. La branche appartient à la *géométrie différentielle* et c'est l'ensemble des singularité~ qui décrit le niveau macroscopique. Nous verrons dans d'autres outils mathématiques récents révéler d'autres mécanismes de l'émergence d'un niveau macroscopique.

2.2 - Géométries fractales.

Les géométries fractales introduisent d'emblée, et par définition, la notion d'échelle puisqu'elles postulent au départ une ***invariance d'échelle*** : toute partie est un "modèle réduit" de l'ensemble, comme une branche d'arbre simule l'arbre entier. Si l'homométrie interne (*self-similarity*) est rigoureusement respectée il est impossible, observant une partie de l'objet, de savoir à quel niveau d'observation on se trouve. La question, d'ailleurs, n'a aucun sens en théorie puisqu'un objet parfaitement auto-similaire est infini dans les deux sens : il y a une infinité de structures homothétiques plus grandes et a une infinité de structures homothétiques plus petites que celle que l'on est en train de représenter.

En fait les géométries fractales ne respectent pas toujours cette invariance d'échelle : le fameux *ensemble de Mandelbrot*, par exemple, n'est pas invariant d'échelle, tout en ayant une dimension fractale unique.

Les objets réels ne sont qu'approximativement fractals (comme une table n'est qu'approximativement plane, un fil approximativement linéaire). Le processus générateur de la géométrie d'un objet à fragmentation ou ramification discrète n'est répété qu'un certain nombre de fois, généralement entre 3 ou 4 et une dizaine. A une échelle supérieure à celle de l'objet, ainsi qu'à une échelle inférieure à la plus fine des structures observées dans cette géométrie, il peut apparaître de nouvelles dimensions.

Le transfert d'échelle est également décrit dans le cas de *fractale, abstraite* (si l'on veut, comme Mandelbrot, conserver le caractère géométrique de la notion de fractale, on parlera de "fractales dans un espace abstrait de représentation") . Il s'agit alors du *caractère fractal d'une organisation*, et le transfert d'échelle se fera en considérant des niveaux successifs d'organisation (ou "niveaux

d'intégration"). Parfois cette organisation a une forte composante spatio-temporelle, et l'on retrouve la géométrie et la cinétique concrètes de l'objet analysé. D'autre fois, il y a davantage de délocalisation. Par exemple, la *diversité spécifique* dans un écosystème est une propriété fractale (FRONTIER, 1985, 1987). La répartition des individus d'un écosystème en espèces de divers niveaux d'abondance, correspondant à divers niveaux de spécialisation dans les rôles joués au sein du système, correspond à une optimisation de ce qu'on pourrait appeler la "gestion de l'information dans un écosystème". Les lois observées ont des points communs avec celles constatées dans d'autres systèmes d'information (lois de Pareto dans les systèmes linguistiques, socio économiques etc.) et sont modélisées par le *lexicographic tree* de MANDELBROT.

2.3 Relateurs arithmétiques.

Cet outil mathématique est moins connu ; il a été élaboré à partir de 1971 et est actuellement perfectionné par le Groupe SYSTEMA (Th. MOULIN et collab.). Il s'agit d'un algorithme diophantien (c'est-à-dire restreint aux nombres entiers) déterminant un cheminement sur un réseau, et censé modéliser une structure et une dynamique. Des exposés didactiques du fondement de la méthode pourront être trouvés dans MOULIN (1986, 1989), et de ses diverses applications dans les numéros 9 à 12 des *Cahiers SYSTEMA. le Rapport de Recherche de décembre 1989* (CHAUVET et al.). et les comptes rendus divers Congrès.

Il est impossible de résumer la théorie en quelques mots. L'objectif affiché est de "représenter le réel", et particulièrement de rendre compte d'un certain nombre de *formes* et de *morphogenèses* notamment en physique (modèles d'atomes et de molécules), biophysique, biologie et même économie. Les recherches pour affiner l'outil et l'appliquer sont en plein essor et les auteurs y entrevoient un langage opérationnel éminemment applicable aux systèmes.

Le modèle doit répercuter certains caractères des systèmes complexes, en particulier biologiques : (1) *processus de naissance-vie-mort*, (2) fractales, correspondant à d'autres contraintes physiques. Ainsi un arbre a une dimension fractale et une autosimilarité réalisée sur une dizaine de niveaux de ramifications ; au delà du plus fin rameau, le parenchyme foliaire réalise une "éponge" d'une autre dimension fractale ; au delà de l'arbre, la forêt est une autre structure, qui réalise l'interpénétration des éléments interactifs à l'interface atmosphère/sol.

Le transfert d'échelle est donc différent (1) à l'intérieur d'un intervalle de tailles où l'homothétie interne est respectée, et (2) au niveau de "sauts" qualitatifs où la dimension fractale change.

L'importance des géométries fractales est évidente dans le cas des des systèmes faits de matière et d'énergie. De tels système (comme les systèmes vivants à toutes échelles d'observation) fonctionnent par des **flux d'énergie à travers des interfaces**. Une biomasse est un *volume* géré par des surfaces. Si en grandissant un organisme vivant ne changeait pas de forme, le rapport des surfaces aux volumes deviendrait vite insuffisant : il est nécessaire que les surfaces augmentent plus vite que proportionnellement au carré des dimensions linéaires. Cela Justifie la génération d'une géométrie fractale au cours de toute croissance (exemple : croissance d'un arbre par ramification tant de ses branches que de ses racines, afin d'assurer un contact suffisant avec l'atmosphère et le sol), et également l'utilisation d'une géométrie fractale de l'environnement (fragmentation du sol; turbulence hydrodynamique renouvelant les surfaces de contact, etc.).

De fait, lorsqu'on examine précisément l'augmentation des performances d'un système physico-chimique en fonction de sa géométrie fractale, par exemple les performances d'un catalyseur en fonction de son degré de fragmentation, on s'aperçoit que l'efficacité pratiquement maximale est obtenue après un nombre réduit de répétitions du processus générateur (voir VILLERMAUX *et al.*, 1986 et nombreux exemples dans CHERBIT édit., 1987). Cela explique pourquoi les objets biologiques ne réalisent leur ramification que sur un petit nombre d'itérations, suffisant pour obtenir l'effet matériel escompté. Au dessus et au dessous, d'autres contraintes physiques peuvent apparaître, justifiant d'autres géométries. Un système vivant, considéré depuis l'échelle infra-cellulaire jusqu'à l'échelle de l'écosystème, est donc redevable de plusieurs géométries fractales, avec des sauts à certains niveaux d'observation particuliers - ce qui, entre autres, permet d'affirmer que le choix d'une échelle d'observation n'est pas complètement arbitraire ni contingent. *processus sous-jacents cycliques, (3) imbrication de niveaux d'organisation* (le troisième caractère est le plus en rapport avec notre propos, mais les trois sont liés).

Les bases mathématiques sont simples et en rapport avec les processus fondamentaux du vivant. Deux types de variables sont mises en oeuvre : des variables "principales" et des variables "d'environnement". L'algorithme décrit une itération aboutissant à des *processus cycliques*, qui peuvent se bloquer ; le déblocage est lié à un "appel à l'environnement" (environnement considéré comme une réserve d'énergie et d'information pour le système). Le système se caractérise donc par une succession de phases de fermeture sur lui-même, et de phases d'ouverture.

Le caractère discret des changements d'état modélisés (lié à l'utilisation des nombres entiers et à un réseau cristallographique de base) donne la possibilité d'utiliser l'ordinateur pour des itérations très nombreuses, au terme desquelles *des "formes" apparaissent, non prévues initialement*. Précisément, des descriptions parallèles d'un grand nombre de sous-systèmes fonctionnement de façon identique, à partir d'états initiaux voisins donne (à la grande surprise des

auteurs lors de leurs premières recherches) des objets et des comportements fortement structurés, évoquant des configurations florales en trois dimensions, des organes etc., avec des transformations brutales au voisinage de certaines singularités métriques évoquant l'apparition de nouvelles parties de l'organe, etc.

Le processus a été comparé au développement parallèle de nombreuses cellules, donnant un organe ou un organisme. Par ailleurs un relateur peut être "pilote" par un relateur dit réduit, de plus petite dimension, comme un enzyme ou une molécule d'ADN le fait pour une entité biologique de plus grande taille.

Enfin - et c'est fondamental pour notre problème de transfert d'échelles - les formes émergentes sont constituées d'amas, eux-mêmes formés de sous-amas et ainsi de suite, impliquant l'existence de niveaux de description imbriqués (Fig. 2a).

Il serait, évidemment, hâtif de dire qu'on a trouvé ainsi le "modèle" d'un organe précis. L'enseignement à tirer de ce processus de calcul, et de ses résultats extrêmement suggestifs, est que d'un processus "microscopique" simple (simple règle de génération pas-à-pas), il *émerge une forme macroscopique hautement structurée* et, qui plus est, à structure *hiérarchisée*. Ces formes macroscopiques, extrêmement singulières et évocatrices avec leurs symétries ou pseudo-symétries et leur organisation hiérarchique à nombreux niveaux (Fig. 2b), ne sont nullement prévues dans le formalisme local simulant le mécanisme sous-jacent : on se contente de constater leur émergence. A noter que ces structures sont liées à une *complexification du système par intégration de l'environnement*. Le formalisme d'un *transfert d'échelles* est ici évident.

Des relations ont été discernées entre les relateurs arithmétiques, la théorie des catastrophes, les fractales, l'entropie de Shannon, la théorie des automates cellulaires et des réseaux neuronaux etc.

2.4 - Théorie du chaos. Attracteurs étranges.

A l'opposé des relateurs arithmétiques, la dynamique chaotique est actuellement l'objet d'une très grande diffusion médiatique - en même temps, bien sûr, que d'une application à un très grand nombre de domaines scientifiques. Le lecteur non spécialiste en trouvera des exposés didactiques en langue française dans plusieurs articles récents de *La Recherche* et de *Pour la Science*, ainsi que dans les ouvrages de DE GENNES édit. (1987) et GLEICK (1989).

La dynamique chaotique est une conséquence directe de la *sensibilité aux conditions initiales* évoquée au §1 de cet exposé. Cette sensibilité confère à nombre de systèmes physico-chimiques naturels et artificiels un comportement erratique et imprévisible - y compris dans le cas de systèmes mécaniques dont on attendait qu'ils fussent déterministes et aient un comportement simple. Ce

comportement apparaît dès qu'il y a plus de deux variables interactives.

Dans un système réel (nous parlerons un peu plus loin de leurs simulations), le chaos s'installe selon un certain scénario lorsqu'on augmente progressivement certaines contraintes. Si par exemple on augmente le forçage d'un système dissipatif par un flux d'énergie croissant, on voit d'abord apparaître une périodicité, puis une multiplication des périodes par doublement. Dans une conception antérieure du phénomène de turbulence, on imaginait que ces périodes augmentaient en nombre indéfiniment, donnant par leur ensemble l'impression de phénomène complètement enchevêtré caractérisant le phénomène macroscopique. On s'est aperçu qu'au contraire qu'après un très petit nombre de doublement de périodes (deux ou trois), le phénomène devenait brusquement chaotique, c'est-à-dire totalement non périodique. En outre, les contraintes augmentant encore, des périodes pouvaient réapparaître par bouffées, puis disparaître au profit d'une nouvelle phase de chaos, et ainsi de suite. Le chaos est donc un phénomène très spécifique, très répandu, apparaissant à divers états énergétiques d'un système. Le passage de l'ordre au chaos a fait l'objet de nombreux travaux et n'est pas encore entièrement compris. La dynamique chaotique implique un certain nombre de paradoxes apparents.

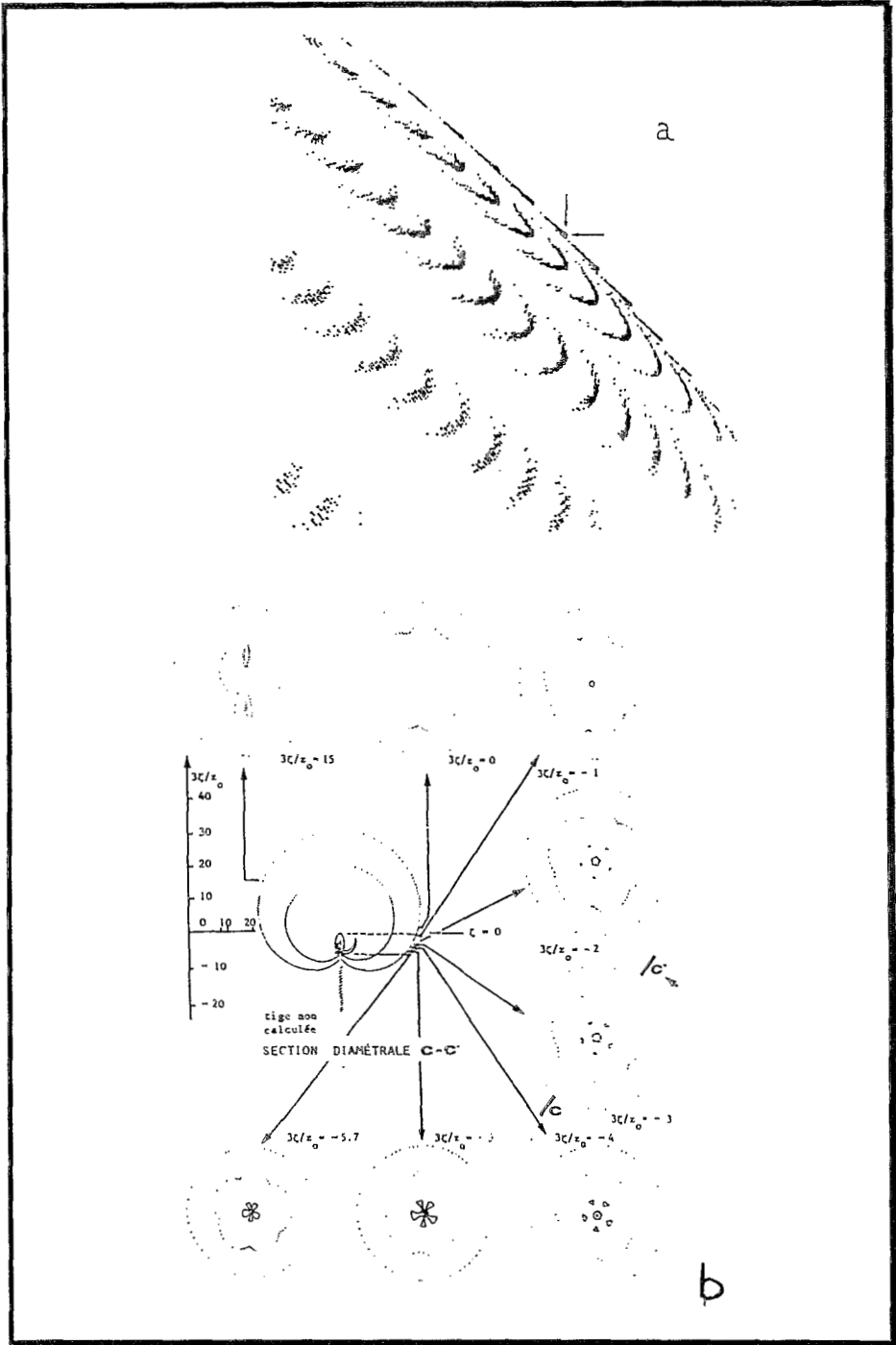


Figure 2 - Figures obtenues par les relateurs arithmétiques
 a - Amas emboîtés (d'après MOULIN, 1986)
 b - Structures complexes à 3 dimensions ("configurations florales")
 (d'après VALLET, 1982)

Le **PREMIER PARADOXE** est que le comportement appelé "chaotique", dont la première conséquence est une *imprévisibilité* du système, est *rigoureusement déterministe*. Il peut être reproduit, en fait, à partir d'un petit nombre d'équations non linéaires à plus de deux variables. La première modélisation d'un système chaotique très simple est celle, bien connue, du météorologue LORENZ.

Celui-ci établit un modèle caricaturalement simple de climat et explora ses conséquences. Le système d'équation pouvait difficilement être plus simple, comprenant en effet en tout et pour tout les trois équations différentielles du premier degré par rapport à chaque variable :

$$\frac{dy}{dt} = -ax + ay$$

$$\frac{dy}{dt} = bx - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = -cz + xy$$

dont on attendrait, en les intégrant, qu'elles fournissent un comportement simple et prévisible. Il n'en est rien : le système décrit une trajectoire chaotique, et une sensibilité aux conditions initiales fait que deux trajectoires partant presque du même point finissent par diverger exponentiellement. Comme aucun "point de départ" ne peut être expérimentalement déterminé avec une précision infinie, il s'ensuit qu'un phénomène physique simple déterminé par ces équations *déterministes* est imprévisible.

Le **DEUXIEME PARADOXE** est que *ce chaos est ordonné*. On s'en rend compte en suivant les trajectoires suivies par le système dans l'"espace de phases" c'est-à-dire l'espace multidimensionnel ayant comme coordonnées les trois variables et leurs vitesses de variations.

Si un système évolue vers une stabilisation, sa trajectoire dans l'espace de phase s'enroule vers un point dont les coordonnées correspondant aux valeurs des positions et des vitesses d'équilibre (Fig, 3 a), soit vers une trajectoire cyclique limite traduisant un mouvement périodique indéfiniment répété (Fig, 3b), S'il v a deux périodicités simultanées, les trajectoires s'enrouleront autour d'un tore, dont la surface sera occupée de façon dense on non selon que les deux périodes sont irréductibles ou ont un dénominateur commun, Points d'équilibre et "cycles limites" sont appelés des attracteurs,

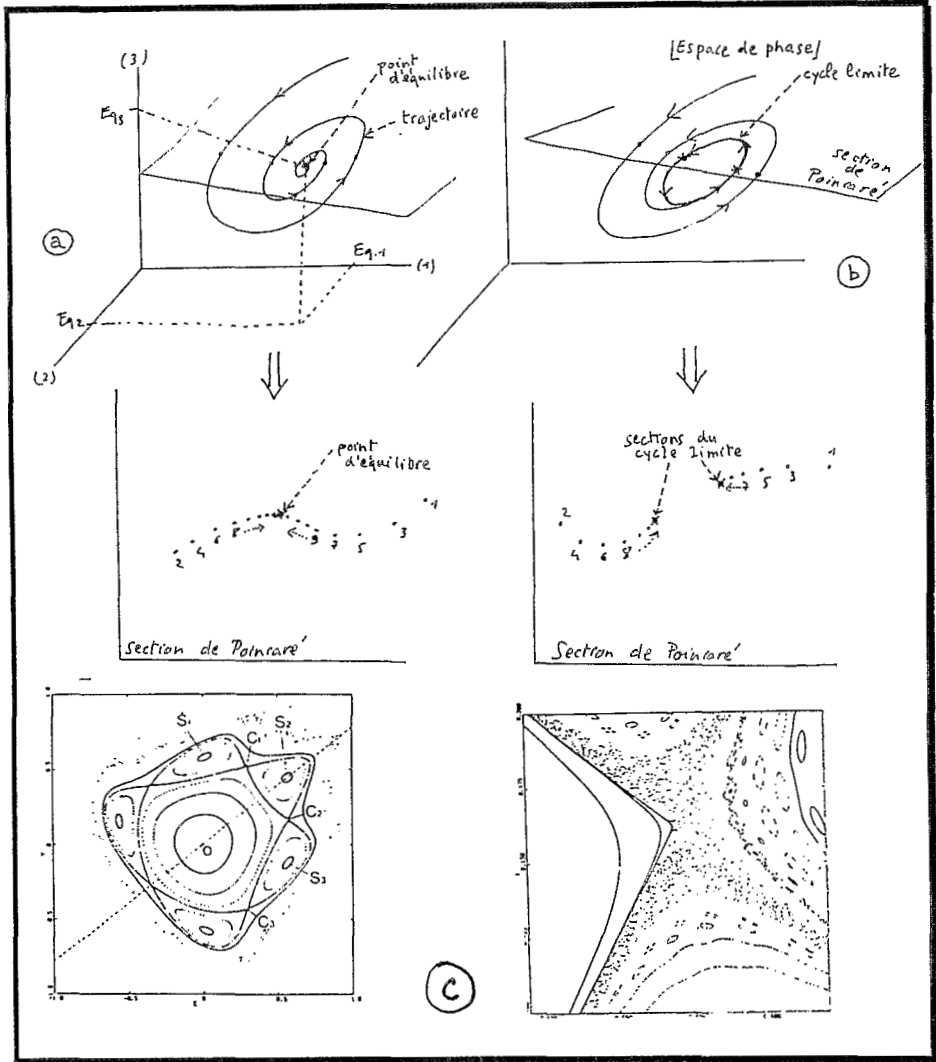


Figure 3 - Attracteurs

c - Section de Poincaré d'un attracteur étrange (vue à deux échelles d'observation) figure fractale (d'après EKELAND, 1984)

Pour simplifier la description des trajectoires on a recours aux "coupes de Poincaré", obtenues en les intersectant par un plan quelconque de l'espace de phase, chaque fois que la trajectoire se boucle, elle marque un point dans le plan d'intersection, et la suite des points d'intersection visualise l'attracteur dans deux dimensions, ainsi, si la trajectoire s'enroule autour d'un point limite et si le plan passe par ce point., les intersections successives seront des points se rapprochant de plus en plus du point limite, si elle s'enroule autour d'un cycle limite, le plan de Poincaré contiendra deux points limites dont les intersections se rapprocheront alternativement, Etc...

Si la trajectoire est chaotique, elle ne passera Jamais deux fois de suite par le même point et il n'y a pas de comportement périodique. Les points d'intersection se dispersent alors sur la coupe de Poincaré, mais pas n'importe comment : on observe, après un nombre suffisant d'itérations, que les points se disposent en figures plus ou moins régulières, en amas qui progressivement prennent des *formes "étranges"* - montrant des structures, des symétries, des homothéties internes montrant que la disposition des trajectoires, bien que "chaotique", est loin d'être aléatoire.

Plus précisément, la position d'un nouveau point d'intersection paraît être réalisée "au hasard" car elle est imprévisible, et deux points successifs peuvent être très éloignés l'un de l'autre : ainsi se concrétise *l'imprévisibilité*. Cependant quand un très grand nombre de points a été obtenu, on s'aperçoit que la densité de probabilité des trajectoires est différente dans les différentes parties de l'espace de phase, et que ces variations de densité dessinent des formes qui, elles aussi, semblent "attirer" les trajectoires autour de certaines régions. On a nommé **attracteurs étranges** de telles distributions des trajectoires de phase, donnant dans un plan de représentation l'impression d'être constituées de "formes dans le brouillard" : elles émergent d'un brouillard de points d'intersection, n'en étant distincts que sous forme de zones plus denses (Fig. 4).

Une des caractéristiques importantes de ces attracteurs étranges est de posséder une *dimension fractale*. En effet il apparaît une homothétie interne (au moins approximative), la "forme" étant composés d'amas, eux mêmes hétérogènes c'est-à-dire composés de sous-amas, de sous-sous amas etc., à la manière d'un des ensembles de Mandelbrot.

Les propriétés de la dynamique chaotique sont développées dans les nombreuses publications sur ce sujet, et font actuellement l'objet de recherches actives allant de la physique à la dynamique des populations vivantes. Ce que nous retiendrons, dans le cadre de notre inventaire des transferts d'échelles conceptuels, est le passage d'un **niveau microscopique** (différentiel) représenté par les équations simples de départ, à un **niveau macroscopique** qui est celui de l'attracteur étrange. Ce passage existe aussi pour les autres types d'attracteurs, mais il reproduit alors exactement le passage différentielle-intégrale évoqué dans le §1 : l'attracteur étrange a, en plus de ces derniers, la propriété de faire émerger progressivement une structure complexe, jamais terminée puisqu'elle est de nature fractale et se complète progressivement, et en tous cas non prévue par les équations de départ simples. En d'autres termes, le microscopique aboutit à l'impossibilité de toute prévision de détail, mais l'itération indéfinie du processus fait apparaître une certaine possibilité de description, qui correspond exactement à l'émergence d'un niveau macroscopique, qui *a sa complexité propre*.

On peut même tirer un peu plus loin de "la leçon du chaos" et découvrir un TROISIEME PARADOXE. En effet, si le chaos apparaît avec un nombre réduit de variables simultanées (il apparaît à partir

de trois "paramètres d'ordre"), on s'attendrait à ce que dans les systèmes réels, subissant l'influence d'un nombre *a priori* bien plus grand de paramètres, le chaos devrait se traduire par des attracteurs d'un degré de complexité bien plus grand, et même totalement enchevêtrés et impossible à appréhender humainement. Or il semble qu'il n'en soit rien : la complexité des phénomènes réels semble être du même ordre que celle des systèmes simulés à partir d'un petit nombre d'équations !

Tout se passe donc comme si *le phénomène macroscopique avait son degré de complexité propre, indépendant du degré de complexité du niveau microscopique sous-jacent*. C'est bien là la définition d'une *autonomie du niveau macroscopique par rapport au niveau microscopique*, justifiant la recherche d'une structure et d'une prévisibilité attachée à son niveau propre. En d'autres termes, il serait fondamentalement (et pas seulement pratiquement) inutile de prospecter le microscopique pour comprendre les structures, les fonctions et les évolutions d'un niveau macroscopique.

Si cette règle se confirmait, elle équivaldrait à une véritable révolution scientifique, du moins du point de vue de la science réductionniste.

2.5 - Analyse non standard.

L'analyse non standard est une branche très récente des mathématiques, pratiquée en France par quelques équipes de Strasbourg et de Mulhouse à la suite des travaux de l'Américain ROBINSON.

L'attitude de ces chercheurs est hétérodoxe par rapport aux mathématiques "pures" (pour lesquelles, disent-ils, "la théorie est seule réelle et la réalité est un fantasme") . Les mathématiques non standard essaient en effet de "mieux rendre compte de l' infinie complexité du réel" grâce à l'*introduction d'états intermédiaires entre le fini et l' infini*.

Si l' on considère tous les nombres, si grands soient-ils, auxquels on peut assigner une valeur (en d' autres termes, que l' on peut *écrire* - ces nombres ont été appelés "nombres naïfs"), il en reste une *infinité* d'autres qui sont plus grands encore sans être égaux à la "limite infinie". De même, si l' on considère l' inverse de tous les nombres entiers, et si l' on met de coté les inverses des nombres de la première catégorie, il en reste *une infinité* qui sont encore plus petits, sans être nuls. Les "non naïfs" constituent d'une part un no-man's-land entre le fini et l' infini, d'autre part un "halo" autour de chaque nombre naïf, correspondant à une sorte de pouvoir de résolution conceptuel.

Une reformulation s'en est suivie de beaucoup de problèmes classiques de mathématiques, en particulier dans le domaine des

équations différentielles et de l'approche d'une asymptote. Qui plus est, des problèmes nouveaux ont pu être résolus, précisément en rapport avec les questions que nous avons évoquées dans ce qui précède, à savoir le comportement au voisinage de bifurcations, les structures fractales, la transition entre un état oscillant et un état chaotique, etc. La justification fondamentale d'une telle façon de faire est qu' *il se passe des choses entre l'échelle d'observation usuelle et l'infini*,

Cette dernière hypothèse de travail est nouvelle en mathématiques (les mathématiques ont toujours exclu la "taille" d'un nombre, considérant tous les nombres sur un pied d'égalité, et simplement, en plus, des "limites infinies"). Elle n'est pas nouvelle dans les sciences du réel, à commencer par la physique; mais dans l'utilisation de l'outil mathématique par la physique il fallait autant de théories mathématiques que d'échelles d'observation. Tout au plus, comme nous l'avons rappelé au § 1, l'intégration d'un système d'équations différentielles donnait une nouvelle équation, celle du phénomène macroscopique, mais sans "intermédiaire" possible. Grâce à l'analyse non standard, il devient possible d'intégrer la notion d'échelle et, selon les besoins, d'examiner une loi mathématique soit avec un "microscope" pour en voir les détails (comportement au niveau d'une bifurcation), soit avec un "macroscope" pour avoir une idée globale d'un phénomène apparaissant mal si l'on reste "le nez sur le détail".

Des applications à de nombreux domaines concrets ont déjà porté des fruits, en permettant de comprendre la genèse de phénomènes jusque là paradoxaux (comme des retards à l'apparition d'un phénomène oscillatoire), et qui sont désormais expliqués par des propriétés mathématiques de l'équation du phénomène. Ces propriétés n'avaient simplement pas été vues" auparavant faute de se placer à la bonne échelle *conceptuelle* d'observation ! On trouvera des exemples dans quelques articles de *La Recherche* ce sujet.

L'existence de ces mathématiques nouvelles est suggestive à l'égard des nombreuses structures citées plus haut. En effet, que ce soit dans le domaine des structures fractales, des relateurs arithmétiques ou des attracteurs étranges, des *formes* apparaissent lorsqu'on itère un *très grand nombre de fois* une règle de génération, *mais pas un nombre infini de fois*. Les structures macroscopiques émergeant par itération d'une règle simple sont parfois complètement noyées si l'on poursuit cette itération "jusqu'à l'infini" : un attracteur étrange finit par occuper de façon dense le plan de coupe de Poincaré, dans lequel des formes singulières apparaissaient pour des nombres très grands, mais finis, d'itérations.

Les mathématiques classiques sont capables de prévoir ce qui se passe à l'infini, mais non ce qui se passe avant l'infini. C'est la raison de leur échec à prévoir les formes "étranges" émergeant de la construction d'un attracteur chaotique ou d'une fractale : aucune explication mathématique ne peut, encore actuellement, rendre compte des pseudo-périodicité, quasi-symétries etc. observées dans

un attracteur fractal. Les démonstrations de propriétés *asymptotiques* aboutissent même à des faits en apparence contradictoires avec l'observation. Par exemple, il est connu que l'ensemble fractal de Mandelbrot montre, après des milliers ou des millions d'itérations, des "îlots" séparés de la figure principale. Mais on n'a jamais poursuivi la génération de l'image fractale des *milliards* de fois pour voir ce qu'il advient de ces îlots. Or il a été récemment démontré qu'"à la limite" (limite infinie), ces îlots sont connexes, c'est-à-dire non isolés. Cette démonstration ne rend pas compte de l'existence d'îlots à un stade intermédiaire : la structure intermédiaire a été gommée par le passage à la limite.

Or ce sont ces structures intermédiaires qui nous intéressent, dans la mesure où elles décrivent le passage d'une échelle microscopique à une échelle macroscopique des phénomènes. Pour revenir au concret, dans l'analyse de l'écologie des masses d'eau par exemple, ce qui nous intéresse est l'hétérogénéité du milieu grâce à laquelle des eaux aux caractères complémentaires entrent en contact et réagissent - l'une apportant par exemple des sels nutritifs remontés de la profondeur, l'autre de la chlorophylle qui s'est formée à la lumière en surface. *Un écosystème homogène ne pourrait jamais fonctionner* (pas plus qu'une société ou tout le monde aurait le même métier, le même niveau de vie et le même pouvoir décisionnaire). La poursuite indéfinie d'un mixage turbulent aboutit à l'homogénéisation complète, c'est-à-dire à l'absence de structure de la masse d'eau, alors que c'est au contraire (comme nous l'avons exposé à propos des "Transferts d'échelles en océanographie") l'existence de surfaces de contact au sein d'un milieu hétérogène qui permet un fonctionnement à une échelle globale.

Le *transfert d'échelles* est donc un phénomène apparaissant lorsqu'on change d'ordre de grandeur des nombres et des phénomènes - et non lorsqu'on "passe à l'infini". Non seulement il n'est pas nécessaire d'"aller jusqu'à l'infini" pour mettre en évidence des phénomènes macroscopiques, mais il ne faut pas le faire, car on gomme souvent, de cette façon, le phénomène que l'on voulait décrire. Le passage à la limite étant une des bases de la mathématique standard, on entrevoit l'espoir que portent en elles les mathématiques "non standard", "irruption de la réalité dans les mathématiques".

CONCLUSION

C'est à une sorte de révolution scientifique que l'on assiste lorsqu'on fait le bilan des tentatives actuelles pour décrire et formaliser la complexité du réel, en prenant le contre-pied à la fois (1) d'une physique remplaçant les objets concrets par des dispositifs expérimentaux maîtrisables - on étudie alors la physique des appareils et non celle de la nature - ; (2) d'une mathématique faisant tout pour fuir la réalité et trouvant en elle-même sa justification.

Même la physique instrumentale et les mathématiques pures bénéficieront de ce changement, puisqu'on devient maintenant capable de maîtriser des objets d'une grande complexité liée à leur géométrie fractale, et que les mathématiques cessent de considérer comme des "monstres" les fonctions. qui n'ont pas de dérivée.

Mais c'est évidemment dans le domaines des *sciences du complexe*, biologie, écologie, sociologie ... - les "sciences molles", par opposition aux "sciences dures" par lesquelles la physique et les mathématiques s'auto-désignent -, que ces tentatives, toutes "non standard", apportent le plus d'éléments. Géométrie fractale, relateurs arithmétiques, dynamique chaotique, alliés sans doute à l'analyse non standard et peut-être à quelques autres théories mathématiques comme celle des ensembles flous, seront sans doute l'épine dorsale de la Cybernétique de demain car ils introduisent une dimension supplémentaire de l'espace-temps : la dimension d'échelle.

REFERENCES

- BLANCHARD (D.), DUJET (C.), FRONTIER (S.), LEGENDRE (P.), QUINET (C.), 1986 - Fractals, flous et catastrophes en écologie. Implications pour les stratégies d'échantillonnage. IN S. Frontier édit., *Evaluation et optimisation des plans d'échantillonnage en écologie littorale*. Rapport d'ATP PIREN/CNRS : 291-354.
- BRADBURY (R.H.) & REICHELT (R.E.), 1983 - Fractal dimension of coral reef at ecological scales. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 10 : 169-171.
- BRADBURY (R.H.), REICHELT (R.E.) & GREEN (D.G.), 1984 - Fractals in ecology : Methods and interpretation. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 14 : 295-296.
- BURROUGH (P.A.), 1981 - Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature*, London, 294 : 240-242.
- CASTI (J.), 1982 - Catastrophes, control and the inevitability of spruce budworm outbreaks. *Ecol. Model.*, 14 : 293-300.
- CHAUVET (F.), MOULIN (T.), RIOT (P.), SAINT-PAUL (L.) & VALLET (C.), 1990 Relateurs arithmétiques. Travaux de Groupe Systema publiée en 1989. Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées, Rapport de Recherche 241, 99 p.
- CHERBIT (G.) édit., 1987 - *Fractals. Dimensions non entières et applications*. Masson, Paris, 362 p.
- CRUTCHFIELD (J.), ABBOTT (A.), PACKARD (N.) & SHAW (R.), 1987 - Le chaos. *Pour la Science*, 112 (février 1987) : 18-25.
- DIENER (M.) & LOBRY (C.) édit., 1985 - *Analyse non standard et représentation du réel*. Coédition OPU (Alger) et CNRS.

- DIENER (F.) & DIENER (M.), 1989 - Les applications de l'analyse non standard. *La Recherche*, 20 (janvier 1989) : 68-83.
- DUBOIS (D.), 1979 - Catastrophe theory applied to water quality regulation of rivers. *Math. Biosci.*, 28 : 243-274.
- DUCKSTEIN (L.), CASTI (J.) & KEMPF (J.), 1979 - Modeling phytoplankton dynamics using catastrophe theory. *Water Resource Res.*, 15 : 1189-1194.
- DUJET (C.), 1981 - *Ensemble co-flous et information*. Thèse 3ème Cycle, Univ. Lyon I, 54 p.
- DUJET (C.), 1982 - Complementation and information based on the separating power of a fuzzy set. In M.M. Gupta & E. Sanchez edit., *Fuzzy Information and Decision Processes.*, North Holland Publ. Cy.: 51-56.
- DUJET (C.) & FRONTIER (S.), 1983 - Application of the separating power of a fuzzy set to ecological systems. *Proceed. internat. Sympos. Systems, Man and Cybernetics*, New Dehli, dec. 1983 : 513-516.
- EKELAND (I.), 1984 - *Le calcul, l'imprévu*. Seuil, Paris, 166 p.
- DELATTRE (P.), 1971, 1985 - *Système, structure, fonction, évolution*. Maloine, Paris, 184 p.
- FRONTIER (S), 1985 - Diversity and structure in aquatic ecosystems *Oceanogr mar Biol. ann. Rev.*, 23 : 253-312.
- FRONTIER (S.), 1987 - Applications of Fractal Theory to Ecology. In P. Legendre & L. Legendre edit., *Developments in Numerical Ecology*. NATO ASI Series, Vol. G14, Springer Verlag: 335-378.
- de GENNES (P. J.) édit., 1987 - *L'ordre du chaos*. Bibliothèque Pour la Science, 191 p.
- GLEICX (J.), 1987 - *Chaos*. The Vicking Press, New York. Traduction française 1989: *La théorie du chaos*. Albin Michel Paris, 424 p.
- GRASSBERBER (P.) & PROCACCIA (I.), 1983 - Characterization of strange attractors. *Phys. Rev. Lett.*, 50: 346-349.
- HAKEN (H.) edit., 1981 - *Chaos and Order in Nature*. Springer Verlag, 275 p.
- HAKEN (H.) & WUNDERLIN (A.), 1990 - Le chaos déterministe. *La Recherche*, 225 (octobre 1990): 1248-1255.
- HARMSSEN (R.), ROSE (M.R.) & WOODHEUSE (B.), 1976 - A general mathematical model for insect outbreaks. *Proc. Entom. Soc. Ontario*, 107 :11- 18 .
- HARTONG (J.), 1983 - L'analyse non standard. *La Recherche*, 14 (octobre 1983): 1194-1201.

