

SÉMINFOR 2

LA MODÉLISATION : ASPECTS PRATIQUES ET MÉTHODOLOGIE

**Montpellier,
du 26 au 28 septembre 1988**

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection COLLOQUES et SÉMINAIRES

PARIS 1989

AVANT-PROPOS

L'objectif du second séminaire informatique de l'ORSTOM était de réunir les agents de l'Institut engagés actuellement dans la mise au point de modèles et de favoriser une réflexion sur cette pratique de plus en plus courante, en essayant, à partir d'expérience en cours, de répondre aux questions qui se posent à propos de:

- l'utilité des modèles : réalise-t-on un modèle dans un but pédagogique, exploratoire, opérationnel, etc...?
- la méthodologie sous-jacente : comment aborder les étapes standard d'identification, d'estimation, de validation et de mise en place?
- la maîtrise des outils employés : comment sont-ils identifiés ? comment sont ils articulés alors qu'ils proviennent de disciplines diverses : mathématique, logique, statistique, physique, informatique, etc... ?

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 Formation. Il a été organisé par le Laboratoire d'Informatique Appliquée.

COMITÉ D'ORGANISATION

Edith PERRIER, Philippe COUTY, Jean Marc IRIS, Pascal RENAUD,
Gaston PICHON, Christian MULLON

ADMINISTRATION

Nicole DELARBRE

EDITION DES DOCUMENTS

Liliane ZURETTI

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.

INTERVENANTS

- Yves ALBOUY**
ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Haja ANDRIANASOLO**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Erik BRAUDEAU**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Gérard COCHONNEAU**
Ingénieur ORSTOM
EMBRAPA SEDE (DIN:DDS)
SAIN PARQUE RURAL
CAIXA POSTAL 04-315
70770 BRASILIA, DF
BRASIL
- Philippe COUTY**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
213 Rue Lafayette
75010 PARIS
- Dominique DAGORNE**
Ingénieur ORSTOM
ANTENNE ORSTOM
BP 147
22302 LANNION
- Philippe. DE REFFYE**
Chercheur CIRAD
2051 Avenue Du Val Monferrand
BP 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX
- Alain DEZETTER,**
Chercheur ORSTOM
Institut International
de Recherche Scientifique
pour le Développement
BP V51
ABIDJAN -01
COTE D'IVOIRE
- Yves DU PENHOAT**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
BP 70
29263 PLOUZANE
- Bertrand GERARD**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
213 Rue Lafayette
75010 PARIS

VI

- Barbara GLOWCZEWSKI** Docteur d'Etat ITSO CNRS
16 rue de la Marseillaise
75019 PARIS
- Gérard HIEZ** Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
2051 Avenue Du Val Montferrand
BP 50454
34032 MONTPELLIER CEDEX
- Jean Marc IRIS** Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Francis LALOE** Chercheur ORSTOM
12, Résidence TOURNEMIRE
91940 LES ULLIS
- André LAPOUILLE** Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
BP A 5
NOUMEA CEDEX
NOUVELLE CALEDONIE
- René. LECOUSTRE** Chercheur CIRAD
2051 Avenue Du Val Montferrand
BP 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX
- Annick LEGELEY** Ingénieur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Yves LEMAITRE** Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
BP 529
PAPEETE
TAHITI
- Patrick LIVENAIS** Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
Petit Bassan
04 BP 293
ABIDJAN 04
COTE D'IVOIRE
- Peter LUCICH** Chercheur au
Département Sociologie
Université New England
Armindale NSW
AUSTRALIE 2350
- Serge MARTIN** Chercheur ENS
6 Place de la Libération
92320 CHATILLON

VII

- Catherine MERING**
Ingénieur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Jean-Arcady MEYER**
Directeur de recherche CNRS
ECOLE NORMALE SUPERIEURE
45 Rue d'Ulm
75230 PARIS CEDEX
- François MISSEGUE**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
BP A 5
NOUMEA CEDEX
NOUVELLE CALEDONIE
- Alain MORLIERE**
Chercheur ORSTOM
UNIVERSITE P. & M. CURIE
LODYC
75252 PARIS CEDEX 05
- Christian MULLON**
Ingénieur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Koffi N'GUESSAN**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
Petit Bassan
04 BP 293
ABIDJAN 04
COTE D'IVOIRE
- Odile PALLIES**
Maître assistant à l'Université de Paris VI
1 Place VICTOR HUGO
92120 MONTROUGE
- Marc PANSU**
Ingénieur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
2051 Avenue Du Val Montferrand
BP 50454
34032 MONTPELLIER CEDEX
- Edith PERRIER**
Ingénieur ORSTOM
CENTRE ORSTOM7
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Gaston PICHON**
Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY
- Serge SAVARY**
Chercheur ORSTOM
Institut International
de Recherche Scientifique
pour le Développement
BP V51
ABIDJAN 01
COTE D'IVOIRE

VIII

Eric SERVAT

Chercheur ORSTOM
Institut International
de Recherche Scientifique
pour le Développement
BP V51
ABIDJAN 01
COTE D'IVOIRE

Patrick SÉCHET

Ingénieur ORSTOM
EMBRAPASEDE (DIN:DDS)
SAIN PARQUE RURAL
Caixa postal 04-315
70770 BRASILIA,DF
BRASIL

Jaoudat TOUMA

Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
BP 1386
DAKAR
SENEGAL

Michel VAUCLIN

Directeur de Recherche CNRS
INSTITUT MECANIQUE DE GRENOBLE
Domaine universitaire
BP 68
38402 SAINT MARTIN D'HERES CEDEX

Bernard VICTORRI

Maître de Conférence à l'Université de Caen
14 Rue Saint Laurent
14000 CAEN

Jean-Marie WACKERMANN

Chercheur ORSTOM
CENTRE ORSTOM
70/74 Route d'Aulnay
93140 BONDY

SOMMAIRE

THEME : MODELES DETERMINISTES

Jaoudat TOUMA MODELISATION DE L'INFILTRATION DANS LES SOLS NON SATURES	3
Eric SERVAT, Alain DEZETTER MODELISATION CONCEPTUELLE GLOBALE DE LA RELATION PLUIE DEBIT.....	13
Eric SERVAT APPROCHE MODELISATRICE DE LA MASSE DE POLLUTION TRANSPORTEE PAR LE RUISSELLEMENT PLUVIAL URBAIN.....	29
Yves du PENHOAT MODELISATION NUMERIQUE D'UN OCEAN TROPICAL APPLICATION AUX VARIATIONS SAISONNIERES ET INTERANNUELLES DE LA TOPOGRAPHIE DE SURFACE DANS L'ATLANTIQUE.....	39
Alain MORLIERE EXPERIENCE D'ASSIMILATION DE DONNEES DANS UN MODELE DE CIRCULATION GENERALE OCEANIQUE.....	49
Marc PANSU CINETIQUE CHIMIQUE ET MODELES COMPARTIMENTAUX : APPLICATION A L'ETUDE DE L'EVOLUTION DU STOCK ORGANIQUE DES SOLS.....	63
Erik BRAUDEAU MODELE DE REPARTITION DE L'EAU ET DE L'AIR DANS UN ECHANTILLON DE SOL STRUCTURE. (A PARTIR DE LA MODELISATION DES COURBES DE RETRAIT).....	79
Jean-Marie WACKERMANN MODELE DECRIVANT LES PHENOMENES DE DISSOLUTION ET DE CRISTALLISATION DE MINERAUX DANS DES SOLUTIONS AQUEUSES.....	93
André LAPOUILLE, Francois MISSEGUE, Annick LEGELEY, Yves ALBOUY DEFINITION D'UN MODELE GEOLOGIQUE A PARTIR DE SA SIGNATURE MAGNETIQUE.....	101

THEME : MODELES SPATIAUX**Jean Marc IRIS**

LES TRANSFERTS D'ECHELLE EN PEDOLOGIE: UNE REVUE.....113

Gérard COCHONNEAU, Gérard HIEZ, Patrick SÉCHET

MVR, AUTOMATISATION D'UN MODELE D'INFORMATION PLUVIOMETRIQUE REGIONALE.....131

Haja ANDRIANASOLO

MODELISATION STATISTIQUE DE LA STRATIFICATION D'UN ESPACE REGIONAL POUR L'ESTIMATION DE LA SUPERFICIE D'UN THEME AU SOL.....145

Dominique DAGORNE

MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE EN TÉLÉDÉTECTION. SUPERPOSITION ET RECTIFICATION DE DONNÉES SATELLITAIRES ET SPATIALISÉES.....175

Theme : MODELES DE CROISSANCE ET MODELES DE DYNAMIQUE DES POPULATIONS**Francis LALOE**

MODELES GLOBAUX DE DYNAMIQUE DES POPULATIONS MARINES EXPLOITÉES ET ASPECTS DE LA PECHE ARTISANALE SÉNÉGALISE.....197

Serge SAVARY

MODÉLISATION DÉTERMINISTE EN PROTECTION DES CULTURES: OBJECTIFS, DIFFICULTÉS ET PERSPECTIVES.....211

R.ené LECOUSTRE et Philippe DE REFFYE

APPROCHE MATHÉMATIQUE D'UN ÉQUILIBRE BIOLOGIQUE A TROIS ANTAGONISTES : EXEMPLE DU PALMIER A HUILE, DE COELAEINOMODERA MINUTA UH. ET DE SES PARASITES D'OEUFs.....227

Gaston PICHON

TRANSMISSION DES FILARIOSES : DU MODELE DESCRIPTIF AU MODELE HEURISTIQUE.....237

Serge MARTIN

MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS DE VERS DE TERRE GEOPHAGES DE LA SAVANE DE LAMTO (COTE D'IVOIRE):LE MODELE SOLTROP.....245

Patrick LIVENAIS, Koffi N'GUESSA

MODELES ET POLITIQUES DE POPULATION : POINTS DE REPERE.....263

THEME : MODELES COGNITIFS

Yves LEMAITRE
 UN MODELE COGNITIF DE L'INVENTION DANS LA PHARMACOPEE TAHITIENNE
 TRADITIONNELLE295

Bertrand GERARD
 L'ABORD TOPOLOGIQUE POUR LA RECHERCHE EN ETHNOLOGIE305

Barbara GLOWCZEWSKI
 PERCEPTION DE L'ESPACE ET PARENTÉ CHEZ LES ABORIGÈNES D'AUSTRALIE.....311

Peter LUCICH
 WHY ARE CLOSED SIGN SYSTEMS ISOMORPHIC TO MATHEMATICAL GROUPS?319

Bernard VICTORRI
 MODELISATION ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.....335

Catherine MERING
 ELABORATION D'UNE CARTE THEMATIQUE A PARTIR DES DONNEES
 SATELLITAIRES: UN ESSAI DE MODELISATION.....343

**THEME : PLACE DE LA MODELISATION DANS LA DEMARCHE
 SCIENTIFIQUE**

Christian MULLON
 RHETORIQUE DE LA MODELISATION371

Philippe COUTY
 SIMILITUDES, SIMULACRES ET ABSENCE385

Theme :
MODELES DETERMINISTES

Coordinateur :
MICHEL VAUCLIN

MODELISATION DE L'INFILTRATION DANS LES SOLS NON SATURES

Jaoudat TOUMA,

I RÉSUMÉ

On présente un modèle pour simuler l'infiltration verticale isotherme de l'eau pure dans un sol non saturé. La loi mathématique qui décrit le phénomène est une équation différentielle aux dérivées partielles qui exprime la variation de la pression de l'eau du sol dans le temps et dans l'espace.

L'équation de l'écoulement est intégrée numériquement par la méthode des différences finies. Sa résolution nécessite la connaissance d'une condition initiale et de deux conditions aux limites. En outre, elle suppose connues deux propriétés du sol : la relation entre la pression de l'eau du sol et son humidité, et celle entre l'humidité et la conductivité hydraulique du sol.

Lorsque la connaissance de ces deux relations est approximative, le modèle peut être utilisé pour les affiner : on ajuste les paramètres de ces relations jusqu'à obtenir un accord satisfaisant entre l'expérience et le calcul. Lorsque ces relations sont connues avec une précision acceptable, le modèle peut être utilisé en prévision : quelle sera la cinétique du phénomène pour un état initial d'humidité différent et/ou pour d'autres conditions aux limites.

II INTRODUCTION

Il est évident que la simulation numérique d'un processus quelconque en général, et physique en particulier, n'est pas une fin en soi. Elle représente plutôt un moyen rapide, économique et efficace pour l'étude dudit processus, dès lors que les lois qui décrivent son évolution sont connues.

Lorsqu'on étudie les écoulements dans les sols non saturés, la complexité des phénomènes et/ou la limitation des senseurs de mesure, notamment sur le terrain, sont telles qu'il est nécessaire d'admettre certaines hypothèses simplificatrices afin que la description mathématique des phénomènes physiques et/ou l'interprétation des observations expérimentales soient possibles.

Le modèle présenté ici est fondé sur la physique des transferts dans les sols non saturés. Etant destiné à des fins de prévision (à l'échelle ponctuelle au sens des mesures de terrain), après une validation préalable par comparaison à des observations expérimentales, il était nécessaire d'adopter dans le modèle les hypothèses communément admises dans la pratique et qui délimitent ainsi ses domaines de validité et d'application. Celles-ci sont les suivantes :

- l'écoulement est isotherme vertical, induit uniquement par le champ de la charge hydraulique (pression et gravité),
- lorsque le sol est stratifié, chaque couche est considérée homogène, isotrope et indéformable. Dans chacune d'elles, la relation qui lie la teneur en eau volumique q à la pression de l'eau du sol h ($h(q)$), et celle qui lie la teneur en eau volumique à la conductivité hydraulique du sol K ($K(q)$) sont connues et uniques. En outre, les éventuelles réactions entre l'eau et le sol ne sont pas prises en compte,
- l'air du sol est en tout point et à chaque instant à la pression atmosphérique et l'eau est considérée pure et incompressible.

III EQUATION DE L'ÉCOULEMENT

Elle est obtenue en combinant l'équation dynamique, qui est la loi de Darcy écrite dans le cas non saturé, avec la loi de conservation de la masse. Théoriquement, la loi de Darcy dans le cas saturé peut être déduite des équations générales de Navier-Stokes de l'écoulement d'un fluide visqueux incompressible moyennant deux approximations : forces d'inertie négligeables devant les forces visqueuses et vitesse d'écoulement très faible.

En tout point, la loi de Darcy s'écrit dans le cas général:

$$\vec{q} = - K \cdot \text{grad } H \quad (1)$$

où \vec{q} est la densité de flux volumique au point considéré ($L \cdot T^{-1}$); K est la conductivité hydraulique du sol au point considéré ($L \cdot T^{-1}$) qui est un tenseur du second ordre dans le cas général et qui se ramène à un scalaire lorsque le sol est isotrope; $H=h-z$ (L) est la charge hydraulique au point considéré, h étant la pression de l'eau mesurée relativement à la pression atmosphérique et exprimée en hauteur de colonne d'eau et z la cote du point considéré mesurée positivement vers le bas avec l'origine prise à la surface du sol; grad est l'opérateur gradient.

En l'absence de source ou puits, la loi de conservation de la masse s'écrit en tout point dans le cas général :

$$\frac{\partial(\rho \cdot q)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{q}) = 0 \quad (2)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau ($M \cdot L^{-3}$), q est la teneur en eau volumique ($L^3 \cdot L^{-3}$) au point considéré (volume d'eau par unité de volume du sol), t est le temps (T) et div l'opérateur divergence. La combinaison des deux équations donne :

$$\frac{\partial(\rho \cdot q)}{\partial t} - \text{div}(\rho \cdot K \cdot \text{grad } H) = 0 \quad (3)$$

Pour un écoulement vertical d'eau incompressible cette équation devient:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \right] \quad (4)$$

Elle contient deux variables dépendantes q et h . La relation $q(h)$ étant supposée connue et unique permet d'écrire :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{dq}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

où $C(h) = \frac{dq}{dh}$ est la capacité capillaire (L^{-1}). L'équation de l'écoulement devient finalement :

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \right] \quad (6)$$

Elle suppose que la variable dépendante soit continue et dérivable, ce qui est physiquement le cas quelle que soit la configuration du profil (stratifié ou non). De plus, elle décrit l'écoulement aussi bien dans une zone non saturée que dans une zone saturée. En effet, dans ce dernier cas et dans le cadre de nos hypothèses, la teneur en eau et la conductivité hydraulique deviennent constantes, ce qui implique $C(h)=0$, et (6) se ramène à un Laplacien nul.

Il serait possible d'écrire l'équation de l'écoulement avec q comme variable dépendante en développant le second membre de (4) :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \frac{dh}{dq} \frac{\partial q}{\partial z} \right] - \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial q}{\partial z} \right] - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (7)$$

où $D = K \frac{dh}{dq} = \frac{K}{C}$ est la diffusivité capillaire ($L^2.T^{-1}$). Dans ce cas (4) devient :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial q}{\partial z} \right] - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (8)$$

Il apparaît clairement que cette équation ne peut pas décrire l'écoulement dans une zone saturée. En effet, la teneur en eau constante dans ce cas implique $\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial q}{\partial h} = 0$. De plus, $D = \frac{K}{C}$ et $C=0$, (8) devient donc indéterminée et il est impossible d'en obtenir la solution. De même, elle est inapte à décrire l'écoulement dans un sol stratifié puisque la variable dépendante peut exhiber des discontinuités dans de tels sols, notamment au voisinage des interfaces de séparation entre les différentes couches. Pour ces raisons, seule l'équation (6) est considérée dans le modèle. Celle-ci étant du premier ordre en fonction du temps et du second ordre en fonction de l'espace, sa résolution nécessite la connaissance d'une condition initiale (à $t=0$) et de deux conditions aux frontières : charge (variable dépendante) ou flux (dérivée de la variable dépendante) connus en fonction du temps à chacune des deux frontières. L'exploitation du modèle suppose connues ces conditions.

IV. RÉOLUTION NUMÉRIQUE

Le domaine physique de l'écoulement est l'axe vertical dont on connaît les relations $q(h)$ et $K(q)$, la valeur de la pression en chaque point à l'instant $t=0$ ainsi que les conditions qui règnent à la surface du sol ($z=0$) et à une certaine profondeur ($z=P$) en fonction du temps. Numérique-

ment il est remplacé par N points discrets numérotés $i=1,2,\dots,N$. Connaissant la valeur de la pression en chaque point à l'instant $t=k.Dt$ ($k=0,1,2,\dots$), le problème se ramène à chercher cette valeur à l'instant $t=(k+1).Dt$ avec les conditions données aux points $i=1$ et $i=N$. La méthode de résolution est celle des différences finies. Elle consiste à remplacer les dérivées partielles figurant dans l'équation (6) par leurs expressions en différences finies obtenues par développements limités en série de Taylor. Désignant par i l'indice de l'espace et par k celui du temps, l'équation (6) est discrétisée avec les considérations suivantes :

- la dérivée temporelle est exprimée en "différence avant" dont l'erreur est de l'ordre du pas de temps Dt ;
- les dérivées spatiales sont exprimées en "différences centrées" dont l'erreur est de l'ordre de Dz^2 , Dz étant le pas de l'espace (considéré constant);
- la quantité $K\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right)$ est évaluée au centre du pas d'espace Dz qui sépare deux points de calcul successifs;
- les quantités K et C sont considérées constantes pendant le pas de temps entre t et $t+Dt$, leurs valeurs correspondent à celles de l'instant t (linéarisation explicite);
- les pressions dans les dérivées spatiales sont exprimées au temps $t+Dt$ et sont donc inconnues (résolution implicite). Avec ces considérations l'équation (6) devient :

$$C_i^k \frac{h_i^{k+1} - h_i^k}{Dt} = \frac{1}{Dz} \left[K_{i+\frac{1}{2}}^k \left[\frac{h_{i+1}^{k+1} - h_i^{k+1}}{Dz} - 1 \right] - K_{i-\frac{1}{2}}^k \left[\frac{h_i^{k+1} - h_{i-1}^{k+1}}{Dz} - 1 \right] \right] \quad (9)$$

Cette écriture ne saurait être justifiée que si les pas de temps et de l'espace sont suffisamment petits pour que les variations de la pression entre deux points adjacents à un instant donné et entre deux instants successifs en un même point puissent être considérées comme linéaires.

En regroupant les termes de l'équation (9) on obtient :

$$A_i^k \cdot h_{i-1}^{k+1} + B_i^k \cdot h_i^{k+1} + D_i^k \cdot h_{i+1}^{k+1} = E_i^k \quad (10)$$

Les coefficients $A_i^k, B_i^k, D_i^k, E_i^k$ sont connus puisqu'ils ne dépendent que des valeurs connues h_i^k . L'application de l'équation (10) aux diffé-

rents points $i=1,2,\dots,N$ en tenant compte des conditions aux frontières $i=1$ et $i=N$, résulte en un système linéaire tridiagonal de N (ou $N-1$ ou $N-2$) équations à N (ou $N-1$ ou $N-2$) inconnues, suivant que les conditions aux frontières soient des flux connus (ou charge connue à l'une ou aux deux frontières respectivement) en fonction du temps. La résolution de ce système fournit la distribution de la pression au nouveau pas de temps h_i^{k+1} . Vue la structure tridiagonale du système résultant, sa résolution par la méthode d'élimination directe est très performante. Elle consiste à remplacer la matrice des coefficients par un produit de deux matrices triangulaires, l'une inférieure (L), et l'autre supérieure (U), dont les éléments sont déterminés par identification. On a donc :

$$(L).(U).(h) = (E)$$

et

$$(U).(h) = (Y)$$

On détermine donc les éléments du vecteur (Y) par résolution "avant" du système $(L).(Y)=(E)$, puis le vecteur des inconnues (h) par résolution "arrière" du système $(U).(h)=(Y)$.

Lors de la discrétisation de l'équation (6) il aurait été possible d'exprimer les pressions dans les dérivées spatiales au temps t et non $t+Dt$. De cette façon on aurait en chaque point une seule inconnue h_i^{k+1} donnée par :

$$h_i^{k+1} = h_i^k + \frac{Dt}{Dz} \frac{1}{C_i^k} \left[K_{i+1}^k \left[\frac{h_{i+1}^k - h_i^k}{Dz} - 1 \right] - K_{i-1}^k \left[\frac{h_i^k - h_{i-1}^k}{Dz} - 1 \right] \right]$$

Bien que cette écriture soit plus simple que celle présentée plus haut, puisqu'elle ne nécessite pas la résolution d'un système linéaire à chaque pas de temps, elle ne peut pas s'appliquer à une zone saturée puisqu'elle nécessite la division par la capacité capillaire qui s'annule dans ce cas.

V. APPLICATIONS DU MODELE

L'exploitation du modèle suppose connues les relations $q(h)$ et $K(q)$ de chaque couche du profil. Pratiquement, elles sont déterminées à partir du suivi de la cinétique de redistribution de l'humidité et des pressions dans le profil de sol préalablement humidifié par apport d'eau à la surface. Les mesures effectuées sont la teneur en eau et la charge hydraulique à des cotes fixes (et donc la pression de l'eau) en fonction du

temps. Cependant, la limitation des moyens de mesure, et surtout les erreurs inhérentes à l'exploitation des mesures, sont telles que la connaissance de ces relations est souvent très approximative. Même lorsqu'elles sont connues avec une précision satisfaisante, leur seule connaissance ne permet pas de prédire le comportement du sol dans une situation différente, et c'est justement l'avantage de la modélisation que de permettre cette prédiction.

Le modèle peut donc être utilisé dans un premier temps comme un complément de l'étude expérimentale afin d'améliorer la connaissance des relations caractéristiques du sol. Pour cela, on peut simuler l'essai qui a servi à déterminer les relations $q(h)$ et $K(q)$. Les paramètres de ces relations seront affinés jusqu'à obtention d'un accord satisfaisant entre l'observation et le calcul. Par la suite, le modèle peut être utilisé en prévision. Parmi les utilisations possibles, on peut citer :

- Quel sera le comportement du sol pour d'autres conditions de l'expérience?
- Etant donné un épisode pluvieux, y aura-t-il ruissellement, et le cas échéant, quand commencera-t-il et quelle sera la lame ruisselée?
- Dans un périmètre irrigué, quelle sera la profondeur humidifiée suite à un apport donné en eaux d'irrigation?

On conçoit aisément les implications pratiques des informations ainsi tirées puisqu'elles servent à la gestion des ressources en eau.