- KENT (C.) & WONG (J.), 1982 - An index of littoral zone complexity and its measurement. *Can. J. Fish. aquat. Sci.*, 39: 847-853.
- JAKOBSON (R.) & THOM (R.), 1985 - *Les catastrophes de la parole*. Maloine, Paris, 354 p.
- JONES (D. D.), 1977 - Catastrophe theory applied to ecological systems. *Simulation*, 291 : 1-15.
- JONES (D. D.) & WALTERS (C. J.), 1976 - Catastrophe theory and fishery regulation. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 33 : 2829-2833 .
- KAUFMAN (A.), DUBOIS (T.) & COOLS (M.), 1975 - *Exercices avec solutions sur la théorie des sous-ensembles flous*. Masson, Paris, 166 p.
- KEMPF (J.), 1980 - Multiple steady states and catastrophes in ecological models. *ISEM J.*, 2: 55-79.
- LE MEHAUTE (A.), 1990 - *Les géométries fractales*. Hermès, Paris, 198 p.
- LICHNEROWICZ (A.), PERROUX (F.) & GADOFFRE (G.) édit., 1976 - *Structure et dynamique des systèmes*. Maloine, Paris, 191 p.
- MANDELBROT (B.), 1975, 1984, 1989 - *Les objets fractals*. 3ème édit., Flammarion, Paris, 268 p.
- MANDELBROT (B.), 1977 - *Fractals. Form, chance and dimension*. W.H. Freeman and Cy, San Francisco, 365 p.
- MANDELBROT (B.), 1982, 1983 - *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Cy, San Francisco, 468 p.
- MARK (D.M.), 1984 - Fractal dimension of coral reef at ecological scales. a discussion. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 14 : 293-296.
- MAY (R.M.), 1973, 1974 - *Stability and complexity in model ecosystem*. Princeton Univ. Press, 265 p.
- MAY (R.M.), 1975 - Deterministic models with chaotic dynamics. *Nature*, London, 256 : 165-166.
- MAY (R.M.), 1976 - Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, London, 261 : 459-467.
- MAY (R.M.), 1981 - Nonlinear phenomena in ecology and epidemiology. *ADR. New York Acad. Sci*, 357 : 267-281.
- MEYER (J.A.), 1980 - Sur la dynamique des systèmes écologiques non linéaires. I. *Phys. (Colloque C5, 1478 : suppl. au n°-8)*, 38 : 29-37.
- MEYER (J.A.), 1981 - Sur la stabilité des systèmes écologiques purispécifiques. In B.E. Paulré édit., *System dynamics and analysis of chance*. North Holland Publ. Cy. : 335-351.

- MOULIN (T.), 1986 - Présentation sommaire des relateurs arithmétiques. *Cahiers SYSTEMA*, 12 : 25-113.
- MOULIN (T.), 1988 - Tentative de modélisation d'un système neuronal au moyen d'un relateur arithmétique : problèmes posés et perspectives. VIII- Séminaire de Biologie Théorique, Abbaye de Solignac, 6-8 juin 1988, 22 p.
- MOULIN (T.), 1989 - Le relateur arithmétique, source de nouveaux concepts systémiques. *Rev. internat. Systémique*, 4
- NICOLIS (C.) & NICOLIS (G.), 1984 - Is there a climatic attractor? *Nature*, London, 311 : 529-532.
- OTTINO (J.), 1989 - Le mélange des fluides. *Pour la Science*, 137 (mars 1989) : 32-43.
- OUIMET (C.), 1985 - La théorie des catastrophes en écologie : élaboration d'un modèle de fronce à l'aide d'étapes graphiques et de régressions non linéaires. Mémoire de Maîtrise, Univ. de Montréal, 137 p.
- OUIMET (C.) & BRASSELET (J.), 1985 - Critique sur un modèle de dynamique du phytoplancton. *Publ. IRMA*, Lille, 7 : 1-27.
- PLATT (R.E.) & ULANOWICZ (E.) edit., 1985 - *Ecosystem theory for biological oceanography*. Proceed. Sympos. Quebec, 16-23 mars 1984. *C.an. Bull. Fish. Aquat. Sci.*, 213 : 260 p.
- POSTON (T.) al STEWART (I.), 1978 - *Catastrophe theory and its applications*. Pitman Publ. Ltd., London, XVIII + 491 p.
- PRIGOGINE (I.) & STENGERS (I.), 1979 - *La nouvelle alliance*. Gallimard, Paris, 302 p.
- PRIGOGINE (I.), 1980 - *Physique, temps et devenir*. Masson, paris, 275 p.
- PRIGOGINE (I.) & STENGERS (I.), 1988 - *Entre le temps et l'éternité*. Fayard, paris, 223 p.
- ROBINSON (A.), 1974 - *Non standard analysis*. North Holland Publ. Cy.
- ROSE (M.R.) & HARMSEN (R.), 1981 - Ecological outbreak dynamics and the cusp catastrophe. *Acta Biotheor.*, 30 : 229-253.
- STEWART (I.), 1982 - *Les fractals* (bande dessinée). Belin, Paris, 67 p.
- STEWART (I.), 1982 - *Oh ! catastrophe* (bande dessinée). Belin, Paris, 60 p.
- THOM (R.), 1972 - *Stabilité structurelle et morphogénèse*. W.A. Benjamin, Readings, Massach., 362 p.
- THOM (R.), 1980 - *Modèles mathématiques de la morphogénèse*. Christian Bourgeois, Paris, 315 p.
- THOM (R.), 1982 - *Paraboles et catastrophes*. Flammarion, Paris, 193 p.

- VALLET (C.), 1982 - Modélisation arithmétique de formes biologiques. *Cahiers SYSTEMA*, 9 : 5-40.
- VALLET (C.), CHAUVET (F.), RIOT (P.), FERRE (M.) & MOULIN (T.), 1988 Introduction aux relateurs arithmétiques. Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées, Document préparé par le Groupe SYSTEMA en vue de la réunion du 20 Juin 1988.
- VAN STRATEN (G.) & KEMPF (J.), 1980 - Applications of catastrophe theory to water quality modeling : a review. Inst. Applied System Analysis, collaborative paper CP-80 12, Laxenburg, Austria, 24 p.
- VERINE (H.), 1986 - Importance potentielle des fractales en biologie. Communic. XIème Séminaire de Biologie Théorique, Abbaye de Solignac, 26-29 mai 1986, 18 p.
- VILLERMAUX (J.D.), SCHWEICX (D.) & HAUTELIN (J.R.), 1986a - Le peigne du diable, un modèle d'interface fractale bidimensionnelle. C. *Rendus Acad. Sci.*, Paris, sér. II, 8 : 307-310.
- VILLERMAUX (J.D.), SCHWEICH (D.) & HAUTELIN (J.R.), 1986b - Transfert et réaction a une interface fractale représentée par le peigne du diable C. *Rendus Acad. Sci.*, Paris, sér. II, 9 : 399-404.
- WILSON (A.G.), 1981 - *Catastrophe theory and bifurcation*. Univ. Calif. Press, XV + 331 p.
- ZADEH (L.A.), 1965 - Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 : 338-353.

TRANSFERT D'ECHELLE ET UNIVERS MULTI-AGENTS: LE CAS DU SYSTEME DE LA PECHE DU DELTA CENTRAL DU NIGER

BOUSQUET F., CAMBIER CH.

RESUME

Le programme Delta Central Du Niger étudie la pêche artisanale en considérant ce phénomène dans sa complexité, en étudiant les interactions, l'organisation du système de la pêche. Au moment d'intégrer les diverses connaissances dans un cadre informatique de simulation, outil de travail pour cette étude systémique, se pose le problème de l'intégration de concepts disciplinaires dans un cadre pluri-disciplinaire. Les sciences cognitives proposent des techniques de représentation à partir de l'objet, de l'élément du système (poisson, pêcheur, chenal, engin...) et des structures de communications (les univers multi-agents) pour faire collaborer les connaissances des différents chercheurs. Les outils présentés sont adaptés pour permettre la propagation de contraintes de niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs ou, inversement, l'émergence de comportements de groupe à partir de comportements individuels.

1 LE PROGRAMME DELTA CENTRAL DU NIGER

Débuté en 1986, le programme d'études halieutiques du Delta Central du Niger (DCN) a été conçu par l'ORSTOM et l'INRZFH (Institut National de Recherche Zootechnique Forestière et Hydrobiologique) avec pour objectif de réunir le maximum d'informations scientifiques, d'aboutir à une meilleure compréhension de la pêche dans le delta central, et enfin de favoriser la mise en place d'une gestion adaptée et cohérente de ce secteur d'activité (Quensière, 1988).

Le secteur des pêches artisanales fait intervenir divers acteurs pêcheurs et poissons dans un environnement dont les composantes hydrologiques, écologiques, sociologiques, économiques sont responsables de l'évolution, de la dynamique.

L'objectif de cette étude sur la pêche artisanale est donc de décrire, d'analyser le comportement, l'organisation de ces acteurs dans leurs interactions avec leur environnement et de définir une dynamique

globale à partir des dynamiques individuelles. Ainsi, la pêche est abordée comme un système dont les différents composants (conditions d'accès à la ressource, de production, de commercialisation, technologies de captures, stocks disponibles, biologie de la ressource) interagissent étroitement; le principal objectif réside donc dans une étude fine de l'imbrication de ces composants (cf. Quensière).

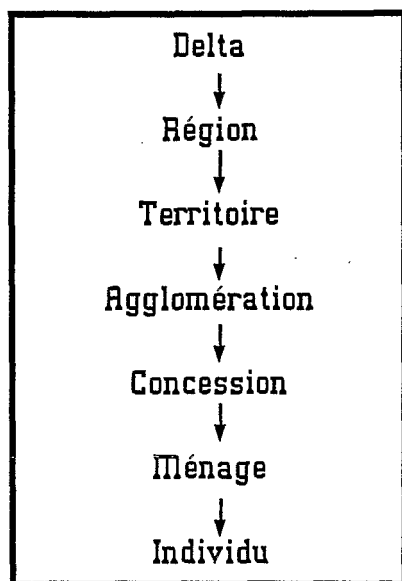
Ce programme est conduit au Mali par une équipe pluridisciplinaire (anthropologues, biologistes, halieutes, économistes, démographes, biométriciens); la phase d'acquisition des données et des connaissances a débuté en 1986 et se caractérise par sa diversité et sa richesse:

- enquêtes statistiques pluridisciplinaires stratifiées (près de 20000 personnes enquêtées) (cf contribution P. Morand)
- monographies sur les structures sociologiques et la dynamique spatio-temporelle du rapport homme-milieu,
- réseau d'acquisition de données de pêche et de commercialisation du poisson (27 villages en permanence) comprenant la saisie et le traitement des données en temps réel,
- enquêtes statistiques en démographie,
- marquage de poissons pour suivre les migrations,
- échosondages pour évaluer les ressources du fleuve,

2 LA DIVERSITE DES ECHELLES

Les connaissances acquises, qu'elles soient issues des enquêtes statistiques, des réseaux d'acquisition de données ou des analyses sociologiques ou biologiques portent sur différents niveaux, correspondant soit à des degrés d'organisation (individu-ménage-concession-agglomération, poisson-"groupes" de poissons) soit à des échelles géographiques (territoire-région-delta), où sont identifiées des caractéristiques, des règles, des lois qui régissent l'activité de la pêche.

Par exemple le schéma montre, pour le pêcheur, différentes échelles qui correspondent à des niveaux sur lesquels des connaissances ont été acquises: le sociologue pourra se pencher sur les structures des groupements de pêcheurs sur un territoire ou une région tandis que le biologiste des pêches s'intéressera à l'individu, acteur d'une pêche, ou que le microéconomiste décrira les évolutions budgétaires au sein des ménages ou encore que le macroéconomiste travaillera sur les flux intra ou extradeltaïque.



Ainsi une bonne intégration des connaissances sur chaque niveau et sur les interactions entre les niveaux, d'une part est nécessaire à la compréhension de la dynamique globale du système de la pêche dans une approche interdisciplinaire et d'autre part permet aux chercheurs de chaque discipline de disposer de connaissances d'autres disciplines qui pourront orienter leur recherche. Le biologiste des pêches pourra par exemple comprendre les efforts de pêche d'un individu en fonction de la position de son ménage dans l'agglomération, l'anthropologue pourra quantifier les résultats d'une stratégie adoptée par le ménage par le poids de poissons rapportés par un individu du ménage, l'économiste évaluer les résultats alimentaires d'un investissement technologique du ménage, etc...

C'est pour tenter d'intégrer les diverses connaissances dans un cadre commun qu'un projet de modélisation est en cours: il consiste à élaborer un logiciel de simulation permettant une représentation du fonctionnement du système ou de sous-systèmes et offrant au chercheur de chaque discipline un outil de travail pour ses propres recherches.

Ainsi défini, ce projet a pour but d'étudier la représentation des connaissances pour une (des) simulation interdisciplinaire et donc d'offrir des possibilités de transferts d'échelle.

3 LA MODELISATION

3.1 principes de modélisation

La recherche sur les pêches artisanales dans le Delta Central du Niger, qui se situe dans le cadre d'une réflexion menée en particulier à l'ORSTOM (Fontana, 1989), se pose en tant qu'étude de système ce qui fait référence, épistémologiquement, à la démarche systémique développée depuis plusieurs années par divers auteurs (LeMoigne, Morin, Durand, Delattre, Walliser...) en abordant un système dans sa globalité, dans sa complexité, dans son organisation et ses interactions plutôt que dans l'analyse réductionniste de ses composantes ou, dans le cas de l'halieutique, d'une de ces composantes, la ressource (cf contribution J. Quensière). Le système est considéré comme complexe et étudié en tant que tel. On passe du réductionnisme, de l'analyse du compliqué mais simplifiable, au complexe, irréductible mais organisé.

La systémique se pose comme modélisation de la complexité, étude de l'organisation, de la dynamique des interactions.

Le Moigne (1990) définit un principe de modélisation d'un phénomène perçu complexe décomposé en trois phases qui sont:

- le cadrage qui consiste à établir un modèle systémique ce qui a été fait au début de l'étude en abordant le problème (la pêche) en tant que système,
- le développement, qui consiste à documenter ce modèle, à établir les correspondances entre les traits de ce modèle systémique et les traits perçus du phénomène à modéliser, phase qui est effectuée depuis 1986 en continu.
- l'interprétation: c'est la simulation d'actions possibles sur le modèle pour anticiper les conséquences éventuelles dans le phénomène. L'interprétation nécessite donc un outil pour développer des simulations dans le but de gérer la connaissance acquise pour assister l'étude dans l'acquisition de nouvelles connaissances.

C'est pour élaborer cet outil de simulation qu'a été monté un projet qui se propose de modéliser **la connaissance acquise par les chercheurs**. La modélisation systémique consiste à élaborer un outil de représentation de la connaissance sur l'organisation, les interrelations entre composants du système, qui offre des possibilités de simulation pour valider ou invalider des hypothèses. Les résultats de ces simulations font apparaître les points où l'information est manquante ou imprécise et permettent ainsi de réorienter les études sur le terrain (Brossier, 1987; Poussin, 1987).

Une méthode pour étudier la complexité à l'aide d'une modélisation est dans le processus :

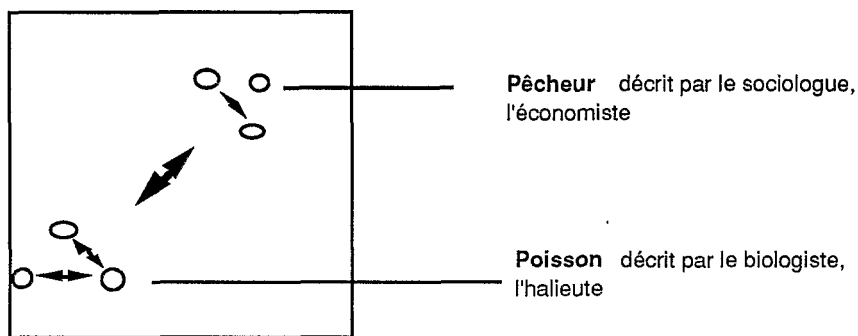
hypothèse -> simulation -> acquisition de connaissance
(par validation ou, au contraire, par un retour à l'objet d'étude)

Elle doit donc aboutir à un outil d'accès très facile (afin que le chercheur puisse le manipuler aisément) qui accompagne et oriente l'étude du système à partir des connaissances déjà acquises. Il a en effet été remarqué (Delattre, 1980) que la difficulté de la modélisation systémique réside dans l'élaboration d'un langage commun pluridisciplinaire. Il ne s'agit pas simplement de juxtaposer des concepts provenant des diverses disciplines car :

- d'une part comme nous l'avons montré les échelles de travail, les niveaux d'étude sont différents: la modélisation a pour but de représenter les effets d'échelle, de transférer les connaissances entre niveaux,
- d'autre part la précision des données et l'objectif des modèles sont très variables d'une discipline à l'autre.

Les modèles sont bâtis sur des échelles plus ou moins fines, fournissent des connaissances aux précisions différentes (parfois non évaluables). La variabilité n'est pas considérée sur les mêmes échelles spatiales et temporelles. Pour ces raisons ce projet propose un cadre de simulation où puissent s'exprimer les différents concepts en s'appuyant sur des objets communs (poissons, pêcheurs, biotopes, engins ...) définis par les différentes disciplines. Ces entités sont caractérisées par des attributs susceptibles de se modifier au gré d'évènements qui affectent le système considéré (Meyer, 1986).

Cadre de modélisation



En pratique, la modélisation est la représentation des déterminations des comportements des composants (Ex: pour un poisson l'espèce détermine le comportement de migration) et des conditions des comportements, des stimuli sur ces composants (Ex: la crue conditionne la migration), ces déterminations et conditions provenant de plusieurs échelles.

3.2 Déroulement d'une simulation

Pour l'utilisateur une manipulation se déroule à peu près comme suit:

- l'utilisateur choisit les objets, leurs attributs (on proposera par défaut des caractéristiques issues des études statistiques de façon à apporter à l'utilisateur la connaissance acquise, mais en laissant la liberté de faire d'autres choix), impose certains évènements (Ex: les dates de modifications hydrologiques).
- simulation dirigée par les évènements (action -> objet -> action) avec suivi à l'écran des actions, localisations, déplacements.
- les résultats (production d'un biotope, d'un engin, enrichissement d'un pêcheur...) sont affichés et pourront être expliqués: pour un évènement qui s'est produit on fournira les conditions et les déterminations qui l'ont provoqué.

Après avoir défini l'objectif de la modélisation, il reste à définir les techniques pour représenter les connaissances aux niveaux où elles ont été acquises et pour définir des structures de transfert entre les niveaux.

4 LES OUTILS POUR MODELISER

L'analyse de système fait en général appel à des techniques mathématiques (systèmes d'équations différentielles, processus matriciel discret, ...) pour gérer des flux entre différents compartiments du système ou pour simuler différentes stratégies. Si ces techniques sont performantes dans certains cas, dans le cadre d'une étude pluri-chercheurs comme le DCN elles s'avèrent d'une part lourdes et compliquées ce qui isole le modélisateur par rapport aux spécialistes, d'autre part trop éloignées du monde observé puisqu'on formalise des concepts (biomasse, densité de populations...) ce qui nuit à la communication interdisciplinaire et enfin trop rigides pour permettre une remise en cause rapide de la connaissance. " L'utilisation du langage mathématique - par nature et par vocation généralisateur- peut conduire à un formalisme qui isole l'approche systémique au lieu de l'ouvrir sur la pratique" (DeRosnay, 1975).

D'autre part se développent actuellement en Intelligence Artificielle des techniques qui apportent des solutions aux problèmes de la représentation des connaissances du projet DCN et des simulations à partir de cette connaissance (Widman, 1989).

4.1 les objets

4.1.1 Définitions

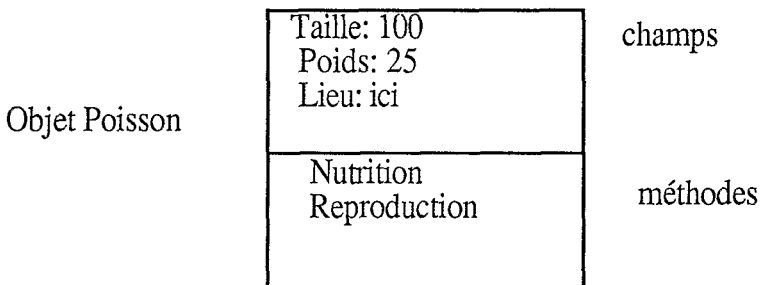
Les techniques de représentation objet offrent un outil à l'analyse de système car elles permettent de représenter un univers par les différents objets qui le composent, de définir la complexité du système par les interactions entre ces objets, de hiérarchiser la connaissance sur différents niveaux de précision, différents points de vue.

Au plan informatique, des langages (langages orientés objets LOO) ont été développés suivant ce principe. Ces langages reposent sur quelques principes fondamentaux qui sont, en résumé (Masini, 1989; Bailly, 1989):

Objet, encapsulation

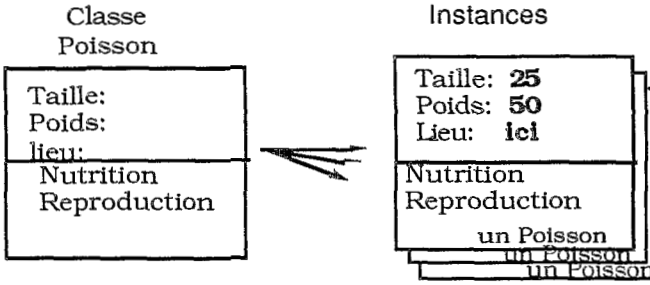
Un objet est un module élémentaire réunissant un certain nombre de données qui lui sont propres et de procédures qui les manipulent. Un objet représente à la fois un savoir déclaratif (base de données locale: les champs) et un savoir procédural (les méthodes). C'est une portion de connaissance possédant son propre contrôle (notion d'encapsulation) et pouvant vivre indépendamment de ses congénères. La connaissance globale est répartie sur les différents

objets. L'objet informatique peut correspondre simplement à des objets du monde réel ou à des concepts, des modèles.



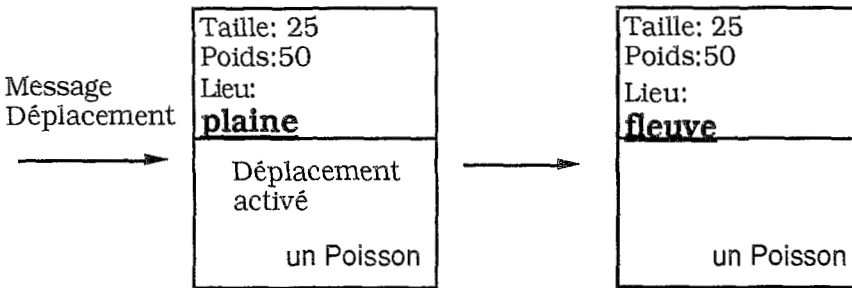
Classe, instanciation

Les objets ayant une même structure et même comportement sont regroupés dans une classe: c'est une représentation de type abstrait, un moule à partir duquel on fabrique autant d'exemplaires (les instances) que l'on veut. La classe spécifie la structure des objets.



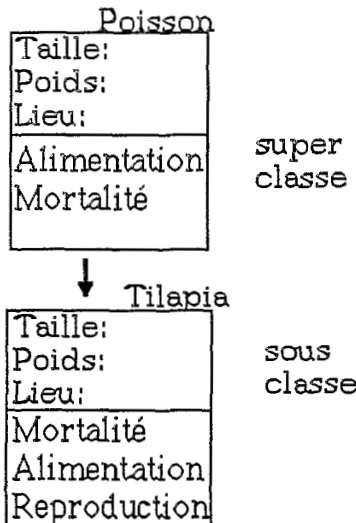
Message, requête dynamique

Les objets sont reliés à leur environnement par des messages. L'objet confronte le message avec ses méthodes et active celle qui lui correspond.



Héritage

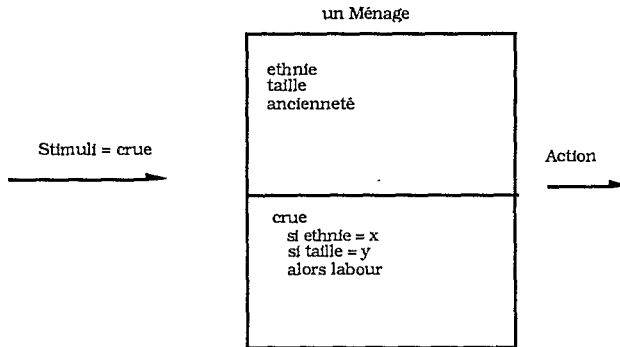
Une classe peut être définie comme une sous-classe d'une autre: les instances de la sous-classe héritent alors automatiquement des propriétés de la classe mère (super-classe), en plus de ses propres caractéristiques .



4.1.2 Les objets du système de la pêche du DCN

L'adéquation de la représentation objet au problème de la modélisation et de la simulation a été discutée dans plusieurs contributions (Pavé,1988-1989; Rechenmann,1989; Bailly,1989; Middleton,1985; Klahr 1985). La formalisation de la représentation des connaissances sur le DCN apparaît clairement: aux éléments du système (Poisson, Biotope, Pêcheur) correspondent des objets informatiques, possédant leurs caractéristiques propres (ethnie, espèce, taille...) et leurs méthodes.

Suivant la définition de la simulation proposée, les comportements sont fixés à l'intérieur des champs et des méthodes de chaque objet et les conditions de leurs comportements par les messages envoyés à ces objets.



Ainsi définis les objets permettent de représenter informatiquement les divers éléments du système de la pêche. L'analyse des données de l'enquête statistique, les recherches de chacun des chercheurs fournissent la connaissance sur ces différents objets.

Cependant, dans le cadre du programme DCN et donc dans le cadre de notre modélisation pluri-disciplinaire la connaissance sur les objets est structurée. Le système est vu par différents chercheurs, une simulation du système doit donc intégrer l'organisation, les communications entre les connaissances sur l'activité de la pêche. Pour appréhender la complexité, il est donc nécessaire de définir une couche au-dessus de l'objet, une structure de communication entre les sous-systèmes de connaissances.

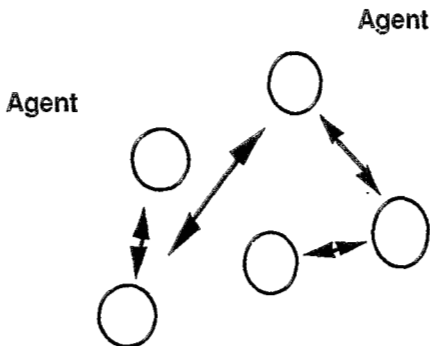
4.2 Les agents, les modèles de communication

4.2.1 Définitions

Les problèmes de communication entre agents intelligents font partie des domaines de recherche d'une branche de l'Intelligence Artificielle (IA), l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) (Ferber,1989; Laasri,1989). "Tandis qu'un système d'IA classique représente un être humain dans l'accomplissement d'une tâche qui requiert à la fois des connaissances, de l'expérience et une certaine dose de raisonnement, un système d'IAD est conçu comme une société (un univers) d'agents autonomes qui travaillent en commun. Chaque agent est amené à coopérer et à collaborer avec les autres agents du système d'une part afin d'améliorer sa propre participation à la résolution du problème global et de compléter les informations dont pourraient avoir besoin les agents, d'autre part afin de n'agir qu'au moment opportun " (Ferber,1989).

Un agent peut être considéré soit comme un objet réel, soit comme un spécialiste disposant d'un ensemble de connaissances pour résoudre une sous-partie du problème. Les systèmes multi-agents diffèrent par la taille des agents, leurs nombres et leurs mécanismes de communication. On distingue deux modèles de communication:

- les systèmes qui communiquent par transmission de messages; les connaissances, les résultats partiels et les méthodes utilisées pour aboutir à un résultat sont distribués entre les agents qui s'envoient des messages. Les agents connaissent l'adresse d'un certain nombre d'autres agents avec qui ils communiquent.

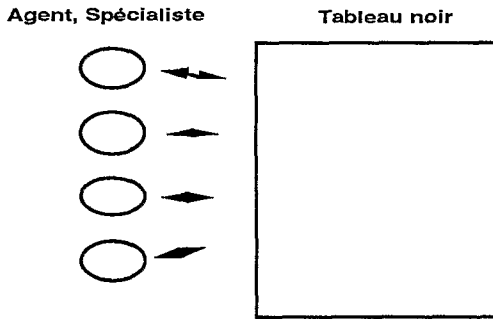


- les communications par partage d'information; l'architecture dite du tableau noir est le système de communication le plus répandu; elle permet de représenter :

- les agents ou spécialistes,

- la base partagée (le tableau noir proprement dit) qui représente les états partiels d'un problème en cours de résolution, l'état du système,
- un dispositif de contrôle qui gère et ordonne les interventions des différents agents.

Les agents n'ont pas besoin de se connaître pour s'envoyer des messages. La structure de contrôle est un intermédiaire qui repère les événements qui se passent dans le tableau noir et informe les spécialistes ou agents intéressés par ces événements. Ceux-ci sont activés, déclenchent eux-mêmes des événements récupérés par le contrôle, etc...



4.2..2 Choix d'une structure pour la modélisation

Bien que les deux structures puissent être envisagées pour élaborer la modélisation du système de la pêche la communication par tableau noir a été choisie car:

- le système est représenté dans son intégralité: il contient les agents qui le composent plus une structure de contrôle, de gestion des interactions. Cette structure contiendra la connaissance sur l'organisation des connaissances.
- cette architecture intègre **la connaissance du spécialiste (du chercheur)**, ce qui correspond au principe même de notre modélisation de la connaissance acquise. On retrouve la séparation objets-chercheurs, base partagée-sources de connaissances. Les agents, représentants des chercheurs, correspondent à un lot de règles sur un phénomène précis. Ainsi le chercheur peut intégrer ses propres connaissances dans un cadre commun où une structure de contrôle se charge de faire communiquer les différents modules experts.
- elle correspond à la démarche évolutive de ce projet de modélisation. Chaque spécialiste, en réponse à un événement donné réagit et laisse une trace de son comportement qui est récupérée par le module de contrôle pour en informer les agents intéressés. Au fur et à mesure de l'étude, les connaissances du

chercheur progressent et viennent s'ajouter aux règles du spécialiste informatique.

- elle fait l'objet de recherches informatiques plus nombreuses et plus avancées (ATOME, BB1,...).

En conclusion le cadre informatique correspond donc à une architecture de communication organisée en blackboard pour faire coopérer les connaissances des divers spécialistes, dans le but de simuler le comportement des différents éléments du système de la pêche représentés sous forme d'objets informatiques.

Dans le cadre des simulations DCN nous avons donc les correspondances suivantes:

- la base partagée (le blackboard) est l'ensemble des objets du système de la pêche: bancs de poissons, groupes de pêcheurs, biotopes, villages etc.... Chaque objet se comporte en respectant les règles énoncées par les spécialistes. Ces objets sont reliés entre eux, définissant ainsi l'état du système, la structure: par exemple un objet individu sera relié à l'objet Ménage qui lui correspond, lui même relié à l'objet Village...

- les agents qui sont des spécialistes (par exemple le micro-économiste, le biologiste ...) chacun disposant de sa connaissance sous forme de règles. Par exemple le spécialiste des migrations de poissons peut avoir une règle de la forme:

*Soit x Poisson
Soit y Plaine
Si x lieu = plaine
St y niveau_eau = descendant
Alors x lieu = chenal*

Cette règle manipule les objets Plaine et Poisson qui possèdent respectivement les attributs niveau_eau et lieu. Le déclenchement de chaque règle est indiqué sur l'écran de façon à pouvoir retrouver la séquence des modifications d'état. La connaissance sur les comportements des objets figure au niveau des spécialistes et pas des objets: c'est une modélisation à partir de la connaissance, des inter-relations entre connaissances.

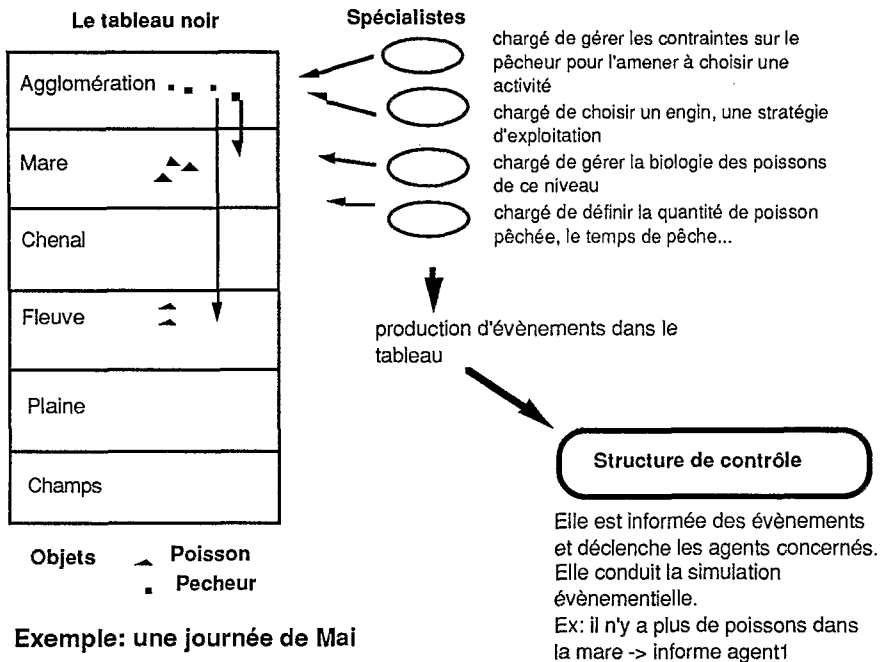
- le dispositif de contrôle permet de pouvoir gérer le déroulement de la simulation. Il est informé des événements, en avise les spécialistes intéressés, peut gérer des conflits entre spécialistes.

4.2.3 Exemple

Au moment d'envisager la gestion de l'espace qui est une valeur fondamentale on pourra par exemple considérer chaque portion

unitaire d'espace (un domaine de pêche composé de différents biotopes) comme un blackboard qui gère les comportements et évolutions des pêcheurs, poissons dans son domaine, et représenter une région (un ensemble de domaines de pêche) comme plusieurs blackboards qui travaillent en parallèle communiquent, les pêcheurs et poissons pouvant passer d'un domaine à l'autre, d'un blackboard à l'autre.

L'exemple suivant montre une éventuelle organisation en tableau noir pour l'exemple: les quelques objets et spécialistes montrés sont très simples et peu nombreux. La bonne représentation du système viendra en structurant de multiples agents aux tâches précises, ce qui permettra, au plan pratique, d'accéder rapidement aux règles de fonctionnement des agents pour les modifier.



Quantitativement il est possible de conduire des simulations avec un très grand nombre d'objets (plusieurs milliers) avec quelques spécialistes contenant une connaissance très simple, ou des simulations avec quelques dizaines d'objets et des spécialistes très riches en connaissance.

5 INTEGRATION DES TRANSFERTS D'ECHELLE DANS LE MODELE

Comme il a été présenté, les connaissances acquises ne portent pas toutes sur le niveau de l'individu ou du ménage mais sur différentes échelles correspondant soit à des degrés d'organisation, soit à des

échelles géographiques. L'organisation du modèle et les outils informatiques présentés permettent d'intégrer simplement les effets d'échelle.