Comme illustration de l'utilisation du modèle nous l'avons utilisé pour prédire le ruissellement conséquent à un épisode pluvieux sur un site de la région de Bambey (Sénégal).

Les relations $q(h)$ et $K(q)$ du sol, déterminées expérimentalement, sont montrées figure 1.

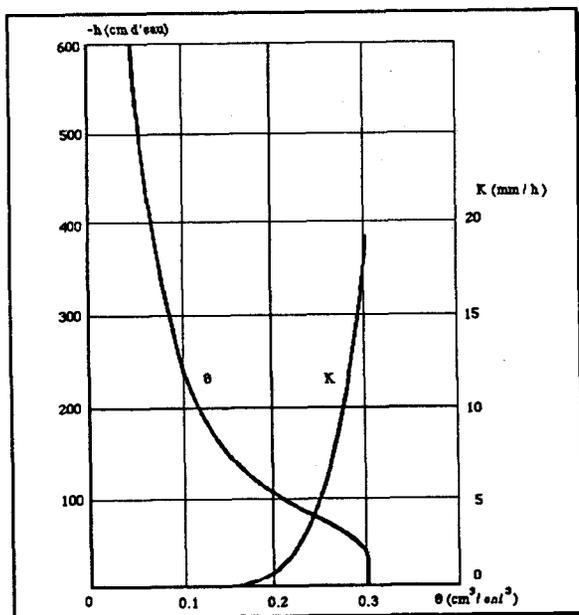
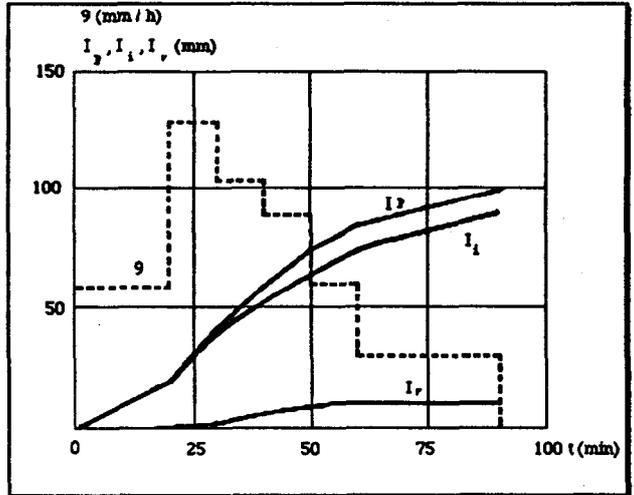


Figure 1

Le sol est relativement sec avant la pluie (humidité initiale uniforme de $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

La figure 2 montre le hyétogramme de l'épisode pluvieux (courbe q en pointillé), représentatif de la pluie décennale dans la région, ainsi que les lames précipitée I_p , infiltrée I_i et ruisselée I_f .

Figure 2



Cette information tirée en quelques minutes par voie numérique nécessiterait quelques jours par voie expérimentale.

MODELISATION CONCEPTUELLE GLOBALE DE LA RELATION PLUIE DEBIT

Eric SERVAT, Alain DEZETTER,

I RESUME

Les auteurs présentent ici une version "opérationnelle" de deux modèles globaux conceptuels et déterministes de relation pluie-débit: CREC et MODGLO. L'objectif visé était de fournir de véritables outils aux aménageurs et aux gestionnaires de projets. Les concepts utilisés dans les deux logiciels concernés sont décrits d'un point de vue théorique. La structure informatique de ces modèles, adaptés sur micro-ordinateur, est ensuite détaillée. On présente des exemples de procédure de saisie et de sortie de résultats. Ceux-ci sont fournis aux pas de temps décennaires, mensuels et/ou annuels sous la forme de tableaux et de graphiques permettant la comparaison des lames écoulées calculées et observées. Les applications présentées concernent un bassin versant tunisien et deux bassins burkinabés.

II OBJECTIFS

L'accroissement des moyens de calcul mis à la disposition des hydrologues a permis un développement important de la modélisation hydrologique durant ces vingt dernières années. Celle-ci a des objectifs variés allant de la prévision de crue à la génération de chroniques de données en passant, entre autres, par la simulation du fonctionnement de systèmes d'eau ou la prédétermination de valeurs atteintes par quelques variables communément mesurées.

Concernant le domaine particulier de la relation pluie-débit, de très nombreux modèles ont vu le jour durant cette période. Cependant le bilan réel de leur exploitation n'est que rarement effectué et leur utilisation par une autre personne que leur concepteur s'avère généralement très délicate, parfois même impossible. Comparé au foisonnement des modèles, le maigre bilan tiré en matière d'utilisation "opérationnelle" de ces modèles vient donc renforcer le contexte général de scepticisme à l'égard de l'évolution actuelle et des performances de la modélisation hydrologique. (Klemes, 1986, Kundzewic, 1986, Beven, 1987)

Avant de se lancer dans tout nouveau développement, il nous a donc paru important d'arriver à une meilleure utilisation des modèles actuellement disponibles. Il faut pour cela leur assigner des objectifs qui soient réellement en rapport avec ce que ces algorithmes sont en mesure de réaliser. Cette démarche est certainement moins ambitieuse mais plus réaliste que celle qui consiste à affirmer l'"universalité" d'un concept élaboré dans un cas particulier.

L'objectif qui était le nôtre était de fournir aux gestionnaires de projets et aux aménageurs de véritables outils, c'est à dire des logiciels utilisables par des non spécialistes tant en Hydrologie qu'en Informatique.

A cette fin, ils doivent répondre à plusieurs conditions:

- être de mise en oeuvre rapide et pouvoir fonctionner sur micro-ordinateur,
- se montrer d'une utilisation particulièrement conviviale,
- pouvoir utiliser des données de réseaux,
- apporter des réponses utiles et adaptées aux problèmes traités (par exemple des évaluations d'apports à des pas de temps décennaux ou mensuels dans le cas de projets à vocation agricole).

Parmi les différents modèles globaux conceptuels déterministes qui étaient à notre disposition, nous en avons retenu deux (les modèles CREC et MODGLO) sur lesquels faire porter nos efforts de manière à satisfaire les contraintes énoncées plus haut. Cela a entraîné un important travail informatique indispensable à leur réorganisation, leur simplification, leur standardisation et leur adaptation sur micro-ordinateur.

III. LES MODELES CREC ET MODGLO

III.1 LE MODELE CREC

CREC est un modèle mis au point au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences de Montpellier au début des années 1970. C'est un modèle conceptuel global (obéissant à un schéma de type à réservoir) appliqué de nombreuses fois, dans des conditions de bassins versants très variées (mais en zone climatique tempérée), et qui a montré une grande capacité d'adaptation. (Guilbot, 1986).

La version de CREC décrite ici est une version à cinq paramètres (X1, X2, ..., X5) (Combes, 1985). Il existe des versions à sept et onze paramètres permettant son application à des conditions hydrologiques particulières.

Classiquement, entre le sol recevant la pluie et l'exutoire du bassin, on définit une fonction de production et une fonction de transfert. La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement. La fonction de transfert comprend un écoulement rapide et un écoulement lent à décroissance exponentielle. La figure 1 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

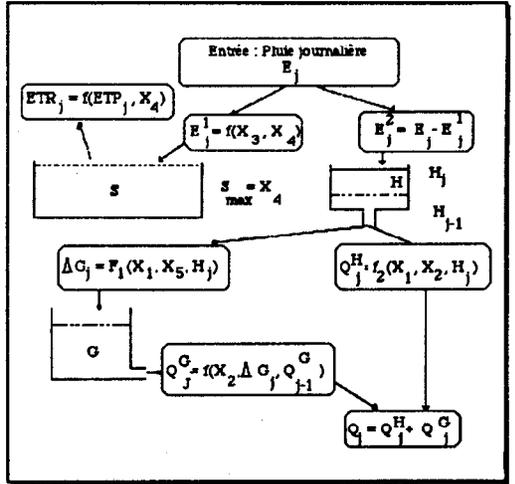


Figure 1 : Schéma conceptuel - Modèle CREC

III.1.a La fonction de production

La fonction de production effectue un prélèvement sur la lame précipitée qui permet de respecter le caractère conservatif du système. Son élément principal est l'évapotranspiration, mais elle peut prendre en compte des éléments différents du type fuites hors du bassin ou biais systématiques dans les évaluations des lames précipitées.

Cette fonction de production est, en fait, représentée par un réservoir en cul de sac, S, soumis à un contrôle amont (fonction de partage de la pluie) et à une sortie aval modulée sur l'ETP et qui génère une ETR (qui n'a sans doute de réelle que le nom). (cf. figure 1)

III.1.b La fonction de transfert

Dans le modèle CREC, la fonction de transfert est constituée d'un ensemble de deux réservoirs (H et G) à la fois en série et en parallèle grâce à la double sortie du réservoir H. (cf. figure 1).

Le réservoir H intervient à deux niveaux:

- laminage des débits permettant de rendre continue la réponse à une alimentation discontinue,

- répartition entre débit à décroissance rapide et débit à décroissance lente. Le transfert rapide se fait directement, alors que le transfert lent est régularisé par le biais d'un tarissement exponentiel (c'est le rôle du réservoir G).

III.1.c La détermination des paramètres

Dans le cas particulier du modèle CREC, la détermination des valeurs des paramètres s'effectue automatiquement à l'aide d'une procédure d'optimisation non linéaire minimisant un critère d'écart entre débits observés et calculés. Le processus d'optimisation choisi ici est la méthode de Rosenbrock (1960) (Servat et Dezetter (1988)), méthode séquentielle permettant à la fois:

- de déterminer la longueur du pas de recherche,
- de déterminer la direction de ce pas,
- de tenir compte de contraintes imposées concernant les valeurs des paramètres.

III.2 LE MODELE MODGLO

Conçu à l'ORSTOM en 1974 par G. Girard, MODGLO est lui aussi un modèle conceptuel global au pas de temps journalier.

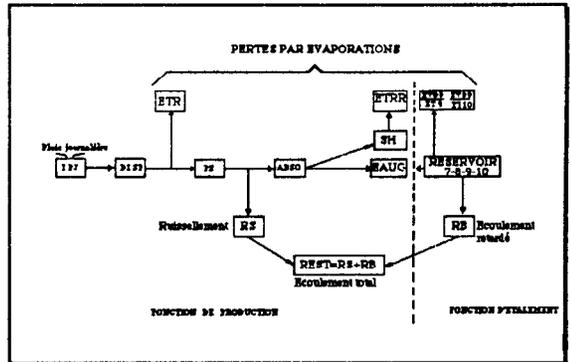
Utilisant des fonctions de production et de transfert individualisées, le modèle effectue à chaque pas de temps une série d'opérations qui conditionne le devenir de l'eau précipitée. Si l'algorithme fait appel à certains mécanismes physiques de la transformation pluie-débit (capacité de rétention, infiltration), on y adjoint cependant de nombreuses hypothèses simplificatrices. (Servat, 1986, Dezetter, 1987).

III.2.a La fonction de production

La fonction de production est organisée autour d'un réservoir "sol" caractérisé par une capacité de rétention en eau définie par deux paramètres: CRT qui est la valeur moyenne sur le bassin versant et DCRT qui permet d'introduire une hétérogénéité de la rétention en eau des sols. (Servat, 1986). C'est au niveau de cette fonction de production qu'est réalisée une première série d'opérations déterminant la répartition des volumes mis en jeu (cf. figure 2):

Figure 2 : Schéma conceptuel -
Modèle MODGLO

- calcul de la pluie moyenne sur le bassin (DISP),
- calcul de l'évapotranspiration potentielle journalière (ES),
- calcul de la pluie au sol pouvant générer de l'écoulement (PS),
- calcul du ruissellement pur éventuel (RS),
- calcul de l'eau livrée à l'écoulement retardé (EAUG)
- calcul du niveau d'eau dans le réservoir sol (SH).



III.2.b La fonction de transfert

La fonction de transfert ne concerne que le terme EAUG, distribué dans quatre réservoirs. Ce sont la charge et les coefficients de débits de chacun des réservoirs qui vont déterminer la modulation de l'écoulement dans le temps. L'écoulement total au cours du pas de temps est alors la somme du ruissellement RS et de cet écoulement retardé RB.

III.2.c La détermination des paramètres

Contrairement au modèle CREC, élaboré avec le souci d'un calage automatique des paramètres au moyen d'une technique d'optimisation, MODGLO n'admettait initialement qu'un calage classique par une méthode du type "essais-erreurs". Il existe maintenant une version de ce modèle couplée avec une méthode d'optimisation (au choix: méthode de Rosenbrock (1960) ou méthode de Nelder et Mead (1964) (Servat et Dezetter, 1988)). Néanmoins, les nombreux paramètres définis à l'origine ne sont pas tous indépendants les uns des autres ce qui ne favorise pas leur optimisation à l'aide d'une procédure automatique. C'est pourquoi, actuellement, les meilleurs résultats sont obtenus par un calage "manuel" de la fonction de production et une optimisation des paramètres de transfert.

IV. STRUCTURE INFORMATIQUE DES LOGICIELS

Les travaux entrepris autour de ces modèles avaient pour principal objectif de les rendre "opérationnels". Nous souhaitons en faire de véritables outils utilisables par des gestionnaires de projets ou des aménageurs. Cette démarche s'inscrit dans un cadre plus général de constitution d'un "système modélisateur" comprenant logiciels et bibliothèque de pro-

cédures. Cela a nécessité un important travail informatique car il a fallu standardiser et adapter les structures de chacun des logiciels étudiés. On a développé une organisation modulaire des algorithmes et repris la programmation proprement dite de façon à les utiliser sur micro-ordinateur (pour accroître leur "portabilité").

La structure actuelle de ces logiciels, une organisation de type modulaire, est présentée en figure 3. On y distingue trois modules au sens large: Entrées, Calculs, Sorties. L'articulation, ou interface, entre les différents niveaux peut être définie par un état de la mémoire vive au moment du passage entre ces niveaux.

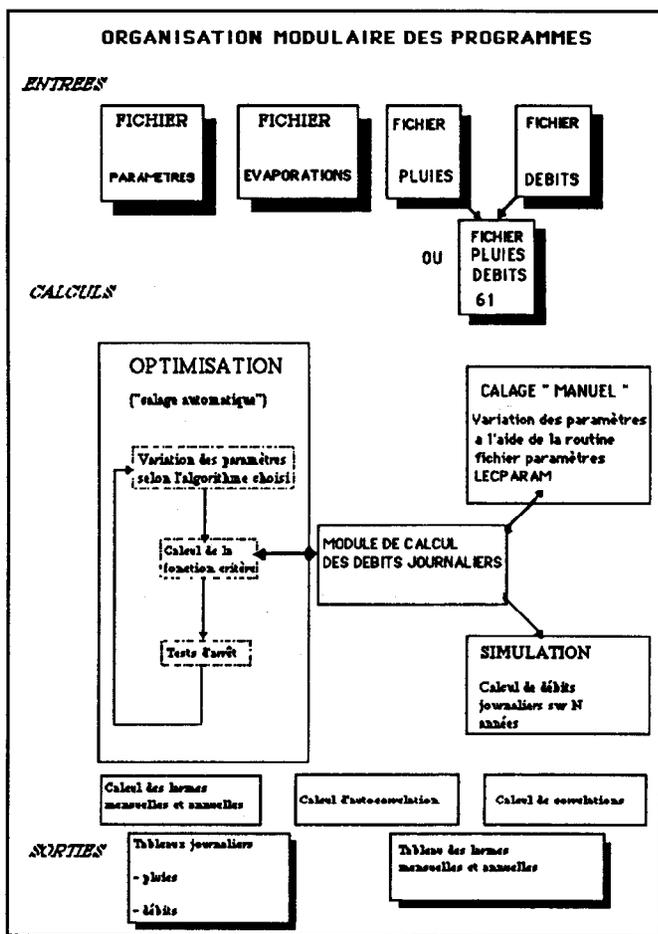


Figure 3

Tableau 1 : Procédure de saisie des paramètres - MODGLO

PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE	
Surface du bassin versant km ²	SURFBV : 13 900
Coefficient de passage pluie brute-pluie au sol CPJ	: 1 000
Hétérogénéité des pluies sur le BV (BB)	: 0 420
Paramètres de l'infiltration XIN	: 8 500 AXIN : 0 270
Hétérogénéité AA	: 0 400
Hauteur d'eau dans le réservoir sol au départ SH	: 80 000
Capacité de rétention en eau du sol CRT	: 150 000
Hétérogénéité DCRT	: 50 000
Coefficient de pondération de l'évaporation mesurée (EVAS) CET	: 1 000
PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT	
Coefficients de répartition de EAUG dans le réservoir	
CG7	: 0 300 CG9 : 0 350 CG10 : 0 350
Coefficients de débit des réservoir d'étalement	
COEFG7	: 0 250 COEFG8 : 0 590 COEFG9 : 0 460 COEFG10 : 0 590
Coefficients de reprise de l'évaporation réservoir 9 et 10	
ET9	: 1000 000 ET10 : 1000 000
Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ	
SH7	: 0 000 SH8 : 0 000 SH9 : 0 000 SH10 : 0 000
Voulez-vous corriger un ou plusieurs de ces paramètres ? O/N	

Tableau 2 : Exemple de sortie des résultats - MODGLO

EDITION DES PARAMETRES DU MODELE MODGLO																																													
SURFBV	: 13.900	ET9	: 1000.000	CG7	: 0.300	BB	: 0.420	SH7	: 0.000	CG10	: 0.350	AXIN	: 0.270	SH9	: 0.000	COEFG8	: 0.590	SH	: 80.000	CET	: 1.000	COEFG10	: 0.590	DCRT	: 50.000	CPJ	: 1.000	ET10	: 1000.000	CG9	: 0.350	XIN	: 8.500	SH8	: 0.000	COEFG7	: 0.250	:AA	: 0.400	SH10	: 0.000	COEFG9	: 0.460	CRT	: 150.000
TABLEAU DES LAMES MENSUELS ET ANNUELLES																																													
ANNEE : 1975																																													
STATION : OUED SIDI BEN NACEUR																																													
Unités : mm																																													
LAME	Janv.	Feb.	Mars.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc	TAN																																
Pluie	61.0	174.7	96.6	19.0	54.1	0.9	0.0	48.9	5.2	110.03	11.3	66.3	948.0																																
E Obs	9.8	91.9	28.7	2.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	115.9	28.9	278.6																																
E Calc	10.3		70.2	23.5	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	129.1	31.5																																
	275.1																																												
EVAPORATIONS MOYENNES MENSUELLES JOURNALIERES EN mm/j																																													
	1.8	2.0	2.9	3.5	3.7	4.2	4.8	3.5	3.1	2.2		1.7																																	
Total pluie	:			948.00				Evaporation	:				628.50																																
Pluie max jour	:			64.90				Ruissellement	:				89.21																																
Lame max jour	:			30.91				Eau gravitaire	:				185.98																																
Niveau max SH9	:			9.93				Ecoulement total	:				275.05																																
VALEUR DES HAUTEURS D'EAU DANS LES RESERVOIRS A LA FIN DE L'ANNEE																																													
SH	: 143.360	SH7	: 0.042	SH8	: 0.063	SH9	: 0.152	SH10	: 0.018																																				

IV.1 LE MODULE ENTREES

Ce premier module a pour objectif de lire et de stocker en mémoire les données et les paramètres définissant un état de fonctionnement du modèle. Il comprend un fichier évaporation, un fichier pluie et un fichier débit (ou un fichier "pluie-débit" unique d'un type standard utilisé à l'ORSTOM), et un fichier paramètres. Ce dernier contient les paramètres du modèle (production, transfert) et les paramètres dits d'"environnement logiciel" (sortie ou non de tableaux, etc.); c'est le seul fichier spécifique du modèle. Les formats des fichiers d'évaporation, de pluie et de débit sont imposés. Par contre il a été développé une procédure permettant la création à l'écran du fichier des paramètres. Cette procédure peut être employée en phase de calage pour modifier les paramètres. L'utilisation de ces modèles est particulièrement commode et conviviale puisque l'opérateur est alors débarrassé de toute manipulation de fichiers. Le tableau 1 présente une copie d'écran de cette procédure de saisie et de constitution du fichier des paramètres dans le cas de MODGLO.

IV.2 LE MODULE CALCULS

Les différentes fonctions de ce module n'ont aucune interface directe avec l'utilisateur. Trois types de fonctionnement ont été distingués (calage "manuel", optimisation, simulation) qui ont conduit à deux types de programme pour chaque modèle: une version calage "manuel" et simulation d'une part, et une version optimisation d'autre part. Plusieurs points sont néanmoins communs aux deux versions:

- calcul des débits au pas de temps journalier. C'est le "coeur" du modèle, appelé à chaque pas de temps, et spécifique à chaque algorithme,
- calcul des lames décadaires, mensuelles et annuelles à partir d'un vecteur journalier,
- calcul d'autocorrélation sur un vecteur et de corrélation entre deux vecteurs.

Les techniques d'optimisation disponibles sont actuellement au nombre de deux (Rosenbrock ou Nelder et Mead (Servat et Dezetter , 1988)). Le choix de la fonction critère et du test d'arrêt de la procédure ne dépend que de l'utilisateur.

IV.3 LE MODULE SORTIES

Les résultats, qui sortent sur écran ou sur imprimante (au choix de l'utilisateur), apparaissent sous la forme de tableaux de lames écoulées décadaires, mensuelles et annuelles, calculées et observées. Ces tableaux donnent également aux mêmes pas de temps les valeurs des lames précipitées et d'un certain nombre de paramètres d'écoulement propres à chaque modèle (le tableau 2 est un exemple de sortie des résultats fournis par MODGLO). L'impression des tableaux journaliers de pluie et de débits observés et calculés est optionnelle. Un environnement graphique a été développé qui permet le tracé des séries chronologiques de débits observés et calculés à des pas de temps journaliers et décadaires. Ces graphiques sont un élément d'appréciation supplémentaire important lors de la phase de calage.

V. EXEMPLES D'UTILISATION

V.1 PRÉSENTATION DES BASSINS VERSANTS

Nous présentons ici les essais réalisés sur trois bassins versants: un bassin tunisien (l'Oued Sidi Ben Naceur) et deux bassins burkinabés (le Kuo à Digouera et le Kuo à Badara).

V.1.a L'Oued Sidi Ben Naceur

Ce bassin versant présente une superficie de 13.9 km² et une pente moyenne de 4%. Le sol est argileux et recouvert d'un manteau de colluvion sablo-argileux. La végétation est constituée d'un taillis de lentisques bien conservé. Le climat est méditerranéen humide avec une pluie interannuelle de l'ordre de 850 mm, et une ETP évaluée, à partir de mesures sur bac, à environ 1170 mm. (Ibiza, 1985). La période étudiée s'étend de 1974 à 1977.

V.1.b Les bassins versants du Kuo

Ces deux bassins versants situés en climat sub-soudanien présentent une végétation de savane classique. Les sols sont généralement de type ferrugineux mais l'on rencontre aussi des sols d'apport colluvial peu évolués. Le Kuo à Badara (période étudiée: 1955 à 1957) offre une superficie de 971 km² et le Kuo à Digouera (période étudiée: 1981 à 1983) une superficie de 67.8 km². Les pentes varient entre 2 et 4%. Ces deux bassins sont situés dans une zone où la pluie interannuelle est comprise entre 900 et 1200 mm. (Albergel, 1987).

V.2 PRÉSENTATION DE QUELQUES RÉSULTATS

Les figures 4, 5 et 6 présentent les résultats obtenus au pas de temps décadaire avec l'un ou l'autre des modèles. Comme on peut le voir, il existe dans chacun des cas une bonne correspondance entre lames écoulées observées et calculées, et ce dans des conditions de fonctionnement de bassins versants pourtant assez différentes les unes des autres:

- superficie allant de 14 à 971 km²,
- zones climatiques différentes,
- hétérogénéité marquée des précipitations au sein même des périodes de temps considérées (exemple du bassin tunisien: total pluviométrique de 1976: 1017 mm, total pluviométrique de 1977: 445 mm),
- lames écoulées sur un même bassin pouvant varier d'un facteur 20 d'une année à l'autre. C'est, par exemple, le cas du Kuo à Digouera: lame écoulée en 1982: 52.3 mm (total pluviométrique 834.2 mm) et lame écoulée en 1983: 2.5 mm (total pluviométrique 678.6 mm).