Dans le cadre de la simulation, le transfert d'échelle est tout d'abord envisagé dans le sens descendant. L'acteur de la simulation, au plan humain, étant l'individu, on se représente aisément la propagation des contraintes des niveaux supérieurs (agglomération, région, delta) vers l'individu dont l'action sera ainsi déterminée. Cependant, le transfert d'échelle doit aussi être envisagé en sens ascendant, conformément à la notion de système; le système est plus que la juxtaposition des sous-systèmes: des comportements particuliers des éléments émerge un comportement de l'ensemble.

L'outil de simulation, d'étude du système, doit autoriser les transferts d'échelle dans le sens de la propagation de contraintes des niveaux supérieurs vers l'acteur comme dans le sens de l'émergence d'un comportement d'ensemble à partir des comportements individuels.

La modélisation informatique peut utiliser deux propriétés pour représenter les effets d'échelle:

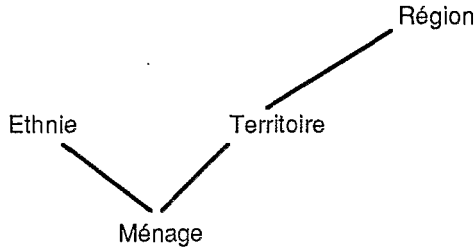
- L'héritage plus haut défini, qui correspond à une spécialisation; l'objet Poisson-d'eau-douce est une spécialisation de l'objet Poisson, il hérite de ses caractéristiques.
- Les objets composites: l'objet incorpore ses composantes qui sont elles mêmes des objets. Par exemple l'objet Poisson est composé d'objets Nageoire, Oeil, etc... En pratique il existera un champ de l'objet Poisson qui contiendra l'adresse d'objets Nageoire, un champ pour les objets Oeil, etc... Il n'y a pas d'héritage: la nageoire n'hériterait pas de la méthode nutrition.

Ces outils permettent le transfert entre les niveaux qu'il s'agisse de propagation de contraintes ou d'émergence.

5.1 La propagation des contraintes

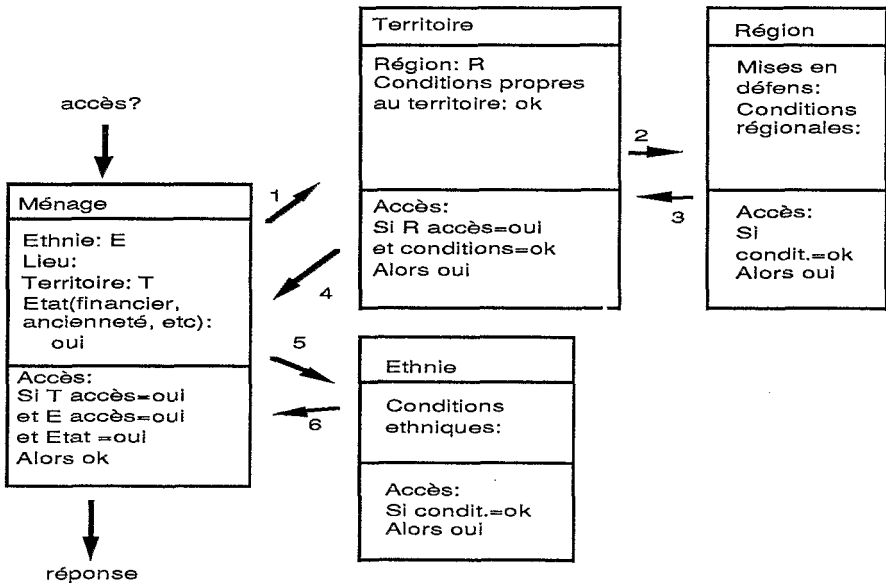
En prenant l'exemple d'un ménage qui à un moment du cycle de pêche se pose la question: ai-je accès à tel lieu de production? on identifie, schématiquement et de façon non exhaustive, des contraintes issues de son ethnie (attribution des engins, période de pêche), de la région qui définit les rapports aux autres groupes (articulation des productions, échanges économiques, organisation foncière), du territoire qui définit l'environnement humain et écologique proche, de ses caractéristiques propres (taille de son ménage, endettement, ancienneté de fixation). La décision du ménage sera déterminée par l'organisation de ces contraintes.

Au plan informatique sont créés des objets composites Région, Territoire, Ethnie reliés aux objets Ménage: une région comprend une collection de territoires, eux-mêmes composés de collections de ménages. Par ailleurs une ethnie comprend elle aussi une collection de ménage (ces objets composites sont un peu particuliers car leurs composantes sont toutes du même type). Ainsi un ménage est caractérisé par l'arbre de propagation des contraintes suivant:



Au moment de décider d'une action le ménage évalue les contraintes en parcourant l'arbre suivant un ordre prédéfini. La définition de cet ordre pourra faire l'objet de différentes simulations: le ménage est-il d'abord d'une ethnie puis d'une région ou l'inverse, en d'autres termes quel est l'ordre des contraintes, existe t'il une hiérarchie des contraintes?

Une méthode de l'objet Ménage interroge d'abord l'objet Territoire qui lui correspond qui interroge lui même l'objet Région, puis l'objet Ethnie pour évaluer la résultante des contraintes et la décision de l'objet Ménage.



De cette façon il est possible d'intégrer la connaissance du chercheur au niveau requis et d'assurer le transfert des contraintes entre niveaux.

5.2 Emergence

Le programme DCN doit aborder le système de la pêche dans sa globalité, dans sa complexité. Un des enjeux est de définir une dynamique globale du système en étudiant les interactions, en montrant comment, des comportements de chaque sous-système émerge une dynamique globale. Le sens du transfert d'échelle est inversé, il ne s'agit plus de propagation de contraintes mais d'une émergence du niveau inférieur vers le niveau supérieur.

Par exemple, schématiquement, à l'échelle du ménage, un ménage d'ethnie bozo (pêcheurs), ayant pour objectif d'assurer son alimentation n'aura pas la même stratégie s'il demeure sur un territoire composé uniquement de bozos ou bien si travaillent sur le territoire des ménages d'ethnies cultivatrices qui lui offrent un contexte (main d'oeuvre, organisation, etc...) propice à l'agriculture. Il émerge donc au niveau supérieur, à l'échelle du village, des règles, des contraintes (schématiquement, dans un village mixte, un ménage bozo consacrerait un effort moins grand à la pêche que dans un village mono-ethnique) qui proviennent des interactions entre membres du niveau inférieur.

En pratique le territoire peut être représenté comme un objet composite avec un champ comprenant une collection de ménages et une méthode chargée d'énumérer dans cette collection les représentants des différentes ethnies. S'il existe un équilibre entre les ethnies, alors les ménages diversifieront leurs activités sinon ils se spécialiseront.

Cet exemple représente des règles qui sont le résultat d'une émergence déjà formalisée par le chercheur, à partir des conditions au niveau inférieur. Par ailleurs, et de façon plus adaptée au problème, l'outil de simulation pourra servir au chercheur pour une aide à la formalisation elle-même, pour observer, à partir d'hypothèses sur le comportement des objets d'un niveau, l'émergence d'un comportement stable au niveau supérieur. Ainsi, en provoquant plusieurs simulations avec différentes stratégies des ménages, l'utilisateur pourra étudier comment ils s'organisent entre eux, les résultats de ces stratégies au plan financier, alimentaire pour faire apparaître des comportements de groupe.

La comparaison de ces résultats à la réalité du terrain montre les connaissances imprécises ou manquantes: c'est bien là l'objectif de ce projet qui consiste à apporter un outil de simulation au chercheur pour lui permettre de tester des hypothèses, de définir l'échelle à laquelle un phénomène doit être abordé et pour poser des questions pertinentes.

6 CONCLUSION

L'outil de modélisation élaboré pour représenter la connaissance multi-disciplinaire du programme DCN est un cadre informatique qui simule le fonctionnement du système en représentant la connaissance acquise par les chercheurs. Ces connaissances sont représentées aux échelles où elles ont été définies, la structure informatique permettant de les transférer des niveaux supérieurs vers le niveau inférieur pour la propagation des contraintes comme dans le sens inverse pour étudier l'émergence de comportements globaux, ce qui permet de s'intéresser par simulation à des dynamiques émergence au niveau supérieur-retour sous forme de contraintes.

Cet outil correspond à un cadre de travail pour les chercheurs, pour l'aide à la recherche. Son but est de pouvoir travailler des problèmes pluri-disciplinaires. Il sera tout d'abord nécessaire de susciter un transfert des concepts de chaque discipline vers les objets définis conjointement. Pour cela seront conduites des simulations avec les chercheurs de chaque discipline, testant des hypothèses simples qui poseront alors des questions d'échelles spatiales, de niveau de représentation, d'organisation, etc ... La deuxième phase consistera à travailler les relations entre les disciplines pour aborder des problèmes de hiérarchisation, d'articulation entre contraintes pour une représentation du système dans sa globalité.

BIBLIOGRAPHIE

- Bailly B., Challine J.F., Ferri H-C, Gloess P.Y., Marchesin B., 1989, *Les langages orientés-objets*, Cepadues-éditions.
- Brossier J. 1987, Système et système de production- Note sur ces concepts, *Cahier des sciences humaines vol. 23- n° 3-4 ORSTOM*.
- Charles-Dominique 1989, Halieutique et pêches artisanales: anciennes méthodes, nouvelles problématiques, *Doc. ORSTOM-IFREMER, La recherche face à la pêche artisanale, T 1*.
- Delattre 1980, Théorie des systèmes et épistémologie, *La notion de système dans les sciences contemporaines, Librairies de l'université, Aix en Provence*.
- De Rosnay J., *Le Macroscopie*, Le Seuil, 1975.
- Durand D. 1990, *La systémique*, Que sais-je, PUF.
- Fay C. 1989c Rapport sociologique: pratique halieutique et stratégies de production, 53p. dact., à paraître dans *INRZFH-ORSTOM, Etudes halieutiques dans le Delta Central du Niger, 1990*.

- Fontana A. 1989, Quelle halieutique pour l'ORSTOM, *document ORSTOM*.
- Ferber 1989, *Objets et agents: une étude des structures de représentation et de communications en Intelligence Artificielle*, Thèse d'état, Paris 6.
- Klahr 1986, Expressibility in ROSS, an object-oriented simulation system, AI applied to simulation, *Simulation Series, Vol. 18*
- Laasri H., Maitre B., *Coopération dans un univers multi-agents basée sur le modèle du blackboard: études et réalisations*, Thèse, Nancy 1.
- Laloë, Samba, 1989, *La pêche artisanale au Sénégal: ressource et stratégie de pêche*, Thèse Paris-Orsay.
- Le Moigne 1980, Systémique et épistémologie, *La notion de système dans les sciences contemporaines*, Librairies de l'université, Aix en Provence.
- Le Moigne 1990, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- Masini G., Napoli A., Colnet D., Léonard D., Tombre K., 1989, *Les langages à objets*, Interéditions.
- Meyer J.A., Les langages et techniques de simulation, cours de DEA biomathématiques
- Middleton, Zanconato 1986, BLOBS: an object-oriented simulation system, AI applied to simulation, *Simulation Series, Vol. 18*
- Pavé A. 1988, EDORA: modélisation de systèmes biologiques, *Cahiers d'EDORA, rapport de recherche INRIA N°866*.
- Pavé A., 1989, Object Centered representation and problems related to living systems in nature, in *Artificial Intelligence in numerical and symbolic simulation*. Edited by Pavé & Vansteenkiste.
- Poussin J.C. 1987, Notions de système et de modèle, *Cahier des sciences humaines vol. 23- n° 3-4 ORSTOM*.
- Quensière J. 1988, Introduction, *Etudes halieutiques du DCN, Enquête statistique auprès des pêcheurs, premiers résultats*, ORSTOM-INRZFH, Bamako.
- Rechenmann, Uvietta, 1989, Shirka: an object Centered Knowledge based management system... in *Artificial Intelligence in numerical and symbolic simulation*. Edited by Pavé & Vansteenkiste.
- Thom R. 1987, La théorie des catastrophes et ses applications, *Revue internationale de systémique, vol 1*.
- Uvietta P. 1989, Modélisation et simulation du système climat-vigne-viticulteur. Quelques réflexions sur la méthode. *Revue internationale de systémique, Vol 3*.

Walliser B., *Systèmes et Modèles*, Le Seuil, 1977.

Weber 1990, Groupe de travail l'halieutique à l'ORSTOM, rapport provisoire.

Widman L.E, Loparo K.A., Nielsen N.R., 1989, *Artificial Intelligence, Simulation and Modelling*, Wiley Interscience.

PHENOMENES DE DEPENDANCES D'ECHELLES DANS L'ETUDE DU CHANGEMENT D'UTILISATION DES TERRES

BAUDRY J.

INTRODUCTION

La prise de conscience de l'importance des échelles d'espace et de temps dans les recherches en écologie s'est rapidement développée ces dernières années, ceci à la fois pour des raisons théoriques et des raisons pratiques. Au plan théorique, Allen et Starr (1982) font remarquer que les discussions sur la validité de différents modèles ont souvent pour origine l'absence de références à des échelles spatio-temporelles identiques. Or les phénomènes écologiques, tous comme de nombreux phénomènes biologiques ou physiques ne sont pas indépendants de l'échelle à laquelle on les observe ("scale dependence"). Sur le plan pratique l'écologie, en tant que science, doit aider à poser et à résoudre des problèmes d'environnement tels que pollution, mutation des paysages, diminution de la diversité biologique.... L'évaluation des problèmes aussi bien que la recherche de solution se font à des niveaux d'organisation spatiale (région, état, planète) sans commune mesure avec les niveaux d'organisation abordés jusqu'à présent en écologie. Kareiva et Anderson (in May, 1989) rapportent que la plupart des investigations écologiques portent sur des quadrats de moins de 1 m². Le problème peut être posé, de façon simplificatrice, de la manière suivante: peut-on extrapoler les résultats de recherches locales dans l'espace et dans le temps et si oui, comment?

De nombreux ouvrages et articles ont paru sur ces problèmes au cours des dernières années (Allen & Starr, 1982; Allen et al, 1987; O'Neill et al, 1986; May, ; Turner et al, 1989; Wiens, 1989). La terminologie est loin d'être fixée, aussi pour lever toute ambiguïté, les mots échelle et niveau, mots-clés de la réflexion seront utilisés, dans cette contribution, dans les sens suivants: échelle = degré de résolution spatiale ou temporelle de l'étude, c'est à dire l'unité de temps et d'espace choisie pour observer un phénomène; niveau = ensemble de l'espace étudié, pour la dimension temporelle on dira plutôt période. Ceci conduit au fait que l'on peut étudier un niveau à plusieurs échelles (e.g. 1/5000, 1/25000 ième) et qu'un changement d'échelle n'équivaut pas à un changement de niveau spatial. Il y a

explicitement une différence entre une hiérarchie de niveaux emboîtés ou non et un ensemble d'échelles.

Cette contribution a pour objet l'illustration d'une démarche de recherche sur le thème du changement d'utilisation des terres. Elle aborde la façon dont le phénomène, objet de débat social et économique, peut être perçu à différentes échelles d'espace et de temps et les problèmes que cela pose pour comprendre les causes et en estimer les conséquences écologiques. Cette démarche suppose que la région ait des propriétés d'autonomie, que l'on puisse la caractériser sur le plan phénoménologique, ce qui a été montré par Phipps et al (1986).

Les tentatives récentes d'évaluation de l'abandon des terres agricoles (Moati, 1987; 1989) ont montré que le prolongement de tendance des "causes" (démographie agricole, facteurs de production...) ne permet pas de prédire le phénomène. Nous faisons l'hypothèse qu'une partie de cet échec est imputable à l'absence d'un référentiel spatio temporel.

Cette hypothèse sera testée grâce aux résultats préliminaires d'une recherche sur les changements de l'utilisation des terres en Bretagne et Basse-Normandie depuis 1882.

Au plan écologique le changement d'utilisation des terres est un facteur essentiel dans la dynamique des paysages ruraux. Le développement de l'écologie du paysage a apporté des outils conceptuels qui permettent de dépasser le niveau de la placette homogène pour aborder des ensembles spatialement hétérogènes. Ils ont été utilisés pour comprendre la différenciation des peuplements (Burel, 1989) la dynamique de certaines populations (Merriam, 1989), la colonisation des terres abandonnées (Baudry, 1989) ou les flux de matière (Ryzkowski, 1989; Woodmansee, 1989).

Dans ce travail nous nous appuyons sur la théorie hiérarchique (Allen & Starr, 1982, Urban et al, 1987) pour formuler des hypothèses sur la dépendance d'échelle et la géométrie fractal (Mandelbrot, 1984, Peitgen & Saupe, 1988, Milne, sous presse) pour reconnaître les domaines d'invariance d'échelle, caractériser l'espace et les trajectoires chaotiques.

La théorie hiérarchique montre que les niveaux supérieurs exercent un contrôle sur les niveaux englobés. Il existe aussi une relation entre l'espace et le temps: plus on s'élève dans la hiérarchie, plus les phénomènes se déroulent lentement sur des pas de temps long. Baudry et Burel (1990) ont montré que le paysage d'une commune rurale change globalement moins vite que la moyenne des quadrats qui ont servi à l'analyse. On pose aussi l'hypothèse qu'à chaque niveau d'organisation on distingue des processus différents intervenant sur un même phénomène.

MATERIEL ET METHODES

Nous avons distingué une analyse espace/temps et une analyse purement spatiale.

Pour l'analyse espace/temps, deux ensembles de données ont été utilisés:

1) les statistiques issues des recensements départementaux annuels des services du Ministère de l'Agriculture. Pour les départements des régions Bretagne (Côtes d'Armor, Finistère, Ille et Vilaine et Morbihan) et Basse-normandie (Calvados, Manche et Orne) on a recueilli les surfaces en terres labourées, prairies permanentes, landes et bois pour les années 1882, 1911, 1920, 1939, 1955, 1965, 1975 et 1985.

2) les données TERUTI (recensement de l'utilisation des terres du Ministère de l'Agriculture) pour les petites régions agricoles du Calvados (Bessin, Bocage, Pays d'Auge et Plaine de Caen) chaque année de 1978 à 1987 pour les mêmes variables. Ce sont les seules données annuelles à l'échelle de la petite région. Il existe, à l'échelle du département un léger décalage avec les données de recensement annuel, mais ici nous travaillons au sein d'un département et considérons l'incertitude comme négligeable.

Les données ont été transformées en fréquence de façon à donner à chaque département le même poids dans une analyse factorielle des correspondances (Benzecri, 1973) qui nous a permis de constituer un espace de gradients d'utilisation au sein duquel des trajectoires d'évolution ont pu être tracées. Les régions Bretagne et Normandie, ainsi que leur somme ont été projetées en éléments supplémentaires dans l'espace factoriel ainsi défini. Nous avons fait de même avec les régions agricoles caractérisées par TERUTI. Cette technique présente l'avantage de permettre la représentation simultanée de plusieurs niveaux spatiaux à diverses époques dans un même cadre de référence. En ce sens l'analyse factorielle des correspondance est un outil précieux pour aborder le problème des échelles.

Ensuite nous avons calculé des vitesses d'évolution dans l'espace factoriel à divers niveaux spatiaux et divers pas de temps (Burel & Baudry, 1990). Cette vitesse est exprimée en unités factorielles par unité de temps. La vitesse est égale à la distance euclidienne entre deux points (états) dans l'espace factoriel divisée par la durée entre les deux états successifs.

Pour une analyse purement spatiale, les résultats du recensement général de l'agriculture de 1979, pour la Basse-Normandie, ont été utilisés car ils donnent des informations aux échelles communales et cantonales, la cartographie d'une commune à l'échelle parcellaire a permis de compléter la gamme des niveaux et des échelles

spatiales. Pour chaque niveau nous avons calculé la dimension fractale de la répartition des prairies permanentes.

RESULTATS

Trajectoires d'évolution

Les deux premiers facteurs de l'AFC expliquent 94 % de l'inertie totale, avec une valeur propre sur le premier facteur de 0.24 qui indique l'existence d'un gradient peu prononcé. Ce premier facteur est principalement lié à l'importance des prairies permanentes et des terres labourées (Fig. 1), le second facteur traduit l'importance des landes. On remarque des changements importants de l'utilisation des terres de l'ensemble des départements pour la période considérée (Fig. 2). Les régions Bretagne et Basse-Normandie ont connu des évolutions très différentes, avec, pour la Normandie de brusques revirements de tendance. Ces trajectoires sont diverses et irrégulières. La régularité augmente et la longueur diminue au fur et à mesure que l'on monte dans la hiérarchie spatiale (Fig.2). Ceci est illustré par le fait que sur l'ensemble de leur trajectoire, les départements changent plus vite que leur agrégation (Fig.3).

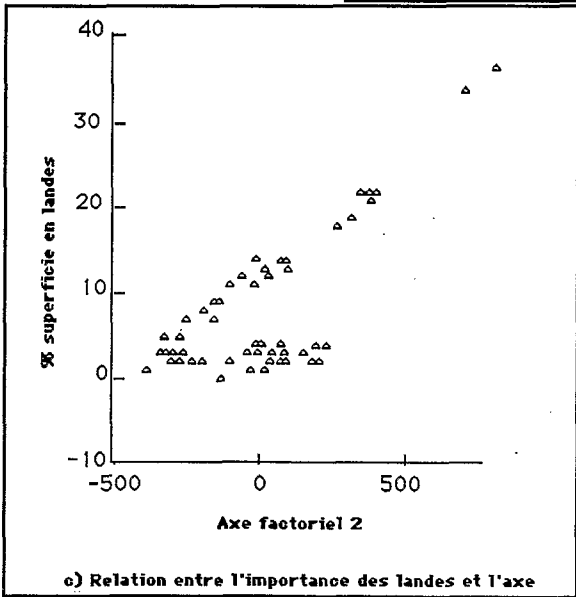
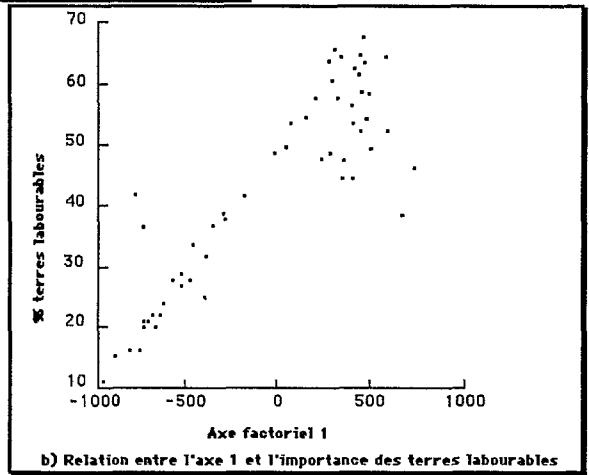
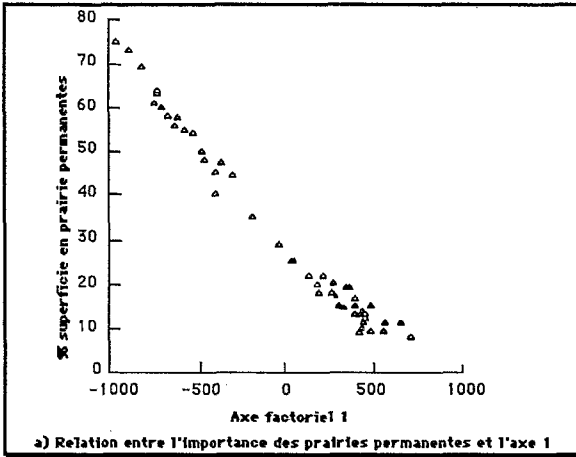
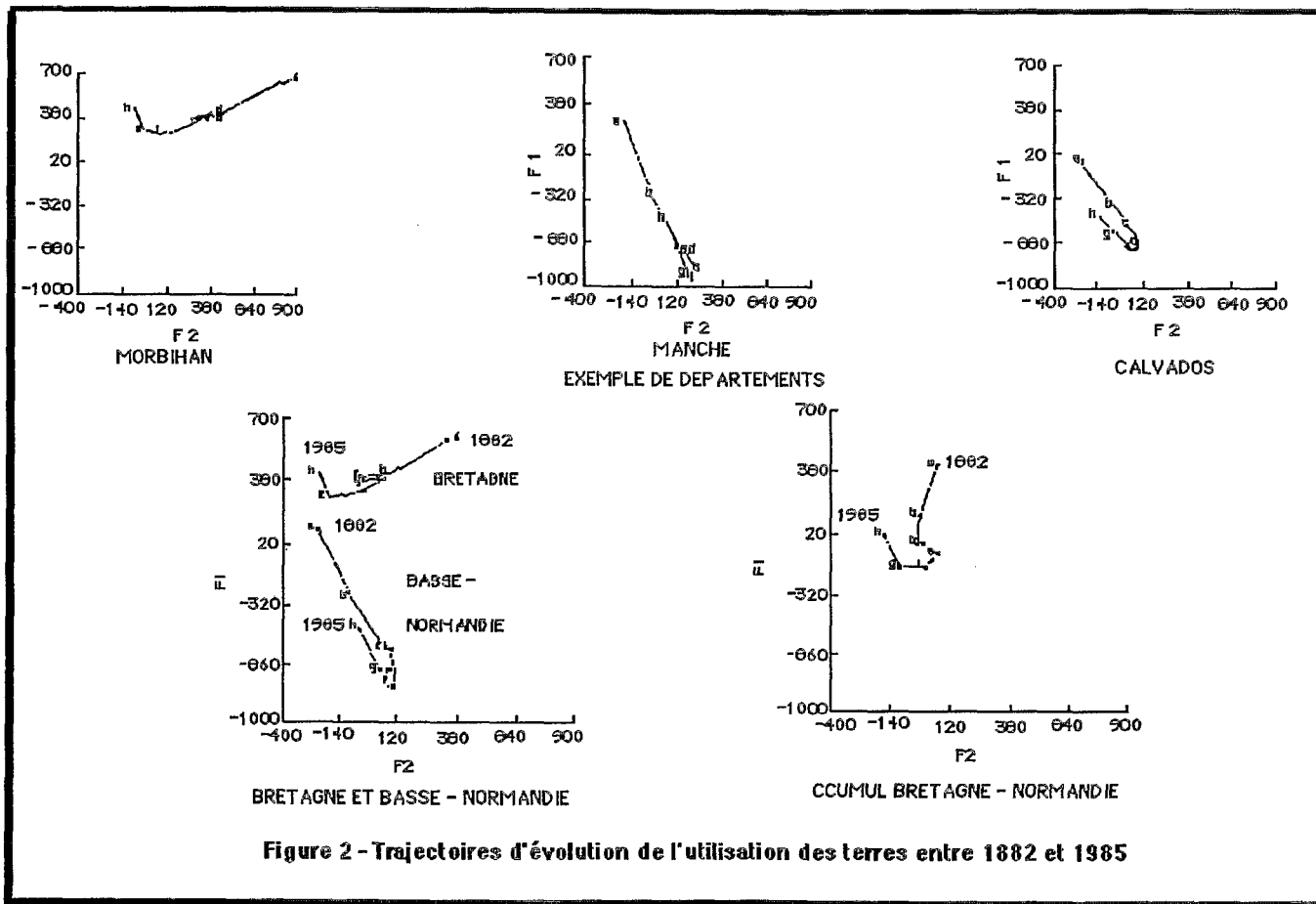


Figure 1. Caractérisation des axes factoriels



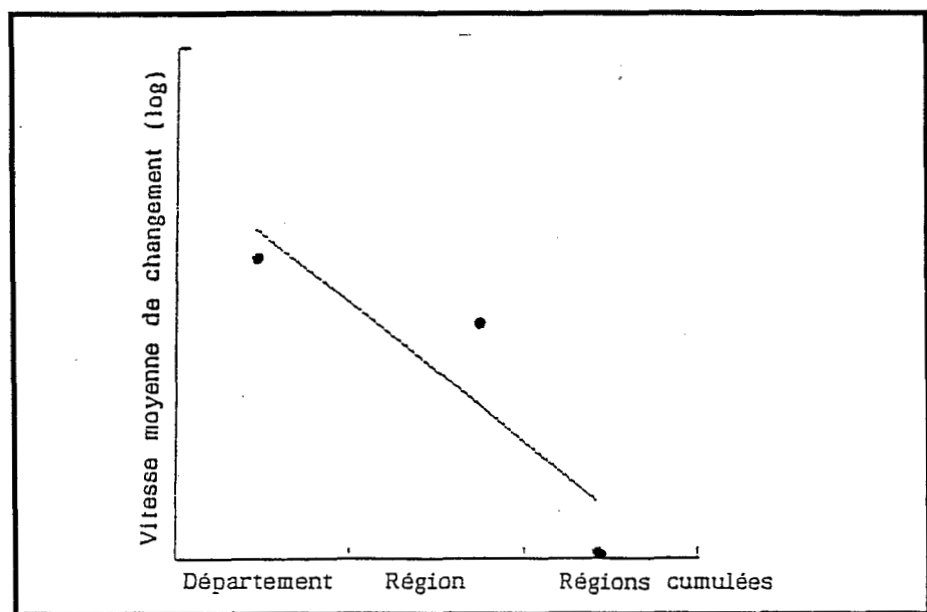


Figure 3. Variation de la vitesse de changement selon le niveau spatial considéré

Evolution annuelle de petites régions agricoles

Les trajectoires d'évolution des petites régions agricoles entre 1978 et 1985 paraissent zigzagantes (Fig.4). Ceci est dû à des variations annuelles rapides et en sens opposé, la trajectoire repasse par les mêmes points. Les vitesses d'évolution diminuent quand l'échelle de temps augmente (Fig.5).

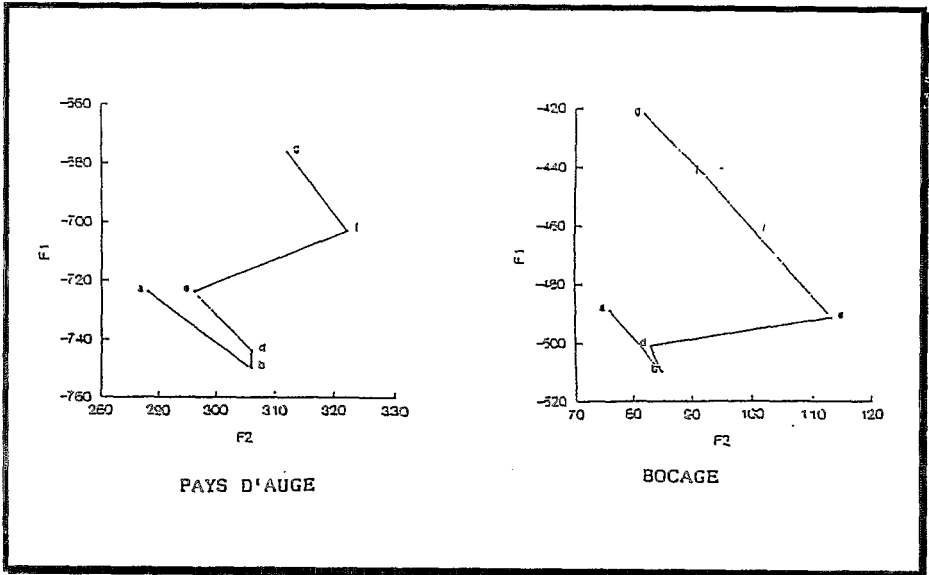


Figure 4. Evolution de l'utilisation des terres dans deux P.R.A. du Calvados entre 1978 et 1985

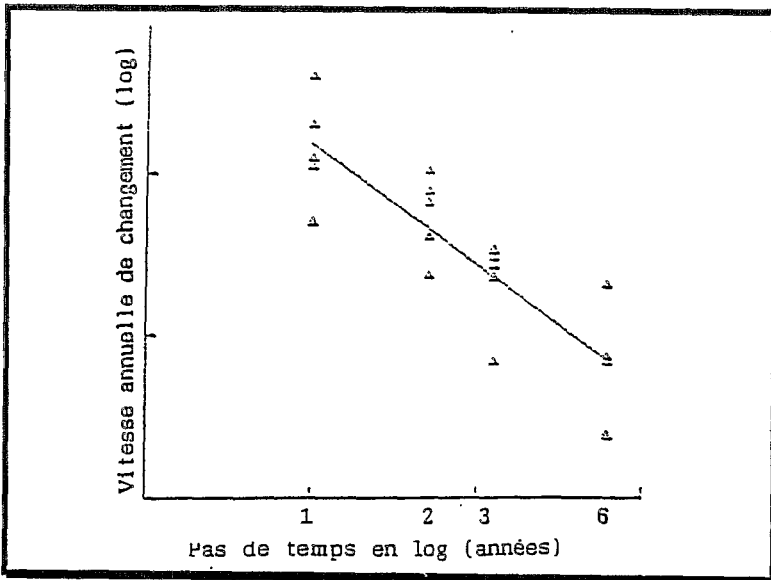


Figure 5. Variation de la perception de la vitesse de changement de l'utilisation des terres dans les petites régions agricoles du Calvados, en fonction du pas de temps considéré

Ces deux exemples illustrent l'importance de l'échelle spatiale et temporelle dans la mesure de l'évolution de l'utilisation du territoire.

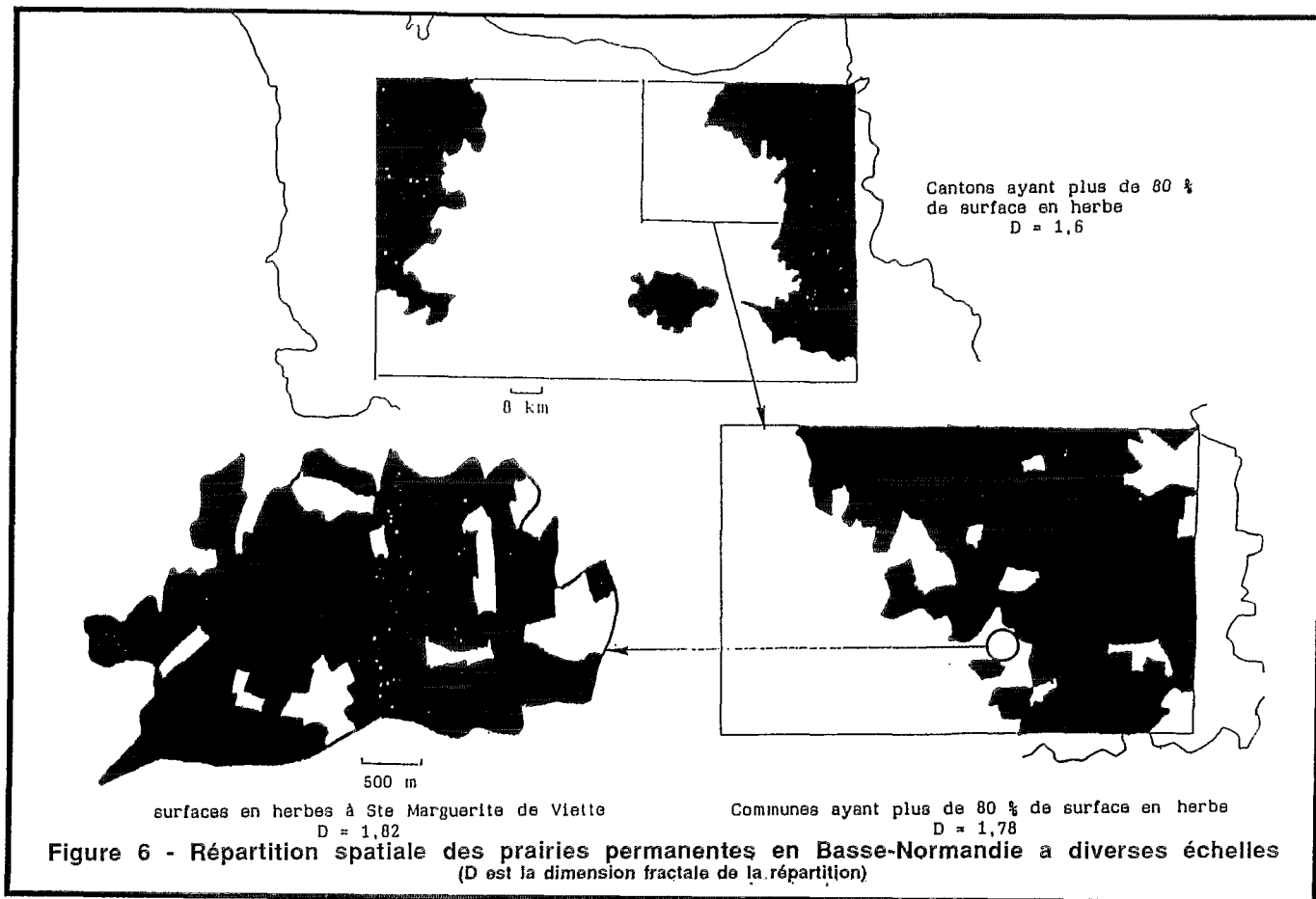
Répartition spatiale des prairies permanentes

La Fig.6 fait apparaître la nature fractale de la distribution de la classe "plus de 80% de prairies" à diverses échelles. Quelle que soit l'échelle la distribution est irrégulière; une distribution euclidienne ferait apparaître des masses homogènes pour les petites unités d'échantillonnage (Voss, 1988), La dimension fractale de la distribution varie selon les échelles (Fig.6). La structure spatiale ne se réplique pas au travers de toutes les échelles, mais seulement sur une partie de lagamme.