Figure 4 : Oued Sidi Ben Naceur Tunisie Modèle MODGLO - Années 1974 à 1977 Lames décennales observées et calculées

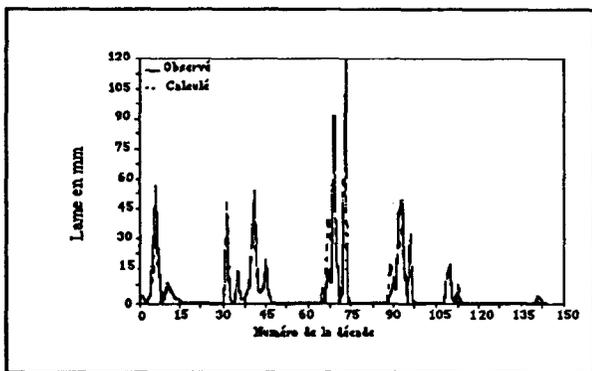


Figure 5 : La Kuo à Badara Burkina Faso Modèle MODGLO - Année 1955 à 1957 Lames décadaires observées et calculées

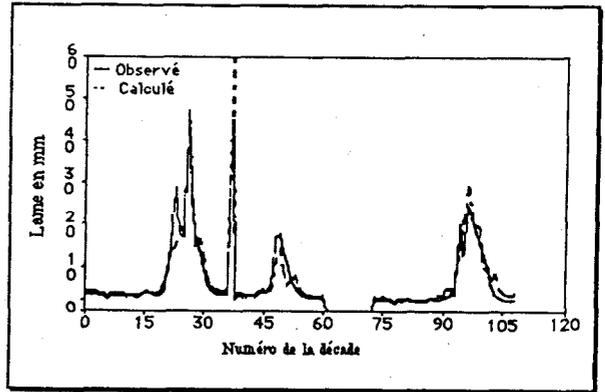
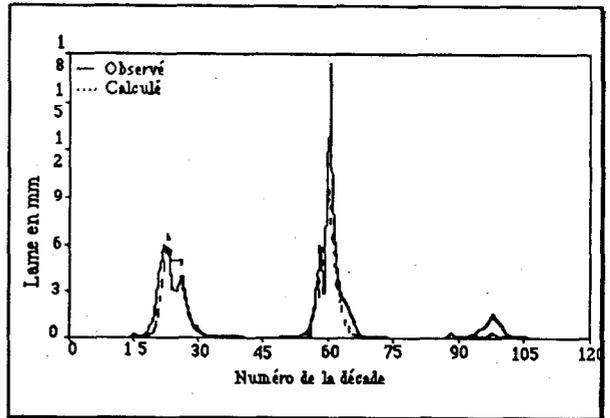
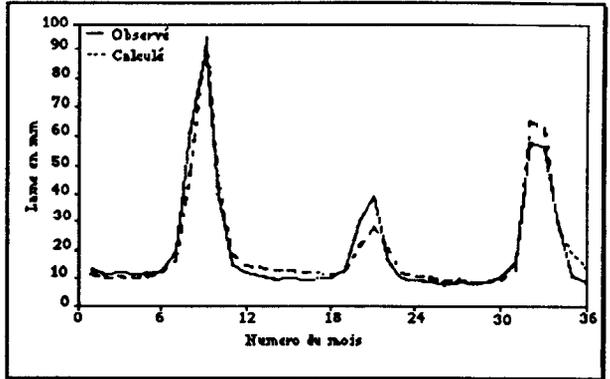


Figure 6 : Le Kuo à Digouera Burkina Faso Modèle CREC - Années 1981 à 1983 Lames décadaires observées et calculées



La figure 7 est un exemple de tracé au pas de temps mensuel. Il présente, lui aussi, un bon degré d'adéquation entre lames écoulées observées et calculées.

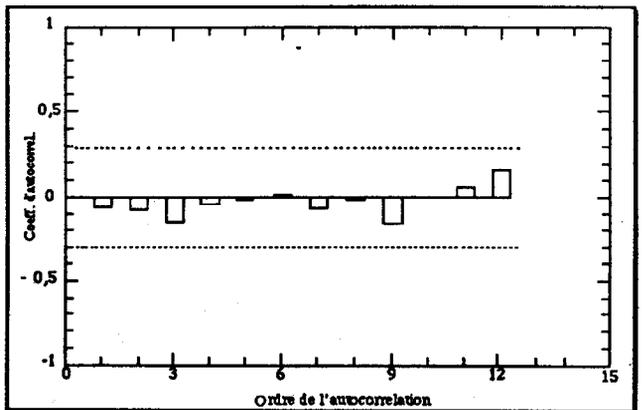
Figure 7 : Le Kuo à Badara Burkina Faso Modèles MODGLO - Années 1955 à 1957 Lames mensuelles observées et calculées



Les séries chronologiques de résidus (écarts "lames observées - lames calculées") peuvent également être étudiées à l'aide de plusieurs types de graphiques:

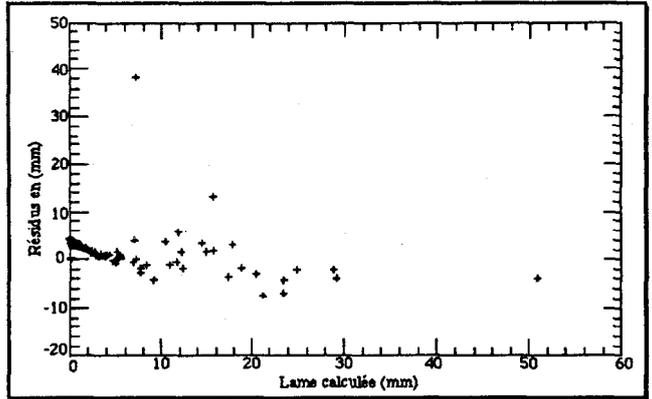
- le corrélogramme des résidus (exemple figure 8) qui présente les coefficients d'autocorrélation pour différents décalages de la série chronologique étudiée ainsi que l'intervalle de confiance à 95% de l'acceptation de l'hypothèse "autocorrélation des résidus nulle" (Kottgeda, 1980).

Figure 8 : Modèle MODGLO - Oued Sidi Ben Naceur Pas de temps mensuel - Corrélogramme de résidus



- le tracé "résidu = f(lame calculée)" (exemple figure 9) révélateur d'anomalies (Draper et Smith, 1981).

Figure 9 : Modèle Crec - Le Kuo à Badara Pas de temps décadaire - Résidu = f (Lame calculée)



Dans le cas présent aucune anomalie particulière n'a été détectée et l'étude des différents corrélogrammes a permis de conclure à une absence d'autocorrélation des résidus pour l'ensemble des calages réalisés à différents pas de temps sur les bassins versants étudiés.

Ces différentes possibilités de sorties graphiques (lames observées et calculées aux pas de temps décadaires et mensuels, corrélogrammes des résidus et tracés de "résidus = f(lames calculées)") combinées aux tableaux de résultats présentés plus haut permettent à l'utilisateur de visualiser rapidement et précisément toute modification apportée à l'un ou l'autre des paramètres des modèles.

VI CONCLUSIONS

Totalement restructurés en modules distincts et adaptés sur micro-ordinateur, les modèles globaux conceptuels déterministes présentés, CREC et MODGLO, sont d'une utilisation simple pour un non spécialiste tant en Hydrologie qu'en Informatique. Ils offrent en effet, actuellement, l'avantage d'une manipulation réduite des fichiers de données, une extrême simplicité des procédures de saisie et de constitution du fichier des paramètres, des possibilités de calages "manuels" ou automatiques et un environnement graphique très complet. Ils présentent aux pas de temps décadaires et mensuels un degré de précision des résultats tout à fait satisfaisant pour un aménageur ou un gestionnaire de projet à vocation agricole par exemple. Dans ces conditions ces algorithmes constituent donc deux outils opérationnels bien adaptés à l'évaluation des ressources en eau.

VII BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), 1987 - Genèse et Prédétermination des Crues au Burkina Faso. Du m² au km², Etude des Paramètres Hydrologiques et de leur Evolution. Thèse de Doctorat. Univ. Paris VI.

BEVEN (K.), 1987 - Towards a New Paradigm in Hydrology. AISH Publication 164

COMBES (V.), 1985 - Paramétrisation de Modèles Conceptuels d'un Bassin Versant. Contribution à l'Elaboration d'un Système de Mesure des Caractéristiques Hydrologiques d'un Bassin Versant. Application au Modèle CREC. Thèse Docteur-Ingénieur. USTL Montpellier.

DEZETTER (A.), 1987 - Modèle Global "ORSTOM 74". Analyse des Structures et du Fonctionnement en vue d'une Reformulation. DEA USTL Montpellier.

DRAPER (N.R.), SMITH (H), 1981 - Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons ed. 709 p.

GUILBOT (A.), 1986 - Des Multiples Applications d'un Modèle Conceptuel du Cycle de l'Eau en France. Rev. Int. Sciences de l'Eau. Vol 2, 1, pp 19-26.

IBIZA (D.), 1985 - Point de Vue sur les Fonctions de Production. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, 3.

KLEMES (V.), 1986 - Dilctantism in Hydrology, Transition or Destiny. Wat. Resour. Res. 22, supplement 9, Aout 1986.

KOTTEGODA (N.T.), 1980 - Stochastic Water Resources Technology, The MacMillan Press Ltd, 384 p.

KUNDZEWICZ (Z.), 1986 - The Hydrology of Tomorrow. Hydro. Sciences Journal 31, 2, 6/1986.

NELDER (J. A.), MEAD (R.), 1964 - A Simple Method for Function Minimization. Computer Journal, 7: 308-313.

ROSENBROCK (H. H.), 1960 - An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. Computer Journal, 3, 175.

SERVAT (E.), 1986 - Présentation de Trois Modèles Globaux Conceptuels Déterministes: CREC5, MODGLO et MODIBI. Rapport ORSTOM, Dépt.F, UR 604.

SERVAT (E.), DEZETTER (A.), 1988 - Deux Méthodes d'Optimisation Non Linéaire. Théorie et Pratique. Publication OVNih, Groupe de Recherche ULM, ORSTOM Montpellier.

APPROCHE MODELISATRICE DE LA MASSE DE POLLUTION TRANSPORTEE PAR LE RUISSELLEMENT PLUVIAL URBAIN

Eric SERVAT

I RESUME:

A partir des données recueillies dans le cadre de la campagne de mesure française, une approche modélisatrice de la masse de pollution transportée par le ruissellement pluvial urbain a pu être développée. Deux modèles de transport ont été élaborés pour simuler les charges totales transportées annuellement par le ruissellement et les charges transportées durant chaque événement pluvieux. Le niveau de précision atteint (+/- 5% à +/- 10% pour la charge annuelle et +/- 10% à +/- 30% pour les événements observés) apparaît satisfaisant bien qu'une telle modélisation puisse être améliorée.

II INTRODUCTION

L'approche modélisatrice développée ici concerne le transport en surface par le ruissellement pluvial urbain des polluants suivants: MES (Matières En Suspension), DBO5 (Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours), DCO (Demande Chimique en Oxygène). Cet objectif découle directement des buts fixés pour la campagne de mesure nationale (4 bassins versants suivis de 1980 à 1982, cf Tableau 1) à savoir: évaluer la masse de polluant transportée sur une longue durée (environ une année)

pour de petits bassins versants urbains (de taille inférieure ou égale à 50 ha). On présente ici une démarche conceptuelle compatible avec la représentativité du programme d'échantillonnage et s'appuyant sur les tendances révélées par l'analyse des données. (SERVAT, 1987).

BASSIN	MAUREPAS	LES ULIS	AIX ZUP	AIX NORD
Surface (ha)	26,7	43,1	25,6	92,0
Pente moyenne (%)	0,5	0,55	2,9	6,5
Imperméabilisation (%)	60	42	78	35
Terrain naturel	Limon - Argile à meulière (peu perméable)	Limon - Argile à meulière (peu perméable)	Marne sous éboulis (imperméable)	Eboulis. Marne formée calcaire en plaquettes (imperméable)
Habitat individuel (Surface totale)	70	0	0	30
Habitat collectif (Surface totale)	17	100	100	60
Type de toiture sur zone d'habitation collective	Terrasse	Terrasse	Terrasse	40% Terrasse 60% Pentes
Densité de Population (hab/ha)	100	350	210	40
Type de réseau	séparatif	séparatif	séparatif	séparatif
Collecteur au point de mesure	T 130-80	Ø1800	Ø1200	T 180-108
Pente au point de mesure (%)	0,5	0,1	1,7	2,0
Période de mesure	09/80 12/80 12/81 12/82	12/81 12/82	10/80 02/82	10/80 02/82

Tableau 1 - Caractéristiques des bassins versants retenus dans le cadre de la campagne de mesure (d'après HEMAIN, 1983)

III. EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES

Les distributions des variables mesurées dans le cadre de la campagne de mesure nationale sur la qualité du ruissellement ont été analysées d'un point de vue statistique (DESBORDES et SERVAT, 1984, SERVAT, 1987).

Plusieurs variables ont été identifiées comme étant principalement liées à la pollution du ruissellement pluvial urbain (DESBORDES et SERVAT, 1984, SERVAT, 1987). Il s'agit de:

- hauteur de pluie (HP, mm),
- intensité moyenne maximale en 5 mn (I_{max5} , mm/h),
- volume ruisselé (V_r , m^3),
- débit de pointe (Q_{max} , l/s),
- durée de temps sec (DTS, jours).

Il a été procédé à une analyse statistique complète (ajustement des distributions, étude de corrélation simple, analyse multivariable par la méthode dite du "Stepwise ascendant" (DRAPER et SMITH, 1981), analyse en composantes principales) qui a permis de tirer plusieurs conclusions:

- l'accumulation des polluants à la surface des bassins versants dépend des conditions climatiques pendant la période précédant l'événement considéré. La durée de temps sec joue un rôle indéniable mais elle ne suffit vraisemblablement pas à caractériser cette accumulation,
- le décollement et, par voie de conséquence, l'entraînement de la pollution sont fonction de l'agressivité de la pluie. Celle-ci est mesurée par une intensité sur une courte durée (5 mn dans le cas présent) ou par des variables qui lui sont liées, comme le débit de pointe.
- dans le cadre d'un travail de modélisation, les régressions multiples sont intéressantes à plus d'un titre. Sur le plan conceptuel, en effet, les équations "Stepwise" calculées sur les valeurs naturelles se heurtent à deux limitations (SERVAT, 1987):
 - la génération de valeurs négatives,
 - la présence d'une ordonnée à l'origine.

Pour un niveau d'adéquation pratiquement identique une formulation du type:

$$Y = c X_1^a X_2^b X_3^c \quad (1)$$

permet de surmonter ces difficultés. La combinaison qui semble s'imposer fait intervenir I_{max5} , V_r et DTS et s'écrit:

$$\text{Masse de polluant transportée} = K I_{max5}^a V_r^b DTS^c \quad (2)$$

Dans cette équation I_{max5} représente la capacité de la pluie à arracher la pollution de la surface du bassin versant et V_r l'élément moteur du

processus d'entraînement, alors que DTS caractérise la phase d'accumulation.

C'est l'ensemble de ces résultats et de ces conclusions qui a servi de base à l'approche modélisatrice exposée dans les paragraphes suivants.

IV. APPROCHE CONCEPTUELLE

Deux modèles de transport ont été élaborés et testés dans le cadre de cette étude. Pour l'un d'eux il était nécessaire d'évaluer la masse de pollution disponible en surface. Nous avons donc mis au point un modèle d'accumulation basé sur les hypothèses suivantes:

- un taux de production constant pour un pas de temps donné,
- un "stock" initial de pollution peu différent du "stock" final sur une longue durée ($R_o \approx R_n$),
- une masse entraînée au cours d'un événement i inférieure ou égale à la masse disponible, c'est à dire $E_i \leq M_{di}$

La première approche modélisatrice concernant le transport considère que la masse disponible évaluée à partir du modèle d'accumulation est un facteur limitant. La seconde approche considère un stock de pollution à deux niveaux à la surface du bassin versant: un premier niveau, fréquemment sollicité, et un second niveau, que nous appellerons niveau profond, parfois sollicité et qui ne constitue pas un facteur limitant. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'évaluer la masse disponible. Hormis cette masse disponible qui n'apparaît que dans le premier modèle, les variables retenues sont les mêmes dans les deux cas et résultent de l'analyse statistique des données. L'intensité maximale sur une courte durée, ici 5 minutes (I_{max5}) est représentative de "l'agressivité" de la pluie et de sa capacité à arracher la pollution accumulée en surface. Ces polluants mis potentiellement en mouvement doivent être acheminés vers l'exutoire du bassin versant. C'est le rôle du ruissellement de surface, d'où la prise en compte du volume ruisselé (V_r).

V. LE MODELE D'ACCUMULATION LINEAIRE

Un modèle d'accumulation linéaire a été élaboré à partir des hypothèses énoncées plus haut. La masse accumulée est calculée comme étant proportionnelle à la période de temps sec:

$$A_i = Pr \cdot DTS_i \quad (3)$$

avec:

A_i = masse accumulée (kg) à la surface du bassin versant durant la période temps sec DTS_i (en nombre de pas de temps) séparant les événements i et $i-1$.

Pr = production de polluant durant un pas de temps (kg/pas de temps).

L'écriture d'un bilan massique pour chacun des événements de la période d'observation et la prise en compte des différentes hypothèses formulées permet alors de calculer la production journalière pour chacun des bassins versants considérés (SERVAT, 1987). On aboutit, en effet, à l'équation suivante:

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n DTS_i} \quad (4)$$

Le tableau 2 présente les valeurs de production journalière en MES, DBO5 et DCO auxquelles nous sommes arrivés.

	MES	DBO5	DCO
MAUREPAS	2.60	0.16	1.10
LES ULLIS	3.10	0.26	1.25
AIX-ZUP	1.70	0.22	1.22

Tableau 2 - Productions journalières calculées en MES, DBO5 et DCO (kg/jour/ha)

VI. LES MODELES DE TRANSPORT

Deux types de modèles de transport de la pollution ont été développés qui font appel à deux concepts différents: le premier nécessite une évaluation de la masse disponible (on utilisera pour cela le modèle d'accumulation linéaire) et le second considère un stock de pollution à deux niveaux qui ne constitue pas un facteur limitant. Dans le premier cas et dû aux résultats de l'analyse des données, les variables de contrôle sont:

- M_d (kg), masse disponible,

- I_{max5} (mm/h), intensité maximale sur un pas de temps de 5 minutes.
- V_r (m³), volume ruisselé.

La méthode d'optimisation utilisée ici est celle développée par ROSEN-BROCK (1960). La fonction critère correspondante minimise la somme des carrés des écarts entre valeurs observées et valeurs calculées. On a procédé de la même façon dans chacun des cas, à savoir: une optimisation des paramètres réalisée sur une chronologie d'événements représentant environ 50% de la masse transportée sur la période d'observation, suivie du test, sur l'autre moitié de la série, de l'expression numérique ainsi déterminée.

Signalons, enfin, qu'il nous a paru très important de pouvoir retenir une même formulation (aux valeurs des paramètres près) pour les trois bassins versants étudiés (suite à certaines anomalies constatées dans l'évaluation des volumes écoulés, il n'a pas été possible de travailler en terme de masse sur le bassin d'Aix-Nord). C'est la condition sine qua non de l'éventuelle généralisation de tels modèles.

Dans le cas du premier type de modèle, l'équation retenue est alors:

$$E = K M d^\alpha I_{max5}^\beta V_r^\delta \quad (5)$$

avec: E = masse transportée durant un événement (kg),

K, α , β , δ paramètres du modèle propres à chaque bassin.

Dans le second cas deux variables de contrôle suffisent, I_{max5} et V_r . La formulation est alors la suivante:

$$E = K' I_{max5}^{\beta'} V_r^\delta \quad (6)$$

avec: E, I_{max5} et V_r définis plus haut,

K', β' , δ paramètres du modèle propres à chaque bassin.

Les résultats obtenus sont du même ordre pour les deux formulations: la précision sur les masses totales transportées est de l'ordre de 5%, et les événements les plus importants en terme de masse transportée sont re-produits à +/- 10% à +/- 30% près. C'est un résultat intéressant en soi dans la mesure où ils correspondent à la majeure partie de la pollution transportée.

Dans les deux cas, nous nous sommes livrés à une analyse de sensibilité du modèle. Nous avons testé chaque paramètre l'un après l'autre. La procédure retenue est la suivante: le paramètre étudié ayant une valeur

donnée on procède à une optimisation sur les autres. Si le paramètre étudié et fixé est peu ou pas sensible du tout, on obtiendra une bonne simulation quelle que soit sa valeur. Inversement si le paramètre étudié est sensible, hors d'une zone de variation bien définie et relativement peu étendue, nous ne pourrons simuler avec succès. Cette analyse de sensibilité a été réalisée pour les trois polluants et pour les bassins versants des Ullis et d'Aix-Zup. Elle a donné les résultats suivants:

$$\text{Formulation } E = K M d^{\alpha} I_{\text{max}} 5^{\beta} V_r^{\delta}$$

Les paramètres K et α ne sont pas sensibles. En ce qui concerne α c'est la valeur de Md, calculée à partir d'hypothèses simplificatrices, qui pourrait être mise en cause. β et δ sont par contre assez sensibles et l'on notera que les intervalles de variation délimités pour chacun des bassins présentent de larges zones de recouvrement (cf. Tableau 3).

	MES		DBO5		DCO	
	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP
K	-	-	-	-	-	0.2-0.9
α	-	-	-	-	-	-
β	0.7-1.0	<1.2	0.06-0.3	0.6-1.5	0.2-0.6	0.3-0.8
δ	0.4-0.7	0.3-1.05	0.1-0.6	0.2-0.8	0.05-0.7	0.2-0.8

Tableau 3 - Intervalles de variation de paramètres, définis dans chacun des cas après étude de sensibilités. Modèle: $E = K M d^{\alpha} I_{\text{max}} 5^{\beta} V_r^{\delta}$

$$\text{Formulation } E = K' I_{\text{max}} 5^{\beta'} V_r^{\delta'}$$

L'étude de sensibilité a montré que les trois paramètres du modèle étaient assez sensibles. C'est un point positif plaidant en faveur de cette seconde formulation. Les intervalles de variation délimités pour chacun des bassins versants présentent, là aussi, de larges zones de recouvrement. L'ensemble de ces résultats a été reporté dans le Tableau 4.

	MES		DBO5		DCO	
	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP
K'	1.5	>1	0.3-3	0.08-0.6	0.4-1.3	0.9-7
B'	0.8-1.2	<1	≥ 0.5	0.7-0.95	0.35-0.7	0.65-0.85
δ	0.2-0.7	-	0.25-0.65	0.5-0.65	0.4-0.8	0.4-0.6

Tableau 4 - Intervalles de variation de sparamètres, définis dans chacun des cas après étude de sensibilité. Modèle: $E = K' I_{max} 5^{\beta'} V_r^{\delta'}$

Le premier modèle d'entraînement permet donc d'atteindre nos objectifs. Cependant, l'analyse de sensibilité montre que deux de ses quatre paramètres ne sont pas sensibles, laissant un doute quant au bien fondé de sa structure.

Au vu de ces résultats, il semble que pour un même niveau d'adéquation, on puisse retenir un modèle plus simple, basé sur le concept d'un stock à deux niveaux.

VII. CONCLUSIONS

A partir des données recueillies dans le cadre de la campagne nationale de mesure, notre objectif, en terme de modélisation, était de reproduire les charges en MES, DBO5, DCO transportées à la surface de différents bassins versants urbains d'une taille de l'ordre de 50 ha.

On a d'abord réalisé une première approche en deux étapes (accumulation et transport). Le modèle d'accumulation retenu est linéaire. Il suppose une production journalière constante et le fait que sur une longue durée la totalité de la masse de pollution produite soit entraînée. Le transport de la pollution a ensuite été simulé par un modèle à trois variables de contrôle: $E = K M d^{\alpha} I_{max} 5^{\beta} V_r \delta$.

Une seconde approche (ne comprenant qu'une étape) a ensuite été réalisée pour simuler l'entraînement de la pollution. Dans ce cas nous n'avons retenu que deux variables de contrôle. Ce modèle est conceptuellement différent dans la mesure où il suppose que la masse disponible n'est pas un facteur limitant. Sa formulation est: $E = K' I_{max} 5^{\beta'} V_r^{\delta'}$.