Discussion: intérêt de l'approche, liens avec l'activité agricole et les processus écologiques. Cette première analyse d'un phénomène complexe car ayant des déterminismes différents selon les niveaux d'organisation, montre la pertinence d'une interrogation sur les échelles. Il apparaît que:

* les vitesses apparentes d'évolution de l'utilisation des terres varient selon les échelles temporelles et spatiales considérées. En accord avec la théorie hiérarchique, plus les échelles temporelles sont grandes (pas de temps court), plus les échelles spatiales sont fines et plus les vitesses moyennes sont élevées. Il découle de ceci un point extrêmement important: la vitesse d'évolution d'un ensemble qui le compose. Une approche statistique basée sur des taux moyens de changement extrapolés linéairement est clairement inappropriée. Dans les domaines étudiées, les trajectoires semblent avoir une seule dimension fractale, ce qui permettrait d'extrapoler la vitesse d'une période à l'autre grâce à cette dimension fractale (la dimension fractale est la pente de la régression log/log de la vitesse par rapport à l'échelle de mesure).

* la distribution spatiale des principaux modes d'utilisation des terres est aussi fractale. Suivant les niveaux et échelles spatiales considérées on a différents domaines de fractalité. Ceci n'est nullement étonnant car l'on sait que des combinaisons particulières de climat et de sol à une échelle régionale peuvent déterminer la dominance des prairies permanentes, tout en permettant localement, à des agriculteurs d'avoir des cultures annuelles. L'étape suivante de la recherche est de chercher les échelles et les niveaux spatiaux où change la dimension fractale, de façon à y concentrer les études de changement de processus d'organisation.



La prédiction des changements nécessite la mise au point de modèles déterministes ou stochastiques basés sur les variables causales agissant à différents niveaux. Sur le thème ici étudié, cela veut dire qu'on ne peut comprendre ce qui se passe à un niveau d'organisation (exploitation agricole, commune, région...) sans étudier simultanément les niveaux englobés et les niveaux englobant (Allen et al, 1984). Le travail actuel nous aide à définir ces niveaux. Notre hypothèse est qu'au niveau de l'ordre de la commune, à des échelles qui restent à déterminer, ce sont les caractéristiques des agriculteurs et de leurs exploitations qui vont déterminer les évolutions, alors qu'au niveau régional, ces variables auront peu d'importance du fait de l'organisation hiérarchique de l'espace qui donne une certaine autonomie aux différents niveaux (Allen & Starr, 1982; O'Neill et al, 1986, May, 1989). A ce niveau régional, ce seront les évolutions des techniques et du marché qui seront vraisemblablement les variables déterminantes. Balent (1989) et Baudry (1990, Baudry et al, 1989) ont montré l'effet des relations hiérarchiques entre les parcelles agricoles et les exploitations ou la société locale sur l'évolution écologique des parcelles.

L'approche hiérarchique doit nous permettre d'éviter ce que Wiens (1989) appelle les "pseudoprédiction"; ce sont les prédictions que nous pouvons faire à court terme sur des niveaux spatiaux élevés. Etant donné que leurs dynamiques sont lentes, il y a peu de changement à court terme d'où la facilité de prédiction, mais dans la mesure où le long terme n'est pas intégré, ce ne sont que des pseudoprédiction.

Relations avec les processus écologiques

L'hétérogénéité spatiale et l'instabilité temporelle de l'utilisation des terres donc des habitats, des couverts végétaux ont des conséquences écologiques importantes qu'il est difficile de cerner globalement, alors qu'il existe de nombreuses études locales. Les principaux problèmes posés concernent:

- * le pool régional d'espèces, qui est une contrainte majeure pour la diversité biologique locale (Ricklefs, 1987).
- * la fragmentation, la taille des fragments, les relations spatiales et leur influences sur les populations locales.
- * les vitesses de réaction, de colonisation des populations. Les espèces prairiales ont-elles pu coloniser les prairies de la Manche en 80 ans? A-t-on jamais atteint un état d'équilibre?
- * comment ces changements affectent-ils les conditions climatiques locales (prairies et bocage sont liés), l'érosion, les flux de minéraux?

La littérature ne fournit que peu d'indications pour répondre à ces questions. Middleton et Merriam (1983) ont montré que la plupart des espèces forestières subsistaient dans les paysages ruraux du sud-est de l'Ontario 200 ans après les débuts de l'agriculture. Sugihara et May (1990) ont formulé diverses hypothèses sur les conséquences écologiques du caractère fractal des paysages. Milne (sous presse) développe des modèles utilisant la géométrie fractale et les relations allométriques entre le poids des herbivores et leur aire de comportement pour prédire l'utilisation des ressources dans un paysage. Senft et al (1987) développent des modèles hiérarchiques de comportement des herbivores.

La principale hypothèse que nous pouvons poser actuellement est la suivante: Les espèces utilisant de grands espaces "voient" celui-ci changer moins vite que les espèces utilisant des espaces petits tels que les parcelles agricoles ou les haies. Ces dernières peuvent trouver des refuges proches du fait de l'hétérogénéité des paysages. Burel (soumis) a observé que la distribution de certaines espèces de coléoptères carabiques intègre l'état du paysage 30 ans auparavant. Ces états de non équilibre seront difficiles à cerner.

Les approches pluri-échelles constituent des outils de recherche puissants permettant de préciser au mieux le domaine de validité des observations (niveaux d'organisation) et de poser des hypothèses sur les processus générant les phénomènes spécifique à chaque niveau.

Remerciements: Ces recherches ont bénéficié du soutien financier de la Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt de Basse-Normandie et du Comité Ecologie et Gestion du Patrimoine Naturel du Ministère de l'Environnement. Je remercie le comité français du SCOPE de m'avoir permis de participer à ce séminaire. Je remercie F. Burel pour ses remarques sur une version antérieure du manuscrit.

REFERENCES

- ALLEN, T.F.H. & STARR, T.B. (1982) *Hierarchy perspectives for ecological complexity*. The university of Chicago Press, Chicago and London, 310 p.
- ALLEN, T.F.H., O'NEILL, R.V. ~ HOEKSTRA, T.W. (1984) *Interlevel relations in ecological research and management: some working principles from hierarchy theory*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-10, 11 p.
- BALENT, G. (1989) Hierarchical analysis of spatial patterns in pastoral systems. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement* 16: 187-198
- BAUDRY, J. (1989) Interactions between agricultural and ecological systems at the landscape level. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 27: 119-130

- BAUDRY, J., BUREL, F. & BALENT, G. (1988) Ecological consequences of changes in agricultural systems: some methodological aspects and cases study in France. In Golley F. and Golley P. (eds) Ecological consequences of agricultural policy and practice. *Ecology International* 16:35-46
- BENZECRI J.P. (ed) (1973) *L'analyse des données*, tome 1: la taxinomie Donod, Paris 615p.
- BUREL, F. (1989) Landscape structure effects on carabid beetles spatial patterns in Western France. *Landscape Ecology*, 2: 215-226.
- BUREL, F. (soumis) Effect of landscape structure and dynamics on carabids biodiversity, in Brittany France. *Landscape Ecology*
- BUREL, F. & BAUDRY, J. (1990) Structural dynamic of a hedgerow network landscape in Brittany France. *Landscape Ecology* 4 (4) sous presse
- MANDELBROT B. (1984) *Les objets fractals*
- MERRIAM, H.G. (1989) Ecological processes in the time and space of farmland mosaic. IN Zonneveld, I.S. & Foraman, R.T.T. (eds.) *Changing landscapes: an ecological perspective*. Springer-Verlag pp 121-133
- MIDDLETON J. & H.G. MERRIAM (1983) Distribution of woodland species in farmland woods. *J. Appli. Ecol.* 20: 625-644
- MILNE, B.T. (1990) Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In Turner, M.G. and Gardner R.H. *Quantitative methods in landscape ecology*. Springer-Verlag (in press)
- MILNE, B.T., TURNER, M.G., WIENS, J.A. & JONHSON, A.R. (soumis) Interactions between the fractal geometry of landscapes and allometric herbivory. *Theoretical Population Biology*
- MOATI P. (1987) L'évolution du nombre et de la structure des exploitations agricoles. *C.R. Académie d' Agriculture* 73:129148
- MOATI, P. (1989) Les facteurs démographiques, économiques et structurels de l'évolution. *C.R. Acad. Agr. Fr.* 75 (2): 9-18
- O'NEILL, R.V., DE ANGELIS, D.L., WALDE, J.B. & ALLEN, T.F.H. (1986) *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University, NJ, Press, 253 p.
- PEITGEN, H.-O. & SAUPE, D. (EDS.) (1988) *The science of fractal images*. Springer-Verlag, New-York. 312p.
- PHIPPS, M., BAUDRY, J. & BUREL, F. (1986) Dynamique de l'organisation écologique d'un paysage rural: Modalités de la désorganisation dans une zone peri-urbaine *C.R. Acad. Sc. Paris, T. 303, Série III, 7: 263-268*

- RICKLEFS R.E. (1987) Community Diversity: relative roles of local and regional processes. *Science* 235:167-171
- SENFTE, R.L., COUGHENOUR, M.B., BAILEY, D.W., RITTENHOUSE, L.R., SALA, O.E. & SWIFT, D.M. (1987) Large herbivore foraging and ecological hierarchies. *BioScience* 37:789-799
- URBAN D.L., R.V. O'NEILL & H.H. SHUGART JR (1987) Landscape ecology. *BioScience* 37:119-127
- VOSS R.F. (1988) Fractals in nature : from characterization to simulation. IN Peitgen, H.-O. and Saupe D. (eds.) *The Science of Fractal Images*. Springer-Verlag, New-York. pp21-70
- WIENS, J.A. (1989) Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology* 3: 385-397
- WOODMANSEE, R.G. (1989) Biogeochemical cycles and ecological hierarchies. In Zonneveld I.S. and Forman, R.T.T. (eds.) **Changing landscapes: an ecological perspective**. SpringerVerlag New-York pp 57-71

MACRO-DYNAMIQUES SOCIALES ET OBSERVATIONS MICRO-LOCALISEES: DES ECHELLES MULTIPLES POUR L'ANTHROPOLOGIE

FAUROUX E.

RESUME

L'un des problèmes classiques de l'anthropologie réside dans la contradiction entre une approche micro, qui paraît souhaitable dans les disciplines ethnologiques, et la nécessité de généraliser les résultats issus d'une telle approche, alors que rien n'indique dans quelles conditions d'éventuelles extrapolations sont possibles. L'approche poursuivie ici, dans le cadre de la convention MRSTD/ORSTOM, à propos de l'étude des grands axes du changement social dans l'ensemble méridional de Madagascar, constitue une tentative pour résoudre cette contradiction en procédant à une succession d'allers et retours entre les niveaux macro et micro.

Mon thème d'étude, et celui de certaines des équipes que je contribue à animer actuellement dans le sud-ouest et l'ouest malgache, peut se ramener, à travers des formulations différentes, à la recherche des "noeuds" qui se trouvent en amont du changement social. Ces noeuds sont des sous-systèmes complexes où s'interpénètrent des éléments culturels, sociaux, économiques, politiques. Ils constituent des matrices qui absorbent et "digèrent" les influences extérieures avant de les restituer sous forme de comportements, plus ou moins nettement différents des comportements antérieurs. Ce sont ces mécanismes d'absorption et de digestion que nous cherchons à repérer, à décrire, et dont nous cherchons à comprendre les modes de fonctionnement. Nous cherchons aussi à savoir comment, du fait même de leur fonctionnement, ces mécanismes se transforment à leur tour. Parmi ces sous-systèmes qui, au moins à Madagascar, interviennent de façon décisive comme matrices du changement social, on peut mentionner: l'ensemble des institutions cérémonielles, les mécanismes qui permettent la reproduction des structures locales du pouvoir, la logique de fonctionnement du système de productions....

De toute évidence, ce domaine de recherche n'est pas du ressort d'une discipline déterminée. Il n'est même pas du domaine exclusif des sciences humaines, dans la mesure où le milieu naturel en constitue l'une des variables sensibles. Nous ne savons plus si les questions que nous nous posons sont du domaine de l'histoire, de la géographie, de l'économie ou de l'anthropologie, mais nous avons à résoudre une multitude de problèmes concrets qui invitent à utiliser tour à tour des astuces méthodologiques appartenant à toutes ces disciplines.

En fait -et nous sommes d'accord sur ce point avec les organisateurs de Seminfor 4- les choix méthodologiques qui portent sur les échelles sont d'une importance fondamentale et se situent en amont des autres choix de méthode. La relative originalité des expériences que nous menons actuellement à Madagascar vient sans doute, justement, de nos choix d'échelle qui sont assez inhabituels pour une étude à dominante anthropologique, et qui nous ont conduit, insensiblement à passer d'une approche anthropologique traditionnelle à une approche élargie dont les limites disciplinaires sont imprécises, dépassant même souvent, le cadre des sciences humaines.

En schématisant la démarche, on peut la ramener à trois phases successives qui correspondent chacune à une échelle différente :

- une échelle macro-régionale, approche extensive,
- une échelle micro, peu différente des techniques classiques de l'anthropologie,
- un retour au macro, incluant un passage à un macro abstrait

I UNE PREMIERE ECHELLE MACRO

Les idées qui sous-tendent cette première approche macro sont très simples : pour aborder l'étude d'un phénomène quelconque, -ce peut être un phénomène social-, il est intéressant de commencer par une sorte d'inventaire aussi exhaustif que possible de toutes les formes qu'il prend dans l'espace. On procède à un repérage extensif en s'intéressant plus à la morphologie des phénomènes, à leur apparence externe, qu'à leur fonctionnement interne.

La nouveauté, par rapport à la démarche habituelle de l'anthropologie, repose sur:

- l'extensivité (on considère **toute** la zone à l'intérieur de laquelle le phénomène existe et non pas un petit nombre de points choisis pour leur représentativité),

- le souci d'exhaustivité (on cherche à inventorier toutes les formes existantes, y compris les formes exceptionnelles, anormales)
- la prise en compte, à grands traits, de tout l'environnement - naturel, social, culturel, politique- dans lequel sont pris les phénomènes étudiés,
- la nature relativement rapide des observations qui, à ce niveau, cherchent plus à inventorier qu'à comprendre de l'intérieur.

Quelques exemples permettront sans doute de mieux comprendre le contenu de cette démarche.

Soit le problème posé par l'évolution des institutions cérémonielles et leur rôle comme matrice du changement social.

Les faits se présentent de manière extrêmement chaotique. Certes, tous les groupes d'éleveurs du sud-ouest et de l'ouest fonctionnent sur le même schéma: des cérémonies lignagères destinées, à travers le sacrifice de boeufs, beaux, gras et nombreux, à obtenir la protection des ancêtres. Mais, cette structure commune masque de grandes différences dans l'espace, dans le temps, et, parfois, dans le même temps et le même lieu. Une première approche extensive paraît défier tout effort de classement et d'établissement d'une typologie précise : à l'exception de la circoncision et des funérailles, partout importantes, il existe un grand nombre de cérémonies lignagères qui, selon les lieux, portent des noms différents, obéissent à des règles rituelles différentes. Les rites funéraires et de circoncision paraissent eux-mêmes très variables d'une sous-région à l'autre, selon l'appartenance ethnique ou de caste, ou selon le niveau de richesse. Les phénomènes d'acculturation mutuelle entre autochtones et migrants a encore compliqué la situation.

Pour mettre de l'ordre dans les observations, il est apparu utile d'utiliser l'échelle macro-régionale. Les conditions particulières dans lesquelles travaillent les équipes MRSID/ORSTOM de Tulear ont permis, en fait, de prendre en considération deux niveaux macro-régionaux :

- un niveau correspondant à l'aire d'extension de chacun des groupes ethniques de la région, en faisant l'hypothèse -très proche de la réalité- qu'à chaque groupe correspond un comportement rituel spécifique; par exemple, l'équipe que j'anime plus particulièrement s'est donné comme champ d'investigation l'aire d'extension de la culture sakalava¹ c'est-à-dire, assez exactement, la région qui porte le nom de Menabe;

¹ Il s'agit des Sakalava du Menabe, dans l'Ouest malgache, à l'exclusion des Sakalava du Boina, dans le Nord-Ouest, dont l'organisation sociale et économique est très sensiblement différente.

• un niveau correspondant à l'ensemble macro-régional le plus large à l'intérieur duquel évoluent les sociétés dont le rituel accorde une place prééminente au boeuf: c'est l'"ensemble méridional de Madagascar" qui englobe le sud, le sud-ouest et l'ouest malgaches. Ainsi, le Menabe (les Sakalava), l'Androy (les Tandroy), l'Ibara (les Bara), le pays masikoro, le Mahafale, le littoral maritime (les Vezo)... sont étudiés séparément par diverses équipes; la somme de ces travaux pourra faire l'objet d'une réflexion comparative synthétique intégrant toutes les informations collectées au niveau de l'ensemble macro-régional.

L'approche extensive conduit tout naturellement à utiliser des méthodes et des techniques qui ne sont pas propres à l'anthropologie. Certaines, en particulier, sont très proches de celles de la géographie humaine. Elles peuvent, par exemple, déboucher sur des cartes :

• carte des aires lexicographiques afin de mettre de l'ordre dans des terminologies rituelles qui apparaissent extrêmement confuses (quatre à cinq termes différents, selon les lieux, pour désigner la cérémonie de la circoncision; une profusion de termes, *bilô*, *tromba*, *doany*, *vorombe*, *kokolampo*¹ pour désigner diverses formes de possession, avec, souvent, une large confusion de sens entre les deux;

• carte des types de rituels: zones où les cérémonies lignagères sont effectuées autour d'un grand poteau cérémoniel clanique (le *hazomanga lava*), où ce dernier est doublé par un poteau lignager (le *hazomanga fohy*), où il existe une sorte d'autel lignager, où les seuls poteaux sont ceux qui sont dressés lors de la circoncision...etc.

• carte des transformations indiquant, par exemple, quels types de solutions sont utilisées pour remplacer les boeufs quand on en manque (recours à des sacrifices d'autres animaux ou à l'offrande de produits agricoles, cérémonies différées), ou quels sont les moyens principalement utilisés pour se procurer les boeufs indispensables (rapports de clientèle simple dans la dépendance d'un riche propriétaire de boeufs, recours au salariat ou au métayage...), ou, encore, cartes d'innovations diverses, comme la répartition des tombeaux portant une croix (il s'agit d'une nouvelle forme d'ostentation non liée à la christianisation).

¹ Dans le *bilô*, l'esprit qui possède le sujet est d'origine lignagère, dans le *tromba*, il s'agit souvent de personnages royaux ayant vécu dans le nord-ouest et le nord de Madagascar, dans le *doany* et le *vorombe*, ce sont des esprits qui viennent de la mer, les *kokolampo* sont des esprits archaïques qui viennent plutôt de l'intérieur, de la forêt.

D'autres techniques peuvent être utilisées dans cette recherche initiale¹. L'idée est qu'il convient de faire flèche de tout bois pour enregistrer aussi vite que possible le maximum d'informations. L'expérience semble prouver que l'efficacité du travail à cette échelle est accrue s'il s'agit d'équipes multi-disciplinaires qui apportent une plus grande variété dans le questionnement des faits et une plus grande imagination dans les techniques de collecte.

Au fond, le premier objectif à atteindre par l'approche extensive macro-régionale est de déterminer des zones à l'intérieur desquels les formes prises par les phénomènes étudiés appartiennent à un même type.

La connaissance aussi précise que possible de ces "zones homogènes" est essentielle pour la suite de l'étude. Elle permet :

- d'avoir d'emblée une idée précise du phénomène étudié, et, surtout, de connaître avec une relative précision son importance relative et la localisation de chacune des formes qu'il prend;
- de choisir, sur la base de critères sérieux, les villages, les micro-régions qui feront, ultérieurement, l'objet des études micro: leur représentativité est connue.

Mais l'approche extensive n'a pas seulement pour fonction de préparer la suite de l'étude: elle a sa propre valeur heuristique liée à ce que j'ai appelé, dans d'autres circonstances, l'effet puzzle. La juxtaposition de formes multiples et la confrontation avec les autres facteurs importants qui ont été repérés, peut apporter certaines clés, qui sont d'autant plus utiles qu'on ne peut guère les trouver au niveau micro plus familier aux anthropologues.

Par exemple, l'étude des conditions dans lesquelles les plus riches prêtent des boeufs aux plus pauvres pour leurs cérémonies lignagères fait apparaître, au niveau macro-régional, d'intéressantes régularités.

Quand la terre est moins rare que la main d'oeuvre, les riches prêtent des boeufs, pratiquement sans contrepartie explicite, mais, à l'occasion, quand ils entreprennent des grands travaux en entraide, ils reçoivent, "spontanément", d'importantes prestations en travail; ils peuvent ainsi, sans grandes mises de fonds, mettre en culture des surfaces importantes.

Quand la terre est rare, les prêts de boeufs sont gagés sur la terre, de sorte que, dans ce cas aussi, les riches finissent par arrondir leur patrimoine foncier.

¹ FAUROUX E. "La recherche socio-économique dans le cadre du Programme National de Régionalisation de l'Equateur: l'étude des dynamiques de transformation d'une société rurale" Cah. ORSTOM, sér. Sc. Hum. n°1, 1984, 29-42.

Cette observation très simple met sur la voie d'une découverte beaucoup moins évidente: l'idéologie cérémonielle lignagère est l'un des mécanismes qui permettent aux plus riches de reproduire leur richesse, et qui maintiennent les plus pauvres dans la dépendance des plus riches (Françoise Delcroix "L'ostentation cérémonielle chez les Sakalava du Menabe: un échange inégalitaire au profit des plus riches").

En définitive, l'approche macro-régionale apparaît comme une sorte de pré-enquête plus lourde et plus ambitieuse qu'une pré-enquête ordinaire, qui vise à effectuer un repérage sommaire mais complet et à établir des typologies localisées précises.

II PLUSIEURS NIVEAUX MICRO

Lorsque les principaux types de phénomènes ont été repérés, il convient d'en faire une étude approfondie à partir d'exemples choisis pour leur représentativité. L'approche est alors beaucoup plus classique pour une étude à dominante anthropologique, et on utilise des techniques qui s'inspirent largement de l'ethnographie traditionnelle.

Mais, à ce niveau aussi, il peut être utile de recourir à diverses échelles. On comprendra mieux cette nécessité sur un exemple, celui de la notion d'espace cérémoniel qui constitue, apparemment, un thème simple. On peut, en fait, le considérer à plusieurs niveaux :

- une aire cérémonielle lignagère c'est-à-dire un espace concret constitué de plusieurs éléments qui peuvent facilement faire l'objet d'une observation directe: l'emplacement réservé, à l'ombre d'un grand tamarinier, où sont effectués les sacrifices lignagers, le lieu protégé, dans la maison, où l'on range les instruments du sacrifice entre deux cérémonies, le cours d'eau, ou l'étang, dans lequel on jette le placenta des enfants qui viennent de naître, ou le prépuce des enfants circoncis, les tombeaux lignagers, le trajet que l'on suit, lors des funérailles, jusqu'aux tombeaux lignagers...;
- un espace social cérémoniel lignager constitué par les flux reliant l'aire cérémonielle lignagère à d'autres points: les villages où résident les invités - parents ou alliés- lors des principales cérémonies qu'organise un lignage: il y a flux réciproques de personnes (les organisateurs qui envoient des émissaires pour lancer les invitations, les invités qui se déplacent) et de biens (les cadeaux cérémoniels apportés par les invités et les cadeaux d'hospitalité offerts par les organisateurs): les flux cérémoniels incluent aussi les prêts, en boeufs ou en argent, qui permettent aux organisateurs et aux invités de faire face à leurs obligations, ainsi que les contre-prestations qui répondent à ces prêts;

- on peut considérer un espace social cérémoniel villageois qui serait la somme des aires et des espaces sociaux cérémoniels de l'ensemble des lignages qui constituent un village déterminé; de même l'espace social cérémoniel d'une micro-région, d'une vallée par exemple, est la somme des espaces sociaux cérémoniels de tous les villages qui la composent.

Les phénomènes mis en évidence à ces divers niveaux ne constituent pas des ensembles et des sous-ensembles homogènes. Par exemple, au niveau d'un lignage, les cérémonies peuvent être lues comme un facteur de cohésion sociale, reposant notamment sur l'actualisation solennelle de l'unité physique du groupe et sur un gommage des différenciations économiques intra-lignagères (les riches contribuent plus en biens de valeur, en échange ils reçoivent plus de prestige social). Mais, au niveau interlignager, les cérémonies peuvent être aussi être lues comme un ensemble de mécanismes qui permettent aux riches de devenir encore plus riches, et qui condamnent les plus pauvres à devenir, au mieux, les "clients" de plus riches (Delcroix F. article cité).

Il est intéressant de constater qu'à condition de convenir clairement de l'échelle choisie et de s'y maintenir, la collaboration interdisciplinaire est hautement souhaitable et relativement facile à mettre en oeuvre dans ce type d'investigations. Un géographe sait mieux qu'un ethnologue caractériser des flux et -surtout- les représenter ; un économiste peut, sans doute mieux qu'un autre spécialiste, analyser les flux de biens et de monnaie qui caractérisent, à tous les niveaux micro, les échanges cérémoniels. Mais, curieusement, l'expérience nous a appris qu'il importe peu que l'ethnologue, le géographe, l'historien ou l'économiste se divisent minutieusement les tâches en fonction de leur spécialité. L'important est qu'ils dirigent simultanément leurs regards sur une même réalité de terrain, qu'ils échangent leurs interrogations, leur façon de "sentir" les problèmes et qu'ils procèdent simultanément à l'élaboration des matériaux recueillis¹(4).

III LE RETOUR AU MACRO

On peut l'entendre sous deux formes radicalement différentes :

- un retour au macro régional qui n'est que la manière finale de compléter les résultats de l'approche micro et d'en présenter la synthèse dans l'espace régional concret,
- le recours à un macro abstrait qui correspond à une sorte de modélisation des résultats acquis.

¹ FAUROUX E. "Les sessions de formation à la recherche par la recherche" Cah. GRSOM, n° 1, 1988, 21-24.

III.1 Un retour au macro-régional

Il existe une forte probabilité pour que l'étude anthropologique micro fasse apparaître un certain nombre de phénomènes dont on n'avait pu apprécier l'importance réelle lors de la première étude extensive macro-régionale. Au terme de l'étude micro, il peut donc être utile de reprendre sommairement la démarche extensive, afin de vérifier l'aire d'extension de ces phénomènes et de corriger, préciser les typologies initiales.

Dans notre étude du Menabe, nous n'avions pas perçu, dès la phase de reconnaissance, l'importance des phénomènes de possession et, en particulier, du *tromba* qui jouait, il y a peu, un rôle mineur. Le *tromba* a subi, au cours des dix dernières années, une véritable explosion. Il semble se présenter comme un substitut à la protection des ancêtres sur laquelle on ne peut plus gère compter depuis que la rareté des boeufs ne permet plus d'accomplir les rites lignagers. Les esprits *tromba* savent se contenter d'alcool et de tabac et apportent cependant des formes efficaces de protection. Un retour au macro-régional permettra de réparer l'omission initiale.

On pourra ainsi affiner, préciser, compléter la zonification initiale et, peut-être même, les remettre partiellement en cause, ce qui peut imposer un retour au terrain micro.

Dans le cas général, on dispose alors d'une typologie claire des phénomènes, de l'environnement -au sens large- dans lesquels évoluent ces phénomènes et d'une description fine des mécanismes de fonctionnement. On a ainsi tous les éléments qui devraient permettre de passer à l'ultime phase: la mise à jour des mécanismes pouvant conduire à des élaborations abstraites.

III.2 Un niveau macro abstrait

La fin des observations micro permet de clôturer le cycle de la description.

Dans notre problématique, l'interprétation de ces résultats repose tout particulièrement sur les rapprochements entre phénomènes qui apparaissent d'eux-mêmes à la faveur d'observations nombreuses: c'est encore l'"effet puzzle" dont nous avons déjà eu l'occasion de parler. On tente ainsi de diminuer le subjectivisme des interprétations: le constat de régularités massives permet d'éviter les extrapolations hasardeuses, les hypothèses parfois brillantes mais souvent fragiles auxquelles contraint l'approche micro dans laquelle l'anthropologie doit généralement se confiner.

C'est une approche spatialisée, intégrant l'espace concret, qui permet d'effectuer ces rapprochements, mais le contenu de ces

rapprochements peut être résumé, synthétisé, dans une sorte de modèle "macro" qui peut s'exprimer en termes abstraits, déspatialisés.

Un exemple permettra peut-être de faire comprendre une démarche dont le caractère demeure assez abstrait.

En travaillant dans le Menabe de 1970 à 1973, j'avais cru déceler une tendance bien caractérisée à l'atomisation des structures lignagères. Sur l'ensemble de la région, la taille des lignages ne dépassait plus guère une quinzaine de ménages, alors qu'elle en comptait deux ou trois fois plus quelques décennies auparavant. En 70-73, la tendance paraissait s'être accélérée depuis peu. Elle était d'ailleurs assez en accord avec une sorte d'évolutionnisme implicite, alors très répandu en anthropologie, qui considérait l'éclatement des structures claniques ou lignagères comme un phénomène assez général, et très souhaitable car favorable au développement: on pouvait y voir l'une des formes spontanées de l'émergence du ménage et de l'individu, et, donc, l'un des moyens favorisant le passage à une société plus moderne, débarrassée de ses structures "traditionnelles".

Or, à la fin des années quatre-vingt, les faits apparus à la lumière de la double approche, macro-régionale puis micro, démontrent que cette évolution s'est interrompue, et qu'elle s'est même inversée. Les scissions de lignage sont devenues très rares, la taille des lignages augmente donc grâce au croît naturel; on assiste même parfois - phénomène inconcevable il y a vingt ans - à des regroupements de segments qui s'étaient autrefois séparés. Les causes de scission n'ont pourtant pas cessé, bien au contraire.

Une présentation cartographique du phénomène nous a mis sur une piste qui s'est révélée intéressante par la suite.

En fait, l'évolution dominante recouvre quelques importantes différences locales.

Dans les villages sakalava où l'élevage a depuis longtemps cédé la place à la riziculture, on trouve soit de très grands lignages, soit de très petits lignages. Les très grands continuent à grandir, mais ils le faisaient déjà au début des années soixante-dix: ils sont propriétaires de la terre irriguée et, pour profiter de leur rente foncière, ils préfèrent gommer leurs tendances scissionnistes plutôt que de renoncer à leur part du patrimoine foncier commun. Les très petits lignages sont composés de métayers ou de paysans qui ne disposent pas de terre irriguée, et sont propriétaires de minuscules troupeaux. Ils subissent le sort commun, ne supportent plus de scissions et tendent à se regrouper.

Dans les villages où l'élevage est demeuré plus important que la riziculture, la plupart des lignages subissent le sort commun et voient leur dimension augmenter; le phénomène est surtout net dans les secteurs les plus touchés par la crise de l'élevage et par l'insécurité. Les seuls cas évidents de scissions spectaculaires et

d'apparition -souvent conflictives- de lignages essais, concernent des nouveaux riches: des individus -souvent bénéficiaires directs ou indirects des vols de boeufs- dont le troupeau a soudainement augmenté en un petit nombre d'années et qui, pour ne pas partager le sort misérable commun, préfèrent affirmer leur autonomie cérémonielle.

En résumé, l'augmentation de la taille des lignages est un phénomène massif dans l'ensemble de la région. Elle est surtout forte dans les zones qui ont subi le plus durement la crise de l'élevage, et pour les lignages qui, depuis longtemps, n'avaient plus guère de boeufs. Pour les lignages dont la taille augmentait déjà à une époque où cela était tout-à-fait exceptionnel, le mouvement ne s'est nullement amplifié et paraît lié à une situation foncière très particulière. Par contre, la quasi-totalité des cas de scission et d'éclatement de lignages concerne les cas très exceptionnels où la richesse en boeufs d'une partie du groupe s'est accrue.

La juxtaposition de ces faits montre avec évidence qu'il existe un lien entre la taille du lignage et celle du troupeau lignager. La cartographie du phénomène suggère l'hypothèse suivante : quand le lignage n'a plus assez de boeufs, il éprouve des difficultés pour réaliser les rites lignagers que continue d'imposer une idéologie cérémonielle toujours vivace. Quelle que soit l'intensité des forces centrifuges, aucun segment de lignage n'a, dans ces conditions, les moyens de réaliser ses velléités d'indépendance. Au contraire, ce peut être une bonne solution, pour sauver l'essentiel, de répartir sur un plus grand nombre le poids des obligations du groupe: on tentera alors de raviver d'anciennes alliances, et, surtout, on patientera sous la tutelle d'un vieux *mpitoka hazomanga* dont, en d'autres temps, on aurait refusé l'autorité.

Ce premier acquis amène à poser une nouvelle question. Comment expliquer, dans ces conditions, la tendance à l'éclatement des lignages que l'on pouvait constater au début des années soixante-dix, à une époque où la pénurie de boeufs -beaucoup moins sévère qu'aujourd'hui- se faisait déjà sentir avec netteté?

La rareté croissante des boeufs semble avoir alors imposé un certain assouplissement des règles cérémonielles: moins de bêtes sacrifiées, moins d'exigences sur la couleur de la robe et la forme des cornes. Ainsi, un troupeau lignager d'une dizaine de têtes pouvait, s'il était intelligemment géré, suffire à faire face aux besoins cérémoniels d'un groupe. Dans ces conditions, les chefs de ménage qui, de diverses manières, avaient su gérer leurs affaires suffisamment bien pour disposer d'une quinzaine de têtes (ce n'était pas exceptionnel à l'époque) pouvaient, s'ils le souhaitaient vraiment, s'affranchir de la tutelle de leur chef de lignage en créant leur propre unité cérémonielle.

Tout semble donc affaire de seuil. Une diminution sensible des effectifs bovins conduit d'abord à un aménagement des règles cérémonielles qui rend possible une accélération de l'éclatement des

lignages. Au-delà d'un certain seuil, la pénurie devient telle que de nouveaux assouplissements de la règle ne sont plus possible, tant que la pérennité de l'idéologie cérémonielle n'autorise pas la disparition de cette règle. Toutes les informations font apparaître, au contraire, une réactivation généralisée des règles cérémonielles, sauf dans les milieux urbains et péri-urbains. L'élargissement des lignages, dans ces conditions, devient une issue normale, probablement provisoire. On peut supposer qu'un retour à des effectifs bovins normaux réactiverait les mécanismes qui, dans les années soixante-dix, favorisaient l'éclatement des lignages.

CHANGEMENT D'ECHELLE ET ECONOMICITE OU L'ENROULEMENT DES CHOSES

COUZY Ph.

RESUME

Si la liaison entre niveaux micro et macro en économie continue de faire problème, c'est parce que les grandeurs traitées par les macro-économistes ne permettent pas de saisir les véritables interdépendances entre agents et ne ménagent qu'un changement d'échelle factice.

Toutefois, pour être praticable, l'accès aux niveaux supérieurs de cohérence exige qu'on abandonne le principe anthropocentrique d'utilité qui fonde encore aujourd'hui l'économicité. Il est illégitime d'isoler les fonctions de production du système organisé dans lequel elles s'insèrent.

Fondée sur une tradition qui remonte à la Genèse et à Spinoza, la science économique actuelle n'est-elle pas engagée dans une impasse?

Certains phénomènes, activités, comportements, sont qualifiés d'économiques et entrent pour cette raison dans le champ de l'Economie Politique ou, si l'on préfère, de la Science Economique. On demande aussitôt: qu'est-ce que l'économicité ?

A cette question, les manuels ne manquent pas de proposer des réponses, non sans préciser parfois que l'économicité pourrait avoir quelque chose à voir avec l'échelle d'observation choisie. Leur message sur ce point traduit un certain embarras, qui signale un problème, et que nous allons essayer d'éclairer.

Au début de ses *Leçons d'Economie Politique*¹, Knut WICKSELL donne deux, et même trois critères de l'économicité. Il commence par une tautologie, suivie aussitôt d'une précision: la science économique s'intéresse aux faits économiques, mais en les considérant dans leur connexion réciproque, c'est-à-dire dans leur ensemble². Les faits en question sont donc du ressort de notre discipline en tant qu'ils concernent de la même façon toutes les classes de la société, ou encore un peuple tout entier, ou encore l'ensemble de tous les peuples (ce que les Allemands appellent *Weltwirtschaft*).

Fort bien, mais en quoi ce qui est économique se distingue-t-il, à proprement parler, de ce qui ne l'est pas ? A ce propos, WICKSELL présente côte à côte les deux critères que nous nous sommes habitués à qualifier de substantiviste et de formaliste:

- Par phénomènes ou activités économiques, on entend tout effort concerté pour satisfaire les besoins matériels ...
- Ou plus précisément tout effort par lequel on cherche à obtenir soit un résultat maximum pour une quantité donnée de moyens, soit un résultat donné pour un minimum de moyens³.

En un sens, le critère substantiviste (la satisfaction de besoins matériels) dessine un champ plus vaste que le critère formaliste (exigence d'un certain rapport entre moyens et résultat). Mais on peut dire aussi que les deux critères se complètent: ne sont pas considérés comme économiques tous les efforts tendant à satisfaire les besoins matériels mais seulement ceux qui prétendent relier conformément à un certain projet les moyens (intrants) et le résultat (la production). Restriction acceptée sans grande discussion, sinon par quelques épigones de la science économique. L'un d'eux est John RUSKIN⁴, qui inspira GANDHI, mais quel économiste a jamais pris au sérieux l'oeuvre hétérodoxe d'un homme qui s'intéressait

¹WICKSELL 1938, vol. I, p. 2.

² Littéralement: "en grand.~

³Toujours rigoureux, WICKSELL ajoute que la formulation habituelle, "atteindre un résultat maximum avec un minimum de moyens", est illogique et doit être évitée.

⁴Voici un passage caractéristique de RUSKIN: "The varieties of circumstance which influence these reciprocal interests are so endless, that all endeavour to deduce rules of action from balance of expediency is in vain. And it is meant to be in vain. For no human actions ever were intended by the Maker of men to be guided by balances of expediency, but by balances of justice All of us may know also that the consequences of justice will be ultimately the best possible, both to others and ourselves ... The motive force, the will or spirit of the creature, is brought to its greatest strength by its own proper fuel: namely, by the affections;". (RUSKIN 1985: 169-170).

surtout aux cathédrales gothiques, à la peinture de TURNER et à l'architecture de Venise?

Essayons maintenant de rapprocher ce que nous dit WICKSELL des divisions courantes de la science économique moderne. Celle-ci travaille à deux niveaux. Elle étudie d'abord les comportements de l'individu, du ménage, de la firme, en un mot des unités économiques de base, en faisant l'hypothèse que tous ces agents recherchent un résultat maximum pour une quantité donnée de facteurs de production. Cette "discipline-reine" (S. Ch. KOLM) distingue soigneusement entre les divers agents et biens, même et surtout lorsqu'elle tente, comme le demande WICKSELL, de saisir et d'analyser l'interdépendance de ces agents et de ces biens. Ce niveau d'analyse est appelé micro-économique.

Au contraire, la macro-économie considère des relations entre grandeurs statistiques (les agrégats), larges sommes de biens concernant de vastes regroupements d'agents rangés dans des catégories préétablies¹. L'analyse se situe à un niveau global, et les spécialistes insistent fortement sur ce point:

Non seulement les phénomènes auxquelles l'analyse macroéconomique s'intéresse sont globaux, mais aussi les raisonnements ou modèles qu'elle met en oeuvre concernent directement des grandeurs globales et des relations entre grandeurs globales ².

En travaillant à ce niveau, le macro-économiste entend saisir, et même privilégier, ce qu'on appelle les effets de composition, dont le jeu peut rendre inopérants ou pervers certains mécanismes fonctionnant au niveau micro-économique. Par exemple: j'ai raison d'épargner une partie de mon revenu mais si tout le monde épargne sans investir, alors la demande globale diminue, la production se ralentit, les revenus baissent et l'économie entre en récession ... Il faut convenir qu'en effet une catégorie de phénomènes quelque peu déconcertants se manifeste à un niveau dépassant celui des agents individuels, mais on peut se demander si le meilleur moyen d'appréhender de tels faits est bien de travailler sur des grandeurs abstraites dont la consistance même est dans une certaine mesure incompatible avec la recherche de mécanismes significatifs. Ainsi la consommation globale (nationale) peut être décrite comme une fonction du revenu global (somme des revenus individuels) mais si, à niveau constant, la distribution du revenu change, alors le niveau de la consommation globale change aussi. Seule une analyse micro-économique attachée au repérage des différences de comportement entre groupes concrets saura peut-être rendre compte de ce genre de péripiéties.

¹Cela ne va pas sans difficultés: construction des grandeurs par agrégation et ajustement, repérage des comportements et anticipations qui fondent les liaisons entre grandeurs.

²MALINVAUD 1987: 4. Pour un point de vue différent, voir OLIVE 1989: 55: " Précisons que macro-économique ne signifie pas global et que les simulations envisagées ici peuvent traiter de problèmes sectoriels ..."

En dépit de ses incertitudes, la macro-économie a pignon sur rue, beaucoup plus que la micro-économie dont le statut scientifique est pourtant plus solide. Cela s'explique si l'on veut bien voir dans le succès de la macro-économie une irrésistible manifestation de ce qu'Elias CANETTI appelle le processus d'évacuation¹: notre civilisation travaillant sans relâche à construire une structure de plus en plus compliquée², il faut probablement que par compensation des intellectuels en donnent une image aussi abstraite, aussi *vide* que possible. Notons simplement, pour mémoire, que cette image n'est guère réalisable en ce qui concerne l'Afrique, par manque de matériau statistique. Notons aussi, avec Ph. HUGON³, que cette image occulte les hétérogénéités spatiales: la comptabilité nationale et la macro-économie manipulent des grandeurs privées de caractéristiques de localisation autres que la référence à l'espace national considéré comme homogène.

Ce qu'il faut bien comprendre, c'est que l'apparent changement d'échelle inhérent à la division courante entre micro- et macro-économie ne correspond en rien à l'exigence de WICKSELL, pour qui la science est appelée à considérer les interdépendances entre phénomènes économiques. L'économiste suédois nous met en garde: le nom donné à notre discipline depuis les mercantilistes (Economie Politique, *Nationalekonomi*) n'implique nullement que le niveau supérieur de cohérence répondant à sa préoccupation essentielle soit celui de la communauté nationale. Pourquoi? Pour la bonne raison qu'au plan économique "la communauté nationale n'existe pas" (WICKSELL 1938: 2). L'affirmation a de quoi surprendre, mais elle n'est pas faite à la légère. Elle prend son sens si l'on prête attention à une distinction indispensable faite par KOLM (1974) entre la macro-économie des agrégats d'une part, et d'autre part "le couronnement de la microéconomie, considération de tous les éléments de l'économie ensemble, en mettant l'accent sur leur interdépendance". Il existe, au moins tendanciellement et idéalement, une échelle d'observation et d'analyse permettant de saisir l'ensemble, partiel ou total, des comportements singuliers mais reliés les uns aux autres que la macroéconomie résume et confond *ex post* dans ses agrégats indifférenciés (COUTY 1989: 415). C'est à cette échelle qu'on étudie par exemple tout ce qui touche aux économies externes, abaissements du coût de production moyen enregistrés par une unité économique en raison de l'évolution d'autres unités comparables qui lui vendent des matières premières ou des services. C'est encore à ce niveau, et à cette échelle, qu'on analysera les filières de production,

¹Entleerungsprozess. "Ce qui me répugne le plus chez les philosophes, c'est que leur pensée est un processus d'évacuation ... Ils sont semblables à des barbares dans une maison haute et spacieuse, remplie de merveilleux objets. Ils sont là, en bras de chemise, et jettent par la fenêtre, méthodiquement et sans se tromper, tout ce qu'ils trouvent: fauteuils, tableaux, assiettes, animaux, enfants, jusqu'à ce que les pièces soient complètement vides" (CANETTI 1981: 141).

²Notre civilisation est caractérisée par le mot progrès. Qu'elle progresse n'est pas seulement l'une de ses propriétés: le progrès est sa forme. Elle est typiquement constructive. Son activité consiste à construire une structure de plus en plus compliquée" (WITTGENSTEIN, cité par CHAUVIRE 1989: 225).

³HUGON 1989: 11

les circuits commerciaux, les multinationales, les liaisons entre activités agricoles et informelles (HAZELL et ROELL 1983). Dans tous ces cas, on prend en considération des unités organiques *sui generis* où des agents économiques collaborent par voie d'échange ou autrement pour produire des biens et des services. La référence à l'espace concret demeure constante, et intervient dans l'analyse.

Si nous suivons WICKSELL, nous ne rangerons pas la nation parmi ces unités économiques significatives. Pourquoi ? Parce que la cohérence nationale est de nature politique, elle repose sur l'action unificatrice d'un monopoleur de la contrainte qui s'appelle l'Etat. Rien là, à proprement parler, de spécifiquement économique, même si l'Etat se comporte comme un agent économique plus lourd que bien d'autres, même si les règles qu'il édicte ont une incidence économique incontestable. Pour faire court: la nation n'est pas une entreprise. C'est la signification de la formule un peu brutale de WICKSELL.

C'est la même idée que développe VON MISES dans un passage provocant de son livre intitulé *The ultimate foundation of Economic Science* (VON MISES 1962: 83-87):

The macroeconomic approach looks upon an arbitrarily selected segment of the market economy (as a rule: upon one nation) as if it were an integrated unit. All that happens in this segment is actions of individuals and groups of individuals acting in concert. But macroeconomics proceeds as if all these individual actions were in fact the outcome of the mutual operation of one macroeconomic magnitude upon another such magnitude.

En fait, poursuit VON MISES, un concept comme celui de revenu national oblitère les conditions réelles de la production en économie de marché. Il tend à faire croire que l'augmentation ou la diminution de biens disponibles ne dépend pas de l'activité des individus, mais de quelque chose qui serait en quelque sorte extérieur et superposé à ces activités. Ce mystérieux quelque chose produirait une quantité appelée revenu national, après quoi la quantité en question serait distribuée aux individus

Dans la réalité, les choses se passent autrement. Le processus de production n'est rien d'autre que l'activité d'individus qui coopèrent, chacun recevant pour sa contribution ce que les autres acceptent de payer. On peut, si l'on y tient, appeler revenu national l'addition des prix payés pour toutes les contributions individuelles, mais ce serait un "passe-temps gratuit" de conclure que ce total a été "produit" par la nation. En fait, si l'on procède à cette sommation, c'est uniquement pour des raisons politiques. Après avoir calculé le revenu national des Etats-Unis, on peut critiquer l'inégalité de sa répartition, et réclamer ou proposer des mesures pour y remédier¹. Mais on

¹Cette inégalité, VON MISES admet qu'on la critique pour des raisons politiques, mais elle est inhérente selon lui, au processus économique lui-même: " *If one raises the question what factors make the national income rise, one has only one answer: the improvement in equipment, the tools and machines employed in production, on*

n'envisage jamais de répartir équitablement le revenu *mondial* entre tous les pays du monde, ce qui serait tout aussi conforme aux exigences de la justice mais politiquement inconcevable. Conclusion de VON MISES: " *The macroeconomic concept of national income is a mere political slogan devoid of any cognitive value*" (VON MISES 1962: 87). Concluons, nous aussi: la macro-économie courante, et la comptabilité nationale qui la nourrit, sont des techniques pratiques de gouvernement et d'administration utilisées à des fins politiques dans des espaces politiques définis par les Etats-Nations. C'est beaucoup, c'est intéressant, cela n'a rien à voir avec la science et l'analyse économiques.

Tout ce qui précède peut maintenant se résumer en quelques propositions simples, soumises à discussion:

- C'est au niveau micro-économique des unités *réelles* de base que l'économicité, entendue au sens substantiel ou formel, se définit ou se perçoit. On reconnaît le postulat de l'individualisme méthodologique, souvent critiqué, voire anathématisé, mais dont il faut bien se résigner à partir pour le dépasser. Ce sont les arbres qui font la forêt, et non l'inverse.
- L'apparent changement d'échelle revendiqué par la comptabilité nationale et par la macro-économie courante n'a rien à voir avec le "couronnement de la micro-économie" représenté par la saisie "en grand" des relations mutuelles entre éléments soigneusement et empiriquement différenciés. La macro-économie globalisante ressortit au domaine de la gestion politique et administrative. Elle constitue un chapitre de la science politique.
- Changer d'échelle en économie, voir les choses "en grand", c'est accéder au plan des connexions entre agents et biens réels, sans prêter plus d'attention qu'elle n'en mérite à l'existence, politiquement essentielle mais économiquement peu ou pas significative des Etats-Nations. Mises à part certaines tentatives purement théoriques comme celle de WALRAS, la vérité oblige à reconnaître que les progrès dans cette voie ont été discrets. Deux explications possibles à ce demi-échec: le développement et le succès ambigu de la macro-économie administrative a sans doute gêné celui de la micro-économie généralisée scientifique, auquel il s'est

the one hand, and the improvement in the utilization of the available equipment for the best possible satisfaction of human wants, on the other hand. The former is the effect of saving and the accumulation of capital, the latter of technological skill and of entrepreneurial activities. If one calls an increase in national income (not produced by inflation) economic progress, one cannot avoid establishing the fact that economic progress is the fruit of the endeavors of the savers, the inventors and of the entrepreneurs. What an unbiased analysis of the national income would have to show is first of all the patent inequality in the contribution of various individuals to the emergence of the magnitude called national income" (VON MISES 1962: 86).

regrettablement substitué; il est à craindre, en outre, qu'un vice de conception empêche la micro-économie d'embrasser l'ensemble des inter-relations qu'elle projette d'analyser.

Tout ne va pas pour le mieux en science économique. Il y a eu un changement d'échelle raté, il y a aussi un principe d'économicité fondé sur une norme d'utilité anthropocentrique. Que signifie en effet le projet "économique" d'obtenir - du point de vue de l'agent économique et de lui seul - un résultat maximum à partir des ressources disponibles, sinon la volonté affirmée de mettre l'ensemble de la planète au service d'une catégorie bien particulière de vivants ?

Cet "infernale principe", CERONETTI le découvre au neuvième chapitre de la Genèse¹. Il le retrouve ensuite, "géométrisé par le plus civilisé des philosophes", SPINOZA, dans un passage de l'Ethique qui donne froid dans le dos:

Outre les hommes, nous ne savons dans la Nature aucune chose singulière dont l'Ame nous puisse donner de la joie, et à laquelle nous puissions nous joindre par l'amitié ou aucun genre de relation sociale; ce qu'il y a donc dans la Nature en dehors des hommes, la règle de l'utile ne demande pas que nous le conservions, mais nous pouvons, suivant cette règle, le conserver pour divers usages, le détruire, ou l'adapter à notre usage par tous les moyens. (SPINOZA 1965: 299).

Sans doute fallait-il que ce texte fût écrit pour que la science économique utilitariste du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècles, âprement mais vainement combattue par RUSKIN, pût prendre son fatal essor avec bonne conscience. Aujourd'hui, après André BRETON et quelques autres, Milan KUNDERA ironise avec talent sur l' "infernale principe":

Tout au début de la Genèse, il est écrit que Dieu a créé l'homme pour qu'il règne sur les oiseaux, les poissons et le bétail. Bien entendu, la Genèse a été écrite par un homme et pas par un cheval. Il n'est pas du tout certain que Dieu ait vraiment voulu que l'homme règne sur les autres créatures. Il est plus probable que l'homme a inventé Dieu pour sanctifier le pouvoir qu'il a usurpé sur la vache et le cheval. (KUNDERA 1989: 416)

¹Genèse IX, 1-3: "Dieu bénit Noé et ses fils et il leur dit: Soyez féconds, multipliez, emplissez la terre. Soyez la crainte et l'effroi de tous les animaux de la terre et de tous les oiseaux du ciel, comme de tout ce dont la terre fourmille et de tous les poissons de la mer: ils sont livrés entre vos mains. Tout ce qui se meut et possède la vie vous servira de nourriture, je vous donne tout cela au même titre que la verdure des plantes".

Le fondateur du surréalisme, pour sa part, adoptait un ton plus violent:

En tête des erreurs initiales qui nous demeurent les plus préjudiciables figure l'idée que l'univers n'a de sens appréciable que pour l'homme, alors qu'il en manque par exemple pour les animaux. L'homme se targue d'être le grand élu de la création. Tout ce que le transformisme a pu lui révéler de son origine et des nécessités biologiques générales qui assignent un terme à la durée même de son espèce demeure en fait lettre morte ... Les réserves mêmes que les philosophes lui ont appris à faire sur les capacités de son entendement n'apparaissent dans ses propos que pour la forme et ne le dissuadent nullement, en son for intérieur, de disposer des causes finales comme si elles se rapportaient obligatoirement à lui. (BRETON 1989: 36).

Et pourtant, insiste CERONETTI

La norme de l'utilité, même lorsqu'elle commande de conserver, travaille en réalité pour la destruction: la faillite des écologistes actuels le prouve, qui parlent au nom d'une norme de l'utilité conservatrice complètement privée d'autorité dans un monde où la norme de l'utilité destructrice domine ... La norme de l'utilité utilise aussi l'homme, sinon elle ne serait pas utilisatrice à fond ... La vérité est pascalienne: notre raison corrompue corrompt tout. (CERONETTI 1984: 102).

Vous avez dit PASCAL ? Un siècle avant Adam SMITH, l'auteur des *Pensées* avait - bien inutilement - rejeté l'optimisme irréfléchi qui allait inspirer le IV^{ème} livre de *La Richesse des Nations*¹:

Tous les hommes se haïssent naturellement l'un l'autre. On s'est servi comme on a pu de la concupiscence pour la faire servir au bien public, mais ce n'est que feindre; car au fond ce n'est que haine. (PASCAL 1961: 190).

On le voit bien aujourd'hui: devenus plus nombreux qu'au temps de SMITH et de WICKSELL, les individus et les entreprises mûs par l'inférial principe de SPINOZA ravagent l'univers et organisent de plus en plus efficacement leur propre destruction. Tout se passe comme si la survie de l'humanité, et accessoirement la reproduction de la science économique et des économistes, exigeait que la norme de l'utilité anthropocentrique cède la place à une vue moins égoïste des choses. Plus question d'apprécier, en fonction de notre seul avantage, le rapport mesquin entre moyens et résultats, même s'il se prête à de séduisantes constructions logico-mathématiques. Nous voilà acculés à la nécessité de changer vraiment d'échelle, de modifier notre perspective, d'abandonner l'utilitarisme subjectif pour tenter de construire une science économique objective. Allant jusqu'au bout du projet de WICKSELL, travaillant enfin "en grand", nous nous rendons à l'évidence : Il devient urgent d'organiser nos

¹"Every individual is continually exerting himself to find out the most advantageous employment for whatever capital he can command. It is his own advantage, indeed, and not that of the society, which he has in view. But the study of his own advantage naturally, or rather necessarily, leads him to prefer that employment which is most advantageous to the society ... He intends only his own gain, and he is in this, as in many other cases, led by an invisible hand to promote an end which was no part of his intention" (SMITH 1964, vol. I: 398-400).

prélèvements en insérant nos fonctions de production dans un système lui-même organisé. La science économique doit redevenir la science de l'organisation conçue par RICARDO (FABRA 1979 : 13).

Le véritable changement d'échelle aujourd'hui, en science économique, consiste donc à sortir de l'ensemble abusivement autonomisé des activités économiques *stricto sensu*, et à considérer cet ensemble mineur comme inséparable d'un univers dont les propriétés ne permettent plus de réparer automatiquement nos erreurs. Ce n'est pas un progrès, mais un simple retour à ce que savaient les Anciens:

Représente-toi sans cesse le monde comme un être unique. Considère comment tout contribue à la cause de tout et de quelle façon les choses sont tissées et enroulées ensemble. De même que sont coharmoneusement ordonnées les choses qui sort, les choses qui naissent manifestent non une simple succession mais un admirable apparemment. (MARC AURELE 1951: 72-73)

BIBLIOGRAPHIE

- Bible de Jérusalem - 1956 - Paris, Editions du Cerf, 1669 p.
- BRETON (A.) (- 1989 - Arcane 17. Paris, J.J. Pauvert, Livre de Poche Biblio, 145 p.
- CANETTI (E.) - 1981 - Die Provinz des Menschen. Aufzeichnungen 1942-1972. Frankfurt a.M., Fischer, 304 p.
- CERONETTI (G.) - 1984 - Le Silence des Corps. Paris, Albin Michel, Livre de Poche Bibli Essais, 222 p.
- CHAUVIRE (Ch.) - 1989 - Ludwig Wittgenstein. Paris, Les Contemporains, Seuil, 281 p.
- COUTY (Ph.) - 1989 - Similitudes, simulacres et absence, in: SEMINFOR 2, La Modélisation. G Aspects Pratiques et méthodologie, Paris, ORSTOM, 426 p., . 385-426.
- FABRA (P.) - 1979 - L'Anticapitalisme. Essai de Réhabilitation de l'Economie Politique. Paris, Champs-Flammarion, 505 p.
- GANDHI (M. K.) - 1985 - An Autobiography, or the Story of My Experiments with Truth. Harmondsworth, Penguin Books Ltd., 454 p.
- HAZELL (P.B.R.) et ROELL (A.) - 1983 - Rural growth linkages: Household Expenditure patterns in Malaysia and Nigeria. Washington, International Food Policy Research Institute (IFPRI), Research report N° 41, 64 p.
- HUGON (Ph.) - 1989 - Economie du Développement. Paris, Mementos Dalloz. 156 p.

- KOLM (S. Ch.) - 1974 - Renaissance de la Science Economique. Le Monde, 3/9/74, p. 17.
- KUNDERA (M.) - 1989 - L'insoutenable légèreté de l'être. Paris, Gallimard, Folio, 476 p.
- MALINVAUD (E.) - 1987 - La méthode de l'analyse macroéconomique. Exposé donné à l'Ecole Nationale Supérieure de Statistique et d'Economie Appliquée d'Abidjan, 13/1/87, 13 p. multigr.
- MARC-AURELE - 1951 - Pensées pour moi-même, suivies du Manuel d'Epictète et du Tableau de Cébès , Paris, Classiques Garnier, 298 p.
- von MISES (L.) - 1962 - The Ultimate Foundation of Economic Science. Princeton, van Nostrand , 148 p.
- OLIVE (G.) - 1989 - Les simulations économiques: une méthode pédagogique active. STATECO N° 60, . 55-77.
- PASCAL (B.) - 1961 - Pensées. Paris, Classiques Garnier, 342 p.
- RICARDO (D.) - 1965 - The Principles of Political Economy and Taxation. Londres, Dent, Everyman's Library, 300 p.
- SMITH (A.) - 1964 - The Wealth of Nations. Londres, Dent, Everyman's Library, 2 vol. 441 et 455 p.
- SPINOZA - 1965 - Oeuvres III. Éthique. Paris, Garnier Flammarion, 378 p.
- WALRAS (L.) - 1952 - Eléments d'Economie Politique Pure, ou Théorie de la Richesse Sociale, Paris, Pichon et Durand-Auzias, 491 p.
- WICKSELL (X.) - 1937 - Foreläsningar i Nationalekonomi, Lund, Gleerups Förlag, 2 vols. 257 et 256 p.
- WITTGENSTEIN (L.) -- 1980 - Culture and Value, Oxford, Blackwell.

APPROCHE INTER-ACTIVE DE LA RESOLUTION DE PROBLEMES: L'ECO-RESOLUTION

DELAYE C. ¹⁻², FERBER J. ², JACOPIN E. ²

RESUME

L'éco-résolution offre une nouvelle manière d'aborder la résolution de problèmes. Alors que les techniques classiques tentent de résoudre les problèmes globalement, en effectuant une exploration de l'espace des états gouvernée par des heuristiques, l'éco-résolution est fondée sur un mécanisme d'interactions entre agents, la résolution étant obtenue par un ensemble de satisfactions locales de ces agents. Ses principes reposent sur la définition d'un ensemble de comportements spécifiques appartenant à plusieurs "espèces" d'agents (réactions de satisfaction, de fuite ou d'aggression).

Le système ECO 1 se compose de deux parties: d'une part le noyau qui décrit l'interaction de ces comportements à partir d'une définition abstraite de ces agents, cette partie étant indépendante de toute application, et d'autre part, la définition d'un ensemble d'espèces d'éco-agents, dépendants du domaine, qui héritent des propriétés de ces agents abstraits, et particularisent le modèle pour une application donnée.

AN INTERACTIVE APPROACH TO PROBLEM-SOLVING : ECO-PROBLEM SOLVING

1. INTRODUCTION

The classical multiagent paradigm involves the decomposition of a problem in order for a population of agents to elaborate a solution and to carry out this solution. We address the problem of

¹ ONERA, DMI/IA, 29 Av. Division Leclerc, BP 72, 93322 Chatillon Cedex

² LAFORIA, Université Paris 6, T46-00, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

constructing the solution with a population of agents [14]. This is Distributed Problem Solving.

Our agents are actor-based and follow Gul Agha's model of continuations [1]. They are integrated in an eco-system [6,7] where they possess very simple behaviors. But our aim is neither the simulation of an environment such as the prey-predator [5] nor the simulation of a behavior [10]. Our approach also differs from connectionism; our agents are not statically linked together and their behaviors are independant one another. Moreover, their actions are not based on stochastic functions [13]. Also, our system differs from the knowledge-based agent approach.

Our system is twofold: (1) a domain independant kernel where the eco-behaviors are described, (2) a domain dependant application where the domain actions are coded. We used it to solve classical AI problems (e.g. blocks world, hanoi towers, n-puzzle, n queens, etc...) [4,8]; in the goal of solving problems involving agents' action selection we propose to extend our model. For this purpose, we choose Roach's non linear problem [11,16] where a robot faces an action selection problem. Section 2 describes the underlying model for our eco-agents, along with Roach's non linear problem. A formal study of an eco-agent is proposed and the completeness of our system is presented. Then, section 3 presents thr runtime for Roach's problem.

Our system makes wide use of continuations. Consequently, agent's actions are serialized through the process of continuations. In order to solve Roach's non linear problem, we need to extend the notion of continuation in an actor-based system. The limits of the continuation model are expressed in section 4, and solutions are provided in section 5.

2.THE ECO-AGENT MODEL

This section presents the model of our very simple agents. Our agent are actor-based. We first present this model and describe agents knowledge and behaviors. Then, we modelize our agents and make a brief study of the completeness of a system using such agents. All this section is presented with the support of a problem whose solution is presented in the last subsection. Figure 1 represents this problem. This problem is called Roach's non linear problem. We chose this problem because it has been newly analysed as a non linear problem [11], it is not an usual blocks world problem and although it is simple, it provides a good workbench for our purpose. In this problem, a robot is at place 1 in the initial situation and must reach place 4 near the sink. The door is closed in both the initial and final situation.

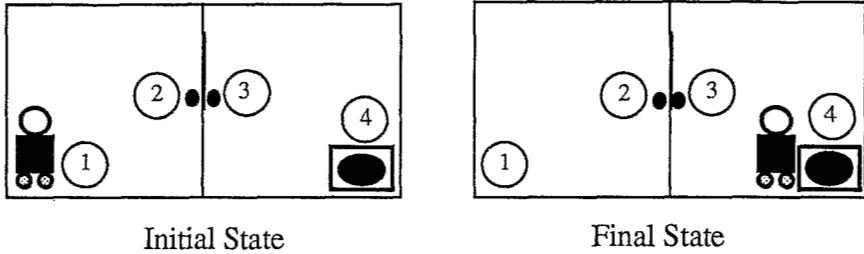


Figure 1: Roach's non linear problem

2.1 Knowledge and behaviors

In this section, we describe the model chosen for our agent. An eco-agent is actor-based [1]. It has some local knowledge of its own environment and has behaviors to modify its local knowledge.

Local knowledge. Independently of the domain, an agent knows:

1. Its satisfaction state; it is true when the agent has reached its goal, otherwise it is false and the agent is seeking for its satisfaction.

2. Its dependancies. Dependancies are agents. We call *master* an owner of some dependancies, and *slave* the agents that are the dependencies. An agent which is a dependency is a master for its own dependencies, and so forth. Slaves will reach their satisfaction state only *after* their master's one has been reached. Differences between the initial situation and the final situation define the master-slave relationship. For instance, in the problem described in Figure 1, the robot has to change its position from place 1 to place 4, near the sink. This makes the robot as the slave of the sink.

3. Its jailers. Jailers are agents that prevent other agents from acting. For instance, in the case of Figure 1, the door prevents the robot from reaching the sink, therefore, the door is a jailer for the robot. As soon as the robot will have open the door, the door will not be a jailer any longer.

Depending on the domain, an agent may have more knowledge about its environment. For instance, the robot also knows its position in the environment.

Behaviors. Agent's behaviors are independent of the application domain. Three distinct behaviors are available for an eco-agent:

1. The will to be satisfied. This will corresponds to the description of the agent's goal in the final state of a problem. In our example, the robot must reach the sink. Consequently, it get the will to be near the sink. An action (reaching its satisfaction) is associated with the will to be satisfied.

2. The will to be free. The idea is that the agent must be free before any acting. Therefore, the agent has the will to be free each time it must act; i.e. before doing its satisfaction, and before fleeing.

3. The obligation to flee. If an agent prevents another agent from acting, then this agent must flee. For instance, the door prevents the robot from reaching its satisfaction state. So, the door must flee.

2.2 The finite state automaton

In this section we propose to formalize an eco-agent as a finite state automaton. This formalization is easily obtained. First, it is easy to derive the internal state of an eco-agent from the behaviors it can have. This internal state is a boolean triple (s,f,l) where s is the satisfaction state, f is the fleeing state and l the liberty state. Providing that an agent cannot be both in the state of fleeing and in the state of satisfaction, triples $(1,1,x)$ where x is either 0 or 1, cannot exist. The starting state is $(0,0,0)$ and the final states are all the possible states. Each behavior is an action on the internal state; application cases are defined through a transition function whose diagram is represented in Figure 2.

The finite state automaton brings up comparison with other works. First, it is clear that this model describes situated actions [17], but also, it is actor-based and then is different from Agre's system, Pengi [2].

2.3 Completeness

We present a brief study of the completeness of a system having the properties described in the previous subsections.

In classical planning systems [3,19], the final situation is described through a set of propositions. These propositions are asserted by the postconditions of a course of actions. This course of actions reaches the final situation from the initial situation: it solves the problem. In eco-problem solving, the final situation is described through a set of satisfaction. Hence, agents must interact in order to reach the satisfactions corresponding to the description of the final situation.

A truth criterion for eco-problem solving. *A satisfaction is asserted in the final situation (S_f) if it is asserted in the final situation or if it has been asserted in a previous situation (S_p) and there is no situation (S_b) between situation (S_f) and situation (S_p) such that the agent has fled. For each situation (S_b) where a satisfied agent must flee there must be a situation (S_a) between situation (S_b) and situation (S_f) such that the satisfaction of the fleeing agent is*

asserted. For each situation where an agent receives the obligation to flee and is able to reach its satisfaction state, then this agent will reach its satisfaction state.

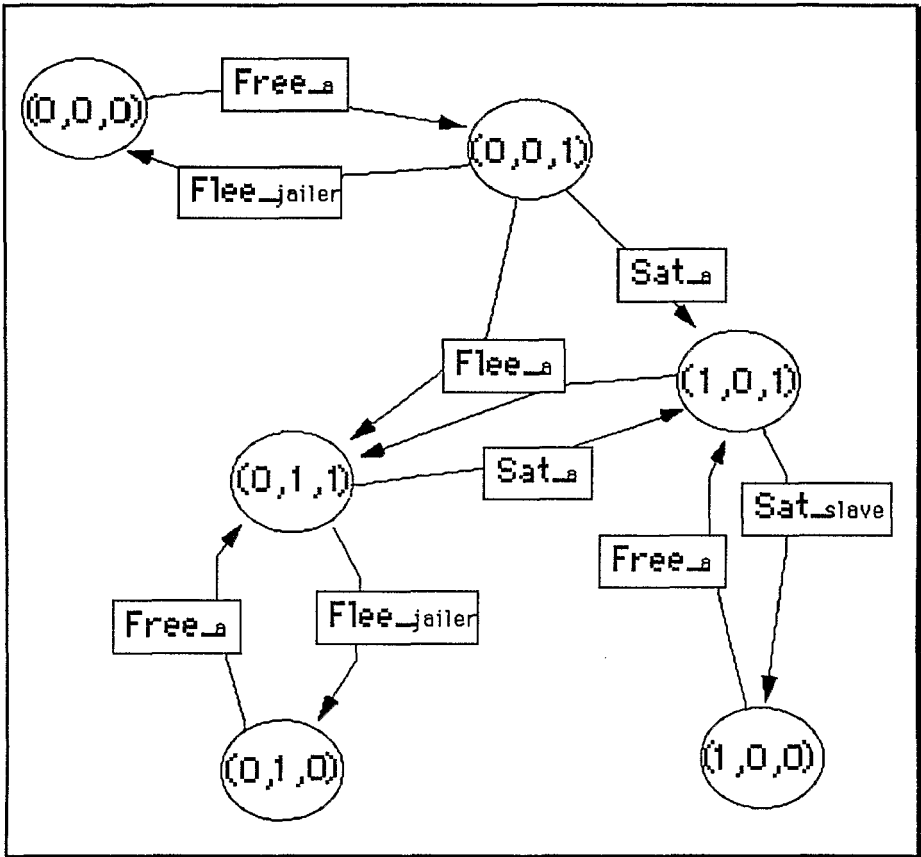


Figure 2: The transition diagram of the finite state automaton

This truth criterion clearly descends from Chapman's [3]; using his terminology, situation S_p is an *establisher*, situation S_b is a *clobberer* and situation S_a is a *white knight*. But our modal truth criterion is adapted to a multiagent environment. First, this criterion does not talk about propositions (i.e. post-conditions) but about states determined by agent's behaviours (i.e. the satisfaction state and the fleeing state). Second, agents are acting from local interactions and no global data bases (such as the usual add or delete lists) about the environment are used. Hence a situation S_a (Declobbering by white knight in Chapman's terminology) is easy to create: an agent that should be satisfied in situation S_f receives the will to get satisfaction each time it flees, although Chapman's TWEAK [3] and wilkins's SIPE [19] do not use a white knight.

3. THE RUNTIME

Now, we are going to describe the solution found by our system. The robot has to go to place 4, near the sink, and the door must be closed. First the robot tries directly to go near the sink. But the door is closed. So the robot tells the door to open; as a consequence, the door asks the robot to move near it in order to open it. Thus, the robot moves near the door and open it. As soon the door is open, the robot is free to reach its satisfaction (i.e. to be in place 4, near the sink); so the robot moves near the sink, leaving the door open. There, the door calls back the robot so as to be closed. Finally, after moving back and closing the door, the robot is free to return to the sink.

The final state is reached. But the robot did make a pretty useless return trip to the door. The problem appears as soon as the robot is free, when the robot is in place 2 and the door open. There, the problem is due to the continuation process.

We can notice that using the idea of serializing the goals [12] (going from place 1 to place 2, then to place 3 then to place 4) leads to the good planning of the tasks. But it is an undesirable solution because it also needs a meta-control to find the good serialization of tasks. So the problem would only be displaced from task-planning to control-planning.

4. THE LIMITS

The purpose of this section is to explain why the robot makes an undesirable return to the door and then acts again towards its satisfaction, near the sink. We will explain the limits of this approach and the different solutions in the following subsections.

4.1 Unneeded sequentialization with continuations

This undesirable return is the result of the programming with continuations. Indeed, each new continuation is considered only when the actor which owns it has finished its current computation. So, if we examine precisely the trace of the execution of the program, we see that there is very few active actors but that each of them handles a long queue of continuations.

As in our system each continuation may correspond to the execution of one task, it means that we can't change the planning of tasks as soon as they appear in a queue of continuations. As a consequence, a queue of continuations reflects the scheduling of a succession of tasks at the instant of its creation; henceforth the scheduling of the tasks in the queue is fixed.