Ce second modèle est plus satisfaisant en terme de sensibilité des paramètres et il permet d'obtenir des résultats ayant le même degré de précision.

A l'heure actuelle, l'amélioration des résultats passe certainement par l'obtention de mesures de qualité encore meilleure quel que soit le polluant considéré. Il s'agit donc, dans un premier temps, de s'efforcer de combler l'écart qui existe entre l'aspect "technologique" du problème (méthodologie, protocole de mesure, appareillage adapté, etc.) et l'aspect "exploitation de l'information recueillie", écart qui est à l'avantage très net de ce dernier pour le moment.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

DESBORDES (M.), SERVAT (E.), 1984 - Solids in urban runoff. Statistical analysis of french experimental data. Third International Congress on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden, 4-8 June.

DRAPER (N.R.), SMITH (H), 1981 - Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons ed. 709 p.

HEMAIN (J.C.), 1983 - Mesure de la Pollution du Ruissellement Pluvial Urbain. Rapport 1: Suivi et Bilan de la Campagne Expérimentale. L.H.M. Université des Sciences. Montpellier. Note 21/83.

Rosenbrock (H. H.), 1960 - An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. Computer Journal, 3, 175.

SERVAT (E.), 1987 - Contribution à l'Etude de la Pollution du Ruissellement Pluvial Urbain. Thèse de Doctorat. U.S.T.L. Montpellier

MODELISATION NUMERIQUE D'UN OCEAN TROPICAL APPLICATION AUX VARIATIONS SAISONNIERES ET INTERANNUELLES DE LA TOPOGRAPHIE DE SURFACE DANS L'ATLANTIQUE

Yves DU PENHOAT

I INTRODUCTION

Les lois physiques fondamentales de la circulation océanique sont connues : ce sont les équations de Navier-Stokes qui en sont la base. Cependant elles ne peuvent être résolues analytiquement et tout modèle océanique sera une approximation de la physique complète.

L'utilisation de modèles pour l'étude de la circulation océanique est justifiée à plusieurs titres :

1 - Ils permettent d'explorer le caractère dynamique de la circulation observée, de comprendre les effets des fluctuations des variables atmosphériques sur cette circulation.

2 - Ils permettent aussi d'élaborer des stratégies d'observations pour de futures expériences. Les modèles numériques sont de faible coût comparés aux expériences à la mer ; cependant ces dernières seront toujours nécessaires à la bonne marche et à la validation des modèles.

3 - Ils permettent de simuler ou prédire l'état de l'océan, donc peuvent être utilisés dans un but opérationnel (cf. A. Morlière).

Simuler l'océan est un art qui demande une compréhension du système physique, aussi bien que des techniques numériques. Par exemple, il est important de comprendre les propriétés du schéma numérique choisi et leurs influences sur le problème physique à résoudre.

La première étape consiste à faire une analyse des échelles pour obtenir une approximation cohérente du système, avec une formulation précise qui permet de connaître sous quelles conditions ces approximations restent valides et qui peuvent être vérifiées à posteriori.

Par exemple, pour tous les modèles de circulations, on a :

$$H / L \ll 1 \quad \text{et} \quad H / C_s \ll T$$

T, H et L sont les échelles caractéristiques pour le temps, les mouvements verticaux et horizontaux ; C_s la vitesse du son. Autrement dit, les mouvements sont peu profonds et lents (comparés à la vitesse du son).

Pour résumer, les approximations permettent :

- 1 - d'éliminer les mouvements qu'on ne veut pas étudier explicitement (c'est important pour la construction d'un modèle numérique car cela permet l'utilisation d'un pas de temps beaucoup plus grand et un temps machine plus réduit) ;
- 2 - d'éliminer les termes trop faibles (comparés à d'autres) pour être calculés avec précision ;
- 3 - de simplifier le système d'équations, et par là de souligner les phénomènes physiques importants.

Il existe essentiellement trois sortes de résolution des équations :

1 - La méthode des différences finies : les équations sont exprimées en termes de variables en différents points de grille. C'est la méthode la plus utilisée pour les modèles de circulation océanique.

2 - La méthode spectrale : c'est une méthode semi-analytique dans laquelle la dépendance de l'écoulement avec une ou plusieurs variables indépendantes est exprimée en série de fonctions continues (souvent orthogonales).

3 - La méthode aux éléments finis : elle repose comme pour la méthode spectrale sur une approximation de la fonction elle-même plutôt que de ses dérivées. Les fonctions choisies ne sont plus orthogonales et sont nulles, excepté dans une région limitée.

Les différentes méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. En général, les méthodes spectrales donnent des résultats beaucoup plus précis mais peuvent être difficiles à représenter dans un espace physique compliqué : elles sont utilisées uniquement pour des modèles de processus. Au contraire, les éléments finis peuvent être très utiles pour représenter des zones côtières mais ne sont pas numériquement plus précis qu'un schéma aux différences finies. Par contre, ces deux méthodes nécessitent un code plus compliqué que les différences finies. Entre autre, les modèles aux éléments finis sont difficilement vectorisables et demandent beaucoup de temps machine.

Pour les modèles équatoriaux, seules les méthodes aux différences finies ont été utilisées.

La disposition des points de grilles dépend du problème à résoudre : Arakawa (1966) a donné des éléments théoriques qui permettent le choix d'une grille suivant les mouvements que l'on veut modéliser ; par exemple, les variables comme les composantes de la vitesse du courant ou la pression peuvent ne pas être calculés au même point de grille, ni au même instant. De même, l'ordre de précision du schéma est limité par le traitement des conditions à la côte. (Les méthodes atmosphériques peuvent avoir un schéma d'ordre supérieur, car ils n'ont pas ce problème de limites latérales).

Un autre problème à résoudre pour la modélisation océanique est celui des processus importants se produisant à des échelles plus petites que la grille numérique. On doit donc inclure une formulation paramétrique de ces processus en fonctions de variables à grandes échelles. On opère de cette façon pour tous les phénomènes qui sont trop rapides, ou trop petits en terme d'échelle spatiale ; par exemple, la convection océanique, dissipation de quantité de mouvement, le mélange (diffusion) de chaleur...etc...

Il y a également plusieurs choix pour représenter la structure verticale :

- en modes : c'est une forme de représentation spectrale en terme d'une base de fonctions verticales (on résoud un système aux valeurs propres)
- en niveaux, ou en couches : Les modèles océaniques emploient toujours une grille espacée irrégulièrement sur la verticale qui permet une meilleure résolution des processus océaniques proches de la surface ;
- en coordonnées isentropiques : par exemple, la structure verticale est résolue sur des surfaces isopycnes (égales densités). Cette méthode est séduisante pour l'étude de certains phénomènes mais pose des problèmes techniques lorsqu'une couche isopycne "disparaît".

Dans la suite de cette note, on explique comment est construit le modèle que nous utilisons au centre de Brest et nous en montrons quelques applications.

II. EXEMPLE D'UN MODELE ÉQUATORIAL

Une variété importante de modèles océaniques a été utilisée pour étudier la circulation équatoriale. Cela va du modèle simple linéaire décrivant la couche de surface, au modèle sophistiqué non linéaire, stratifié de façon continue (modèle aux équations primitives). Ces modèles ont produit des solutions réalistes comparées aux observations. Quant aux modèles simples, ils ont prouvé qu'ils étaient des outils nécessaires pour isoler les processus physiques importants et ont également produit des solutions réalistes.

Le modèle que j'utilise a été développé en collaboration avec Mark Cane aux USA (Cane et Patton, 1984) et comporte maintenant plusieurs versions plus ou moins élaborées suivant le but recherché.

II.1 LE MODELE

C'est le type même du modèle de processus. Il a été conçu pour l'étude des variations basses fréquences, c'est à dire, saisonnières et interannuelles de la circulation océanique, forcée par le vent. Du fait de l'annulation de la force de Coriolis à l'équateur et de la forte stratification en densité de l'océan équatorial, celui-ci répond très rapidement (et fortement) aux fluctuations du vent. De fait, la région équatoriale se comporte comme un guide d'onde, (tout comme les régions côtières), c'est à dire que les perturbations sont piégées au voisinage de l'équateur.

La première approximation consiste à ne plus utiliser les équations sur sphère, mais à projeter les équations sur un plan centré sur l'équateur, plan que l'on appelle le plan bêta équatorial (dans cette approximation, le paramètre de Coriolis $f = B \cdot y$ avec y la distance de l'équateur). Cette approximation reste valide théoriquement jusqu'à 30° au delà de l'équateur.

On linéarise ensuite les équations du mouvement par rapport à un état moyen, c'est à dire que l'on étudie les anomalies par rapport à cet état. On justifie cette approximation en soulignant la rapidité de la réponse de l'océan tropical à une force extérieure. De plus, la réponse d'un modèle linéaire permet d'apprécier l'importance des termes non linéaires. On interprète les résultats en fonction des solutions libres du système : les ondes équatoriales basses fréquences, de grandes longueurs d'ondes zonales 1) de Kelvin se propageant vers l'Est), 2) de Rossby (se propageant vers l'Ouest). Bien que ce soit les seules solutions pertinentes pour

les variations saisonnières et interannuelles des variables physiques océaniques, ces équations décrivent aussi les ondes inertielles à beaucoup plus hautes fréquences. Leur présence pose un problème numérique dans les modèles classiques et oblige l'utilisation de pas de temps d'intégration qui sont petits comparés aux échelles de temps qui nous intéressent (quelques heures comparées avec quelques mois).

C'est pourquoi, nous avons développé un modèle qui filtre toutes les ondes excepté les ondes basses fréquences et de grande longueur d'onde, en appliquant une hypothèse dite des ondes longues. Ceci nous permet l'utilisation de pas de temps d'intégration de l'ordre de 10 jours. Le modèle est donc extrêmement rapide, ce qui permet d'utiliser des calculateurs aux ressources modestes et de procéder à de nombreuses expériences.

Le schéma numérique tient compte des particularités du système d'équation, en particulier du fait que, de toutes les solutions libres du système, seul le mode de Kelvin se propage vers l'est.

On écrit la solution sous la forme :

$$(u,v,h) = K(x,t) (H(y),0,H(y)) + (u',v',h')$$

Le premier terme représente les contributions dues aux ondes de Kelvin; le deuxième terme à droite représente tous les modes qui se propagent vers l'ouest. En utilisant les propriétés d'orthogonalités des fonctions propres du système d'équation, on trouve $K(x,t)$ en résolvant une équation d'onde.

Les équations différentielles qui régissent le reste de la solution sont trouvées en soustrayant l'équation d'onde donnant $K(x,t)$. La solution pour $K(x,t)$ est calculée en utilisant la méthode dite des caractéristiques et le second système est résolu en utilisant un schéma numérique aux différences finies.

On considère le bassin comme étant fermé au Nord et au Sud (20°N - 20°S). Ceci est, bien sûr, une approximation. La présence de ces frontières crée une couche limite artificielle au Nord et Sud du bassin (de l'ordre de 1° de latitude) mais ne pollue pas la solution à l'intérieur du domaine d'intérêt (15°N - 15°S).

La géométrie des côtes est très simplifiée pour deux raisons : la première, parce qu'on s'intéresse à des phénomènes de grande échelle, et la deuxième, parce que la résolution des conditions de radiations pour des portions de côtes sont mathématiquement compliquées et plus difficiles à mettre en oeuvre numériquement lorsque le schéma de côte est très mouvementé.

Pour la structure verticale, on utilise une représentation en modes verticaux, c'est à dire que la structure verticale est projetée sur les fonctions propres verticales. (Résoudre la structure verticale revient à résoudre un problème de Sturm-Liouville). Seuls les 3 premiers modes (fonctions propres) sont utilisés pour obtenir la solution verticale quand on s'intéresse aux variations du niveau de la mer. Pour des variables comme la vitesse, il est parfois bon de prendre en compte les modes supérieurs. Cependant, les trois premiers modes donnent une bonne approximation si on s'intéresse à des phénomènes près de la surface.

Comme souligné dans l'introduction, il est nécessaire de donner une représentation paramétrique des effets du mélange vertical et horizontal. Cette formulation est quelque peu empirique et varie d'un auteur à un autre. Nous avons utilisé une formulation semblable à celle de McCreary (1984) : le mélange vertical se présente sous la forme d'un coefficient de frottement qui affecte chaque mode de façon différente. Les modes plus élevés sont plus sensibles au frottement que les modes les plus bas, ce qui est physiquement raisonnable. Ces coefficients se trouvent dans une gamme de valeurs qui sont réalistes comparés à ceux que l'on peut déduire de l'observation.

II.2 EXEMPLES D'UTILISATION DU MODELE

Le premier exemple d'utilisation du modèle est l'étude du cycle saisonnier de l'Atlantique tropical en réponse au vent. La complexité du champ de vent pour les études de modèle a entraîné une distinction entre deux approches théoriques différentes pour expliquer la réponse saisonnière de l'Atlantique tropical. L'une des approches est de modéliser le signal d'upwelling qui a lieu en été dans le golfe de Guinée comme la solution d'un problème aux valeurs initiales. L'accroissement annuel du vent est idéalisé soit, par une fonction type "marche d'escalier", soit par une amplitude qui suit la climatologie. La seconde approche consiste à simuler la réponse totale du bassin comme la solution forcée d'un vent périodique. Nous avons adopté cette seconde approche en utilisant comme champ de vent nécessaire pour forcer le modèle un champ de vent moyen déduit des observations de bateaux depuis le début du siècle. La solution obtenue est la combinaison des ondes forcées de Kelvin, de Rossby, leurs multiples réflexions sur les bords de l'océan en plus de la réponse locale. La solution diffère de celle obtenue par un problème aux valeurs initiales.

En étudiant ainsi la topographie de la surface, on trouve (figure 1) que la réponse de l'Atlantique équatorial à l'ouest du bassin est principalement locale et pratiquement en équilibre avec les vents d'Est, et que son amplitude annuelle domine le signal. Le modèle confirme que, dans la partie Est, l'upwelling annuel le long de l'équateur n'est pas forcé locale-

ment mais par des actions du vent plus éloignées. L'action locale du vent dans le Golfe de Guinée est de moindre importance.

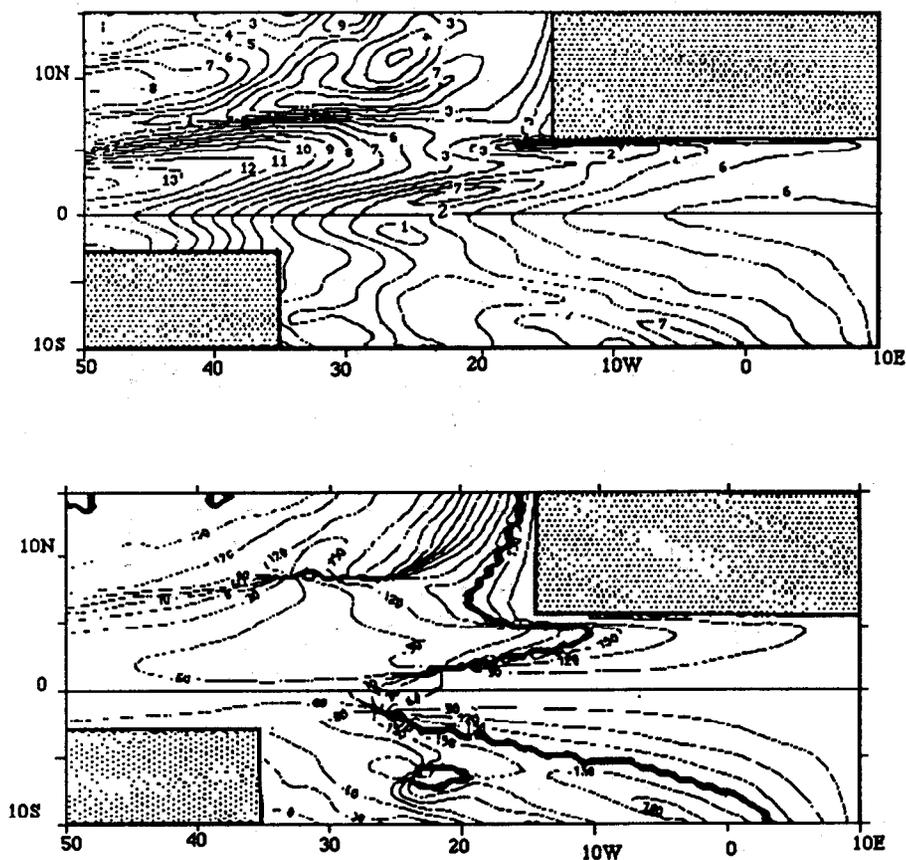


Figure 1 - Amplitude et phase du signal annuel de la topographie dynamique de surface calculées par le modèle forcé par le vent climatologique.

La figure 2 montre le résultat de la simulation pour le cycle saisonnier du contre courant Equatorial Nord (CCEN) comparé à celui obtenu à partir des dérives des bateaux marchands. Le nombre des modes verticaux utilisés pour résoudre la structure verticale joue un rôle important dans l'obtention d'un cycle correct pour le CCEN de même que pour le développement d'un sous Courant Equatorial.

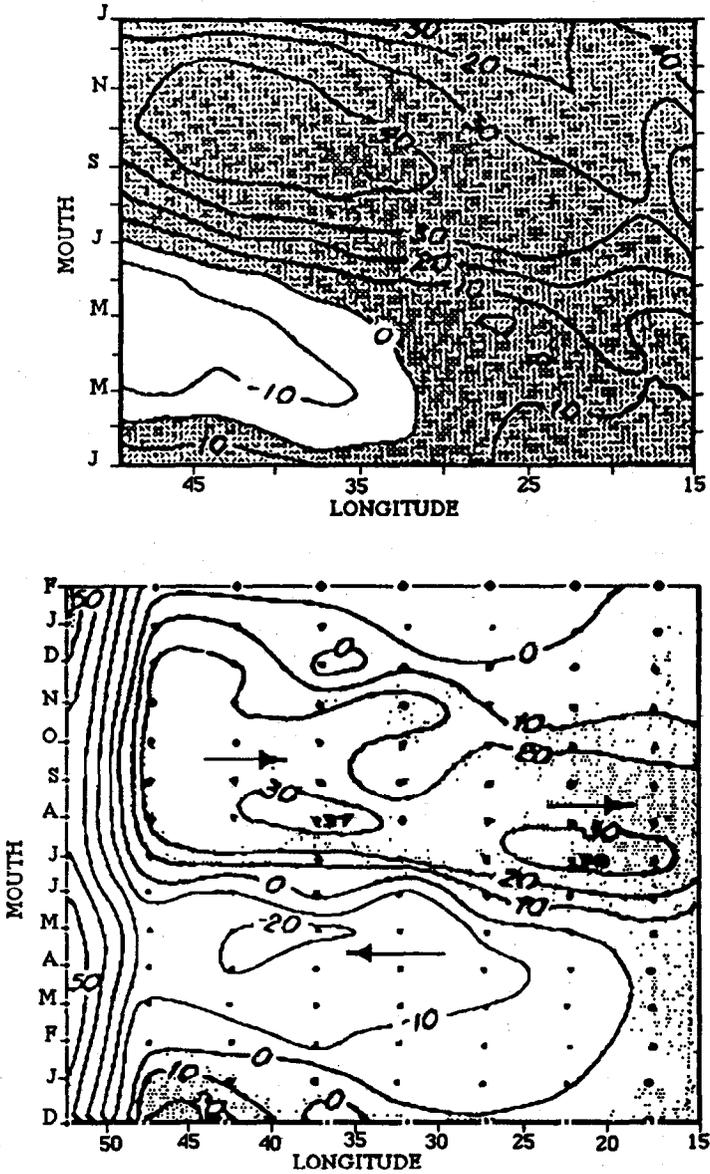


Figure 2 - Cycle saisonnier du contre courant Nord Equatorial en fonction de la longitude
 a) calculé par le modèle forcé par les vents climatologiques, b) déduits des données bateaux.

Cependant, ce type de modèle ne donne pas de bons résultats pour les courants de surface à l'équateur bien que la structure de la pente de la surface (ou de la thermocline) soit bien reproduite.

Le second exemple montre la réponse de l'océan pour une année particulière. Par opposition aux vents climatologique qui, par définition, lisse les événements rapides variant d'une année sur l'autre ou n'étant pas résolu par l'intervalle d'échantillonnage, le vent pour une année particulière montre de brusques variations notamment lors de l'intensification des vents en avril ou mai. La réponse océanique peut donc être différente du cycle saisonnier climatique et ne plus être en équilibre avec le champ de vent. Par exemple, la figure 3 représente l'évolution de la topographie de surface le long de l'équateur pour les années 82-84. La présence du cycle saisonnier est bien marquée mais on observe également les différences d'une année sur l'autre et notamment en début 84 l'absence totale de gradient zonal de la topographie à travers le bassin. Cette absence de gradient est créée par un front d'ondes de Kelvin dû au relâchement anormal des alizés de sud-est. Cette anomalie de topographie de la surface a été observée durant l'expérience FOCAL dont l'ORSTOM était le maître d'oeuvre pour les campagnes à la mer. Elle implique des anomalies importantes du champs de courants et de la structure thermique tant en surface qu'en subsurface.

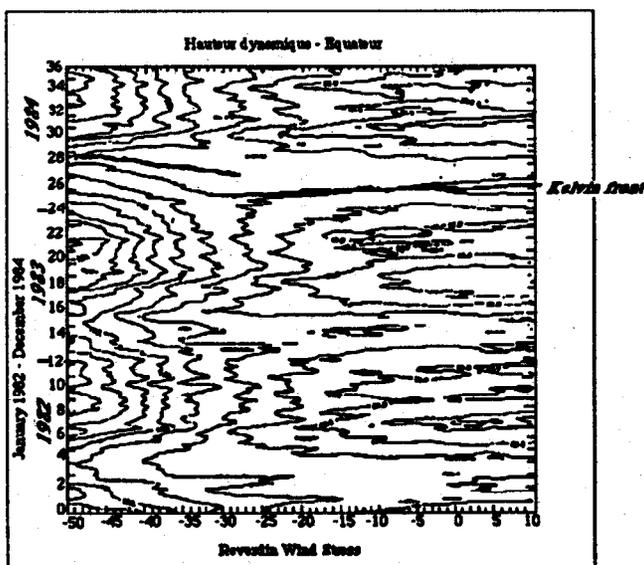


Figure 3 - Topographie dynamique de la surface à l'équateur calculée par le modèle forcé par les vents 82-84 (vents Reverdin)

III. DISCUSSION

Les modèles linéaires tels que celui exposé ici ont été utilisés avec succès pour la description et la compréhension des phénomènes physiques du cycle saisonnier de l'Atlantique tropical. Ils ne permettent pas de tout expliquer, notamment notre modèle ne résout pas explicitement la couche limite du bord ouest. Il ne prétend pas non plus être réaliste dans les zones côtières parce qu'il n'a pas de topographie et parce que ces zones ont une dynamique non linéaire importante. Par contre, son faible coût machine permet de tester diverses hypothèses et de faire des simulations sur un grand nombre d'années, ce qui n'est pas possible actuellement avec un modèle plus important.

Il existe plusieurs versions du modèle. Il a été notamment couplé à un modèle atmosphérique et tourne de façon opérationnelle pour prédire les cycles du phénomène El Nino dans le Pacifique (Zebiak et Cane, 1986). Il a également été utilisé pour déterminer la faisabilité d'expériences à la mer (Reverdin et du Penhoat, 1987) et sert actuellement à tester des méthodes d'assimilation.

IV. BIBLIOGRAPHIE

- ARAKAWA, A., 1966 : Computational design for long term numerical integration of the equations of fluid motion. *J.Comp.Phys.*, 1, 119-143.
- CANE, M.A ET R.J. PATTON, 1984 : A numerical model of low frequency equatorial dynamics. *J.Phys.Oceanogr.*, 14, 1853-1863.
- MCCREARY, J.P., 1984 : Equatorial beams. *J.Mar.Res.* 42, 395-430.
- DU PENHOAT, Y. ET A.M. TRÉGUIER, 1985 : The seasonal linear response of the tropical Atlantic. *J.Phys.Oceanogr.*, 15, 316-329.
- DU PENHOAT, Y. ET Y. GOURIOU, 1987 : Hindcasts of equatorial sea surface dynamic height in the Atlantic in 1982-1984. *J.Geophys.Res.*, 92 (C4), 3729-3740.
- REVERDIN, G. ET Y. DU PENHOAT, 1987 : Modeled surface dynamic height in 1964-1984 : An effort to assess how well the low frequencies in the equatorial Atlantic were sampled in 1982-1984. *J.Geophys.Res.*, 92 (C2), 1899-1913.
- ZEBIAK, S.E. ET M.A. CANE, 1987 : A model El Nino southern oscillation. *Mon.Wea.Rev.*, 115, 2262-2278.