As a result, the satisfaction of the robot to reach the sink is in the queue of continuations. The satisfaction of the door is only taken in charge when the robot has first satisfied its goal to be near the sink as it is specified in the continuations. There is no way to avoid it even if we put priorities between tasks like "always execute first the tasks with the door as receiver" because it is impossible to break the queue of continuations.

It is important to note that this "continuation problem" seems to be one of the major drawback of programming with actors.

4.2 Task versus eco-action duration

We must now focus on another problem. In the current implementation, we have made no difference between behaviors of eco-agents and real physical execution of these behaviors in the world of the robot. In fact, going from one location to another is not an **atomic** task: it may take a long time for the robot to move, conversely, the intention to move is instantaneous [9]. But in our system, consuming one step of any queue of continuations takes exactly the same time whatever action (e.g. moving or getting the intention to move) it recovers.

In our example, the "DoGoal" of the door can't be consumed before the satisfaction of the robot. We must insist that even if we use real-time slice for our scheduling of continuations instead of a round-robin, the result would not change. In this case, the time to consume a continuation would be proportional to the time of computing its code. It would have no relationship with the duration of the execution of the task in the real world.

This also leads the robot to fail to immediately close the door: the first goal of the robot is to get near the sink, so it does it before any other consideration. As soon as the door is open, the robot is free so it satisfies itself.

5.SOLUTIONS

In order to solve our problem we want the robot to have two simultaneous abilities: (1) to go from one point to another; (2) to care of all messages that it receives. An ideal solution would be to make an agent that contains two parts: one for displacement and one for listening. The listening part would interrupt the work of displacement as soon as a more important task must be realized. The importance of a task is associated with its temporal cost in the context of the global succession of tasks.

In order to avoid an increase of complexity, we have implemented a simpler system that do not use continuous parallelism of the two

tasks but is an incremental version where an agent reads its mailbox at some interval.

5.1 Incremental Actions

All the actions occurring in the real world will be incremental in order to allow each agent to read its mailbox and act in the same time. It results in similar implementations for the eco-actions interacting with the real world: DoFlee and DoSatisfaction. In the next paragraphs we will only develop the code of DoSatisfaction but the code of DoFlee is similar.

5.1.1 An incremental DoSatisfaction

We now introduce a new DoSatisfaction that moves the robot for only a small distance instead of realizing an instantaneous satisfaction (going from place 3 to place 4 at the speed of changing an actor's field). The new DoSatisfaction calls itself recursively until the robot has reached the sink. At every cycle (when a new DoSatisfaction is executed) the robot reads its mailbox. When this one is not empty, it takes the messages into account.

For the implementation, it results in a DoSatisfaction(agent's position in x , agent's position in y) that sends the message DoSatisfaction(agent's position in $x + dx$, agent's position in $y + dy$) unless there are messages in the mailbox; dx and dy are given by a extremely simple path planner which calculates the next increment towards the goal. In this case, the robot executes these messages---if needed---and then sends the normal continuation DoSatisfaction($x+dx,y+dy$) as soon as all the messages received have been taken into account. Here are the outlines of functions **Satisfied?**, **IncrementSatisfaction** and **DoSatisfaction**.

```
(function Satisfied? (self)
  (return (Is self's goal reached ?)))

(function IncrementSatisfaction (self)
  (Let the current self's position be nearer to
  self's goal position))

(function DoSatisfaction (self ?constraint ?cont)
  (If self is Satisfied? then

(Carry out the current continuation ?cont)
  Else
  (When the mailbox contains a message, take care of
  it))
  (IncrementSatisfaction self)
  (DoSatisfaction self ?constraint ?cont))))
```


We have introduced a local mailbox. This mailbox may be a common one like in blackboards but it is more useful to use local mailbox for each agents. By this way, eco-agents have reached real agents status.

The solving of the precedent example is now biased in the sense that only one message may be in the mailbox (the need of the door to be closed). In real problems, multiple messages may be sent and the order in which they are executed is a real task planning.

Another problem is that it may be important to plan all the tasks to go to the sink. An example is the robot+sink+key problem that is identical to Roach's except that the robot needs a key to close the door. Here, we have to plan the execution of the task to search the key simultaneously with using the fact that we will further have to reach the sink.

5.2 A step forward dynamical planning

In a more general problem solver, we must add the goal of going from the position of the robot to the sink to the content of the mailbox. But as soon as we allow this, we need a more powerful planning to know how to merge the tasks in the mailbox with the task of going to the sink. Here is an outline of a new function **DoSatisfaction** that handles the problem:

```
(If self is Satisfied? then
  Carry out the current continuation ?cont)
Else
  (IncrementSatisfaction self)
  (When the mailbox contains a message
   (add (DoSatisfaction self ?constraint ?cont)
    to the mailbox)
   (take care of mailbox))))
```

5.3 Tasks as eco-agents

Reorganizing the tasks in the mailbox do not seem to be of a real interest because it is only an other rewriting of the same old problems. We will see now that we may consider tasks not only as first-class objects but also as eco-agents (we have shown, in [8], that in blocks world, blocks are eco-agents).

5.3.1 Plunging the tasks in blocks world

Figure 3 illustrates our description. We may consider that the constraints between tasks are not very different from clobberers in the world of blocks; i.e. blocks on top of others.

Also, the temporal constraints between tasks are similar to the spatial constraints in blocks world. Consequently, we propose to introduce the task of going from one place to another as a block. Thus, taking a distance-block off a tower is similar for the robot to move along the same distance.

On moving from one place to another, the robot needs to suppress the corresponding distance in the block world representation. The loci are also represented by a block. When a locus-block is on top of a tower, it indicates that the robot is on the locus corresponding to the block. The task of opening and closing the door are indicated by blocks that dynamically goes on the top of the tower, the robot cannot do anything without suppressing this block (executing the corresponding task).

It is very important to note that this technique is nothing else than composing a "big" eco-agent with "smaller" eco-agents that handle the tasks of the "big" eco-agent.

6. CONCLUSION

6.1 Results

In this (extended) abstract, we have presented a multiagent model involving the notion of eco-agent. Its description and its formalization (finite state automaton, completeness) has been studied. Using the example of Robot and Sink, we have shown that a actor-based system have some limitations that we have solved by two means: incremental actions and tasks as eco-agents in the blocks world.

6.2 Perspectives

We have not pointed out the fact that our blocks world may be a dynamic one. Therefore, the blocks may be pushed dynamically on the top of the tower. It means that we may consider situations where the tasks of an agent may dynamically be changed. In this representation, the breakdown of a tower of blocks means a total replanning. In order to exploit this characteristic we are currently implementing the Misachieving Baby example [15] that leads us to a more dynamical problem where tasks must constantly be reorganized from the beginning.

Another extension will be to give new dimensions to blocks world: the weight of a block may be compared to the temporal cost of a task. We may also consider more elaborated constraints between tasks using geometric blocks that may interleave together.

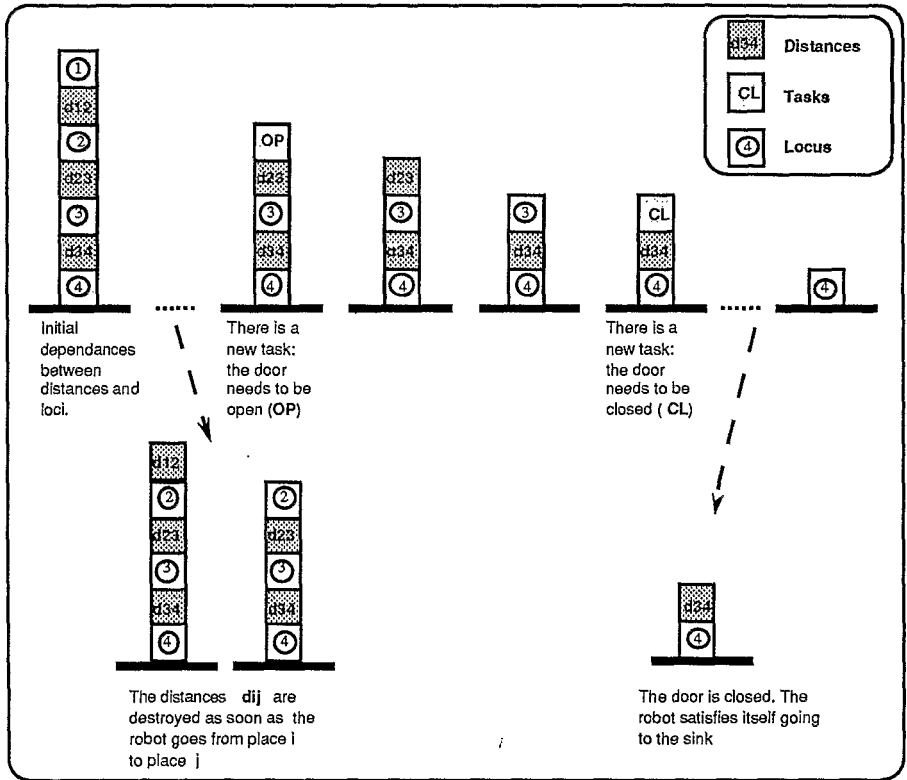


Figure 3 : The robot problem revisited through blocks world

REFERENCES

- [1] Gul Agha, *Actors - A model of Concurrent Computation for Distributed Systems*, MIT Press (1986).
- [2] Philip Agre & David Chapman, *Pengi: An implementation of the theory of activity*, in: Proceedings of AAI-87 (1987), pp. 268-272.
- [3] David Chapman, *Planning for Conjunctive Goals*, Artificial Intelligence 32 (1987), pp. 333-377.
- [4] Alexis Drogoul & Christophe Dubreuil, *Classical AI problems and Eco-problem solving*, LAFORIA working paper, LAFORIA 1990.
- [5] E. Durfee, T. Montgomery, *MICE: A Flexible testbed for intelligent Coordination Experiments*, Proceedings of the 9th Workshop on Distributed Artificial Intelligence (1989), pp. 25-40.
- [6] Jacques Ferber, *Objets et agents: Une étude des structures de représentation et de communication en Intelligence Artificielle*, Thèse de Doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, 492 pages, June 1989. (In french).

- [7] Jacques Ferber, *Eco-Problem Solving: How to solve a problem by interactions*, in: Proceedings of the 9th Workshop on Distributed Artificial Intelligence (1989), pp. 113-128.
- [8] Jacques Ferber & Eric Jacopin, *A Multi Agent Satisfaction Planner for Building Plans as Side Effects*, LAFORIA Report 07/90, February 1990.
- [9] Jean Marie Hoc, *Psychologie cognitive de la planification*, Presses Universitaires de Grenoble (1987).
- [10] Bernardo Huberman, *The ecology of computation*, Elsevier Sciences Publication, North Holland (1988).
- [11] David Joslin & John Roach, *A Theoretical Analysis of Conjunctive Goal Problems*, Artificial Intelligence **41** (1989/90), pp 97-106.
- [12] Richard E. Korf, *Planning as Search: A Quantative Approach*, Artificial Intelligence **33** (1987), pp 65-88.
- [13] Patti Maes, *The dynamics of Action Selection*, AI memo 89-09, AI LAB, Vrije Universiteit Brussel (1989).
- [14] Marvin Minsky, *The Society of Mind*, Basic Books (1986).
- [15] Marcel Schoppers, *Universal plans for reactive robots in unpredictable environment*, in: Proceeding of IJCAI-87 (1987), pp. 1039-1046.
- [16] Laurent Siklossy & John Dreussi, *A Hierarchy driven robot planner which generates its own procedures*, in: Proceedings of the 3rd IJCAI, Stanford, CA (1973), pp 423-430.
- [17] Lucy A. Suchman, *Plans and situated Actions, The problem of human-machine communication*, Cambridge University Press (1987).
- [18] Luc Steels, AI memo 89-07, AI LAB, Vrije Universiteit Brussel (1989).
- [19] D. Wilkins, *Practical Planning - Extending the classical AI paradigm*, Morgan Kaufman (1988).

**CONSTRUIRE
DES PROGRAMMES
MULTI-DISCIPLINAIRES**

SYSTEMIQUE ET PLURIDISCIPLINARITE : L'EXEMPLE DU PROGRAMME D'ETUDE DE LA PECHE DANS LE DELTA INTERIEUR DU NIGER

QUENSIERE J.

*"Nous avons choisi de présenter les choses dans l'état actuel, tout en sachant combien incomplètes sont nos réponses, combien imprévisibles encore sont les problèmes que susciteront nos théories actuelles."
(Prigogine et Stengers, 1988)*

Le mot pluridisciplinaire est d'un usage fréquent dans le monde scientifique. On le retrouve dans la plupart des présentations de programmes ou de laboratoires, dans la plupart des demandes de financement. Sa familiarité laisse à penser qu'il recouvre une pratique courante basée sur des notions bien définies. Pourtant, l'expérience montre, qu'au moins dans la majorité des disciplines biologiques et sociales, il n'en est rien.

L'usage excessif du mot "pluridisciplinaire" est-il simplement le signe d'une mode passagère ou n'est-ce pas au contraire l'indice d'une évolution progressive de la pensée scientifique vers certains concepts dont les bases épistémologiques sont encore mal assurées ?

Pourquoi donc la pluridisciplinarité ? Comment la construire ? C'est à ces questions que nous tenterons d'apporter des éléments de réponse sur la base de l'expérience acquise depuis quatre ans dans le programme d'études halieutiques du Delta Central du Niger.

Nous présenterons ce programme tel qu'il est, c'est à dire, davantage une tentative qu'un exemple, certainement pas un modèle. En regard des questions posées ici, son principal mérite est d'exister depuis plusieurs années et de témoigner des difficultés mais aussi des avantages présentés par l'approche pluridisciplinaire de certains objets.

Le terme "pluridisciplinaire" est utilisé dans les acceptions les plus diverses. Il convient donc tout d'abord de préciser de quoi l'on parle.

Dans les pages qui suivent le mot pluridisciplinaire qualifie la collaboration effective de plusieurs disciplines pour et pendant l'étude d'un même objet.

Certains étendent le sens du terme "pluridisciplinaire" à la compilation au sein d'un même ouvrage de travaux réalisés indépendamment, comme par exemple les actes d'un colloque, les atlas ou les inventaires statistiques. Le regroupement au sein d'un même vocable de deux réalités très différentes, une problématique de recherche d'une part et un travail d'éditeur ou d'archiviste d'autre part, nous paraît porteur de confusion et donc inopportun.

De même nous ne reprendrons pas à notre compte les différents termes introduits par certains pour qualifier des niveaux de pluridisciplinarité (juxtadisciplinaire, multidisciplinaire, interdisciplinaire, transdisciplinaire, ...) du fait que la pluridisciplinarité ne se définit pas indépendamment des questionnements scientifiques qui l'ont suscitée et que son évolution ne dépend que du devenir de ces questionnements.

PLURIDISCIPLINARITE ET COMPLEXITE

La pratique pluridisciplinaire renvoie obligatoirement à l'étude d'objets complexes. En effet, la pluridisciplinarité n'a de raison d'apparaître que, lorsque les connaissances acquises par une discipline, sur un objet réputé accessible à sa seule compétence, montrent que la coopération d'autres disciplines est indispensable à la compréhension de cet objet. La démarche pluridisciplinaire tire sa légitimité de la nature de l'objet auquel elle s'applique.

Ainsi, la pêche a longtemps été pensée réductible à une forme de dynamique de la ressource exploitée. D'après la théorie halieutique classique, il suffisait de décrire la trajectoire d'une population ichtyologique pour être en mesure de prévoir le devenir de la pêche qui l'exploitait.

Ce n'est qu'après de longues années d'efforts qu'on s'aperçut que cette démarche était illicite pour la simple raison que la trajectoire en question n'était calculable qu'au prix de nombreuses simplifications et que, sans ces simplifications, cette trajectoire était imprédictible.

Il ne s'agit pas de dire que le schéma réductionniste proposé par l'halieutique classique ne permet jamais d'atteindre le but fixé mais qu'il n'englobe que certains cas où les simplification restent acceptables.

On reconnaît aujourd'hui que ce schéma et les concepts qui l'accompagnent n'ont pas l'universalité qu'une certaine école de biologistes a tenté d'imposer pendant 30 ans (Larkin, 1977). La redécouverte du rôle déterminant de la variabilité écologique, de l'adaptabilité proximale des espèces aux fluctuations de milieu, des

facteurs sociaux économiques et politiques, etc. fit apparaître d'une part la nécessité de concevoir un autre schéma de fonctionnement qui intègre la complexité de la pêche, et la nécessité d'une collaboration entre différentes disciplines.

Actuellement, trois théories de la complexité s'affrontent encore

La première, qualifiée de réductionniste, considère que tout objet complexe est un agrégat de choses simples. L'ensemble des propriétés d'un objet complexe est la somme des propriétés de ses diverses composantes. Ainsi, pour les réductionnistes, un être vivant n'est qu'un ensemble de molécules ; une économie, un ensemble d'*homo economicus*; etc.

La thèse réductionniste est, *in fine*, celle des inconditionnels de la recherche monodisciplinaire. Elle renvoie à de vieux mythes scientifiques tels que le "démon" de Laplace dont la science moderne (théories de la relativité, de l'hérédité, du chaos,...) a démontré l'obsolescence.

La seconde, qualifiée de globaliste, est diamétralement opposée à la précédente. La thèse globaliste interprète la complexité en terme de système. Un système est une totalité qui est quelque chose de plus que la somme de ses parties. Les globalistes reconnaissent donc la réalité de la complexité et des niveaux d'organisation qu'elle sous-entend. Cependant ils considèrent que la différence entre la totalité et la somme des parties, ce "quelque chose en plus", ne peut être identifié par l'analyse du tout, à travers ses composantes. La complexité existe mais elle ne peut être comprise. Le globalisme, bien que très souvent invoqué dans la littérature, laisse la porte ouverte à toutes les irrationalités et n'est pas heuristique. "*Toutes les approches actuelles de la complexité sont tautologiques : construire un modèle à partir de l'affirmation du complexe en tant que tel ne donne qu'une possibilité d'interprétation d'une fiction, aucune justification de l'efficacité d'un point de vue.*" (Mullon, 1988).

La troisième, que nous appellerons systémique, en référence à Bunge à qui revient le mérite d'en avoir clarifié les concepts, définit la complexité en cohérence avec la méthode scientifique. La théorie systémique, comme la théorie globaliste reconnaît l'existence d'objets complexes qui sont des systèmes et caractérisent des niveaux d'organisation de la nature. Cependant elle ne considère pas que cette complexité est ineffable mais au contraire qu'elle peut être analysée et décrite. C'est des trois théories la seule scientifiquement utilisable. C'est donc à elle que nous nous référerons après en avoir rappelé les principales propositions.

SYSTEME ET PROPRIETES SYSTEMIQUES

Les définitions qui suivent sont tirées de l'ouvrage "Epistémologie" (Bunge, 1983).

Concept d'action

"Le concept d'action, ou d'effet d'une chose sur une autre, permet de définir la notion de connexion, couplage ou lien entre deux choses, par opposition à une simple relation non connective comme les relations d'espace ou celles qui consistent à être "plus grand que" ou "antérieur à". En effet nous dirons que deux choses sont couplées ou liées ou connectées entre elles si l'une d'entre elle agit sur l'autre et, à plus forte raison si elles sont en interaction".

Concept général de système

"Un système est un objet complexe dont les parties ou composantes sont liées de telle façon que l'objet se comporte, à certains égards, comme une unité et non pas comme la simple réunion de ses éléments."

"Le concept général de système est le suivant : un système est un ensemble d'objets quelconques dont chacun est en relation avec les autres éléments constitutifs du système, soit directement, soit par l'intermédiaire d'autres éléments. Si les éléments constitutifs du système sont des concepts, des propositions ou des théories, alors les relations mutuelles sont des relations logiques, et le système est dit conceptuel...En revanche, si les éléments constitutifs du système sont matériels ou concrets (...) et si chacun d'entre eux agit sur les autres, soit directement, soit par l'intermédiaire des autres, le système est dit concret ou matériel".

Plus précisément, "une chose S est un système concret si et seulement si S peut être représenté de façon adéquate par le triplet ordonné de trois ensembles :

$m = \langle \text{composition de } S, \text{ milieu de } S, \text{ structure de } S \rangle$ où :

- la composition de S est l'ensemble des parties de S , ensemble composé d'au moins deux éléments ;
- le milieu ou l'entourage de S est l'ensemble des choses concrètes distinctes des composantes de S , qui s'unissent à celui-ci, ou encore qui agissent sur S ou sont affectés par S ;

- la structure de S est l'ensemble des relations entre les composantes de S , ainsi que les relations qui existent entre les composantes de S et les composantes du milieu de S . Une structure telle que cet ensemble comporte au moins une connexion ou une liaison".

Sous-système

"Soit σ un système représenté par l'ensemble des trois éléments $\langle \mathcal{E}(\sigma), \mathcal{M}(\sigma), \mathcal{Y}(\sigma) \rangle$. Alors σ' est un sous-système de σ si et seulement si :

- σ' est un système (au lieu d'être un simple agrégat) ;
- La composition de σ' est comprise dans celle de σ ;
- Le milieu de σ' est inclus dans celui de σ ;
- La structure de σ' est incluse dans celle de σ

(...) Par exemple, le système juridique d'une société est un sous-système de cette société ayant les propriétés suivantes :

- composition : Juges, avocats, procureurs, greffiers, employés judiciaires, gendarmes, plaignants et délinquants.
- milieu (immédiat) : Tribunaux, cabinets juridiques, bibliothèque légales, commissariats de police, prison, chambres de torture, parents des membres du systèmes.
- structure : L'ensemble des relations sociales (incluses dans l'ensemble des relations de transformations humaines) qui consistent à accuser, défendre, mener des enquêtes, prononcer des jugements, faire appliquer les jugements, ne pas s'y soumettre, etc."

Identification d'un système

Pour savoir si l'on a affaire à un système et non pas à un être simple ou un simple agrégat on peut avoir recours à l'un ou l'autre des critères suivants ¹¹:

¹¹ Il s'agit en fait de deux façon différente d'enoncer la même propriété

"Premier critère : une chose est un système si et seulement si elle se comporte comme un tout dans certains cas. C'est-à-dire si elle possède des lois propres en tant que totalité.

Deuxième critère : une chose est un système si et seulement si son comportement change de façon appréciable lorsqu'on lui enlève une de ses composantes ou qu'on la remplace par une autre tout à fait différente."

Quelques types de systèmes concrets

Système réactif : "(...) une chose se compose au départ d'entités appartenant aux classes A et B (qui ne sont pas forcément différentes) ; ces entités agissent entre elles et forment des choses appartenant à une troisième classe C qui diffère de A comme de B. Dans ce cas là nous dirons qu'il s'agit d'un système réactif. (...) une communauté, aussi simple et pacifique qu'elle soit, est un réacteur social dans la mesure où ses membres et ses sous-systèmes agissent entre eux pour former de nouveaux membres et de nouveaux sous-systèmes."

Système auto-contrôlé : "Un système auto-contrôlé est un système qui comporte soit un sous-système qui contrôle le reste, soit un processus (une réaction chimique, par exemple) qui se contrôle lui même comme cela se produit avec les réactions enzymatiques et les réactions dont les produits inhibent ou stimulent la réaction même."

Propriétés résultantes et propriétés émergentes

"Le concept de propriété émergente s'applique à des choses complexes, ou systèmes, et non à des choses simples comme nous supposons que le sont un électron et son champ de gravitation. Soit donc x une chose (concrète) complexe, et soit P une propriété de x . Alors,

a/ P est une propriété résultante (...) de x si et seulement si certains éléments constitutifs de x possèdent également P .

b/ P est une propriété émergente ou collective de x si et seulement si aucun des éléments constitutifs de x ne possède P ."

Les mécanistes ou réductionnistes soutiennent que toutes les propriétés sont ou simples ou résultantes ; par conséquent, les secondes se réduisent aux premières. En revanche les globalistes affirment qu'il existe des propriétés émergentes ou collectives et qu'aucune ne s'explique en fonction des propriétés de leurs composantes. Mais la différence entre les mécanistes (réductionnistes) et les globalistes (émergentistes) n'est pas une dichotomie. Il existe au moins un philosophe (l'auteur de ces lignes)

pour reconnaître l'émergence comme un fait, et pour supposer en même temps que toute émergence s'explique par l'analyse de la totalité émergente de ses composantes et des interactions entre celles-ci. (...) Par exemple, la sexualité est une propriété qui émerge au niveau biologique mais ce n'est pas une propriété inintelligible ; elle est expliquée par la biologie moléculaire et par la théorie de l'évolution. Celle-ci explique le mécanisme de la fécondation, et celle-là, les avantages (en variété et, par conséquent en sélection) de la sexualité."

D'où la thèse générale suivante : Certaines des propriétés de tous les systèmes sont émergentes, et toutes les propriétés émergentes sont enracinées dans (sont précédées par) des propriétés de leurs composantes. C'est là l'essentiel de l'émergentisme rationnel, qui diffère autant de l'émergentisme mystique des globalistes (holistes) que du mécanisme réductionniste."

LE SYSTEME PECHE

Il est facile de démontrer que la pêche constitue bien un système concret. Pour cela il convient tout d'abord de définir l'objet pêche : on appellera pêche toute industrie¹ basée sur l'exploitation d'une ressource vivante animale aquatique.

Selon cette définition, la pêche, pour exister, nécessite la réunion d'au moins trois ensembles : des pêcheurs, des poissons et des commerçants. En effet, sans pêcheur ou sans poisson il ne peut y avoir de pêche et sans commerçant il n'y a pas d'industrie.

Chacun de ces trois ensembles est dénombrable, au moins de façon statistique et agit sur les deux autres ensembles directement ou indirectement, par des relations.

Schématiquement ces relations sont les suivantes. Les pêcheurs agissent sur les poissons en modifiant leur mortalité naturelle par l'action de pêche. Les pêcheurs agissent sur les commerçants par la nature, l'abondance et la régularité de la production de poissons. Les poissons agissent sur les pêcheurs par leur plus ou moins grande abondance, et sur les commerçants via cette relation (relation indirecte poissons -> pêcheurs - > commerçants). Les commerçants agissent sur les pêcheurs par les cours qu'ils pratiquent, et sur les poissons via cette relation (relation indirecte commerçant -> pêcheurs -> poissons).

¹Le mot industrie signifie ici activité productrice de richesse (ou de biens) pouvant avoir valeur d'usage et/ou d'échange. Nous avons considéré le cas le plus général où ces biens sont échangés, au moins en partie. Si le poisson est destiné uniquement à l'usage des producteurs, le nombre de commerçants égale zéro et le système se simplifie.

En outre ces trois ensembles sont plongés dans un environnement écologique, économique, politique et social qui influe sur eux.

La pêche est donc bien un système au sens de Bunge

Cependant la définition du système pêche qui vient d'être donnée est incomplète car elle ne permet pas de dimensionnement. Elle peut donc s'appliquer à des réalités d'échelles très différentes, depuis un système composé d'un seul pêcheur, d'un commerçant et d'un banc de poissons jusqu'à celui qui englobe l'ensemble des pêcheries mondiales, le marché international du poisson et l'ensemble des stocks exploitables.

Considérons donc une propriété de la pêche qui n'a pas encore été prise en compte : le fait que la pêche est une activité humaine durable. Il existe probablement des cas de pêcheries dont l'existence a été éphémère mais il est peu probable que dans de telles circonstances elles aient pu se structurer et constituer des systèmes, encore moins des industries. En règle générale, la pêche est donc une activité durable. Une activité humaine durable génère nécessairement des règles pour se perpétuer. Dans le cas de la pêche, cette régulation peut être assurée par les pêcheurs eux-mêmes ou par une administration distincte des pêcheurs. Cette administration, si elle existe, est en interaction étroite avec les pêcheurs. Elle fait donc partie du système pêche. Il en résulte que la pêche, avec ou sans administration, est un système auto-régulé.

Par ailleurs, la régulation de la pêche est issue de la partie anthropique du système. Plus précisément de l'ensemble des pêcheurs, seul ou uni, selon les cas, à l'ensemble des agents constituant l'administration des pêches. Cet ensemble, ou réunion d'ensembles, constitue lui même un système auto-régulé :

composition : pêcheurs, maîtres des eaux, gardes de pêche, ... ;

milieu : lieux de pêche, zones de défens, corpus législatif coutumier et moderne, populations de poissons, ... ;

structure : action de pêche, ensemble des relations sociales spécifiques au groupe des pêcheurs et plus particulièrement celles qui consistent à réglementer, partager, approprier, interdire, autoriser, pénaliser, ...

Nous pouvons donc conclure que la pêche est un système concret autorégulé comportant un sous-système social lui même auto-régulé.

Cette définition des systèmes pêche privilégie très clairement les niveaux d'organisation sociale des pêcheurs.

NIVEAUX D'ORGANISATION ET ECHELLES D'OBSERVATION

Dans le Delta intérieur du Niger, des systèmes pêche correspondant à cette dernière définition, peuvent être identifiés à plusieurs échelles (Cl. Fay, 1990) :

échelle de l'unité de production

composition : les membres de l'unité de production, qui est, dans le cas du Delta intérieur, la "marmite" ; le(s) commerçant(s) en relation avec l'unité ; le(s) garde(s) pêche et/ou le(s) maître(s) des eaux surveillant les activités de l'unité ; les populations de poissons exploitées par l'unité ;

milieu : ensemble des règles sociales, des législations, auxquelles est soumise l'unité, ensemble des lieux de pêche de l'unité, environnement économique, environnement écologique, ... ;

structure : ensemble des relations familiales liant entre eux les membres de l'unité ; des relations avec les commerçants ; ensemble des connaissances acquises sur la ressource et ses modes de capture, ...

échelle de la région

composition : ensemble des unités de production de la région (qui peut dans certains cas être celui d'une agglomération), ensemble des maîtres des eaux, des gardes, des commerçants, des populations de poissons de la région, ... ;

milieu : cf. supra mais élargi aux terroirs régionaux ;

structure : ensemble des relations de pêche, des relations sociales, économiques et politiques en usage dans la région, relation de compétition et de prédation entre populations de poissons de la région, relation de compétition entre commerçants de la région, ... ;

échelle de l'ensemble du Delta

composition : ichtyocoenose deltaïque, populations de pêcheurs du Delta, commerçants du réseau commercial deltaïque, agents de l'administration des pêches du Delta, ... ;

milieu : écosystème deltaïque, environnement économique et social du Mali, environnement politique, ... ;

structure : cf. les systèmes précédents, mais à l'échelle du Delta.

Ces différents types de système caractérisent des niveaux de complexité de la pêche deltaïque; le système pêche deltaïque est composé de systèmes pêche régionaux (sous-systèmes) eux-mêmes composés de systèmes pêche familiaux (sous-sous-systèmes).

On retrouve ici une organisation par niveau, comparable à celle des biosystèmes par exemple (cellule, organe, individu, population, peuplement) ; de l'unité de production à l'ensemble du Delta, tout système d'un niveau donné est formé d'éléments qui sont des systèmes au niveau précédent. Ce type particulier d'organisation de la complexité permet de dépasser les problèmes d'échelle habituellement rencontrés dans l'étude des objets complexes. Expliquons nous.

L'étude d'un niveau donné (N) est l'étude du système correspondant, c'est à dire la recherche de la causalité de ses propriétés (résultantes et émergentes) à partir de l'analyse de sa composition, de son milieu et de sa structure. Cette analyse repose, entre autres choses, sur les caractéristiques des éléments du système. Si ces éléments sont eux-mêmes des systèmes (de niveau N-1), leurs caractéristiques sont leurs propriétés résultantes et émergentes. Il n'est pas nécessaire de connaître l'origine de ces propriétés mais seulement leur existence pour étudier le système de niveau N. Les niveaux de complexité peuvent donc être étudiés indépendamment.

Si par exemple on étudie l'origine d'une stratégie de production (propriété émergente d'un système unité de pêche), on s'interrogera sur la composition de l'unité (membres de la "marmite"), ses contraintes, ses relations familiales, etc. Si maintenant on tente d'expliquer la stratégie d'exploitation d'un terroir villageois (propriété émergente d'un système pêche régional), les éléments à prendre en compte ne seront pas les villageois appartenant aux différentes unités de pêche du village, mais ces unités de pêche caractérisées par leurs stratégies de production, les relations qui les lient, etc.

On peut donc étudier indépendamment chaque niveau de complexité du système pêche, mais à condition de l'aborder en tant que système, c'est à dire, par une approche pluridisciplinaire.

LA PLURIDISCIPLINARITE DANS L'ETUDE DE LA PECHE

Nous abandonnerons ici le confort relatif de la théorie pour aborder les imperfections de la pratique à travers l'exemple du Projet d'études halieutiques du Delta Central du Niger.

Débuté fin août 1986, ce Projet, placé sous l'égide de l'INRZFH¹ et de l'ORSTOM, a une durée de vie théorique de six ans. Son objectif est de permettre une meilleure compréhension de la structure et de la dynamique de la pêche artisanale du Delta intérieur du Niger. L'équipe pluridisciplinaire qui l'anime comprend des représentants des disciplines suivantes : anthropologie, biologie des pêches, démographie, écologie et économie.

Il ne peut être question, dans le cadre de cette note, de détailler les travaux réalisés au Mali. Nous n'en évoquerons que les trois aspects suivants :

- les quelques principes de fonctionnement que nous avons retenus ;
- la chronologie adoptée pour les travaux ;
- le problème de la validation des hypothèses.

Principes de fonctionnement

Les règles de fonctionnement de l'équipe ont été élaborées pour la plupart au cours d'ateliers et de réunions destinées à préciser quelle approche adopter pour étudier les systèmes pêche. Elles visent toutes à permettre le dépassement des problèmes de cohabitation de disciplines différentes (voire même très différentes) au sein d'un même programme. On a en effet coutume de souligner cette difficulté qui est réelle mais somme toute beaucoup plus facile à dépasser que l'individualisme de bon nombre de chercheurs.

L'essentiel des problèmes rencontrés dans la pratique de la pluridisciplinarité seraient évités si les chercheurs n'avaient une ignorance complète du travail en équipe, même au sein de leur propre discipline. Respecter l'autre, tenir sa place, ne pas empiéter sur celle du voisin, informer et se tenir informé, nécessitent certaines dispositions de caractère mais aussi une pratique. Or la formation scientifique française ne forme pas au travail en équipe. Elle enseigne la solitude, éventuellement la hiérarchie mais bien rarement la coopération.

¹Institut National Malien de Recherche Zootechnique, Forestière et Hydrobiologique.

Cette propension à l'individualisme, qui correspond au mythe de la "liberté du chercheur", est sans doute l'une des plus grandes difficultés que rencontre et que rencontrera la pratique pluridisciplinaire.

Si donc les quelques principes indiqués ci-dessous nous ont paru nécessaires à un travail pluridisciplinaire ils ne suffisent pas à en assurer le succès qui dépend avant tout de la volonté de chacun.

1 / Si l'étude d'un objet complexe nécessite la collaboration de plusieurs disciplines, il ne peut y avoir de hiérarchie entre les disciplines puisqu'elles sont toutes indispensables à la connaissance de l'objet.

1'/ La pluridisciplinarité n'a de sens que si elle s'exerce dans le cadre d'une problématique elle-même définie de façon pluridisciplinaire. Ceci implique que le travail d'une équipe n'a de chance d'être fructueux que si cette équipe élabore elle-même - en tenant compte de ses spécificités, de la nature de la question posée et des particularités du terrain d'étude - la stratégie de recherche qu'elle développera par la suite.

2 / La pluridisciplinarité, qui se définit comme la réunion de compétences, ne se fait pas au dépens de la spécialisation des participants. Elle doit favoriser au contraire l'expression et l'approfondissement du professionnalisme de chacun.

2'/ Chacun dans l'équipe doit tenir sa place en tant que spécialiste ; dans une équipe pluridisciplinaire, l'amateurisme n'est pas permis. Son moindre défaut est de ne pas permettre ou de rompre la confiance qui doit s'instaurer entre les membres de l'équipe.

3 / L'information doit impérativement circuler dans l'équipe. Il est de la responsabilité de chacun d'informer et de s'informer.

3'/ Toute action de recherche doit être précédée par un document de programme où sont exposés : le thème de recherche et sa justification dans le cadre du projet ainsi que dans le cadre de la (des) discipline(s) concernée(s) ; la méthodologie proposée et, dans la mesure du possible, les paramètres d'observation (descripteurs) choisis ; les échéances et les résultats attendus. Il s'agit d'un document d'information aussi bien pour les membres de l'équipe que pour les instances d'évaluation scientifique. Il s'agit également d'un engagement pris par le (les) chercheur(s) concerné(s) vis à vis du reste de l'équipe.

4 / Certaines échelles d'observation doivent être respectées, à savoir, dans le cas du Delta, l'échelle de la zone deltaïque dans

sa totalité et une échelle sous régionale. Ces deux échelles sont complétées selon les cas par une échelle supra-régionale (macro-économie, commercialisation, écologie) ou par l'échelle des unités de production / consommation définie comme étant la "marmite" (anthropologie, biologie des pêches, micro-économie, démographie).

En dehors de cette dernière contrainte, qui n'en est pas vraiment une puisque les échelles pertinentes sont définies par l'équipe elle-même (cf. règles 1, 2 et leurs corollaires), il ne s'agit pas d'imposer des normes au travail scientifique. Ce dernier doit se développer de la façon la plus libre dans l'objectif commun de l'équipe : connaissance des pêches deltaïques. Les principes adoptés sont essentiellement destinés à permettre le fonctionnement d'une équipe.

Chronologie des travaux

Le travail d'équipe nécessite de progresser par étape afin de pouvoir, dresser de fréquents bilans des connaissances acquises, réorienter les travaux, voire en envisager d'autres qui n'avaient pas été prévus.

Le programme d'étude halieutique a donc été découpé en quatre phases de dix huit mois. A l'issue de chaque étape un rapport scientifique est rédigé et les orientations à venir redéfinies. La préparation de ces rapports induit une contrainte de rédaction mais présente de multiples avantages :

- C'est l'occasion pour chaque chercheur de faire le point sur l'avancement de ses travaux ;
- C'est une autre façon d'informer les autres membres de l'équipe des données et des résultats acquis ;
- C'est un moyen d'informer nos partenaires de nos recherches et de permettre la diffusion de résultats qui ne sont pas encore publiés.

Première phase : enquête auprès des pêcheurs

La première tranche de travaux a été consacrée à la réalisation et à l'exploitation d'une enquête auprès des pêcheurs de l'ensemble de la zone d'étude (cf. contribution de P. Morand dans le même ouvrage). Cette enquête avait pour but d'établir une description homogène de la pêche dans les différentes régions du Delta afin d'en faciliter une première approche globale. Elle était en outre nécessaire au cadrage des plans d'échantillonnage ultérieurs. Enfin, au plan du fonctionnement de l'équipe elle a permis d'établir un langage commun aux différentes disciplines et de faciliter ainsi les échanges.

L'ensemble des disciplines impliquées dans le projet ont participé à l'élaboration, la réalisation et l'exploitation de ce travail préliminaire qui a permis de collecter une somme importante d'informations puisqu'en l'espace de 12 semaines une superficie de 29 000 km² a été échantillonnée et plus de 700 000 données ont été recueillies auprès de 19 000 personnes appartenant à quelques 2 000 ménages exerçant la pêche et vivant de ses produits soit environ 9% de la population de pêcheurs.

Le dépouillement de ces données a permis d'étudier les caractéristiques démographiques des groupes de pêcheurs (fécondité, mortalité, ...), de décomposer la région du Delta Central en une série de sous-ensembles géographiques homogènes (strates) et d'identifier les mécanismes majeurs du système pêche (relations entre les éléments du système et entre ceux-ci et leur milieu).

Deuxième phase : études par champ disciplinaire

La seconde phase de travail a été consacrée à l'analyse de ces mécanismes. C'est ainsi qu'ont été abordés l'étude des prêts bancaires auprès des pêcheurs, les modalités des migrations de pêches et les stratégies de production qui les intègrent, l'organisation traditionnelle du monde pêcheur, les maîtrises de pêche et les conflits provoqués par le développement d'une réglementation nationale (anthropologie), les stratégies de productions de pêche et les inter-relations pêche-agriculture (microéconomie), les grands aspects de l'économie régionale pour les trois régions administratives couvrant le Delta Central et l'importance de la pêche dans l'économie nationale malienne (macro-économie), l'immigration rurale et l'insertion urbaine dans les villes du Delta et la quantification de la mobilité des pêcheurs (démographie), les quantités de poissons transitant par deux des principaux marchés de la rive droite (Mopti et Konna) (économie des pêches), la définition des modalités de reproduction des principales espèces pêchées en relation avec les caractéristiques environnementales (écologie) et tout particulièrement l'importance de la crue, etc.

Parallèlement, un travail méthodologique d'échantillonnage a été réalisé et testé (pendant un an sur une portion du Delta) pour estimer sur un même échantillon de village : l'effort de pêche ; les quantités produites ; les quantités transformées par type d'espèce et de transformation ; les quantités commercialisées par les producteurs.

Il est important de souligner que, pendant ce travail de recherche et d'analyse des mécanismes de la pêche, il n'y a pas de recherche systématique de consensus. Des opinions divergentes peuvent résister aux discussions et cohabiter au sein de l'équipe. Il semble important, en effet, de ne pas appauvrir trop rapidement le champ des hypothèses et de permettre des regards différents.

Troisième et quatrième phases

La dynamique du programme veut qu'au cours des travaux des trois dernières phases, la démarche évolue progressivement du disciplinaire au pluri-disciplinaire ; chaque chercheur ayant, dans un premier temps, besoin de situer avec les seuls moyens de sa discipline les processus et leur importance avant d'identifier d'autres processus ou encore des relations de causalité qui ne peuvent être appréhendés correctement qu'en collaboration avec une ou plusieurs autres disciplines. Ces collaborations se développent, bien évidemment, entre disciplines partageant la (les) même(s) échelle(s) d'observation. Ainsi au stade actuel de nos travaux on note par exemple des approches communes entre l'anthropologie et la micro-économie (échelles du village et du ménage), entre la biologie des pêches et l'étude de la commercialisation, ou encore entre la biologie des pêches et la démographie (échelle de la strate et du village).

Nous sommes actuellement au milieu de la troisième phase. Après quatre ans de travail une somme importante de données est maintenant disponible et une réflexion sur l'articulation de ces informations au sein d'un même schéma explicatif est désormais possible. Ce travail de synthèse présente des difficultés nouvelles qui amènent à penser de nouvelles solutions.

Cohérence de l'information et validation des hypothèses

Le travail de chacun, seul dans sa discipline ou en collaboration avec d'autres, a permis d'identifier des éléments, des structures, des dynamiques, des influences externes, de la pêche deltaïque à différents niveaux d'organisation. Tous ces éléments ne sont pas de même importance. Il ne s'agit donc pas seulement de les identifier et de les décrire, mais encore de les hiérarchiser, ne serait-ce que pour concentrer les efforts sur les facteurs majeurs quitte à délaisser ceux qui paraissent par trop secondaires. L'approche systémique ne consiste pas à exiger l'étude de tout, partout, très finement¹ mais à ne rejeter *a priori* aucun facteur influent qui aura été identifié.

Un problème majeur se pose donc : comment hiérarchiser des relations qui ne sont pas forcément de même nature ? Comment décider par exemple si c'est l'introduction d'une nouvelle réglementation, ou le fléchissement des cours du poisson qui est cause d'une diminution relative de l'effort de pêche dans une région donnée.

¹Confucius (?)

Par ailleurs, comment vérifier que les hypothèses de fonctionnement de tel niveau de complexité sont vraisemblables ou complètement erronées ? Comment être sûr que les schémas explicatifs obtenus sur d'autres terrains dans d'autres circonstances peuvent effectivement être appliqués au cas présent ?

En écologie comme en économie ou en anthropologie il est plus facile de produire des hypothèses que de les valider par une expérimentation. Pourtant il ne suffit pas de parler pour faire de la science, il faut aussi prouver qu'on a raison. Tout particulièrement lorsqu'on ne s'adresse pas seulement à des scientifiques mais également à des décideurs qui restent peu sensibles aux constructions théoriques hypothétiques. *"Lorsqu'un scientifique se livre à un travail d'interprétation, il construit des hypothèses et celles-ci sont toujours provisoires. Elles devraient toujours être testées et révisées, si elles paraissent insatisfaisantes."* (Mayr, 1988)

Nous avons donc été conduit à envisager l'usage de simulations pour valider nos hypothèses et hiérarchiser leurs effets (cf. contribution de F. Bousquet dans le même ouvrage).

Telle que nous entendons nous en servir, une simulation est une représentation, un modèle, d'une réalité pour laquelle on dispose de suffisamment d'informations pour imaginer sa structure et sa dynamique mais qu'on ne peut facilement valider par une expérimentation empirique.

Une simulation consiste donc à permettre une approche expérimentale d'objet qui ne s'y prêtent pas. En effet l'ajustement de la simulation peut conduire à altérer les règles de fonctionnement initialement introduites voire en introduire de nouvelles qui seront autant d'hypothèses à confirmer par de nouvelles observations de terrain, nouvelles observations dont le schéma explicatif initial n'avait pas permis de soupçonner l'importance.

Une simulation est donc d'abord l'énoncé d'une hypothèse, d'une théorie que l'on cherchera à confirmer ou à amender jusqu'à ce qu'on aboutisse à une construction logique qui résiste aux faits. Une simulation doit donc nécessairement comporter :

- l'énoncé de l'hypothèse à valider
- les conditions requises pour tester cette hypothèse (le domaine d'application de l'hypothèse)
- l'énoncé des conséquences attendues de la construction hypothétique avancée.

Les premières simulations proposées concernent d'une part les facteurs principaux régissant l'organisation et la dynamique des stratégies de survie des poissons dans le Delta Central et d'autre part, les facteurs principaux régissant l'organisation et la dynamique des

stratégies de production des populations de pêcheurs du Delta Central.

La justification de ces choix provient de ce que c'est à ces niveaux de complexité que le plus grand nombre d'informations a été recueilli et que notre analyse est la plus fouillée.

Nous ignorons encore si les espoirs que nous plaçons dans l'usage de ces méthodes sont réellement justifiés. Une chose est certaine cependant, le travail préparatoire à ces simulations induit une réflexion approfondie sur les données acquise et leurs articulations, qui ne peut être que bénéfique à la qualité du travail que nous menons.

CONCLUSION

La pluridisciplinarité ne peut être comprise que comme la collaboration effective de plusieurs disciplines à la connaissance d'un même objet.

L'envisager c'est reconnaître l'existence d'une complexité analysable. C'est considérer avec Prigogine et Stengers (1988) que la science d'aujourd'hui " *est désormais capable de comprendre et de décrire, au moins partiellement, les processus complexes qui constituent le monde le plus familier, le monde naturel où évoluent les êtres vivants et leurs sociétés*".

Cependant, cette reconnaissance de la complexité doit être explicite. Elle doit s'appuyer sur des outils théoriques qui permettent de l'aborder avec succès. L'erreur bien souvent a été de penser qu'il suffisait de regrouper des chercheurs de différentes disciplines pour que la nature, impressionnée par tant de monde, révèle spontanément ses secrets.

La pratique pluridisciplinaire est donc indissociable de l'approche systémique.

OUVRAGES CITES

BUNGE (M.), 1983. - Epistémologie, Paris, Maloine S.A., 12 fig, 279 pp.

FAY (Cl.), 1990. - Systèmes halieutiques et espaces de pouvoir : transformation des droits et des pratiques de la pêche dans le Delta Central du Niger (Mali), 1920-1980. Cah. Sci. Hum. 25 (1-2) : 213-236.

LARKIN (P.A.), 1977. - An epitaph for the concept of maximum sustained yield., Trans. Amer. Fish. Soc., 106 (1), pp. 1-11.

- MAYR (E.), 1989. - Histoire de la biologie ; Diversité, évolution et hérédité. Paris, Fayard - Le temps des Sciences. 871 pp.
- MULLON (C.), 1989. - Rhétorique de la modélisation. SEMINFOR 2. La modélisation : aspects pratiques et méthodologie. ORSTOM. Colloques et séminaires : 371-384.
- PRIGOGINE (I.) & STENGERS (I.), 1988. - La nouvelle alliance. Paris. Folio-Essais, 439 pp.

H COMME HAPEX : HYDROLOGIE HORS BASSIN VERSANT

LEBEL T.

1. HAPEX-SAHEL : UNE ETAPE VERS UNE HYDROLOGIE DE GRANDE ECHELLE

Les grands projets d'aménagement hydrologique concernant des régions de plusieurs dizaines voire centaines de milliers de km², ainsi que les préoccupations croissantes envers les évolutions climatiques, ont progressivement fait prendre conscience aux scientifiques impliqués dans ce type de recherches, de la nécessité de mieux appréhender le cycle de l'eau aux échelles régionales et continentales (voir sur ce point Eagleson, 1986). Le premier pas significatif dans cette direction a été la conception de Modèles de Circulation Générale (MCG) à la fin des années soixante dix (e.g. Gates, 1983). Au sein de ces modèles, développés par les atmosphériciens et les océanographes, la paramétrisation hydrologique a tout d'abord été très sommaire : la surface du sol sur les continents, qui constitue la condition à la limite inférieure des MCG, étant décrite comme soit totalement sèche, soit saturée. Les études ultérieures de sensibilité de ces modèles ont montré l'importance d'une bonne description de l'interface continent-atmosphère, ce qui signifie, entre autres, une meilleure approche des processus de surface (ce que les anglophones appellent "land-surface processes"). Ceci passe à la fois par une paramétrisation améliorée des processus hydrologiques dans les MCG et par une compréhension plus fine de ceux d'entre eux qui sont fondamentaux à cette échelle.

Plus que partout ailleurs, c'est dans la zone intertropicale que s'imposent des expériences dont le but serait d'aider à cette double tâche. D'une part, ce sont sous ces latitudes que les résultats des MCG sont les moins bons, comme on peut le constater sur la figure 1 extraite de Mitchell (1983). D'autre part, les observations disponibles y sont peu nombreuses, alors même qu'il est assez aisé d'y trouver de grandes surfaces relativement homogènes et peu perturbées par l'action anthropique, donc propices à une instrumentation intensive des différents niveaux de l'interface continent - atmosphère. Un autre aspect important du point de vue des hydrologues est la possibilité offerte, à travers une collaboration avec les chercheurs des disciplines voisines (atmosphériciens, bioclimatologues, pédologues, écologues, ...), de reconsidérer notre

approche des questions expérimentales. En effet, si analyse et expérimentation peuvent être considérées comme les deux mamelles du progrès scientifique, nul doute que la deuxième se soit beaucoup tarie en hydrologie depuis quelques temps, sans que la première puisse prétendre fournir tous les éléments nutritifs nécessaires pour faire face à de nouveaux besoins. HAPEX-SAHEL constitue le premier prototype de telles expériences, visant à une approche conjointe des problèmes d'expérimentation et de modélisation.

2. PLUSIEURS DISCIPLINES ET PLUSIEURS ECHELLES

2.1 Objectifs de l'expérience

Aboutir à une évaluation plus fine du bilan hydrologique et à une meilleure représentation des états de surface dans les MCG constitue un des principaux buts de l'expérience. La composante hydrologique vise à estimer les quantités d'eau stockées dans les différentes unités du système hydrologique en fin de saison des pluies. Les études sur les états de surface concernent aussi bien leur caractérisation (albedo, classification du couvert végétal, répartition des grandes unités, ...) que le fonctionnement de l'interface sol-végétation. Cette interface conditionne les échanges continent-atmosphère, c'est à dire essentiellement les flux de H₂O, CO₂ et chaleur, qui sont en étroite interaction. Il est, par exemple, bien connu que le cycle évaporation-condensation de l'eau atmosphérique est à la fois un moteur essentiel de la circulation générale, et une source majeure de transfert d'énergie des régions tropicales, au bilan radiatif excédentaire, vers les régions tempérées ou polaires dont le bilan radiatif est déficitaire. Pareillement, les flux de vapeur d'eau et de gaz carbonique, contrôlés par la végétation, dépendent d'un équilibre énergétique qui est lui même influencé par la dynamique de la végétation.

2.2 Une véritable pluridisciplinarité

Le projet HAPEX-SAHEL ne peut exister que grâce à la collaboration entre plusieurs disciplines. Atmosphériciens, hydrologues, physiciens du sol et de l'interface végétation-atmosphère, pédologues, géologues, écologues, climatologues sont les principaux intervenants. HAPEX-SAHEL démarre dès cette année par une pré-campagne, associant hydrologues, physiciens du sol, pédologues, géologues, écologues, et bioclimatologues, destinée à améliorer nos connaissances sur le milieu physique et sur certains processus qui sont très variables dans le temps, notamment l'excitation du système hydrologique par les précipitations. Deux campagnes lui succéderont en 1991 et 1992, qui couvriront l'ensemble des phénomènes hydrologiques et météorologiques durant toute la saison des pluies. Puis viendra la Période d'Observation Intensive

(POI) qui débutera en septembre 1992 et se concentrera sur deux "super-sites" (fig. 2). Un troisième super-site potentiel est localisé en dehors du degré carré de référence, afin de tester les effets du gradient latitudinal de précipitation sur les processus étudiés

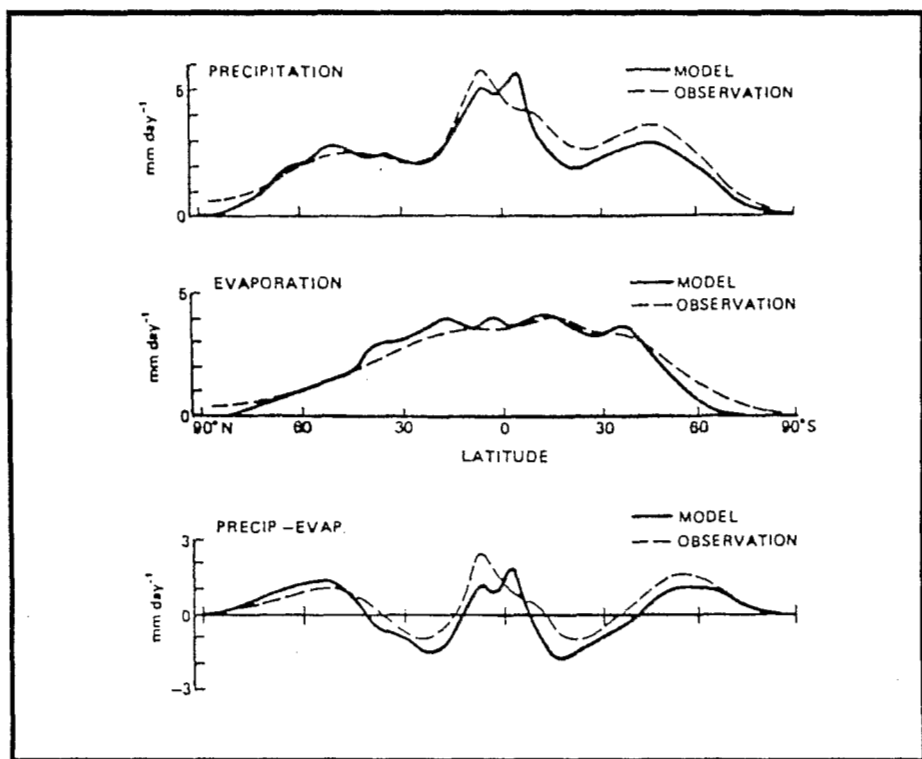


Figure 1 . Comparaison entre valeurs observées de précipitation et d'évaporation, et valeurs calculées par un Modèle de Circulation Général (d'après Mitchell, 1983)

2.3 Du km² à l'ensemble du Sahel

Certains de ces processus seront analysés à petite échelle (de 1x1 km² à 10x10 km²), et devront par la suite être intégrés sur l'ensemble du degré carré (100x100 km²) qui constitue la surface de référence de l'expérience (13°-14° N; 2°-3° E). L'extension des résultats à l'ensemble de la zone sahélienne reposera, elle, sur un suivi par satellite, et une forte composante télédétection a été en conséquence incluse pour étudier le passage de la vérité terrain sur la surface de référence (100x100 km²) à l'image satellitaire. Il s'agit là aussi d'une question d'échelle: résolutions différentes d'un côté et intégration sur de surfaces non instrumentées de l'autre. Ces questions vont être illustrées dans ce qui va suivre par quelques réflexions sur la modélisation hydrologique que l'on envisage de mettre en oeuvre.

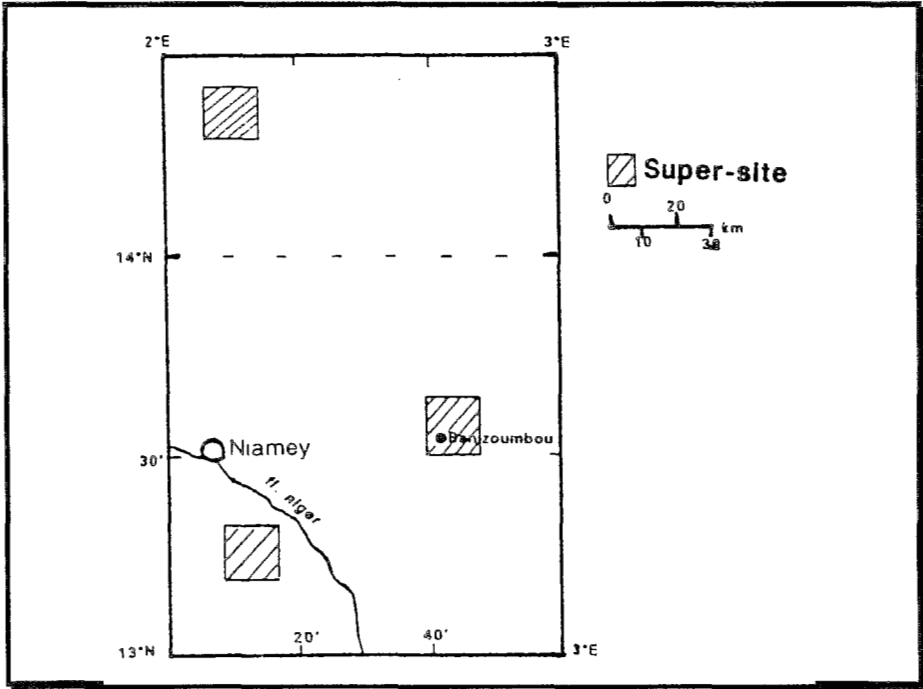


Figure 2. La zone d'étude de HAPEX-SAHEL. Elle recouvre un carré mesurant un degré en longitude et un degré en latitude. Un super-site sera de plus installé plus au nord, dans la région de Ouallam, pour étudier l'influence du gradient pluviométrique

3. CONSTANTES DE TEMPS ET RESOLUTION SPATIALE

3.1 Les précipitations

Il s'agit de procéder à des mesures qui permettront de tester l'influence, supposée grande, de la répartition spatiale des précipitations sur les modalités du stockage de l'eau dans le sol et en surface. Comme les différentes composantes de la réponse du système ont des temps caractéristiques très variables, la première exigence est d'être capable d'appréhender cette répartition des pluies pour des pas de temps pouvant descendre jusqu'à 15 minutes et sur des surfaces allant de $1 \times 1 \text{ km}^2$ à $100 \times 100 \text{ km}^2$.

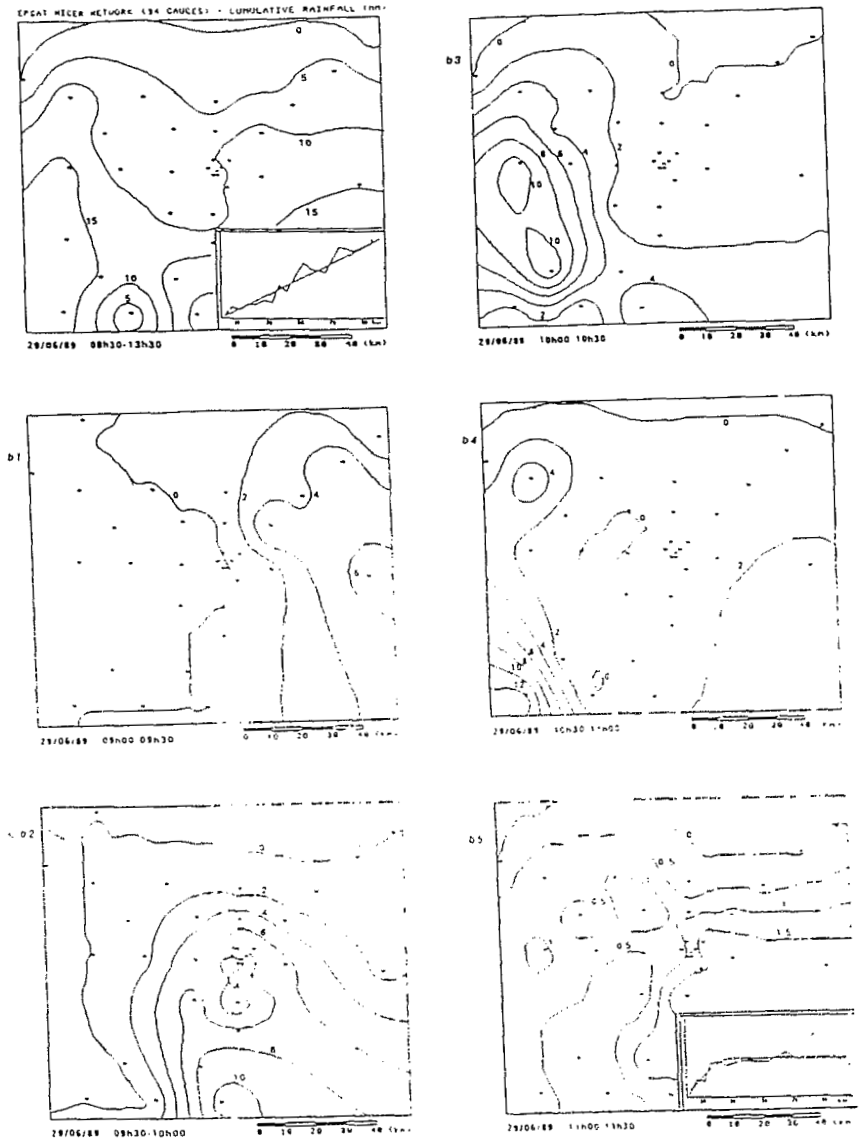


Figure 3. Isohyètes d'une ligne de grains (29 juin 1989). En haut à gauche : cumul sur l'évènement. b₁ à b₅ : cumuls sur une demi-heure au passage de la partie convective

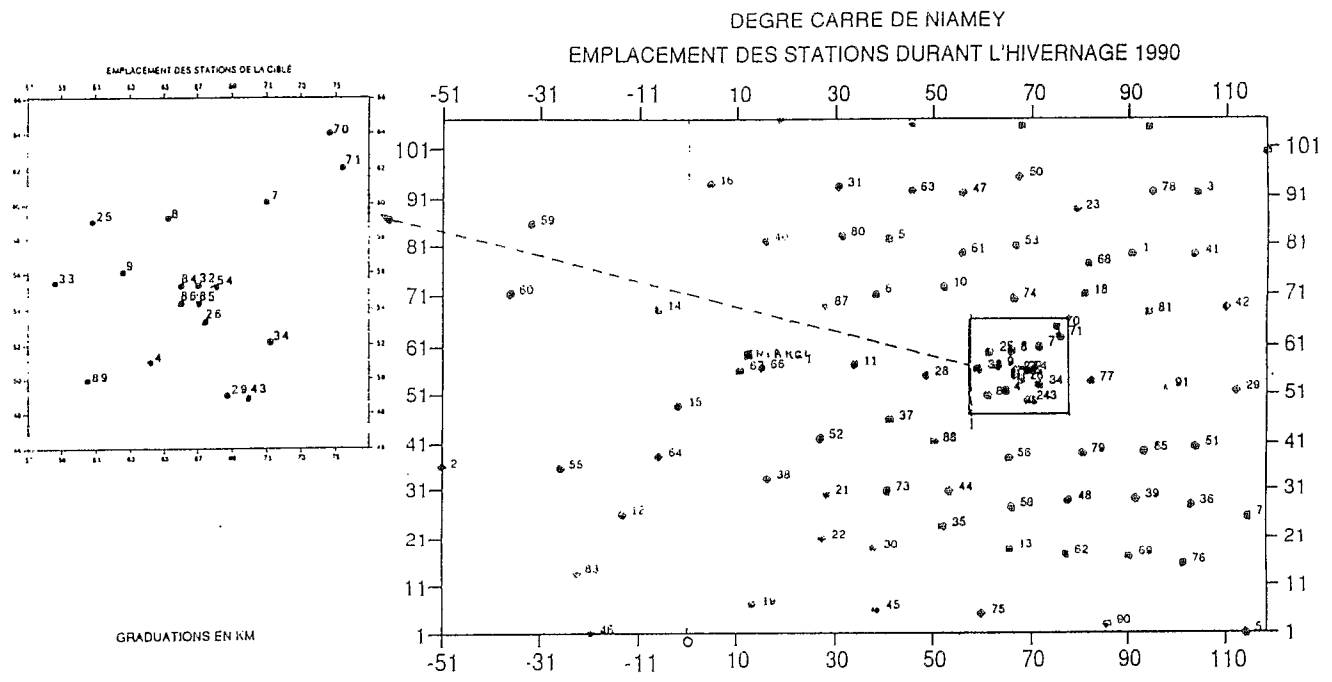


Figure 4 : le réseau de pluviographes à mémoire statique.

De ce que l'on connaît sur l'extrême variabilité spatiale des pluies en milieu sahélien déjà soulignée par Girard (1975), et confirmée à petite échelle par l'exploitation des données de la campagne EPSAT-NIGER de 1989 (fig. 3), on est amené à admettre qu'un réseau de capteurs ponctuels ne peut fournir à lui seul une estimation précise des quantités d'eau tombées en tout point d'intérêt pour l'hydrologue, aux pas de temps faibles (inférieurs à 30 minutes), sauf à mettre en place un réseau de plusieurs milliers d'appareils.

Parmi les alternatives disponibles, le radar météorologique utilisé en association avec un réseau relativement dense de pluviographes à mémoire statique (1 poste pour 200 km² environ) paraît la plus crédible, même si l'assimilation de données sol et radar est loin d'être une technique totalement maîtrisée. Pour pouvoir étudier la fiabilité de la mesure radar, et pour caractériser la répartition spatiale des précipitations, on disposera, à compter de 1990, d'un réseau de 83 stations sur le degré carré (soit 85 pluviographes, deux sites étant équipés de deux appareils chacun pour comparer la pluie au sol et la pluie à 1m), et de 10 stations plus à l'ouest, donc un total de 95 appareils (fig. 4).

La géométrie du réseau sol a été établie pour les besoins de l'expérience EPSAT-Niger, de telle sorte qu'on puisse couvrir des résolutions allant de 1 à 100 km. Ceci permet d'étudier aussi bien les questions d'échantillonnage de la pluie ponctuelle mesurée par le pluviographe que la variabilité de la relation Z.R (facteur de réflectivité radar-pluie au sol). Cette variabilité est explicable en partie par la nature différente de l'échantillonnage des deux capteurs, et en partie par les erreurs de mesure inhérentes à chacun d'eux. Si les erreurs de mesure du pluviomètre sont assez bien connues, fortement liées au vent notamment et relativement systématiques, il n'en est pas de même pour le radar. L'instabilité électronique, les effets d'atténuation (qui dépendent de la structure du système précipitant et sont donc instationnaires) sont des sources d'erreur difficilement maîtrisables et dont l'appréhension nécessite des études spécifiques.

3.2 La redistribution de l'eau précipitée

Suite aux nombreuses études de ruissellement menées au Sahel, l'ORSTOM a acquis des connaissances sur les mécanismes élémentaires de production des écoulements superficiels et d'infiltration (voir entre autres, Rodier, 1975, Chevallier et al., 1985, Casenave et Valentin, 1989) ou d'évaporation (e.g; Pouyaud, 1986). Les premières tentatives de modélisation à l'échelle du bassin de quelques dizaines de km², menées notamment par Girard (1975), se sont révélées en partie décevantes. On ne disposait en effet à l'époque ni de la vision d'ensemble permettant de traiter le problème dans sa globalité, ni des moyens d'instrumentation qui auraient permis de quantifier les différents termes du bilan. La plupart des études menées par la suite en milieu sahélien n'ont été que la

répétition d'un schéma identique: instrumentation, mesures, accumulation de données, traitement et, éventuellement, modélisation. Cette approche, tout en permettant de diversifier les conditions d'observation et donc d'améliorer nos capacités à décrire, n'a pas débouché sur la mise au point de modèles adaptés au calcul des bilans des différentes aires de stockage.

D'une manière générale, qu'elle s'attache à des bassins de réseau ou expérimentaux, la modélisation hydrologique est rarement précédée d'un schéma d'instrumentation conçu en fonction de cette modélisation. On mesure donc la pluie en certains points du bassin et le débit à l'exutoire et on cherche, le plus souvent à l'aide d'un calage numérique aveugle, à ajuster la série des débits calculés par un modèle à la série des débits observées. Il est rare que le modèle ait été conçu en fonction des objectifs spécifiques de la modélisation, et le calage numérique n'est qu'une technique pour le forcer à adapter ses paramètres aux séries observées, sans aucun égard pour la réalité physique. Cette démarche peut se justifier en hydrologie opérationnelle et tant qu'on ne cherche pas à transposer le modèle. Elle s'apparente alors à une analyse en corrélation un peu sophistiquée, où le modèle linéaire est remplacé par un modèle non linéaire plus ou moins conceptuel.

A l'inverse, elle ne peut donner aucun résultat tangible dès lors que l'on s'intéresse à la transposabilité du modèle, soit parce qu'il doit être intégré sur des surfaces plus grandes que celles sur lesquelles il a été validé, soit parce qu'il faut l'appliquer sur des zones où on ne dispose que d'un petit nombre d'observations élémentaires.

Dans l'étude de la redistribution de l'eau après un événement pluvieux, on peut distinguer a priori trois cinétiques.

Cinétique rapide	Stockage superficiel, écoulements de surface et de sub-surface.
Cinétique lente	Redistribution de l'eau dans le sol et mouvements vers les nappes.
Déstockage	Reprise de l'eau par évaporation sous contrôle de la végétation.

La principale contribution attendue de l'hydrologue concerne la cinétique rapide, mais il n'est pas compétent à lui tout seul pour en traiter tous les aspects. Réciproquement, il ne peut se désintéresser de la cinétique lente et du déstockage, car ils conditionnent l'état du système au commencement d'un nouvel événement pluvieux. La cinétique rapide est conditionnée par une variable de forçage externe (les précipitations), une variable d'état très souvent dominante (l'humidité du sol) et les variables statiques décrivant un milieu physique donné. La schématisation des relations existant entre ces trois groupes de variables est la base du modèle hydrologique, caractérisé notamment par l'échelle à laquelle ces relations sont envisagées. Cette échelle est elle-même fonction de la compréhension

déjà acquise sur le fonctionnement du milieu, des possibilités instrumentales et des objectifs assignés au modèle.

4. UNE MODELISATION PARTICULIERE

4.1 Les grandes unités du système hydrologique

En zone tropicale sèche, et plus encore au Sahel, la part respective de l'infiltration, du ruissellement de surface et de l'évaporation dans le bilan hydrologique est très différente de ce qu'elle est en zone tempérée ou en zone équatoriale. L'évaporation excède largement l'infiltration au point que dans les zones de pluviométrie inférieures à 400 mm, il a été avancé que l'infiltration est inexistante. En effet, le réseau de drainage n'est bien marqué que sur de petites portions de versant où la pente est significative. Ces versants se terminent en chanfreins, généralement sableux, où l'eau s'écoule de façon erratique et s'infiltré. Plus à l'aval encore, on va rencontrer soit des bas-fonds endoréiques, soit des émissaires hydrologiques dont certains ne fonctionnent même pas une fois par saison des pluies, du fait de la forte infiltration sur les chanfreins. Dans les deux cas l'eau ainsi infiltrée est en partie concentrée sur place dans les couches du sol où la végétation pourra l'utiliser ultérieurement, et en partie drainée vers la nappe phréatique, contribuant à la remontée de celle-ci, dont le niveau peut alors localement se rapprocher de la surface, favorisant également l'évapotranspiration.

Enfin, un autre élément déterminant du paysage hydrologique est constitué par la brousse tigrée implantée sur les plateaux gréseux. La brousse tigrée est un milieu caractérisé par son manque de relief en grand, l'homogénéité relative de sa végétation, et un sol de faible épaisseur (20 à 80 cm) recouvrant des cuirasses latéritiques. La végétation s'y présente en bandes, ou arcs, plus ou moins continues, qui lui confère, vu d'en haut, l'aspect d'une peau de tigre, d'où son nom.