EXPERIENCE D'ASSIMILATION DE DONNEES DANS UN MODELE DE CIRCULATION GENERALE OCEANIQUE

Alain MORLIERE

I INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années l'océanographie s'est considérablement transformée avec le développement de l'intérêt porté à la climatologie et à la prévision du temps. Ceci est dû en grande partie aux résultats qui ont montré le rôle très important joué par l'océan dans la redistribution de l'énergie thermique à la surface de la planète. Il assure l'évacuation de la chaleur en excès aux faibles latitudes vers les hautes latitudes; sa capacité thermique très importante et ses vitesses de déplacement lentes font de l'océan la "mémoire" à moyen terme des événements climatiques. Cette caractéristique laisse augurer d'un allongement de la prévision du temps par une meilleure connaissance de l'océan et des mécanismes qui le régissent.

Toutefois, dans le dispositif de prévision du climat, l'océan reste le point faible du fait de la difficulté d'observations systématiques sur toute l'étendue maritime. Au cours de la prochaine décennie les satellites fourniront un élément de réponse à cette nécessité d'observations synoptiques systématiques. Parallèlement à cette voie, il existe deux autres voies complémentaires: l'observation systématique par l'intermédiaire des bateaux marchands (qui, seuls, permettent l'observation en profondeur) et la simulation de l'océan à l'aide de modèles numériques.

Les océanographes physiciens de l'ORSTOM, ont, jusqu'à présent, surtout travaillés dans le domaine de l'observation. Ils ont mis en place un réseau de mesures par navires marchands qui est actuellement la pièce maîtresse du dispositif permanent d'observation de l'océan tropical du programme international TOGA. Quelques uns (du Penhoat et Tréguier 1985, du Penhoat et Gouriou 1987, Morlière et al. 1988) tentent depuis peu de prospecter la voie de la modélisation en utilisant des modèles numériques pour des études de processus et pour des simulations périodiques les plus réalistes possible. C'est la voie que notre équipe a choisi avec un projet de modélisation opérationnelle de l'océan Atlantique tropical (Merle et Morlière 1988) dont l'objectif est de fournir, à l'aide d'un modèle une description détaillée mensuelle de l'Atlantique dans ses trois dimensions entre 20 N et 20 S.

Les modèles dit de Circulation Générale Océanique sont des outils encore imparfaits qui donnent une image de l'océan à la fois réaliste et entachée de certaines imperfections. Celles-ci proviennent de la difficulté à résoudre certains problèmes physiques ou numériques; mais aussi d'une mauvaise connaissance globale de l'océan à un moment donné. En effet, il est indispensable de disposer, à un instant donné, d'une description physique de l'océan la plus exacte possible car, c'est à partir de cet état initial que le modèle calculera l'évolution de l'océan sous l'action des différentes contraintes extérieures (vent, échanges thermodynamiques à l'interface atmosphérique, échanges aux frontières...). Mais il faut se contenter d'une connaissance approximative de l'état initial de l'océan ce qui, ajouté aux autres insuffisances du modèle, n'améliore pas les simulations.

Un des moyens de lutter contre ces imperfections est d'injecter dans le modèle toutes les nouvelles données au fur et à mesure de leur acquisition en procédant à une assimilation de données. Elle consiste à prendre un état simulé de l'océan, à le transformer le plus objectivement possible en tenant compte des dernières observations et à relancer la simulation à partir du nouvel état ainsi calculé. L'assimilation des données dans les modèles océaniques est un problème mal connu qui fait l'objet de nombreuses recherches. Combien de données faut-il assimiler, quelles données sont les plus efficaces, quelle doit être la cadence d'assimilation, quelle doit être la couverture spatiale la plus efficace, comment prendre en compte les erreurs de mesure? Autant de questions auxquelles il est encore difficile de répondre. Les premières réponses sont des cas d'école utilisant des données générées par les modèles (Moore, Cooper et Anderson 1988).

Nous avons abordé ce problème de manière pragmatique en développant une méthode simple qui utilise au mieux les seules données acquises de façon systématique par les navires marchands le long des lignes de navigation et qui constituent actuellement la seule surveillance opérationnelle des océans.

Nous présenteront d'abord rapidement le modèle utilisé et le bilan que nous en avons dressé dans le domaine thermique; ensuite nous présenterons la méthode que nous avons développée et enfin nous montrerons les améliorations obtenues en appliquant cette méthode sur une année test sur l'ensemble de l'Atlantique intertropical.

II. LE MODELE ET SES PERFORMANCES COMPAREES AUX OBSERVATIONS

II.1 LE MODELE:

Le modèle du LODYC est décrit en détail dans Chartier (1986) et Delécluse et al. (1988). C'est un modèle de circulation générale pour un océan stratifié qui résout les équations primitives. La grille géographique s'étend de 20N à 20S et de 65W à 20E; la résolution est variable de 0°33 en latitude à l'équateur à 1°5 à 20N; en longitude, elle varie de 0°5 près des côtes américaines et africaines à 1° au centre de bassin. Le modèle comporte 16 niveaux entre 0 et 3000 m avec une résolution verticale forte en surface; il ne prend pas en compte la topographie, ne comporte pas d'île. Le pas de temps est de 40 minutes.

II.2 LES FLUX THERMODYNAMIQUES:

Une description détaillée des flux thermiques à l'interface océan-atmosphère est donnée dans Morlière et al. (1988). Les flux radiatifs sont supposés constants, les flux de chaleur sensible et latente sont calculés à partir de "bulk formula" classiques. Les choix de paramétrisation donnent une grande importance au vent. Le vent moyen utilisé filtre les variations haute fréquence ce qui entraîne une sous estimation de l'évaporation. Dans les zones de vent faible, afin d'éviter l'apparition de températures trop élevées du fait de cette sous-estimation, on fixe une valeur minimale au terme d'évaporation qui joue un rôle prépondérant dans les échanges avec l'atmosphère.

II.3 LES CONDITIONS INITIALES:

Les conditions initiales de mise en route ("spin-up") du modèle sont: mouvement nul, stratification thermique fixée en tout point suivant un profil analytique utilisé par Philander et Pacanowski (1980). L'équilibre du modèle est obtenu pour le cycle saisonnier par une intégration de deux années et demie avec des vents annuels puis des vents mensuels climatologiques. Pour notre expérience, les conditions initiales sont constituées par l'état du modèle au 31/12/83 après deux années supplémentaires d'intégration réalisée pour l'expérience FOCAL avec un vent issu d'un modèle atmosphérique.

II.4 LES VENTS:

Deux champs de vents différents ont été utilisés pour forcer le modèle de circulation générale du LODYC en Atlantique Tropical (20N-20S) pour l'année 1984. Le premier champ de vents (MOA) provient des observations des bateaux marchands; le deuxième (FS2b) est issu des analyses d'un modèle de prévision atmosphérique (ECMWF). Le vent MOA qui est plus énergétique et qui présente un signal saisonnier plus marqué, donne globalement les meilleurs résultats.

II.5 LES OBSERVATIONS:

Les observations de température utilisées sont extraites de l'ensemble des profils thermiques rassemblés et validés par Reverdin et al.(1988). Le fichier pour 1984 comprend 3610 profils de températures entre 0 et 400m qui proviennent soit des navires marchands, soit des navires océanographiques notamment ceux participant aux expériences FOCAL et SEQUAL. Toutes les températures sont ramenées aux 15 du mois par une pondération temporelle. Une interpolation linéaire spatiale entre les points de grille les plus proches fournit la température du modèle au lieu d'observation. Pour exprimer l'erreur entre le modèle et les mesures, nous utiliserons l'écart quadratique moyen entre température observée et température simulée aux points d'observation.

II.6 LA COMPARAISON AVEC LES OBSERVATIONS THERMIQUES:

La comparaison systématique entre les observations et les données du modèle a permis de confirmer le rôle essentiel du champ de tension de vent utilisé pour forcer un modèle de circulation océanique générale comme celui de LODYC. Avec les deux champs de vents utilisés, l'événement anormal chaud du début de l'année 1984 est bien simulé. Mais, le champ de vent FS2b issu du modèle du ECMWF de Reading ne permet pas de simuler en 1984 un trait caractéristique du cycle saisonnier en Atlantique: l'upwelling équatorial de l'été boréal. Cependant, avec les mêmes conditions initiales, les mêmes flux thermodynamiques, le modèle simule de façon satisfaisante ce phénomène lorsqu'il est forcé par un vent issu d'observations. Cette différence entre les simulations peut en partie s'expliquer par la différence (30%) des modules moyens des tensions de vent utilisés et par la relative faiblesse de l'amplitude du signal saisonnier de FS2b.

Dans ces conditions d'utilisation, le modèle du LODYC, forcé par le vent MOA issu d'observations, fournit une bonne estimation de la température de la couche de surface qui est un paramètre essentiel des interactions océan-atmosphère. Toutefois, le cycle saisonnier n'est pas pleinement simulé; en particulier l'upwelling équatorial est situé trop à l'ouest et ses manifestations superficielles sont sous-évaluées par le modèle. Ce dernier

point provient davantage de la médiocre qualité de la structure thermique verticale que d'un manque éventuel "d'intensité" de l'upwelling simulé par le modèle. Cela se traduit, dans la région est, par un écart maximal entre données mesurées et simulées en surface : le modèle est trop chaud de 0°5 à 1°5 entre juin et septembre; l'écart quadratique mensuelle entre les observations et la simulation MOA est maximum (1°4 C) en juillet. Par contre, la région équatoriale ouest est mieux simulée; l'écart quadratique moyen mensuel en surface reste inférieur à 1°C; le modèle forcé par le vent MOA est légèrement plus froid en surface que les observations dans cette partie de l'océan.

La thermocline moyenne du modèle, très diffuse, est nettement moins marquée que celle observée. Il y a eu étalement du gradient thermique vertical simulé entre le bas de la couche homogène et 200m, ce qui induit une surestimation du contenu thermique dans cette couche. Ce problème d'étalement vertical de la thermocline peut être lié à de multiples facteurs. Il peut provenir d'une diffusion turbulente verticale trop forte (mais cela ne semble pas être le cas dans les couches superficielles qui présentent parfois trop de stratification). Cela peut être dû au fait que le modèle, isolé de la circulation générale par des frontières fermées, ne peut évacuer les apports de chaleur de la zone équatoriale.

L'erreur entre observation et modèle est supérieure à l'écart type des mesures dans la thermocline, indiquant ainsi une faiblesse de la simulation pour représenter les gradients verticaux. En dessous de 200m, la variabilité du modèle est très faible, les températures simulées sont plus froides que celles observées et voisines de celles du profil initial montrant ainsi qu'en dessous de la thermocline le modèle fait peu évoluer les conditions initiales. Les profils verticaux sont nettement mieux simulés dans la région équatoriale ouest où, malgré l'étalement de la thermocline, ils ont la même allure que ceux observés et restituent le cycle saisonnier de façon satisfaisante (avec le vent MOA). Dans l'est, l'étalement de la thermocline simulée apparaît comme une faiblesse essentielle du modèle.

Pour résumer, l'étude de Morlière et al.(1988) a permis de montrer qu'à la condition d'utiliser un vent le plus "réaliste" possible, le modèle du LODYC restitue la température de surface sur l'ensemble du domaine géographique de façon satisfaisante; il souffre d'un étalement de la thermocline très marqué dans la région est et simule mieux en profondeur la région équatoriale ouest que la région est.

III. METHODE D'ASSIMILATION DE DONNEES

La méthode développée est basée sur une démarche de type expérimentale où le modèle est considéré comme un instrument de mesure perfectible; elle s'appuie sur les seules observations non superficielles perma-

nelles de l'océan: les profils thermiques mesurés par les navires marchands et transmis en temps quasi-réel. Le principe en est le suivant: à l'issue d'une première simulation pour le mois étudié, on détermine un écart entre les champs thermiques observés et simulés, en chaque point de grille; puis on effectue une deuxième simulation dans laquelle on a introduit une correction dans l'équation de la température de façon à rattraper progressivement l'écart mesuré précédemment. Le résultat de cette simulation "corrigée" sert d'état initial pour le traitement du mois suivant.

III.1 DÉTERMINATION DU CHAMP THERMIQUE SIMULÉ MENSUEL

Le champ simulé de température au 15 du mois est déterminé par une moyenne pondérée de cinq champs thermiques instantanés simulés tous les 7.5 jours.

III.2 DÉTERMINATION DU CHAMP THERMIQUE OBSERVÉ MENSUEL

Pour chaque niveau du modèle, à une analyse objective du champ des observations permet de passer d'une distribution aléatoire de l'information à une distribution en chaque point de grille du modèle.

L'analyse objective utilisée est celle dite des corrections successives de Bergsthorson et Döös (1955), reprise par Cressman (1959). Nous avons calqué notre schéma sur celui utilisé par Cadet et Reverdin (1981) pour déterminer la distribution spatiale de paramètres météorologiques au-dessus de l'océan Indien lors de l'expérience MONEX.

Le schéma consiste en des modifications successives d'un champ initial (ici, le champ mensuel de température du modèle) sur la base des observations (ici, les profils XBT du mois). Ceci est réalisé en deux étapes. La première consiste à interpoler le champ initial à tous les points de mesure et à calculer les différences entre les valeurs mesurées et interpolées; ces différences constituent les corrections à apporter au champ test initial. La deuxième étape consiste à calculer ces corrections à tous les points de grille en ne prenant en compte que les données les plus proches. Pour cela on définit un rayon d'influence qui correspond à la distance maximale d'influence des données sur le champ de test initial. On applique ce schéma plusieurs fois en diminuant le rayon d'influence à chaque itération de telle sorte que le champ analysé s'ajuste aux données d'abord pour les détails les plus grossiers, ensuite pour les caractéristiques les plus fines. L'analyse comprend aussi une élimination des données présentant un écart trop grand par rapport au champ test.

Nous avons introduit dans ce schéma la notion d'anisotropie horizontale afin de tenir compte de la réalité de la distribution des grandeurs océa-

niques; ce n'est plus de rayon d'influence qu'il faut alors parler mais de zone d'influence (qui dans notre cas est rectangulaire).

A l'issue de cette opération nous obtenons un champ thermique analysé qui est un mélange entre les observations et les températures mensuelles simulées; il a été obtenu par une déformation du champ simulé en direction des observations. Ce champ analysé sera proche du modèle dans les régions où il n'y a pas d'observation; il sera d'autant plus près de la réalité que les observations seront plus nombreuses. Notre analyse pourra être améliorée dans l'avenir en travaillant en trois dimensions et non plus en raisonnant successivement sur chacun des niveaux du modèle sur la verticale.

III.3 SIMULATION AVEC CORRECTION PROGRESSIVE

Une fois déterminée la différence entre champs analysé et simulé en chaque point de grille, on lance une nouvelle simulation du mois étudié. Cette nouvelle simulation comporte un terme correctif dans l'équation de la chaleur du modèle qui a pour but de rattraper progressivement l'écart thermique constaté. La correction est active pendant 15 jours à partir du jour 7.5; elle est inactive pendant la dernière semaine du mois traité. Ce terme correctif n'a pas de réalité physique, il est de nature expérimentale et a pour but de pallier une "dérive" constatée du modèle dans le domaine thermique.

IV. RESULTATS DES CORRECTIONS

Nous avons comparés les résultats des simulations sans et avec assimilation, soit avec des observations sous forme de moyennes mensuelles, soit avec les résultats d'une analyse optimale du champ des observations thermiques menée par G.Reverdin. Nous avons également mené la même expérience avec une simulation obtenue en partant d'un autre état initial que nous avons considéré être plus proche de la réalité.

IV.1 EFFETS DE LA CORRECTION SUR LES STRUCTURES VERTICALES

Pour chaque mois, nous comparons trois profils moyens (figure 1): l'un est la moyenne mensuelle des observations, les autres sont les moyennes des profils simulés aux mêmes points d'observations lors de simulations sans et avec assimilation. Le profil avec assimilation, est le résultat d'une simulation qui n'a pas encore assimilé les données du mois traité. Pour chaque mois, nous comparons des données prises de façon quasiment aléatoire, c'est à dire là où des observations ont été réalisées par les navires du commerce et quelques navires océanographique lors de l'expérience FOCAL de 1984.

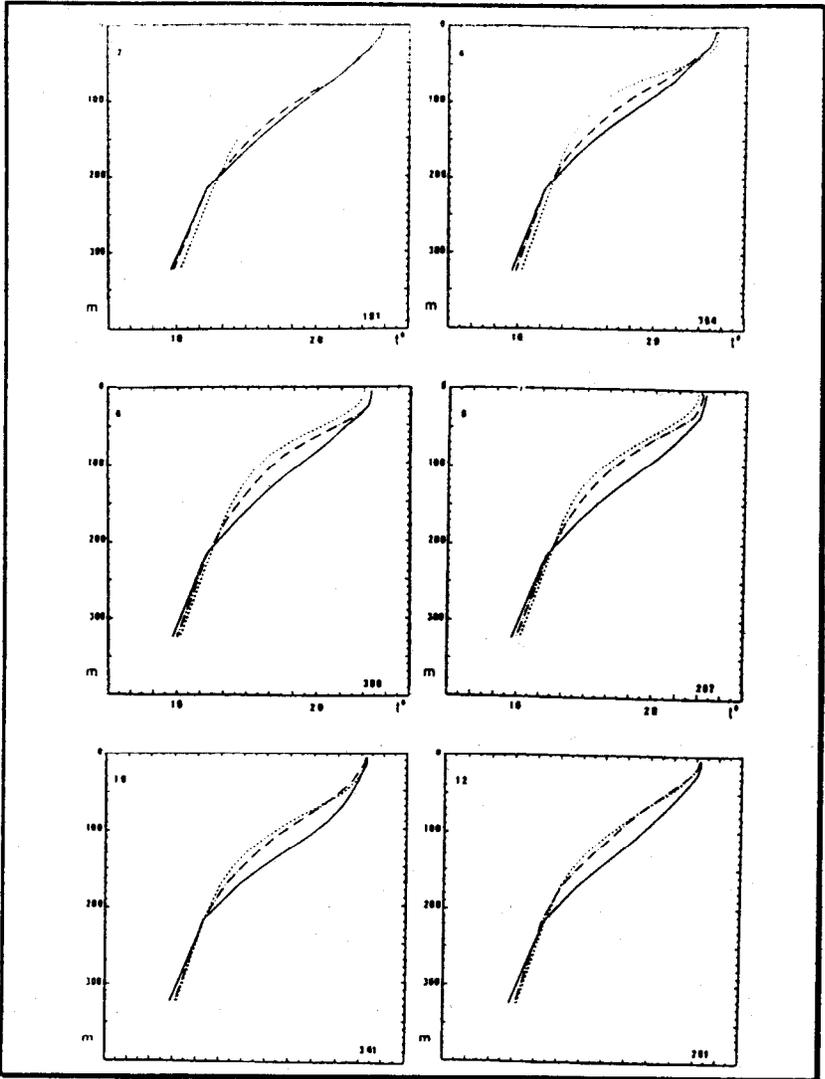


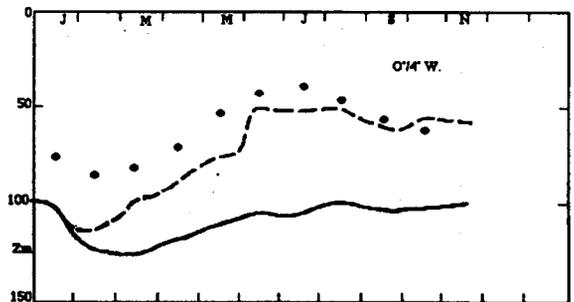
Figure 1: Monthly mean temperature profiles: observations (dotted), simulated with no assimilation (full), simulated with assimilation in previous months(dashed-dotted).

L'effet de la correction sur les profils de température est progressif, il est particulièrement net dans la couche entre 50 et 200m qui était le point faible des structures verticales simulées par le modèle du LODYC.

IV.2 EFFETS DE LA CORRECTION DANS LE TEMPS, EN UN POINT

La figure 2 représente l'évolution temporelle au cours de 1984 de la profondeur de l'isotherme 20°C qui représente l'immersion de la thermocline; sont représentées les observations et les simulations avec et sans assimilation pour deux expériences avec états initiaux différents. Sans assimilation, la profondeur de la thermocline du modèle est trop profonde (40 à 50m pour un état initial, 20 à 30m pour l'autre); après assimilation cette thermocline simulée remonte plus ou moins rapidement suivant la qualité de l'état initial utilisé. A partir de juillet, suivant le site; l'écart entre simulations corrigées et observations varie entre 0 et 10m.

Figure 2: Time evolution of the monthly 20°C isotherm depth at 4W on the equator for observations (dots), simulation without assimilation (thick line) and simulation with assimilation (thin line).



Ceci montre l'amélioration progressive due à l'assimilation qui permet de récupérer en 6 mois la différence simulation observation dans la région équatoriale.

IV.3 EFFETS DE LA CORRECTION SUR LA PENTE ÉQUATORIALE

La pente équatoriale de la thermocline est une des caractéristiques essentielles de la circulation équatoriale.

La figure 3 représente la pente de la thermocline entre les côtes d'Amérique de sud et d'Afrique en juillet 1984. L'effet de l'assimilation est d'autant plus important que l'état initial est éloigné des observations en particulier dans l'est de l'Atlantique. Il apparaît que l'assimilation compense très rapidement les effets de l'état initial choisi puisque les deux pentes obtenues avec assimilation sont pratiquement confondues. Ceci n'est vrai qu'à l'équateur et l'assimilation ne suffit pas à compenser le rôle de l'état initial sur l'ensemble du domaine du modèle. La figure 4 illustre les différences de la profondeur de la thermocline dues à la différence d'état initial entre deux simulations avec assimilation; dans la zone équatoriale, ces différences sont faibles; les écarts les plus importants sont dans la région des contre-courants nord et sud montrant ainsi que l'un

des états initiaux de l'océan prend très mal en compte les structures thermiques associées aux contre-courants.

Figure 3: Equatorial slope of the 20°C isotherm in July 1984 for observations (dots), for the simulation using one initial state with (full thin line) and without (full thick line) assimilation and for the simulation using another initial state with (dashed thin line) and without (dashed thick line) assimilation.

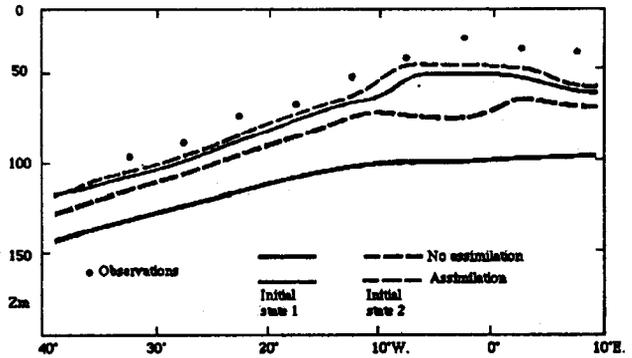
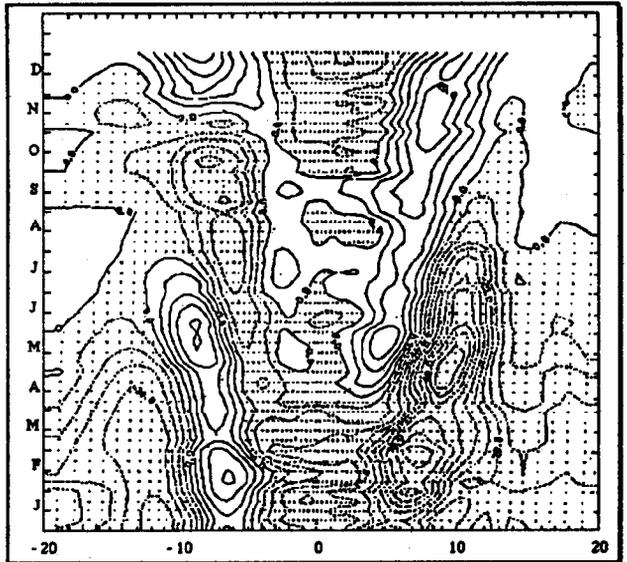


Figure 4: Difference of the 20°C isotherm depth between two simulations with assimilation using different initial states at 28W during 1984. Isolines are every 5 meters.



IV.4 EFFETS DE LA CORRECTION SUR LA CIRCULATION

La figure 5 permet de constater que les courants, entre 10S et 10N sont globalement accélérés après correction des champs thermiques. A 20W, le noyau du Sous-Courant Equatorial a gagné 20cm/s; les Contre-Courants Nord et Sud ont également progressé de près de 20cm/s; le flux ouest du Courant Equatorial Sud garde le même maximum mais voit son extension augmentée.

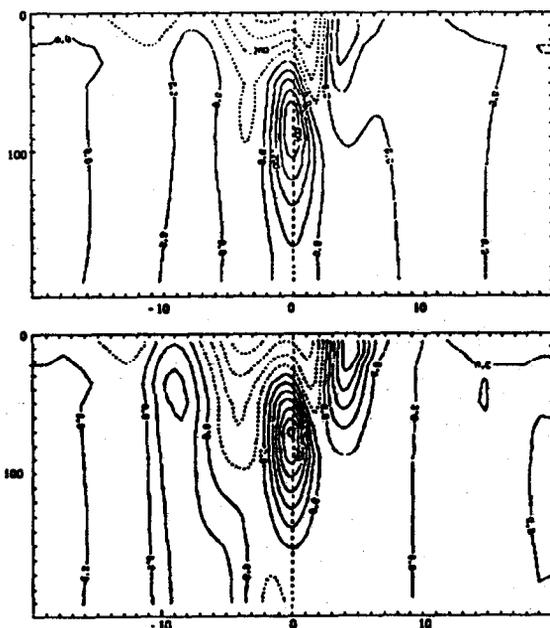


Figure 5: Simulated section of zonal current component at 20W between 20S and 20N without assimilation (left) and with assimilation (right).

La correction des champs thermiques a donc des conséquences sur la circulation. Il y a une intensification de la circulation, il y a également une augmentation du signal haute fréquence dans les courants.

V. CONCLUSIONS

Nous avons montré qu'avec une méthode simple, il était possible d'améliorer sensiblement les performances d'un modèle tridimensionnel de circulation générale océanique.

La méthode employée vise à corriger les champs thermiques simulés sur la base des seules observations réellement disponibles en permanence sur l'ensemble de l'océan. Le principe de la correction est de type expérimental: à l'issue d'une première simulation mensuelle, on constate des différences entre champs observés et simulés, on relance alors une nouvelle simulation après une modification simple des équations du modèle qui a pour but de rattraper progressivement les écarts estimés. Cette méthode de correction apporte une amélioration globale du champ thermique simulé mais aussi de la circulation.

Les performances du modèle sont améliorées par un procédé d'assimilation-correction mais sont toujours largement tributaires de la connaissance initiale du milieu océanique. Il apparaît donc que, dans l'état actuel des modèles océaniques, il ne peut y avoir de bonne modélisation sans des observations nombreuses et permanentes qui permettent la meilleure description initiale possible de l'océan, le contrôle et la correction des insuffisances des modèles. La querelle des "modélisateurs" et des observateurs n'a donc pas lieu d'être: les observations sont indispensables aux modèles qui peuvent être considérés comme de remarquables interpolateurs de données.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- BERGTHORSSON P. AND B. DÖÖS (1955) Numerical weather map analysis. *Tellus*, 7, 329-340.
- CRESSMAN G. P. (1959) An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.
- CHARTIER M. (1986) Un modèle numérique tridimensionnel aux équations primitives de circulation générale de l'océan. Thèse Univ. P. et M. Curie, 4 Place Jussieu 75005 Paris. Rapport CEA-R-5372
- CADET D. AND G. REVERDIN (1981) The monsoon over the Indian ocean during summer 1975. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 148-158.
- DELÉCLUSE P., ANDRICH P. AND M.A. FOJJOLS (1988) Simulation of the 84 warm event in the tropical Atlantic and sensitivity experiments using a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, submitted
- DU PENHOAT Y. AND A.M. TRÉGUIER (1985) The seasonal linear response of the tropical Atlantic ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 316-329.
- DU PENHOAT Y. AND Y. GOURIOU (1987) Hindcasts of equatorial sea surface dynamic height in the Atlantic in 1982-1984. *J. Geophys. Res.*, 92, 3729-3740.
- MERLE J. AND A. MORLIERE (1988) Toward an operational 3 dimensional simulation of the tropical Atlantic ocean. *Geophys. Res. Lett.*, vol 15, n°7, July 1988.
- MOORE A.M., N.S. COOPER AND D.L.T. ANDERSON (1987) Initialisation and data assimilation in models of the Indian Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, vol 17, n°11, 1965-1977.
- MORLIERE A., P. DELÉCLUSE, P. ANDRICH AND B. CAMUSAT (1989) Evaluation des champs thermiques simulés par un modèle de circulation générale de l'Atlantique tropical. *Oceano. Acta*, Vol 12, n°1, janvier 1989.
- PHILANDER S. G. H. AND R. C. PACANOWSKI (1980) The generation and decay of equatorial currents. *J. Geophys. Res.*, 85, 1123-1136

CINETIQUE CHIMIQUE ET MODELES COMPARTIMENTAUX : APPLICATION A L'ETUDE DE L'EVOLUTION DU STOCK ORGANIQUE DES SOLS

Marc PANSU

I RESUME

Un exemple simple d'étude cinétique d'un équilibre chimique permet de montrer :

-L'insuffisance et les dangers d'une approche statistique par rapport à une démarche déterministe d'étude des mécanismes.

-L'application de la cinétique chimique à des systèmes écologiques plus complexes où les produits ne sont pas tous identifiés et mesurés.

Dans de tels systèmes, on peut pourtant identifier des variables d'état ou compartiments contenant des produits dont la vitesse de décomposition peut être considérée comme homogène. Entre ces variables, s'échangent des flux de matière régis par les lois classiques de la cinétique chimique.

Nous décrivons alors des modèles à deux ou trois compartiments que nous avons proposés concernant la cinétique d'évolution de mélanges sols-résidus végétaux sous l'action des microorganismes et nous les situons par rapport à un modèle plus simple et un plus complexe proposés antérieurement.

Nous commentons ensuite en relation avec ce travail, les principales étapes de l'élaboration d'un modèle à compartiments : proposition d'hypothèses, estimation des coefficients de décroissance, simulation dynamique et validation. Simultanément, sont décrits quelques outils de calcul avec les moyens informatiques qui ont permis leur mise en oeuvre.

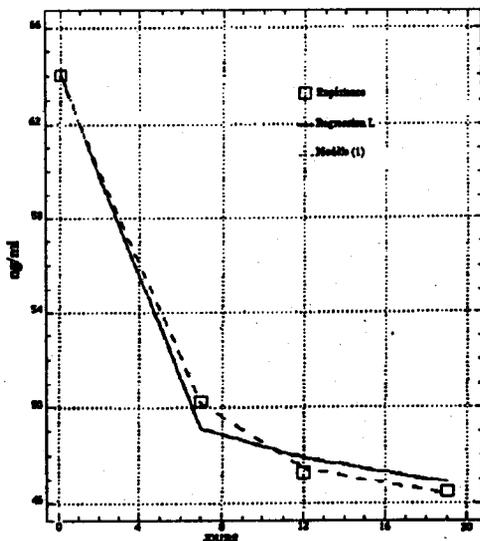
Enfin nous suggérons brièvement les voies de recherche qui à notre avis doivent permettre de transposer nos modèles validés selon des données de laboratoire à de véritables modèles prévisionnels d'évolution des sols en conditions naturelles.

II. APPROCHES STATISTIQUES OU DETERMINISTES

II.1 APPROCHES STATISTIQUES

L'expérimentateur qui suit une évolution, comme celle d'une concentration chimique, est souvent tenté de réaliser un ajustement statistique de ses données. Ainsi, la figure 1 montre un ajustement logarithmique de la concentration en deltaméthrine d'une solution diluée dans l'alcool à l'abri de la lumière en fonction du temps.

Figure 1 : Approches statistique et déterministe de la cinétique de dégradation d'une solution alcoolique de deltaméthrine. la régression linéaire de la concentration par rapport au logarithme du temps est significative (trait plein). Elle ne correspond pourtant à aucune loi contrairement au modèle (1) basé sur la cinétique chimique (traits pointillés).



Cet ajustement est hautement significatif (probabilité de refus $<0,02$) et peut donc fournir un modèle empirique de l'état des solutions de deltaméthrine. Pourtant une réflexion est nécessaire en ce qui concerne les imperfections ou caractéristiques suivantes :

-il ne fournit de réponse que pour l'ensemble des temps réels positifs $]0, \infty[$ excluant le temps 0 de l'intervalle physique.

-Pour un temps ∞ , la dose restante de deltaméthrine devient nulle et la conservation des solutions alcooliques est impossible

-Il n'est en accord avec aucune loi physique connue. Peut-être s'agit-il de la découverte d'une loi ?

II.2 APPROCHE DÉTERMINISTE.

Dans un premier temps, il est possible de prendre du recul par rapport aux données et de rechercher s'il existe un mécanisme et une loi qui peut régir le phénomène à observer.

Dans le cas ci-dessus, une étude par chromatographie gazeuse couplée spectrométrie de masse (PANSU et al., 1988) nous a montré que la décomposition s'accompagnait de la croissance d'un composé identifié comme un stréréoisomère du produit initial. Par ailleurs, RUZO et al. (1978) ont étudié les produits de photodégradation accélérée de la deltaméthrine.

Il ressort que le mécanisme de l'isomérisation peut être pressenti comme un double équilibre radicalaire, le radical intermédiaire I pouvant redonner soit la deltaméthrine D soit son isomère B selon le schéma :



En posant les hypothèses de cinétiques chimiques du premier ordre et d'un état dynamique stable ($d[I]/dt=0$) pour le radical I on aboutit aux équations de vitesse régissant les teneurs des composés D et B :

$$d[D]/dt = -\alpha[D] + \beta[B] \quad (2)$$

$$d[B]/dt = \alpha[D] - \beta[B] \quad (3)$$

Selon que l'on a mesuré D seul ou D et B en fonction du temps, deux types de calculs permettant d'estimer α et β sont alors disponibles en prenant en compte l'ensemble des données. Leur principe sera présenté ci-dessous.

Cet exemple simple montre bien l'intérêt d'une démarche déterministe par rapport à la simple approche statistique. Même si l'ajustement aux données est proche du précédent (figure 1), les trois ambiguïtés citées ci-dessus sont maintenant levées :

-Le modèle (1) donne une réponse sur toute l'échelle de temps;

-Les solutions ne se dégradent pas complètement pour un temps infini mais la teneur en deltaméthrine tend vers une limite lorsque les vitesses des équations 2 et 3 deviennent égales soit :

$$[D] = \beta[B]/\alpha \quad (4)$$

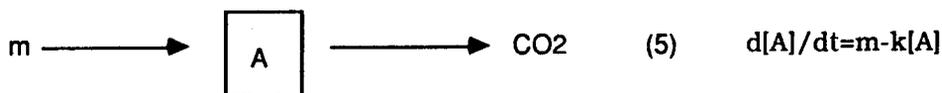
-La validation, par nos résultats expérimentaux, de ce modèle qui respecte les lois classiques de la cinétique chimique constitue une confirmation du mécanisme réactionnel suggéré par RUZO et al. dans d'autres conditions expérimentales.

II.3 CAS DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS

Le devenir des caractéristiques chimiques des sols, l'évolution de leur stabilité structurale et de leur fertilité sont en liaison avec celui de leur stock organique quantitatif et qualitatif. Aussi, dans un souci de prévision de l'effet de différentes pratiques culturales, plusieurs auteurs ont cherché à mesurer l'évolution de ces stocks et à modéliser leurs résultats.

Selon les expériences, la démarche statistique a permis des ajustements en fonction du temps selon des courbes exponentielles (HOFMAN et RUYMBEKE, 1979), hyperboliques (BOIFIN et FLEURY, 1974), puissances (BALESDENT, 1982).

Ces divers ajustements sont tous des variantes de l'ancien modèle présenté par HENIN et DUPUIS (1945) et décrivant la matière organique comme un seul compartiment A dans lequel entrent des apports végétaux m et qui se décompose selon une cinétique chimique du premier ordre :



La décroissance exponentielle correspond bien à la loi de vitesse (5) alors que les ajustements hyperboliques et puissances correspondent respectivement à des cinétiques de décroissance d'ordre 2 et 3 (Tableau I).

Loi cinétique	Ordre 0	Ordre 1	Ordre 2	Ordre n
$-dA/dt$	Linéaire	exponentielle	hyperbolique	puissance
Modèle	$A \xrightarrow{a}$	$A \xrightarrow{a(A)}$	$A \xrightarrow{a(A)^2}$	$A \xrightarrow{a(A)^n}$
Dimension a				
M = %o massique	MT^{-1}	T^{-1}	$M^{-1}T^{-1}$	$M^{-1}T^{-1}$
T = temps				
Evolution A	$A_0 - at$	$A_0 \exp(-at)$	$A_0(1 + A_0at)^{-1}$	$A_0(1+a)AL^{n-1}t^{-n-1}$ $n < -1$ $(Z^{n-1} - 1)/(n(n-1))A_0^{n-1}$
Demi-vie A	$A_0 / 2a$	$\text{Log } 2 / a$	$1/aA_0$	
Exemples d'applications au carbone des sols	pour mémoire	HOFMAN ET RUYMBEKE (1979) BOIFIN et al. (1986)	BOIFIN ET FLEURY (1974)	BALESDENT (1982)

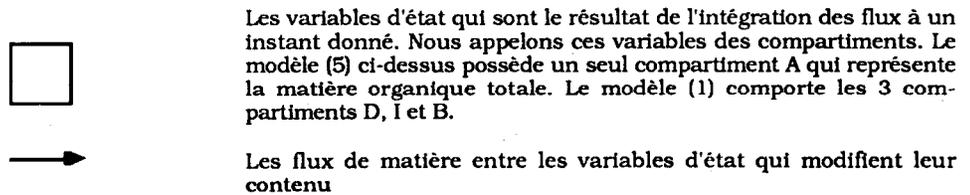
Tableau 1 : Cinétique de décroissance de modèle monocompartimentaux appliqués au carbone des sols. A = contenu carboné exprimé généralement en pour mille massique du sol sec. t est le temps exprimé en année. A₀ = valeur de A au temps 0. a = coefficient de décroissance. Dans le seul cas de la décroissance exponentielle le temps de demi-vie est indépendant de la quantité de matière à détruire.

Cependant, ces modèles ne peuvent constituer que de grossières approximations de la dynamique des matières organiques des sols. En particulier, ils ne peuvent pas du tout rendre compte du comportement des composés labiles qui se transforment rapidement lors d'apports végétaux. D'un autre côté, ils ne permettent pas de comprendre les âges importants mesurés pour la matière organique des sols. C'est pourquoi, divers auteurs ont préféré des modèles à plusieurs compartiments.

III. MODELES COMPARTIMENTAUX.

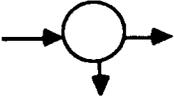
III.1 DIAGRAMMES RELATIONNELS : COMPARTIMENTS ET FLUX.

FERRARI(1070) dans une description des techniques de base de simulation dynamique décrit des normes pour construire des diagrammes relationnels. Parmi celles-ci nous retiendrons :





Les variables d'entrée ou de sortie de quantités ne modifiant pas l'équilibre du système. Par exemple CO_2 dans le modèle (5).



Variables intermédiaires ou auxiliaires indiquant un partage des flux.

III.2 LOIS DE DÉCROISSANCE DES COMPARTIMENTS.

Ce sont ses lois qui régissent l'intensité des flux ou quantités de matière qui quittent une variable pendant un intervalle de temps. Ce sont dans notre cas les lois classiques de la cinétique chimique (Tableau I).

Si nous représentons par des crochets les concentrations de chaque variable d'état :

Dans le modèle (1), le flux de D vers B est égal à $\alpha[D]$ et le flux inverse à $\beta[B]$. Dans le modèle (5), le flux de sortie de A est $k[A]$. Ces flux correspondent ici à des cinétiques chimiques du premier ordre exprimant un pourcentage de sortie constant par rapport au contenu du compartiment.

Pour des réaction d'ordre 0, ce sont les flux de sortie qui sont constants et ici respectivement égaux à α , β et k . Pour des réactions d'ordre n nous aurions les flux $\alpha[D]^n$, $\beta[B]^n$ et $k[A]^n$.

A chaque compartiment, sera associé une équation différentielle comme les équations (2), (3) et (5) représentant sa dynamique d'évolution par la différence entre toutes les entrées et toutes les sorties. L'intégration simultanée de toutes les équations, après en avoir estimé les coefficients, constitue la simulation dynamique.

III.3 PARAMETRES DES COMPARTIMENTS.

Nous venons de voir qu'un paramètre essentiel permettant de caractériser un compartiment est son coefficient de décroissance (α , β et k dans nos exemples).

Une variable d'état peut rester stable quantitativement si elle est en équilibre dynamique, c'est à dire que les entrées sont parfaitement égales aux sorties. C'est le cas de l'hypothèse admise pour le

compartiment I du modèle (1) et aussi des compartiments D et B si on est à l'équilibre.

Cette stabilité dynamique ne signifie pas une stabilité des molécules présentes mais leur disparition et renouvellement (turnover) d'autant plus rapide que leur flux de sortie lié au coefficient de décroissance est important. L'âge moyen des molécules d'un compartiment à un temps donné sera en relation avec son temps de résidence dans ce compartiment.

FRISSELL(1982) consacre un article à la définition des temps de résidence dans les modèles écologiques. Il distingue:

-Le temps de résidence dans les modèles de demi-vie. Dans l'exemple du modèle (5) pour un apport nul ($m=0$), la demi-vie des matières organiques peut s'exprimer par :

$$T_{1/2} = 0,693/k \quad (6)$$

correspondant au temps de vie moyen ou temps de résidence :

$$\tau = T_{1/2}/0,693 = 1/k \quad (7)$$

-Le temps de résidence dans les modèles d'état stable :

$$\tau = \frac{\text{quantité retenue}}{\text{quant. traversante}} \quad (8)$$

Dans l'exemple (5) ci-dessus, si $m=k[A]$ nous aurons :

$$\tau = [A]/k[A] = 1/k \quad (9)$$

Enfin, l'auteur indique comment calculer des temps de résidence moyens, des temps de résidence effectifs et des pseudo temps de résidence dans les équilibres écologiques complexes.

III.4 CAS DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS.

Plusieurs modèles à compartiments ont été proposés pour décrire la dynamique des matières organiques des sols sous l'effet des microorganismes. Ces modèles ne sont pas contradictoires mais leur complexité est limitée par le volume des données qui ont permis de les ajuster : mesures biochimiques, datations, etc.

Ainsi un modèle complexe n'infirmes pas la description apportée par un modèle plus simple mais permet l'interprétation de données plus diverses et augmente la précision.

La question suivante est donc posée : à partir de combien de compartiments disposera-t-on d'une précision suffisante pour les études prévisionnelles in situ ? Cette question est d'autant plus importante qu'une prévision en conditions naturelles doit prendre en compte d'autres facteurs que le seul effet des microorganismes simulé par les modèles.

Contrairement au modèle (1) où les contenus des compartiments D et B peuvent être mesurés à tout moment, les compartiments des matières organiques des sols correspondent très rarement à des fractions chimiques aussi aisément identifiables et mesurables. Les données physiques, chimiques ou biologiques conduisent cependant à leur affecter une cinétique de décroissance et à estimer les flux qui les traversent.

Nous ne citerons ci-dessous que les deux modèles entre lesquels nous situons nos propositions :

- Le modèle de HENIN et al.(1959) (HMT fig. 2) permet la distinction entre deux compartiments : matières organiques labiles (A) et matières humifiées plus stables (B) .

- Le modèle de JENKINSON et RAYNER(1977) (JR Fig 2) distingue 5 compartiments : fractions décomposables des végétaux (D), fractions résistantes des végétaux (R), biomasse microbienne (A), matière organique physiquement stabilisée (B) et matière organique chimiquement stabilisée (C).

Nous avons proposé (PANSU et SIDI, 1987) :

- Un modèle à deux compartiments (PS II fig. 2) prenant mieux en compte que celui de HENIN et al. deux réalités physiques :

- la possibilité d'incorporation des apports végétaux pour partie dans chacun des deux compartiments stable et instable.

- le renouvellement des matières organiques entre les deux compartiments.

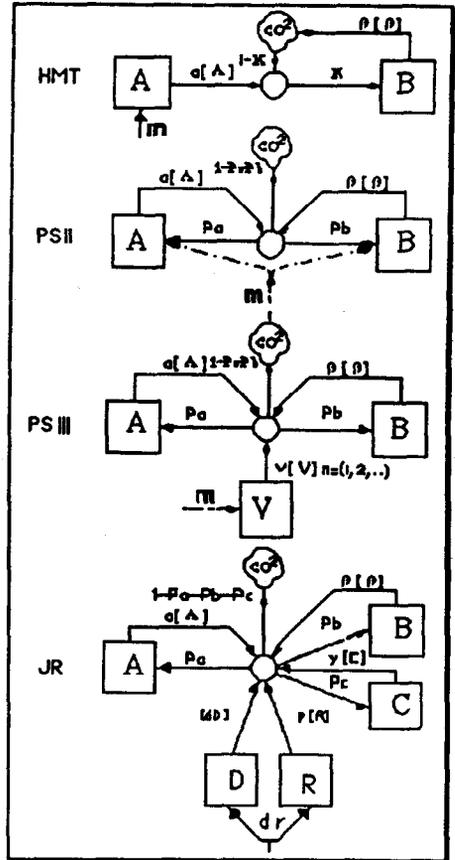
- Un modèle à trois compartiments plus précis que le précédent et qui constitue une simplification de celui de JENKINSON et RAYNER (PS III fig.2) :

- les deux compartiments fractions végétales D et R sont remplacés par un seul V dont l'ordre de la cinétique peut varier. Ce changement provient de nos observations concernant la cinétique de décroissance de matières organiques légères séparées par densimétrie. le compartiment A correspond chez nous à des matières organiques labiles aussi bien d'origine végétale que microbienne.

- le compartiment stable B correspond à des temps de résidence proches de celui de JENKINSON et RAYNER appelé "Physically stabilised organic matter". Pour des prévisions à court terme de l'ordre d'une centaine d'années notre modèle néglige le compartiment C introduit par JENKINSON et RAYNER pour expliquer l'âge important des matières organiques des sols dont le renouvellement est très faible.

Figure 2 : diagrammes relationnels comparatifs de modèles prévisionnels du stock organique des sols : HMT = HENIN, MONNIER et TURC (1959), PS II = PANSU et SIDI (1987) à deux compartiments, PS III = PANSU et SIDI (1987) à trois compartiments, J R = JENKINSON et RAYNER (1977). Les traits pointillés expriment une possible différence d'échelle de temps entre apports et décroissance.

- m apport végétal
 A matière organique labile (HMT? PS II). métabolites végétaux labiles + biomasse microbienne (PS III) (microbial) biomass (JR)
 B matière organique stable (HMT) (PS). physically stabilised organic matter (JR);
 V compartiment végétal non remanié (PSIII).
 D decomposable plant material (JR)
 C chemically stabilised organic matter (JR)
 $\alpha, \beta, \dots, \delta$ coefficients de décroissance respectifs de compartiments A,B,V,C,D,R.
 k coefficient isohumique (HMT).
 P_a, P_b, P_c proportion de renouvellement dans les compartiments A,B,C.
 d, r proportion d'entrée dans les compartiments D et R (JR).
 n ordre de la décroissance du compartiment V (PS III).



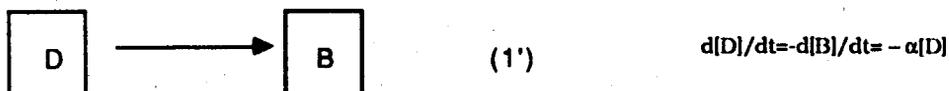
IV. TECHNIQUES DE RECHERCHE D'UN MODELE

Elle passe par de grandes étapes : émission d'une hypothèse correspondant à un diagramme relationnel, recherche des coefficients des équations différentielles correspondant à l'hypothèse, simulation numérique, validation et corrections.