En l'absence de réseau hydrographique, la cinétique rapide se limite ici, après remplissage des dépressions superficielles qui jouent probablement un grand rôle, à une alimentation des nombreuses mares de taille assez faible et des talus qui font communiquer les plateaux avec les bas-fonds (fig. 5).

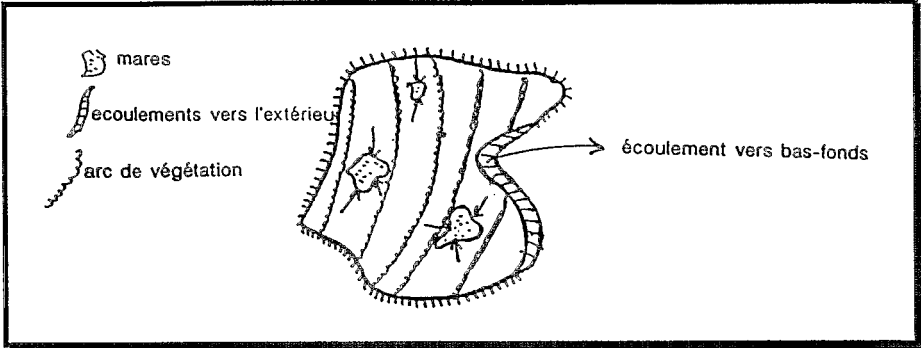


Figure 5. Schéma d'une zone de brousse tigrée

Cette juxtaposition de deux grandes unités de fonctionnement hydrologique (auxquelles on peut en ajouter une troisième, la vallée sèche du Dallol Bosso, qui borde le degré carré à l'est, et qui doit être traitée comme une entité à part), impose de prévoir une instrumentation en conséquence. D'une part, on doit essayer de déterminer les différents termes du bilan sous brousse tigrée, le ruissellement ne jouant qu'un rôle mineur sauf sur les talus. D'autre part, il faut déterminer, sur les zones de versant, le rôle du ruissellement dans la redistribution de l'eau, sachant qu'une faible part s'écoule en dehors des bassins de taille moyenne et rien (sauf débordements exceptionnels) en dehors des mares de bas fonds. Bien entendu il faudra, pour la modélisation être capable de relier zones de brousse tigrée et de versants, ce qui pose deux problèmes. Le premier est celui du fonctionnement : i) rôle de la texture et de la profondeur des sols, et de la pente dans la formation des écoulements au contact plateaux / versants; ii) peut-il y avoir alimentation de ces écoulements de versant par mise en charge de nappes perchées à partir des infiltrations sur le plateau ? Le second problème est celui de l'évaluation (ou de la modélisation) des zones de drainage externe des plateaux, lors de l'extension à des zones non instrumentées. D'une manière générale, le défi à résoudre est de passer d'une instrumentation sur des zones échantillons à une modélisation d'ensemble sur des surfaces beaucoup plus grandes qui ne pourront être décrites comme la juxtaposition d'aires élémentaires, répertoriées et classifiées selon les critères déterminés à partir des zones échantillons.

En effet, il est impensable, dans l'état actuel des moyens de mesure, de fournir une image suffisamment fidèle (moyenne échelle) et précise (petite échelle) de l'ensemble du milieu (pédologie, végétation, géologie, topographie, caractérisation hydrodynamique des sols, ...) que nécessiterait la mise en oeuvre d'un modèle spatialisé classique. Cela est techniquement réalisable en simplifiant à l'extrême la partition du paysage, mais alors la validité des modèles élémentaires, calés sur les zones étudiées en détail, risque d'être remise en cause. Ainsi, à supposer que le modèle de base repose sur l'estimation précise de paramètres locaux, tels que la profondeur du sol, ses caractéristiques hydrodynamiques et la topographie de

petite échelle, lorsqu'on l'applique sur des zones où ces différents paramètres ne peuvent être évalués que très grossièrement (des erreurs de 100 % ne sont pas à exclure), il deviendra illusoire de l'utiliser sans calage sur des séries observées. Les incertitudes sur les paramètres déduits des cartes ou de quelques observations ponctuelles, conduisent à des situations de compensation très forte entre ces paramètres, et donc à une multiplicité des solutions possibles que seule une optimisation numérique aveugle est à même de discriminer.

Même à supposer que l'on soit capable d'équiper chaque émissaire hydrologique drainant plus de 100 km² et chaque mare de bas fonds, les imprécisions sur la mesure des débits et des fluctuations des volumes stockés seraient telles, que l'optimum numérique ne serait qu'un compromis sans signification physique. Dans l'incapacité où on se trouve alors d'expliquer cet optimum par l'influence respective des erreurs de mesure, des erreurs de spécification des paramètres et des erreurs de formulation du modèle lui-même, toute amélioration ultérieure de ses performances, basée sur d'autres expériences, devient un jeu de hasard.

Il n'existe, bien entendu pas de solutions simples à ces difficultés qui, au demeurant, se rencontrent fréquemment en hydrologie. On peut au mieux essayer de conserver une certaine cohérence entre la structure du modèle mis en oeuvre, la nature des données que l'on pense pouvoir recueillir (échelle d'intégration, précision, ...) et nos connaissances sur les mécanismes, quand elles existent.

4.2 Le cas particulier de la brousse tigrée

Comme on l'a vu plus haut, la brousse tigrée est un milieu hostile pour l'hydrologue. Les écoulements y sont pratiquement inexistants. La répartition de l'eau est avant tout sous le contrôle de la végétation, ce qui requiert une approche tout à fait inhabituelle pour lui. Trois échelles de travail sont à considérer pour étudier les flux hydriques sous brousse tigrée : l'arbre; l'arc de végétation; l'ensemble du plateau physiquement bien délimité par les talus qui l'entourent.

Introduire l'arbre en tant que tel dans le modèle hydrologique est exclu. On retomberait dans les ornières de l'intégration d'éléments disparates dont on ne connaît pas les caractéristiques individuelles. Des études sur l'enracinement peuvent néanmoins être intéressantes pour apprécier la possibilité de reprise par évaporation de l'eau des nappes directement à partir des arbres du plateau, information utile dans la modélisation du déstockage.

On peut alternativement s'intéresser à la dynamique de l'eau circulant entre arcs de végétation et plages dénudées. Les observations de terrain amènent à constater que l'eau s'accumule au niveau des arcs, alors qu'entre les arcs elle doit s'évacuer soit par drainage interne, soit par écoulement vers des zones de

concentration : les arcs eux-mêmes ou de petites mares repérables par photographie aérienne. Ces mouvements de surface et sub-surface dépendent de la micro topographie locale, de la texture et de la structure des sols, tous paramètres qu'il semble vain de vouloir cartographier sur de grandes étendues. A supposer donc que l'on soit capable de modéliser le fonctionnement d'un arc, on se heurterait pour l'extension spatiale aux difficultés de représentation de l'agencement des arcs, doublé d'une grande incertitude sur les lames d'eau précipitées à cette échelle et l'humidité des horizons superficiels des sols.

La solution restante est donc de raisonner directement à l'échelle d'un ensemble homogène de brousse tigrée. A cette échelle, on ne peut transposer les modèles qui auraient été validés expérimentalement au niveau de la parcelle, puisque leurs paramètres n'ont plus aucun sens et que d'autres mécanismes, absents à petite échelle, interviennent. Une modélisation globale, faisant abstraction des connaissances que nous possédons sur la répartition spatiale des pluies et que nous pouvons acquérir sur celle de l'humidité du sol, ne constitue pas non plus une alternative pertinente puisque l'on sait que ce type de modèle est difficilement transposable à d'autres domaines que ceux sur lesquels ils ont été calés.

La nature du modèle à mettre en oeuvre doit être adaptée à la nature des données dont nous pouvons disposer. Ces données se présentent essentiellement sous une forme stochastique. Les premiers traitements effectués sur les données de la saison des pluies 1989 ont montré que, pour les lignes de grain, le réseau de pluviographes fournissait à lui seul une bonne estimation du champ des lames d'eau moyennes précipitées sur des surfaces de $5 \times 5 \text{ km}^2$, et pour des pas de temps dépassant 30 minutes (Thauvin and Lebel, 1989). L'estimation simultanée de la covariance spatiale du processus aléatoire débouche par ailleurs sur la possibilité de simuler des champs de précipitations sur les zones moins bien instrumentées. Enfin, l'apport du radar, et le renforcement local de la densité des pluviographes, permettent d'envisager de réduire la surface minimale d'estimation à une taille de $1 \times 1 \text{ km}^2$ et le pas de temps à 15 minutes. A condition d'obtenir des renseignements du même ordre sur l'humidité des sols, une modélisation stochastique du ruissellement de surface est envisageable, moyennant certaines études de fonctionnement à cette échelle et une description appropriée du milieu.

Pour valider un tel modèle, on procéderait également par échantillonnage, en suivant l'évolution du niveau de l'eau dans un certain nombre de mares réparties sur l'ensemble. La densité de la végétation, la nature et l'épaisseur des sols, les surfaces drainées vers les mares et vers l'extérieur, la topographie d'ensemble y seraient cartographiées précisément. On chercherait également une méthode permettant de caractériser la micro topographie, après avoir vérifié son importance présumé dans le stockage de l'eau in situ.

Dans cette étape de mise au point du modèle, on décrirait donc "exactement" le milieu physique de petite échelle d'une part et stochastiquement celui de micro échelle, ainsi que les données de précipitations et d'humidité des sols d'autre part.

La zone de brousse tigrée située à l'est du bassin de Sama Dey se prêterait bien à ce travail. Elle a grossièrement la forme d'un carré de 7,5x7,5 km².

Parallèlement à ces études concernant la redistribution de l'eau à la surface et dans le sol, un suivi géochimique et isotopique de ces mares serait une contribution utile à l'étude du déstockage en permettant de séparer les variations de niveau dues à l'évaporation de celles dues à un drainage profond vers les nappes.

5. CONCLUSION

La mise sur pied de grosses expériences multidisciplinaires est indispensable pour approcher globalement les problèmes de climat et d'environnement qui apparaissent de plus en plus comme cruciaux pour l'avenir de notre planète. L'ampleur des moyens dégagés et la qualité reconnue des équipes impliquées ne doivent pas masquer que nous sommes encore très mal préparés à ce type de projet. Nos habitudes de scientifiques spécialisés, la tendance à isoler des questions pointues et à les traiter indépendamment du contexte dans lequel elles prennent leur sens, nous éloignent de cette vision d'ensemble si nécessaire à la réalisation d'une expérience telle que HAPEX-SAHEL. Pour ce qui concerne l'hydrologie, les perspectives ouvertes par HAPEX-SAHEL concernent aussi bien l'ouverture vers d'autres disciplines et le retour vers une hydrologie de grande échelle, que des progrès méthodologiques qui, pour être moins spectaculaires, ne devraient pas pour autant être tenus pour négligeables.

Ainsi, on peut espérer retirer des enseignements fructueux de la comparaison entre un modèle spatialisé classique et un modèle distribué et stochastique. On s'efforcera également d'intégrer la vision des spécialistes des autres disciplines (physiciens du sol et de l'interface végétation - atmosphère en particulier), non pas seulement au niveau de la description des phénomènes, mais également à celui de leur modélisation. Ceci implique de réfléchir à un modèle au sein duquel plusieurs échelles seraient emboîtées. Pour atteindre ces objectifs, deux conditions sont impératives : 1) traiter les données rapidement pour corriger d'une campagne sur l'autre les protocoles de mesure et favoriser la confrontation des points de vue; 2) définir un cadre d'échange et de validation de ces données, acquises avec des résolutions spatiales et temporelles fort diverses. Il s'agit là d'un travail en soi, dont la difficulté et l'importance ne doivent pas être sous-estimées.

REFERENCES

- CASENAVE, A., et C. VALENTIN, Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, Collec. Didactiques, ORSTOM ed., Paris, 1989.
- CHEVALLIER, P., J. CLAUDE, B. POUYAUD, A. BERNARD, Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi, Collection travaux et documents N° 190, ORSTOM ed., Paris, 1985.
- EAGLESON, P. S., Global scale hydrology, Water Resour. Res., 22(9), 6S-14S, 1986.
- GATES, W.L., The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic change, Report of the Study Conference on Sensitivity of Ecosystems and Society to Climatic Change, World Clim. Impact Stud. Program, Worl Meteorol. Org., Geneva, 1983.
- GIRARD, G., Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'oued Ghorfa (Mauritanie), Cah. O.R.S.T.O.M., sér. hydrolog., 12(3), 167-188, 1975
- HOEPFFNER, M., T. LEBEL and H. SAUVAGEOT, EPSAT-NIGER a pilot experiment for rainfall estimation over West Arica, WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement, Proceedings pp 251-259, St Moritz, 1989.
- MITCHELL, J. F. B., The hydrological cycle as simulated by an atmospheric general circulation model, in Variations in the Global Water Budget, edited by A. Street-Perrott and M. Beran, pp. 429-446, D. Reidel, Hingham. Mass., 1983.
- POUYAUD, B., Contribution à l'évaluation de l'évaporation des nappes d'eau libre en climat tropical sec, exemple du lac de Bam et de la mare d'Oursi (Burkina Faso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien, Collec. Etudes et Thèses, ORSTOM Ed., Paris, 254 p., 1986.
- RODIER, J., Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain, Collec. Travaux et Documents N° 146, ORSTOM Ed., Paris, 121 P., 1975.
- THAUVIN, V., and T. LEBEL, EPSAT : study of rainfall over the SAHEL small time steps using a dense network of recording raingauges. WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement, Proceedings pp 260-267, St Moritz, 1989

**ANALYSE DE LA DYNAMIQUE
DES SAVANES D'AFRIQUE DE L'OUEST:
MECANISMES SOUS-JACENTS ET
SPATIALISATION DES PROCESSUS
(PROJET SALT: LES SAVANES A LONG TERME)**

MENAUT J.C., PODAIRE A.

RESUME

Le projet SALT a pour objectifs de comprendre les mécanismes qui régissent la dynamique des savanes, d'identifier, de quantifier, de modéliser et de prédire les modifications de ces mécanismes sous l'effet de perturbations naturelles et humaines. Sur des sites disposés sur un gradient d'aridité croissante, les recherches intégreront travaux de terrain et perception satellitaire. Ils porteront sur: 1) l'analyse de la réponse des écosystèmes aux perturbations; 2) la détermination des seuils de perturbation au-delà desquels les écosystèmes sont irréversiblement modifiés; 3) l'étude des échanges d'énergie, d'eau, de CO₂ et de gaz-traces (rétroactions écosystèmes-climat); 4) la spatialisation des processus à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest. Le projet possède une forte vocation interdisciplinaire et s'appuie sur de nombreuses spécialités de l'écologie s.l. Il est mené en étroite collaboration avec des recherches atmosphériques (chimie, physique et météorologie).

Les savanes d'Afrique de l'Ouest (3 M km²) jouent un rôle important sur la circulation atmosphérique (flux d'eau, de gaz carbonique, d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures). En retour, tout changement climatique entraîne une forte modification du fonctionnement des écosystèmes et des surfaces relatives occupées par les divers types de couverture végétale, naturels ou exploités. Plus importants encore seront les changements à venir dans le court terme, du fait de l'expansion démographique et de l'amélioration des modes de culture.

Les objectifs du projet sont de:

Identifier et analyser la réponse des savanes aux perturbations d'origines naturelle et anthropique: modification des processus et de la nature des systèmes;

Spatialiser l'ensemble des processus à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest: variation de l'intensité des processus et de la surface relative des différents types de couverts végétaux; incidence sur le climat régional et rétroaction sur les écosystèmes;

Déterminer le rôle des savanes dans les échanges hydriques et gazeux (CO_2 , NO_x , C_xH_y) avec l'atmosphère.

Les savanes forment une entité fonctionnelle liée à l'équilibre herbes/arbres. La variabilité spatio-temporelle des conditions du milieu et la forte emprise humaine induisent une grande hétérogénéité des structures observées. Il importe donc d'utiliser: une approche comparative, expérimentale et modélisatrice :

Analyse détaillée des processus en cause: variations temporelles; rôle fondamental de la variance des phénomènes.

Prise en compte de l'ensemble des échelles spatiales (du site à la région): le passage à chaque niveau d'intégration écologique, les propriétés émergentes de chaque niveau.

Principe de non-linéarité de la réaction des systèmes écologiques sur le long terme.

Nécessité des études à long terme: processus lents, variables, subtils ou complexes; rôle déterminant des phénomènes épisodiques; importance de la prise en compte du passé.

ANALYSE DES PROCESSUS ECOSYSTEMIQUES

L'influence de la variabilité climatique sera analysée sur un gradient d'aridité croissante des savanes guinéennes au Sahel. Chaque site fera l'objet de recherches particulières liées aux caractéristiques édaphiques et végétales, et aux modes d'exploitation locaux (systèmes "naturels" vs. systèmes fortement anthropisés). Les paramètres-clefs des processus seront étudiés comparativement sur les 8 autres sites.

Gradient d'aridité croissante:

Lamto (Côte-d'Ivoire): savanes guinéennes; dynamique des flux de matière et des communautés végétales: des processus de base à la structuration du paysage

Ouango Fitini (RCI): savanes sud-soudaniennes; impact du feu, des jachères et du pâturage; l'hétérogénéité à l'échelle du paysage

Ouarkoye (Burkina Faso): savanes soudaniennes

Bidi (BF): savanes soudano-sahéliennes

Relations agro-sylvo-pastorales; analyse de l'hétérogénéité locale, de l'écosystème à la région

Banh (BF): savanes sahéliennes; agropastoralisme

Gourma (Mali): savanes sahéliennes; impact du pâturage; désertification

Bourem (Mali): savanes saharo-sahéliennes; désertification

Modifications longitudinales des effets climatiques:

Souilène (Sénégal): savanes sahéliennes intensément pâturées

Bidi, Banh (BF; savanes soudano-sahéliennes)

Niamey (Niger): savanes sahélo-soudaniennes, fortement anthropisées; relations agropastorales

PROCESSUS ETUDIÉS

Echanges sol-végétation-atmosphère

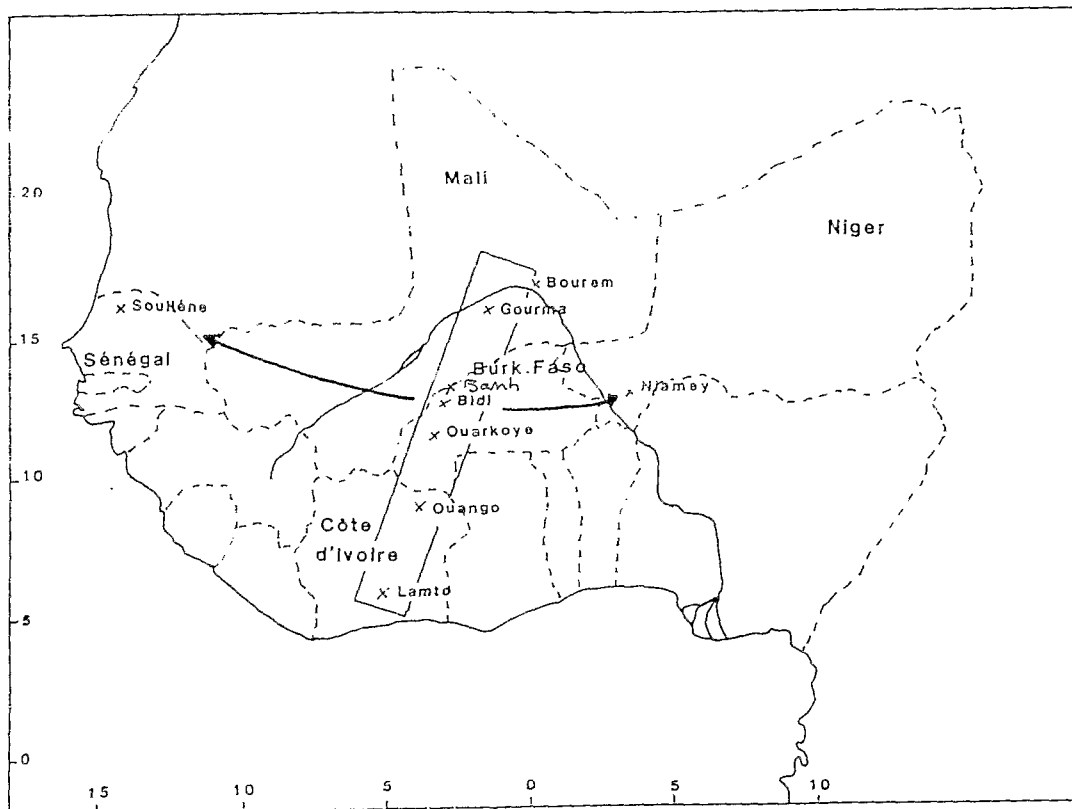
Décomposition et constitution de la matière organique des sols: dynamique de l'équilibre minéralisation-humification; cycle de l'azote.

Etat hydrique du sol; états de surface et érosion pluviale.

Processus de la production primaire épigée et hypogée par groupe fonctionnel de plantes.

Echanges CO_2 - H_2O aux niveaux du sol et de la végétation.

- Stocks et flux de carbone dans la végétation et le sol
- Bilans énergétiques, hydriques et radiatifs



Spatialisation des processus

Dynamique des populations végétales: équilibres annuelles-pérennes, herbes-arbres;

Structure des peuplements ligneux;

- Processus de structuration du paysage

Effets des perturbations (le feu, en particulier) *in natura* et expérimentales sur l'ensemble des processus précédents;

Création de la mosaïque végétale à l'échelle de la région: dynamique des systèmes naturels et exploités par l'homme (pâturages, défrichements et jachères)

Variation du fonctionnement de la mosaïque et de ses éléments en fonction du climat.

- Dynamique du système savane en réponse aux modes d'exploitation, aux perturbations et aux changements climatiques

METHODES ET TECHNIQUES UTILISEES: LES PROBLEMES D'ECHELLE

Extension temporelle: intégration journalière, décadaire, mensuelle et annuelle des mesures

Extension spatiale:

- Etablissement de relations entre les types de végétation (composition, structure, biomasse) et les caractéristiques du sol: physico-chimie, matière organique (quantité, stabilité);
- Utilisation des méthodes de la géostatistique: moyennes pondérées, distributions de fréquence, relations multivariées, variogrammes et dimensions fractales;
- Etablissement de relations entre le complexe sol-végétation et les caractéristiques géomorphologiques et climatiques.

Variations spatiales et temporelles exprimées sous formes de modèles corrélatifs et mécanistes:

- le long du gradient (calage sur les 7 sites et sur quelques relevés-tests intermédiaires),

- sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (les 2 autres sites et les données publiées).

On adaptera aux conditions de la savane les modèles disponibles sur:

- simulation du régime hydrique du sol;
- simulation du cycle de la production primaire en fonction de l'eau disponible;
- simulation de la décomposition, de la constitution et du renouvellement de la matière organique;
- simulation de la dynamique spatiale des ligneux (couplée à celle de la production herbacée);
- simulation de la succession végétale

Intégration dans un modèle générique de fonctionnement et de dynamique des savanes

APPROCHE SATELLITAIRE DE LA SPATIALISATION

Les indices de végétation différentiels normalisés (NDVI) peuvent être corrélés à la capacité d'interception du rayonnement photosynthétiquement absorbé (PAR) par les couverts végétaux, ce qui permet d'estimer la production primaire saisonnière et d'avoir un accès aux flux de CO_2 . Il y a donc possibilité de lier les NDVI, l'albédo et la température de surface accessibles par des données spatiales et d'en déduire des comportements-type en fonction des contraintes climatiques à l'échelle globale. Le projet imbriquera étroitement:

- les mesures de terrain: établissement de relations entre les caractéristiques du sol (état de surface) et du couvert végétal (structure, indice foliaire, biomasse) et les mesures radiométriques au sol;
- les images à haute résolution (relations radiométriques et superficie des différents milieux).

L'analyse stratifiée des images en fonction des classes retenues permettra:

- l'estimation à l'échelle régionale de la production primaire nette et son suivi saisonnier et interannuel;
- la validation des données spatiales.

L'approche globale (NOAA/AVHRR) sera couplée aux instruments plus fins que sont SAR, TM et SPOT (sur sites et dates échantillons) afin d'étudier la signification de paramètres locaux à une plus vaste échelle. La spatialisation se fera donc à deux niveaux:

- intégration de l'hétérogénéité locale dans une image de synthèse,
- extrapolation à l'échelle de la région et de l'Afrique de l'Ouest.

L'objectif est d'utiliser les données spatiales pour:

- réaliser des cartes de la production primaire terrestre aux échelles locales et régionales (Afrique de l'Ouest);
- estimer les flux de CO₂ échangés entre le sol et l'atmosphère, en particulier sa fixation par la végétation et sa libération par les feux de brousse;
- réaliser des cartes de l'évolution du mode d'occupation des terres (zones pâturées, cultivées, en jachère ou inexploitées).

RESULTATS ATTENDUS

Grâce à l'analyse comparée des effets de la variabilité climatique et des perturbations sur chaque site, le projet devrait contribuer à une meilleure compréhension des modalités du fonctionnement global des savanes d'Afrique de l'Ouest et de leurs échanges avec l'atmosphère. Il devrait également fournir une série de scénarios de l'évolution de ces savanes sous l'effet des changements à venir

- Modèle générique de fonctionnement des savanes
- Cartographie régionale de variables-clefs à différentes échelles d'espace et de temps:
 - indices de végétation,
 - flux de carbone (+ CO₂ et gaz trace)
 - évapotranspiration,
 - albédo et bilan radiatif,
 - rugosité de surface (sol, végétation, cultures).

POSITION INTERNATIONALE DU PROJET

Le projet s'inscrit dans la problématique de trois grands programmes internationaux qui ont choisi les savanes d'Afrique de l'Ouest comme une région-test d'application:

I. RESPONSES OF SAVANNAS TO STRESS AND DISTURBANCE (IUBS-UNESCO/MAB)

II. PRIMARY PRODUCTION AND ORGANIC MATTER CYCLING (SCOPE)

III. INTERNATIONAL GEOSPHERE-BIOSPHERE PROGRAMME (ICSU)

Ce projet sera également mené en collaboration avec divers groupes internationaux:

- Conservatoire et Jardin botaniques de Genève, Suisse
- Max Planck Institut für Chemie, Mainz, RFA
- GIMMS du NASA/GSFC, Greenbelt, USA
- Dept. Environ. Sci., Univ. Virginia, Charlottesville, USA
- Natural Resources Lab., Univ. Colorado, Fort Collins, USA
- Dept. of Wildlife & Ecology, CSIRO, Canberra, Australie
- Res. Sch. Biol. Sci., Austr. Nat. Univ., Canberra, Australie

LISTE DES LABORATOIRES PARTICIPANTS (contact)

Laboratoires français

- Lab. d'Ecologie, E.N.S., Paris (J.C. Menaut)
- L.E.R.T.S., CNES, Toulouse (A. Podaire)
- Lab. Biogéoch. Isotopes Stables, Univ. Paris VI, (A. Mariotti)
- Lab. IMAGEO (GDR 103), Paris (F. Cuq)
- Lab. d'Ecologie Végétale, Univ. Paris XI, Orsay (B. Saugier)
- I.E.M.V.T., Maisons-Alfort (J. César)
- Lab. de Zoologie, Univ. Paris XII, Créteil (C. Rouland)
- ORSTOM, Lab. de Pédologie, Bondy (C. Valentin)
- ORSTOM, Lab. de Télédétection, Bondy (M. Pouget)
- CEREG, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (J.P. Blanck)
- Lab. Ecophysiol. Plantes Four., INRA, Lusignan (G. Lemaire)
- Lab. Ecol. Microbienne, Univ. Lyon I, Villeurbanne (R. Lensi)
- CEFE-CNRS, Montpellier (sol: P. Bottner, modèles: S. Rambal)
- ENGREF, Montpellier (P. Couteron)
- ORSTOM, Montpellier (J.M. d'Herbes, G. Serpantié)
- IARE, Montpellier (A. Gerbe)
- ORSTOM, Centre de Dakar, Sénégal. (M. Grouzis)
- ORSTOM, Centre de Niamey, Niger (B. Monteny)

Programmes français menés en collaboration

Ces programmes sont étroitement complémentaires du projet proposé (voir annexes). Une coopération sera établie avec eux sur le terrain dès qu'ils seront opérationnels

Aérosols désertiques (G. Bergametti)
DECAFE (J. Fontan) (collaboration établie, cf annexe II.2)
HAPEX - Niger (M. Hoepffner)
Modèle de circulation générale (K. Laval)
Paléoécologie (R. Bonnefille)

Institutions et laboratoires africains

Tous les travaux de terrain et d'interprétation des données seront menés en étroite collaboration avec les équipes africaines intéressées. Dans la première phase de développement du projet, une collaboration bilatérale est déjà en place sur la base des conventions établies entre équipes africaines et françaises pour les différents sites d'études (travaux en cours). Par sa vocation régionale et par ses liens probables avec l'Observatoire du Sahara et du Sahel, le programme SALT devrait intéresser de nouvelles équipes nationales avec lesquelles des contacts sont en cours d'établissement.

ANNEXES

ANNEXE I. Mise au point d'une méthodologie d'estimation de la biomasse passée des diverses formations de savane

On connaît les grands traits de l'histoire climatique et végétale de l'Afrique de l'Ouest. Des travaux plus approfondis devraient permettre d'obtenir une meilleure connaissance de l'évolution spatiale et temporelle des limites Forêt-Savane-Désert, ainsi que de la surface occupée par le biome savane au cours du dernier grand cycle climatique.

Les techniques palynologiques classiques ne permettent cependant pas de définir les limites internes des diverses formations de savane, de reconstituer leur structure et donc de fournir une estimation, même approximative, de leur biomasse. Une méthodologie nouvelle, alliant aux méthodes de la palynologie celles de l'écologie, doit être développée:

- Calibration végétation - pollens - matière organique. Calage des structures présentes sur les spectres polliniques actuels;

mise en relation avec la biomasse et la matière organique en place.

- Histoire des flores

- Histoire de la matière organique (C14, T δ C13) et du sol (processus pédogénétiques)

- Utilisation des modèles mis au point sur l'actuel pour tenter une reconstitution des biomasses passées

• R. Bonnefille, Laboratoire de Géologie du Quaternaire, CNRS, Marseille

• J.C. Menaut, Laboratoire d'Ecologie, ENS, Paris

ANNEXE II. Etudes atmosphériques

II. 1. Aérosols de savane

Le programme vise à étudier les modalités de l'érosion éolienne dans les régions de savanes sèches et à analyser la composition chimique et granulométrique des sols et des aérosols. Le transport et la déposition des particules seront modélisés et validés sur le terrain le long du transect utilisé pour les études écologiques. Ce programme complète très utilement les travaux sur le bilan des éléments minéraux en savane puisqu'il a été montré que, dans les savanes les plus éloignées des sites majeurs d'érosion éolienne, les eaux de pluies apportaient environ 20 kg d'azote par hectare et par an, dont 15 sous forme organique.

• G. Bergametti, Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère, Université de Paris VII

II. 2. Programme DECAFE

Le volet savane de ce programme d'étude de la chimie de l'atmosphère en région intertropicale débute sur la station de Lamto (janvier 1991), avec une extension ultérieure vers le Nord. Une collaboration étroite a été mise en place tant pour l'analyse des effets des feux de brousse que pour l'étude des sources biogéniques de gaz-traces (composés de l'azote, du carbone et du soufre). Certaines mesures au niveau du sol et du couvert végétal seront menées en commun. Les analyses faites dans l'atmosphère (à différents niveaux) permettront une intégration spatiale des résultats de terrain.

- J. Fontan. Lab. Aérologie, Univ. Paul Sabatier, Toulouse (responsable DECAFE)
- J.P. Lacaux. Centre de Recherches Atmosphériques, Lannemezan (responsable DECAFE - Feux de savane)

II. 3. Programme HAPEX-Niger

Analyse des bilans hydriques, radiatifs et énergétiques sur une surface de 100x100 kms, composée de savanes naturelles et cultivées. Une étroite collaboration est prévue entre les deux programmes. Le site HAPEX-Niger fait l'objet d'une étude écologique (sol, végétation, bilans d'eau et de CO₂ au niveau du couvert végétal) menée, entre autres, par des participants au programme SALT. La complémentarité des deux programmes devrait dans une certaine mesure permettre une extension des résultats HAPEX à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, pour sa partie sèche tout au moins.

- M. Hoepffner, Dept. d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier

II. 4. Modèle de circulation générale

L'ensemble du programme (écosystèmes terrestres et atmosphère) couvre une vaste région qui, au-delà d'une forte hétérogénéité locale, présente une indéniable homogénéité fonctionnelle. Il se prête donc tout particulièrement à une articulation avec des travaux de climatologie régionale. Un modèle de circulation générale pour l'Afrique de l'Ouest, établi en liaison avec l'étude écologique des savanes et l'analyse chimique de l'atmosphère, serait une contribution majeure de la recherche française au programme IGBP.

- K. Laval. Lab. de Météorologie Dynamique, E.N.S., Paris

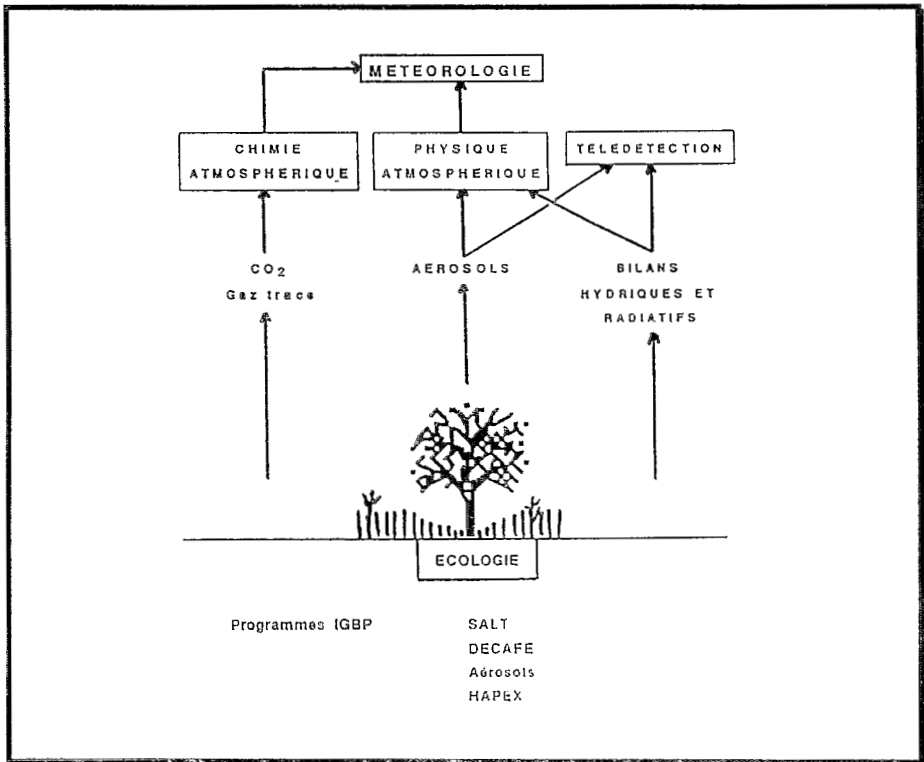
ANNEXE III. L'OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL

Programme conjoint des Ministères des Affaires Etrangères et de la Coopération, "Observatoire du Sahara et du Sahel" a pour but d'analyser les phénomènes de dégradation des terres et d'y proposer des remèdes. Pour l'Afrique de l'Ouest tropicale, il s'appliquera à l'ensemble des savanes soudanaises et sahéniennes. Certains objectifs SALT correspondent à ceux en cours de définition de l'OSS.

- M. Bied-Charreton, Min. Affaires Etrangères, Paris

CONTRIBUTION AU PROGRAMME IGBP

La figure ci-après montre les liens qu'entretient le programme SALT, d'essence écologique, avec des projets d'étude de l'atmosphère. L'ensemble de ces travaux devrait permettre de mieux saisir la contribution de cette vaste région au bilan carboné (source vs. puits) et au climat du globe.



ORSTOM Éditeur
Dépôt légal : mars 1991
Impression
ORSTOM BONDY

ISSN : 0767-2896
ISBN : 2-7099-1029-2
Editions de l'ORSTOM
72, route d'Aulnay
F-93143 BONDY Cedex

160F

Photographie de couverture
• *Scène Landsat*
du 26 décembre 1978. Delta du Niger
• *Pêcheur dans le delta du Niger*
(cliché Christophe Cambier)