IV.1 HYPOTHESES ET DIAGRAMME RELATIONNEL

Il s'agit de définir les variables d'état du système et les flux qui traversent ces variables afin de construire un diagramme relationnel selon les normes indiquées ci-dessus.

Cette construction nécessite d'intégrer le maximum d'observations sur le phénomène étudié. Si l'on ne dispose pas de travaux antérieurs, il faut alors émettre plusieurs hypothèses et les tester ensuite avec des données expérimentales afin d'en sélectionner une. Par exemple pour le modèle (1) on peut émettre l'hypothèse complémentaire d'une réaction irréversible de D en B soit :



Parmi toutes les variables d'état possibles, il faut sélectionner celles qui ont un effet limitant pour l'évolution du système.

Par exemple, dans les modèles que nous proposons pour les matières organiques des sols, les microorganismes n'interviennent pas sur la dynamique du système bien qu'ils soient les responsables de celle-ci. Ceci provient du fait que dans les sols, les microorganismes sont souvent excédentaires par rapport aux aliments dont ils disposent. Leur quantité n'est donc pas un facteur limitant et ils ne sont pris en compte dans nos modèles que dans leur rôle de stockage organique temporaire parmi les autres fractions labiles du compartiment A. Il en est de même dans le modèle de JENKINSON et RAYNER qui intitulent pourtant ce compartiment labile "biomasse microbienne".

IV.2 ESTIMATION DES COEFFICIENTS DE DÉCROISSANCE.

C'est la partie la plus délicate. Elle nécessite une collecte de données, au besoin par la mise en place d'expériences et peut faire appel à une large panoplie de calculs scientifiques.

Ce travail dépend de la complexité des hypothèses à vérifier :

- il peut s'agir de simples régressions linéaires comme dans le cas du modèle (1'), où l'intégration de l'équation de vitesse fournit :

$$D = D_0 \text{EXP}(-\alpha t) \quad (10)$$

signalons pourtant qu'il existe au moins deux manières de réaliser ce simple ajustement de mesures de D en fonction du temps :

- si l'on donne le même poids à chaque point:

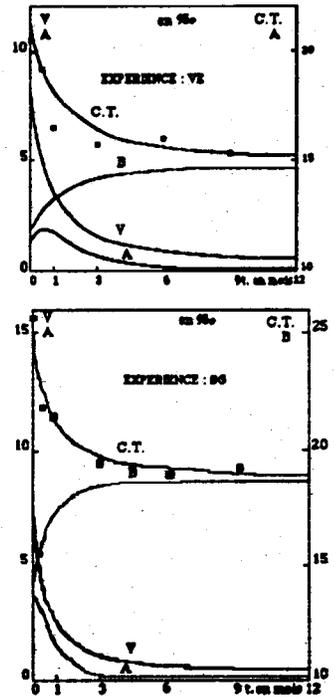
$$\text{LN}(D) = \text{LN}(D_0) - \alpha t \quad (11)$$

- si le point origine D0 est plus sûr :

$$\text{LN}(D/D_0) = -\alpha t \quad (12)$$

ce sont des ajustements du type de l'équation (12) que nous avons utilisé pour établir la cinétique du compartiment V de notre modèle (fig.3.III).

Figure 3 : Evolution simultanée des trois compartiments du modèle PS III (fig.II) et du carbone total dans deux expériences d'incubation de mélanges sols/pailles correspondant à des apports de 8,1°/oo de carbone.



-les régressions non linéaires représentent un outil plus puissant que nous avons utilisé pour valider le modèle I (fig.3). En effet, dans ce cas, l'intégration des équations de vitesse des compartiments A et B est possible et conduit à un modèle pour l'évolution du carbone total de la forme :

$$C = a \text{ EXP}(-\alpha t) + b \text{ EXP}(-\beta t) \quad (13)$$

de nombreux auteurs ont d'ailleurs utilisé des ajustements du type de l'équation (13) pour des courbes de décroissance de résidus végétaux dans les sols selon une démarche statistique et non déterministe. Nous

avons dressé un tableau comparatifs de différents résultats (PANSU et SIDI, 1987).

De tels ajustements peuvent être réalisés au moyen de logiciels existant dans le commerce (STATGRAPHICS, sté Uniware) ou plus spécialisés (CHEVILLOTTE et TOUMA, 1987). L'algorithme de calcul le plus employé demeure celui de MARQUARDT (1963).

Un ajustement non linéaire peut être également utilisé pour rechercher le modèle (1) si l'on dispose de mesures du seul compartiment D en fonction du temps. En effet, en exprimant la constance de la teneur totale par $Co=D+B$, l'intégration de l'équation (2) fournit :

$$D = \beta Co / (\alpha + \beta) + (Do - \beta Co / (\alpha + \beta)) e^{-(\alpha + \beta)t} \quad (14)$$

-Pour ajuster simultanément quatre paramètres concernant la décroissance de résidus végétaux dans les sols, JENKINSON et RAYNER ont utilisé la méthode du maximum de vraisemblance préconisée par ROSS (1974) pour l'ajustement des données écologiques.

-dans le cas d'un équilibre du type (1) nous avons utilisé la technique suivante, pour ajuster simultanément des mesures de D et B en fonction du temps. Il s'agit de trouver simultanément les coefficients de deux équations différentielles du type :

$$d[D]/dt = a[D] + b[B] \quad (2')$$

$$d[B]/dt = c[D] + d[B] \quad (3')$$

si V est la matrice à 2 lignes et n colonnes des vitesses expérimentales et T la matrice des teneurs correspondantes pour les temps (1,2,...,n), nous pourrions écrire tous les couples d'équation (2') et (3') selon l'équation matricielle :

$$|V| = |K| |T| \quad (15)$$

|K| étant la matrice des coefficients :

$$|K| = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \quad (16)$$

On démontre que la solution est alors donnée par une équation du même type que celle des équations de régressions classiques (Mullon et Perrier, ORSTOM, com. pers. :

$$|K| = |VT^t| |TT^t|^{-1} \quad (17)$$

Si l'ensemble des données vérifie le modèle (1) les valeurs espérées pour les coefficients de (16) sont d'après les équations (2) et (3):

$$c = -a = \alpha \text{ et } b = -d = \beta \quad (18)$$

Nous avons programmé les calculs au moyen des routines de méthodes numériques TURBO PASCAL TOOLBOX. L'avantage de cette technique est qu'elle peut facilement être étendue à des modèles plus complexes avec un nombre plus important d'équations différentielles.

-Enfin, la simulation dynamique décrite ci-dessous constitue également un moyen d'affecter des valeurs plausibles aux coefficients de vitesse.

IV.3 SIMULATION DYNAMIQUE ET VALIDATION.

Il s'agit de trouver la solution à une valeur initiale d'un système d'équations différentielles ici du premier ordre.

Différents algorithmes d'intégration numérique d'équations différentielles peuvent être employés parmi lesquels le plus utilisé est celui de RUNGE-KUTTA.

Là aussi, il est possible d'utiliser soit des bibliothèques de calculs numériques du commerce comme TURBO PASCAL TOOLBOX, soit des logiciels spécialisés (G. PICHON, ORSTOM, com. pers.).

Un modèle sera validé par des données expérimentales si les valeurs d'une ou plusieurs variables d'état obtenue(s) pour les temps d'intégration correspondant à leur collecte sont en accord avec ces données.

Un modèle peut également être validé par des données équivalentes à la somme de variables d'état. C'est le cas de nos modèles fig.2, la mesure la plus aisée dans les sols étant celle du carbone total.

La simulation pendant 12 mois (fig. 3) de l'évolution simultanée des trois compartiments organiques de notre modèle PS III (Fig.2) est en accord avec les observations d'autres auteurs sur les matières organiques des sols.

Le maximum fourni par la simulation du compartiment labile A en début d'incubation permet d'expliquer d'autres données collectées lors de l'expérience qui a servi à établir ces modèles, comme un maximum observé simultanément sur les taux d'agrégats des sols. Cette simulation a donc d'autant plus de valeur qu'il n'est pas possible actuellement de fractionner chimiquement et de mesurer ce compartiment A.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Les modèles à compartiments constituent une extension intéressante des lois plus faciles à vérifier des mécanismes réactionnels et de la cinétique chimique.

La différence essentielle réside dans le fait que les équilibres écologiques et biologiques sont trop complexes, pour mesurer précisément chaque constituant chimique. On doit regrouper en compartiments des ensembles de produits proches quant à leur cinétique de décomposition puis simuler l'évolution simultanée de tous ces compartiments.

Les modèles que nous avons proposés pour décrire la cinétique d'humidification et de minéralisation des mélanges sols, résidus végétaux ont été validés par nos expériences de laboratoire.

Leur transposition en conditions naturelles devrait être facilitée par:

- leur relative simplicité par rapport aux autres propositions
- la possibilité de simuler des apports à pas de temps variable

Pourtant, une telle transposition ouvre encore bien des voies de recherches et d'approches multidisciplinaires.

Elle concerne surtout la prise en compte des facteurs climatiques (VANVEEN et PAUL, 1981) mais aussi les phénomènes de transport convectif dans les sols et des facteurs moins directement reliables (évasion, faune des sols etc...).

Toutefois l'effet simulé par un modèle semble prépondérant dans la description de la dynamique des matières organiques dans les sols.

VI BIBLIOGRAPHIE

BALESDENT J., 1982 -Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations ^{14}C des matières organiques. Thèse Docteur-Ingénieur, Univ. Nancy I, 90 p.

BOIFIN J. et FLEURY A., 1974 -Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. Ann. agron. 25, 4, 555-573.

CHEVILLOTTE H. et TOUMA J., 1988 -Le logiciel OPTIM : optimisation d'ajustements non linéaires, ORSTOM, à paraître.

FERRARI J., 1982 -Basic techniques of dynamic simulation, in PENNING DE VRIES et VAN LAR ed., centre of agricultural publishing and documentation, Wageningen

FRISSEL M.J., 1981 -The definition of residence times in ecological models, Ecol. Bull. (Stockolm), 33-49.

HENIN S. et DUPUIS M., 1945 -Essai de bilan de la matière organique du sol, Ann. Agron., 15, 17-29.

HENIN S, MONNIER G. et TURC L., 1959 -Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol, C.R. Acad. Sci. Fr., 248, 138-141.

JENKINSON D.S. et RAYNER J.H., 1977 -The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments, Soil Sci., 123, 5, 298-303.

MARQUARDT D.W., 1963 -An algorithm for least squares estimation of non linear parameters, J. of the society of industrial and applied mathematics, 11, 2, 431-441.

PANSU M. et ELISSA N., 1988 -Evolution des solutions diluées de deltaméthrine en relation avec leur pouvoir insecticide, Actualité chimique, à paraître.

PANSU M. et SIDI H., 1987 -Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux, Science du sol 25, 4, 247-265.

ROSS G.J.S., 1974 -Fitting methods to ecological data, in CORSTEN and POLSTENICU ed., Proc. 8th int. biometric conf., Constanza Romania.

RUZO L.O., HOLMSTEAD R.L. et CASIDA J.E., 1977 -pyrethroid phytochemistry : decamethrin, J. of agric. food chem., 25, 6, 1385-1394.

VAN VEEN J.A. et PAUL E.A., 1981 -Organic carbon dynamic in glassland soils. 1 Background information and computer simulation, Can. J. Soil Sci. 61, 185-201.

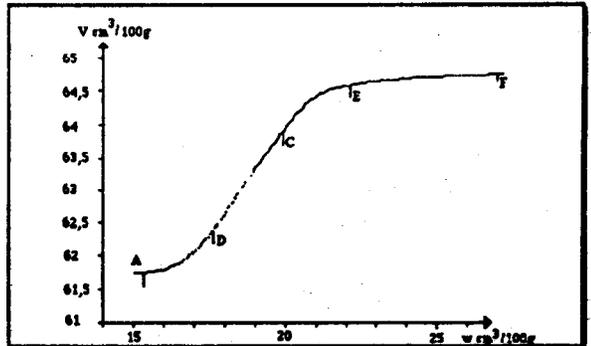
MODELE DE REPARTITION DE L'EAU ET DE L'AIR DANS UN ECHANTILLON DE SOL STRUCTURE. (A PARTIR DE LA MODELISATION DES COURBES DE RETRAIT)

Erik BRAUDEAU

I INTRODUCTION

La courbe de retrait, bien connue en pédologie, représente la variation du volume massique d'un échantillon de sol en fonction de sa teneur en eau (ex. fig.1). C'est une mesure qui est longue et difficile à obtenir directement, et dont le nombre de points a toujours été limité. Récemment, cependant, nous avons montré comment obtenir les courbes de retrait d'échantillons de sol non remaniés (1), indirectement mais en continu, par la mesure automatique de la rétraction du diamètre de l'échantillon. Cela donne accès à des courbes expérimentales, dont la précision, jamais obtenue auparavant, permet la recherche de leur équation.

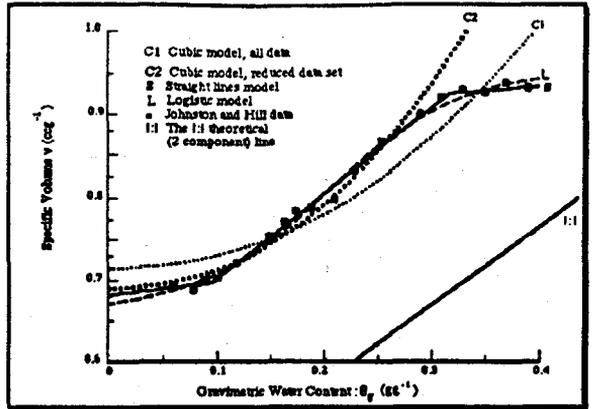
Figure. 1 Courbe de retrait expérimentale d'un échantillon de sol non remanié



Or le retrait peut être considéré comme une variation structurale d'ensemble de l'échantillon, causée par la variation géométrique de son système poral en fonction des volumes d'eau et d'air qui l'occupent. C'est pourquoi les courbes de retrait sont précieuses à obtenir pour le calcul des processus hydrodynamiques dans le sol (2), ou bien aussi pour la caractérisation de propriétés structurales du sol (3). Plusieurs tentatives de modélisation du retrait ont donc été faites, mais sans résultat vraiment satisfaisant (4), à cause semble-t-il du nombre insuffisant des données expérimentales aux environs des points de transition des phases de retrait, qui ne permet pas de choisir par exemple, entre un modèle continu ou discontinu des variations structurales de l'échantillon (4,5) (fig.2).

Disposant alors de données très précises et surtout mesurées en continu de la rétraction d'échantillons de sol structurés (1), nous nous proposons dans cette note, de tenter cette modélisation en reprenant l'approche de SPOSITO et GIRALDEZ (5,6) qui ont bien montré l'existence d'une équation paramétrique universelle des courbes de retrait mais sur un cas particulier et sans que la forme de l'équation n'ait pu être donnée.

Figure . 2 Exemple de différentes modélisations de la courbe de retrait, tiré de GARRY et MALAFANT (1987)



II. CADRE DE L'ETUDE

Les quatre sols pris en exemple sont des sols ferrallitiques du CONGO, dont les principales caractéristiques sont reproduites dans le tableau I, un prélèvement au cylindre a été effectué dans les horizons supérieurs A,AB,BA, en trois répétitions, et analysés au rétractomètre (1). Cet appareil, schématisé à la figure 3, mesure le diamètre de l'échantillon cylindrique en même temps que son poids, au cours du séchage l'air, en enceinte régulée (28°, Hr 40%).

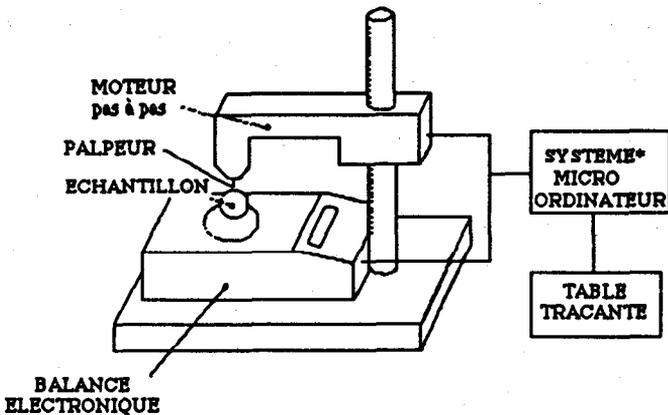


Figure 3 Appareillage de mesure de la rétraction et de l'évaporation d'un échantillon de sol en cours de séchage

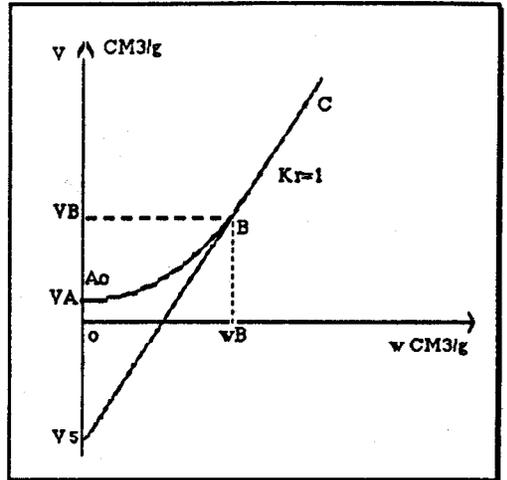
nom	texture	teneur
		en
échantil.	argile:limon:sable	carbone
LOH2-A	: 64.3% : 16.4% : 11.7%	: 5.2%
LOH2-AB	: 66.3 : 13.7 : 10.3	: 4.9
LOH2-BA	: 62.5 : 18.6 : 10.5	: 1.1
TNZI-A	: 46.7 : 31.8 : 13.2	: 3.8
TNZI-AB	: 57.5 : 29.5 : 8.1	: 1.4
MSBA-A	: 45.9 : 30.8 : 17.8	: 1.9
MSBA-AB	: 52.2 : 30.6 : 12.1	: 1.5
MSBA-BA	: 54.1 : 32.1 : 9.9	: 1.2
AGRI-A	: 17.0 : 24.4 : 57.3	: 1.7
AGRI-AB	: 11.2 : 38.2 : 47.3	: 0.9
AGRI-BA	: 22.7 : 20.8 : 53.1	: 0.7

Tableau I:- Analyse granulométrique et teneur en carbone de quatre sols ferralitiques du CONGO.

La figure 1 reproduit la courbe de retrait d'un échantillon de sol ferralitique argileux du CONGO (MSBA-BA, cf. tableau I), suivi en dessèchement depuis l'état saturé (point F), jusqu'à l'état sec, c'est à dire en deçà de la limite de retrait (point A). Il s'agit d'une courbe expérimentale obtenue point par point, en sorte qu'il est aisé d'en délimiter avec précision les différentes phases de retrait séparées par les points A, B, C, E, F (1).

L'analyse des phases C-B et B-A des courbes de retrait a été bien étudiée par SPOSITO et GIRALDEZ (5) qui en ont recherché l'équation en posant, comme hypothèse de base, que le volume d'air entrant dans l'échantillon de sol, à partir du point B considéré comme point d'entrée d'air, est une fonction de la teneur en eau w , ne dépendant que des points A et B (fig. 1a), et obéissant la loi des états correspondants. De ce fait, l'entrée d'air, et corrélativement le volume massique de l'échantillon, peuvent être exprimés par une fonction paramétrique de forme universelle, c'est à dire valable pour tous les types de sol. Malheureusement, leur étude ne portait que sur des échantillons dont les courbes de retrait ne présentaient pas de phase structurale (F-C), et commençaient directement avec la phase (C- B) dont la pente, appelée constante de retrait: K_r , est égale 1 (fig. 1b). De tels échantillons sont très particuliers, car ils sont sans macro-porosité et par conséquent complètement saturés jusqu'en B où commence à se produire l'entrée d'air.

Figure . 3 Modèle de courbe de retrait étudié par SPOSITO et GIRARDEZ (1976°)



Pour considérer le cas général des sols structurés, dont la constante de retrait est différente de 1, et qui sont en partie dessaturés au point B, on a élargi ce modèle en posant de nouvelles hypothèses.

III DEFINITION DU MODELE

Trois hypothèses sont nécessaires pour définir le nouveau modèle de la variation structurale d'un échantillon de sol:

1° Il existe un système poral microscopique, constituant l'un des volumes fonctionnels responsables du retrait global de l'échantillon; ayant son point d'entrée d'air au point de transition entre ces deux phases (point B sur la courbe de retrait), et donc sa constante de retrait (pente C-B) égale 1.

2° La micro-porosité totale de l'échantillon correspond exactement à la porosité de ce système, si bien que le volume poral de celui-ci, appelé V_{mi} , est égal à la teneur en eau w , de l'échantillon au point d'entrée d'air B: $V_{miB} = wB$.

3° Le volume global de l'échantillon est fonction linéaire des volumes fonctionnels responsables du retrait composant l'échantillon.

Ces trois hypothèses définissent les différents volumes fonctionnels du nouveau modèle, et par là, les différents volumes structuraux considéré. Tous ces volumes sont rapportés à la masse M_s de la phase solide de l'échantillon.

Ainsi, la 1ère hypothèse définit qualitativement un volume fonctionnel homogène (V_{mi}), qui répond en fait au modèle de SPOSITO et GIRAL-

DEZ (fig.3). Son volume poral est noté V_{mi} , et sa teneur en eau, w_i . L'entrée d'air dans ce volume se faisant seulement partir du point B, sa constante de retrait est égale 1 puisque $\frac{dV_{mi}}{dw_i}=1$ jusqu'en B.

La deuxième hypothèse définit quantitativement la microporosité de l'échantillon, et par conséquent aussi sa macroporosité qui est la macroporosité complémentaire, dont le volume poral est noté V_{ma} et la teneur en eau w_a : d'après cette hypothèse, $V_{mi}=w_i=w$ au point B, ce qui entraîne $w_a=w-w_i=0$ en B.

Enfin la troisième hypothèse exprime la relation entre le volume global de l'échantillon V , et ses volumes fonctionnels constitutifs causant le retrait, c'est dire (V_{mi}), et w_a , l'eau extérieure à (V_{mi}). Cette relation peut être mise sous la forme:

$$dV/dw = K1 \cdot \frac{dV_{mi}}{dw} + K2 \cdot \frac{dw_a}{dw}$$
, étant entendu que la variation du volume de (V_{mi}) correspond celle de son volume poral V_{mi} , puisque le volume de sa phase solide associée est constant.

IV. CONFRONTATION DU MODELE AVEC LES DONNEES OBSERVEES

On considère successivement les deux portions: C-A et F-C de la courbe de retrait (fig. 1).

1° Partie C-A de la courbe de retrait. On observe sur toutes les courbes une partie rectiligne C-B correspondant à la phase de retrait maximum. Cela se traduit par la relation (hypothèses 1 et 3): $dV/dw = cte = K1 \cdot \frac{dV_{mi}}{dw} + K2 \cdot \frac{dw_a}{dw} = K1 \cdot \frac{dw_i}{dw} + K2 \cdot \frac{dw_a}{dw}$;

Or par définition, $w=w_i+w_a$, ce qui entraîne que $\frac{dw_a}{dw}$ et $\frac{dw_i}{dw}$ sont également constants au cours de cette phase, et respectivement égaux à 0 et 1, valeurs obtenues en B d'après l'hypothèse 2. Cela veut dire que la macroporosité V_{ma} , est entièrement vide d'eau dans toute cette partie (C-A) de la courbe, et que seul (V_{mi}) est responsable du retrait global de l'échantillon. C'est pourquoi, on peut écrire, en accord avec la troisième hypothèse:

$$\frac{dV}{dw} = K1 \cdot \frac{dV_{mi}}{dw}$$
, mais avec $K1=K_r$, déterminé au cours de la phase C-B où $\frac{dV}{dw}=K_r$ et où $\frac{dV_{mi}}{dw}=1$. On obtient alors, pour cette partie de la courbe, la relation générale suivante:

$$dV = K_r \cdot dV_{mi} \quad (1)$$

En posant $dV_{mi} = x \cdot dw$, la fraction de l'eau sortant de l'échantillon, responsable du retrait du système microscopique, l'équation (1) s'écrit:

$$dV = Kr \cdot x \cdot dw \quad (2)$$

où x est une fonction paramétrique qui ne dépendrait, d'après l'hypothèse de SPOSITO et GIRALDEZ, que des points A et B. On trouve effectivement un très bon ajustement de cette partie de la courbe, en prenant:

$x = 1$, entre les points C et B;

$$\text{et } x = \frac{e^{wn} - 1}{e - 1} \text{ dans l'intervalle B-A,} \quad (3)$$

$$\text{où } wn \text{ est la teneur en eau normalisée: } wn = \frac{w - w_A}{w_B - w_A} \quad (4).$$

Cela donne, après intégration de (2), l'équation paramétrique suivante de V fonction de wn :

$$V - V_B = Kr \cdot (w_B - w_A) \cdot \frac{e^{wn} - wn - e + 1}{e - 1} \quad (5),$$

et la forme normalisée de V :

$$V_n = \frac{V - V_A}{V_B - V_A} = \frac{e^{wn} - wn - 1}{e - 2} \quad (6).$$

Par ailleurs, en faisant $wn=0$ dans l'équation (5), on obtient une relation générale entre Kr et les coordonnées des points A et B:

$$Kr = \frac{V_B - V_A}{w_B - w_A} \cdot \frac{e - 1}{e - 2} \quad (7).$$

Un exemple d'ajustement de V_n (équ.6) est donné dans la figure 4.

2° Partie F-C de la courbe de retrait. On observe sur toutes les courbes étudiées, une première phase de rétraction faible ou nulle F-E, dont la pente est constante et notée Ko : $Ko = \frac{VE - VF}{wE - wF}$.

l'hypothèse 3 s'exprime alors par la relation:

$$dV = Kr \cdot dV_{mi} + Ko \cdot dwa \quad (8)$$

où l'on a fait $K2=Ko$, $K2$ étant déterminé au cours de la phase rectiligne F-E de pente Ko , où pour les mêmes raisons que précédemment (phase C-B), $\frac{dV_i}{dw}$, et $\frac{dwa}{dw}$ sont constants et égaux respectivement 0 et 1 (valeurs connues en F).

En posant comme précédemment $x.dw$, la fraction de l'eau sortant de l'échantillon, responsable du retrait de (V_{mi}), on a:

$dwi=x.dw=dV_{mi}$, $dwa=(1-x)dw$; et l'équation 8 devient:

$$dV=K_r.x.dw+K_o.(1-x).dw \quad (9)$$

avec $x=0$ entre les points F et E, puisque $\frac{dV_{mi}}{dw} = \frac{dwi}{dw} = 0$ dans cette phase.

En prenant pour x , dans la phase E-C, la même équation que celle utilisée précédemment dans la phase B-A:

$$x = \frac{e^{wn} - 1}{e - 1}, \text{ avec } wn = \frac{V - VE}{VC - VE}.$$

on obtient dans ce cas également, un très bon ajustement de V_n (ex. fig.5), qui s'obtient par intégration de (9):

$$V_n = \frac{V - VE}{VC - VE} \frac{K_r.(e^{wn} - wn - 1) + K_o.(e.wn - e^{wn} + 1)}{K_r.(e - 2) + K_o} \quad (10)$$

et on a aussi K_r relié aux points E et C par la relation:

$$K_r = \frac{VE - VC}{wE - wC} \cdot \frac{e - 1}{e - 2} + \frac{K_o}{e - 2} \quad (11)$$

Figure 4 Courbes $V_m = f(\omega n)$ calculée (en trait plein), et observée (croix), concernant la phase de retrait B - A. (MSBA - BA)

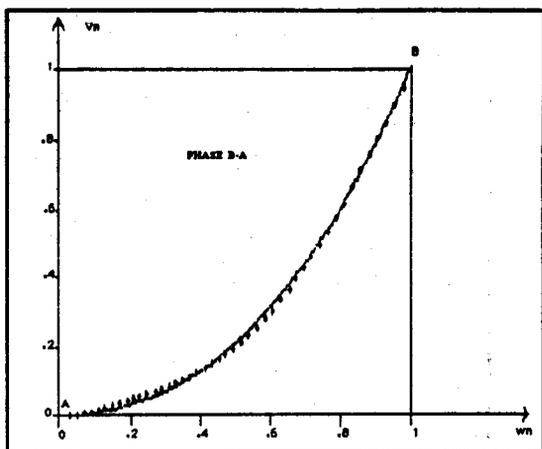
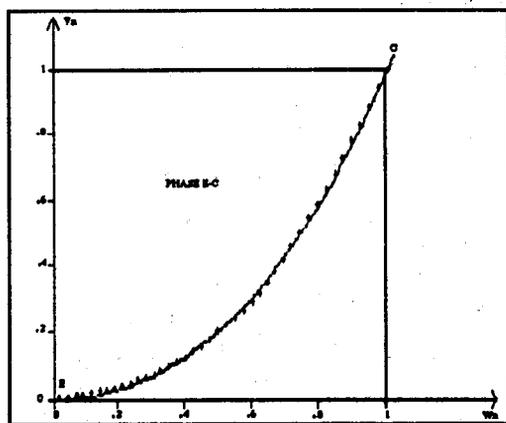


Figure 5 Courbes $V_n = f(\omega n)$ calculée (trait plein), et observée (croix), concernant la phase de retrait E - C. (MSBA - BA)



V. VALIDITE ET PROPRIETES DU MODELE.

HYPOTHESES	+	LES FAITS OBSERVES	----->	MODELE
1) B est le point d'entrée d'air dans (Vmi)	:	C-B rectiligne	:	wa=0 à partir de C : $Kr = \frac{dV}{dVmi}$
2) Vmi = w au point B	:	F - E rectiligne	:	:dwi=0 de F à E : $Ko = \frac{dV}{dwa}$
3) V est fonction linéaire de (Vmi) et wa	:	E-C courbe expon	:	: $x = \frac{dVmi}{dW} = \frac{(e^{m-1})}{(e-1)}$
	:	B-A courbe expon	:	: $x = \frac{dVmi}{dW} = \frac{(e^{m-1})}{(e-1)}$

Tableau II - Schéma de la démarche utilisée pour l'élaboration du modèle et la recherche de l'équation mathématique

Le tableau II résume la démarche qui a été suivie pour obtenir la formulation complète de la courbe de retrait. D'après ce tableau, l'équation généralisée de la courbe de retrait peut être donnée sous la forme dérivée (8):

$$dV = Kr.dVmi + Ko.dwa \quad \text{où:}$$

°Vmi et wa sont déterminés au cours de la phase de retrait maximum durant laquelle Vmi=w et wa=0;

$$°Kr = \frac{VC-VB}{wC-wB} \quad \text{et} \quad Ko = \frac{VF-VE}{wF-wE}$$

°dVmi=x.dw, x étant une fonction paramétrique représentant la partie de l'eau s'évaporant de l'échantillon, qui contribue au retrait de (Vmi).

La validité du modèle est attestée, dans le cas de nos échantillons de texture et structure différentes, par les très bons ajustements obtenus avec l'équation (8), des parties E-C et B-A de la courbe de retrait. Ceux-ci sont évalués par les moyennes des carrés des écarts donnés dans le tableau III. D'autre part, ces ajustements ont été obtenus en prenant pour x, la fonction paramétrique continue, décrite dans le tableau IV. Cette fonction est un fait expérimental qui donne au modèle son caractère dé-

terministe et continu quant à la variation des volumes structuraux, d'eau et d'air dans l'échantillon, en fonction de la teneur en eau globale.

		: phase E-C		: phase B-A	
NOM	: C.E. : nbre de			: C.E. : nbre de	
ECHANT	: x 10 ⁴ : points			: x 10 ⁴ : points	
LOH2	A : 2.00	: 153		: 2.57	: 58
"	AB: 3.32	: 39		: 3.27	: 33
"	BA: 1.06	: 37		: 1.47	: 26
	:	:		:	:
TNZI	A : 1.63	: 124		: 2.12:	: 53
"	AB: 0.81	: 38		: 1.24 :	: 35
	:	:		:	:
MSBA	A : 1.79	: 42		: 4.28	: 38
"	AB: 1.08	: 27		: 1.24:	: 48
"	BA: 0.78	: 41		: 1.06:	: 46
	:	:		:	:
AGRI	A : 3.42	: 87		: 2.21	: 69
"	AB: 0.86	: 84		: 3.09	: 55
"	BA: 0.62	: 75		: 2.05	: 39

Tableau III:-Moyenne des carrés d'écart entre les valeurs calculées et observées de Vn, au cours des phases E-C et B-A.

PHASES:	F - E	E - C	C - B	B - A	A - A ₀
x =	: 0	: $\frac{w_n}{e - 1}$: 1	: $\frac{w_n}{e - 1}$: 0
wn =	:	: $w - w_E$:	: $w - w_A$:
	:	: $w_C - w_E$:	: $w_B - w_A$:

Tableau IV:-Valeurs de x et wn dans chaque phase de retrait.

En effet, d'après le tableau IV, la courbe de retrait est entièrement déterminée par la position des cinq points particuliers: A,B,C,E,F. Et comme il existe deux équations, ((7) et (11)), liant Kr et Ko ces points, le nombre de paramètres nécessaires au tracé de la courbe de retrait est ramené à huit. Par conséquent, avec huit paramètres indépendants, on est en mesure de calculer, pour toute teneur en eau w, tous les volumes structuraux (V,Vmi,Vma,Vs) composant l'échantillon, ainsi que la répartition de l'eau (wi,wa), et donc aussi de l'air (Vmi-wi, Vma-wa), dans celui-ci. Les équations de ces différentes variables sont données dans le tableau V.

RETRAIT	F	C	B	A
wi	$wE(e-2)+wC$	wiE	$(wC-wE)y+wC$	wC
	$e-1$			
Vmi	wiE	wiE	wi	wC
wa			w	wB
Vma			w	wB
			$(wB-wA)y+wB$	$VmiA = \frac{wA(e-2)+wB}{(e-1)}$
			$w_a = w - w_i$	
			$V_{ma} = V - V_{mi} - V_s$	

Tableau V:- Equations des volumes poraux et teneurs en eau des deux systèmes de porosité micro et macroscopiques du sol, dans les différentes phases de retrait. ($y = \frac{e^{wn} - wn - e + 1}{e - 1}$).

V. UTILISATION DU MODELE

En pratique, les points particuliers A,B,C,E,F, sont tout d'abord localisés graphiquement, puis déterminés avec précision par optimisation de l'ajustement entre la courbe calculée et les points observés; cela permet d'obtenir les valeurs très précises des huit paramètres du retrait, et donc de toutes les variables dérivées, sans avoir tenir compte du "coup de main" de l'opérateur. D'autre part, ces huit paramètres indépendants peuvent être choisis parmi les plus significatifs du comportement structural de l'échantillon, et présentés dans un tableau de mesures, qui est alors caractéristique du sol, comme par exemple le tableau VI. Dans celui-ci, chaque paramètre de la série: VA,wA,wB,wC,wE,wF,Kr,Ko a une signification physique simple, déjà précisée dans le modèle; mais on montre de plus, que ces paramètres sont en correspondance avec une propriété agro-pédologique connue du sol (7), (exemple: wB et le point de flétrissement du sol, wA et la limite de retrait) .

ECHANT.:	VA	WA	WB	WC	WE	WF	Kr	Ko
	cm ³ /g							
LOHZ A	:0.746	:20.49	:24.62	:25.15	:36.03	:41.05	:0.73	:0.069
" AB	:0.713	:23.03	:25.24	:27.34	:30.08	:37.32	:1.06	:0.018
" BA	:0.728	:23.83	:25.63	:27.45	:30.46	:38.40	:1.08	:0.021
TNZI A	:0.749	:16.83	:20.24	:21.81	:30.61	:39.71	:0.51	:0.013
" AB	:0.665	:19.22	:21.44	:23.29	:25.91	:31.29	:0.80	:0
MSBA A	:0.589	:13.80	:16.09	:18.71	:21.31	:24.33	:0.67	:0.18
" AB	:0.585	:14.86	:16.96	:20.05	:21.42	:23.28	:0.64	:0.14
" BA	:0.617	:15.34	:17.59	:19.83	:22.06	:26.69	:0.69	:0.046
AGRI A	:0.613	:5.42	:8.64	:9.90	:14.90	:24.95	:0.37	:0.018
" AB	:0.611	:8.01	:11.08	:12.71	:17.48	:25.09	:0.47	:0
" BA	:0.616	:8.46	:10.39	:12.15	:16.13	:24.60	:0.42	:0

Tableau VI:- Valeurs des huit principaux paramètres du retrait, obtenus par optimisation de l'ajustement entre les courbes théoriques de $V_n=f(w_n)$ (éq. 6 et 10) et les données observées.

VI CONCLUSION

A partir d'un modèle de comportement structural du sol, mettant en jeu deux volumes fonctionnels emboîtés (V_{mi}) et w_a , on a pu établir l'équation paramétrique qui décrit entièrement le retrait d'échantillons de sol structurés. Le très bon accord obtenu, pour tous les échantillons de sols ferrallitiques étudiés, entre les points observés et calculés des courbes de retrait, atteste la validité du modèle, et de l'équation paramétrique qui le régit. Ceci a pour conséquence importante:

-la définition précise des volumes fonctionnels (V_{mi}) et w_a , et structuraux (V , V_{mi} , V_{ma} , w_i , w_a) du sol.

-l'existence de huit paramètres caractéristiques du sol, qui permettent de déterminer quantitativement l'ensemble de son comportement structural fonction de la teneur en eau.

VII BIBLIOGRAPHIE

BRAUDEAU E. 1987. *Sci. du Sol*, 25/2,85-93.

SPOSITO G. 1975. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*,39: 1053-1056.

McGARRY D. et I.G. DANIELLS. 1987. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1575-1580.

McGARRY,D. et K.W.J. Malafant. 1987. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:290-297.

SPOSITO,G. et J.V. GIRALDEZ. 1976. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:352-358.

GIRALDEZ J.V., G. SPOSITO. et C. DELGADO. 1983. *Soil Sci. Am. J.*, 47:419-422.

BRAUDEAU E. 1988. *Cr. Ac. Sci.* en cours de publication.

MODELE DECRIVANT LES PHENOMENES DE DISSOLUTION ET DE CRISTALLISATION DE MINERAUX DANS DES SOLUTIONS AQUEUSES

Jean-Marie WACKERMANN

I RÉSUMÉ

Une étude statistique préalable a démontré que les concentrations des différents éléments, dissous dans des eaux de nappes phréatiques, sont liées à leur conductivité électrique par des coefficients de corrélation variables selon leur solubilité et le comportement du minéral hôte (dissolution ou néogenèse). La représentation graphique de cette liaison a permis d'affiner la relation: en coordonnées logarithmiques, les points représentatifs du couple de valeurs "teneurs- conductivités" s'ordonnent systématiquement selon des droites parallèles dont chacune est liée à une espèce minérale définie. La pente de ces droites est spécifique de l'élément concerné: elle est positive pour les dissolutions, négative pour les cristallisations. Un modèle mathématique empirique, basé sur ces propriétés, a été élaboré: le calcul des ordonnées à l'origine permet le diagnostic des minéraux en cours de dissolution ou de néoformation, au contact d'une solution. Ces propriétés se sont avérées identiques à celles déduites de la physique quantique pour le dopage des semiconducteurs cristallins. L'application de ces lois permet, à présent, le calcul rigoureux des paramètres du modèle et son extrapolation pour des milieux naturels variés.

II ETAT PREALABLE DES RECHERCHES.

Vers 1976, l'accumulation considérable d'observations et de données portant sur les manteaux d'altération et les sols, permettait d'identifier la plupart des mécanismes qui régissent leur formation et leur évolution. Par contre, des carences conceptuelles et méthodologiques laissaient dans l'ombre l'aspect quantitatif des phénomènes. Les bilans, portant sur les matériaux solides, résiduels ou néoformés, sont handicapés par la fréquence des hétérogénéités et par l'imbrication des faciès issus de phases successives. Néanmoins, quelques modèles isotopiques et chimiques (diffusion notamment) ont fourni des paramètres de référence et des datations (absolues et relatives).

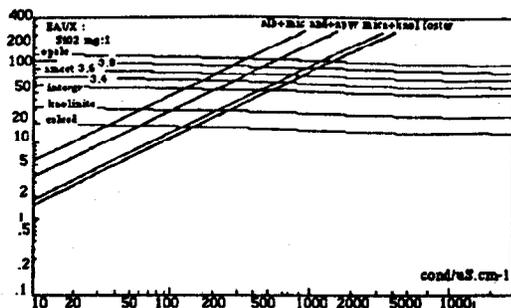
L'étude de la composition chimique des eaux de drainage présente l'avantage de refléter les processus contemporains. L'application de la loi d'action de masse aux réactions d'équilibre, total ou partiel, a permis l'élaboration de modèles féconds (méthode de la boîte noire ou du degré d'avancement). Ces modèles exigent l'analyse préalable de l'ensemble des composants et un nombre important de calculs en cascade et en boucle. D'autre part, les écarts par rapport aux conditions idéales imposées par les principes utilisés entraînent l'introduction de coefficients de correction empiriques qui limitent considérablement la rigueur de la méthode. Les divergences avec les observations ne sont pas rares. Enfin, les courbes d'équilibre n'introduisent pas de discrimination entre dissolution et cristallisation.

III ELABORATION D'UN MODELE EMPIRIQUE.

L'étude de la composition d'eaux de nappes phréatiques du Sénégal oriental [1] a montré que la règle, généralement admise, concernant l'accroissement simultané des teneurs et de la conductivité électrique n'est valable que pour les éléments issus de processus de dissolution, avec une variation importante du coefficient de corrélation selon l'élément. Par contre, pour les éléments concernés par des néoformations, le coefficient de corrélation est faible à fortement négatif. La représentation graphique permet d'affiner l'étude statistique globale: pour chacun des éléments, en coordonnées logarithmiques, les points figuratifs du couple de valeurs "teneur - conductivité électrique" sont répartis selon des bandes linéaires, à pente positive ou négative. L'identification avec les espèces minérales, primaires ou secondaires, constitutives des niveaux aquifères, fournit quatre informations importantes (figure 1)

Figure 1 - Représentation du double système de droites parallèles correspondant aux phénomènes de dissolution (pente positive) et de réformation (pente négative) pour le silicium, en coordonnées logarithmiques.

-abscisse: conductivité électrique (microsiemens cm^{-1})



- pour chacun des éléments, les points figuratifs correspondant à un phénomène de dissolution d'un minéral sont disposés selon des droites parallèles à pente positive.

- inversement, les phénomènes de néoformation minérale sont représentés par des droites parallèles à pente négative.

- pour un élément donné, les droites figuratives sont disposées dans l'ordre de la solubilité des minéraux pour l'élément hôte concerné.

- la valeur de la pente des droites, correspondant respectivement à des dissolutions et à des néoformations, est spécifique de l'élément.

Il existe ainsi une relation empirique entre la teneur n d'un élément dans une solution aqueuse et la conductivité électrique c , soit (1): $n = b.c.a$. Les valeurs analytiques des pentes a (dissolution) et a' (crystallisation) concernant les éléments majeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau. 1 - Valeurs des paramètres relatifs aux éléments majeurs dissous.
 a : pente des droites correspondant aux dissolutions
 a' : pente des droites correspondant aux néoformations

élément	Cl	Mg	C	Ca	S	Na	K	Si	H
a	1,45	1,37	1,26	1,20	1,16	1,09	1,00	0,91	0,26
a'	-1,55	-1,64	-1,80	-1,91	-1,99	-2,15	-2,41	-0,05	-0,59

La relation (1) et les valeurs des paramètres a , a' et b se sont trouvées vérifiées pour une trentaine d'autres inventaires régionaux d'eaux souterraines et superficielles: ce contrôle écarte l'objection d'artefacts éventuels liés au prélèvement et au protocole analytique ou de la subjectivité de l'interprétation minéralogique.

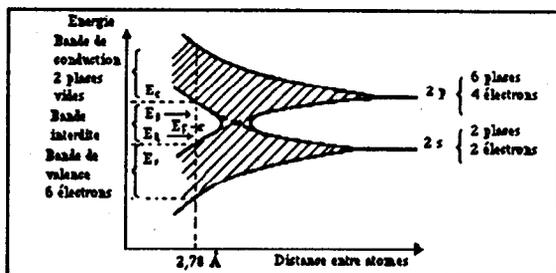
Le caractère régulier et général des observations, pour de larges gammes de teneurs (1.10^{-8} à 5.10^{+2} mol.l⁻¹) et de conductivités (1.10^{-6} à 5.10^{-2} Ω^{-1} . cm⁻¹), a ainsi pu servir de base à un modèle de représentation graphique et d'interprétation mathématique pour les couples de données "teneurs - conductivités", pour chacun des éléments, pris isolément ([2],[3]). Un premier logiciel (H.P. 9845, puis Macintosh-Plus) fournit une représentation graphique qui situe les points figuratifs par rapport aux courbes de référence relatives à la dissolution et à la cristallisation des minéraux communs, la valeur des paramètres b et le nom des minéraux en cours de dissolution ou en voie de formation (par comparaison de la valeur calculée avec les données de référence propres à chaque minéral, dans une fourchette de plus ou moins 10%).

IV. IDENTIFICATION THEORIQUE.

La relation (1) est vérifiée, et couramment utilisée, pour le calcul de la répartition des teneurs des impuretés de dopage dans les semiconducteurs cristallins [4]. Son interprétation fait appel à la théorie des quanta, qui décrit, dans un système réticulaire, la répartition des niveaux d'énergie intrinsèques des électrons sous la forme de bandes: les niveaux d'énergie des électrons qui assurent les liaisons chimiques ne sont plus liés à un atome déterminé, mais constituent une bande pleine (bande de valence, dont le maximum d'énergie est E_v) et les niveaux supérieurs non occupés sont regroupés dans une bande vide (bande de conduction, dont le minimum est E_c). Un intervalle énergétique (bande interdite) sépare ces deux bandes; lorsque son gradient énergétique ($E_c - E_v$) dépasse un seuil de l'ordre de 2 eV, le cristal constitue un isolant électrique.

L'ajonction d'atomes donneurs ou accepteurs d'électrons introduit des niveaux d'énergie extrinsèques, respectivement ED et EA, qui réduisent le gradient d'énergie interdite, augmentant ainsi la conductivité et induisant des propriétés de milieux semiconducteurs dans un matériau isolant (figure 2). A l'inverse, la recombinaison de porteurs de charges en excès supprime les niveaux extrinsèques et les propriétés afférentes.

Figure 2 - Passage progressif du système de niveaux d'énergie discrets des électrons périphériques d'un atome isolé d'oxygène (distances interatomiques élevées) à un système de trois bandes lorsque les atomes d'oxygène sont rapprochés dans un réseau périodique de type cristallin (2,78 Å pour l'eau et la glace) - en abscisses: distance interatomique - en ordonnées: énergie des électrons - E_c : minimum de la bande de conduction - E_v : maximum de la bande de valence - E_F : niveau de Fermi (potentiel chimique) E_O et E_A : niveaux extrinsèques introduits par éléments donneurs ou accepteurs d'électrons



En l'absence d'excitation extérieure, la limite supérieure des niveaux d'énergie occupés par les électrons, appelée niveau de Fermi (E_F), équivaut à leur potentiel chimique. Le gradient ($E_F - E_c$) ou ($E_v - E_F$) détermine la concentration des éléments de dopage dans le semiconducteur [5].

Or, des études récentes sur la structure de l'eau montrent que sa phase aqueuse comporte un ordre atomique, réticulaire, à courte distance [6], comme dans le cas des verres. L'ossature du réseau est constituée par un agencement hexagonal, ou pseudo-hexagonal, de l'oxygène, dont les électrons périphériques 2s et 2p sont susceptibles de former le système des trois bandes d'énergie décrit ci-dessus. D'autres propriétés, comme la transparence optique et l'équation de variation de la conductivité avec la température, sont communes avec les milieux semiconducteurs. Effectivement, les valeurs des paramètres a et b sont conformes aux relations déduites des équations de Schrödinger et de la statistique de Fermi-Dirac pour les fermions (électrons): le coefficient angulaire a est proportionnel au gradient ($E_D - E_c$), lui-même équivalent au gradient des potentiels d'ionisation de l'oxygène et de l'élément dissous, et le paramètre b est fonction du potentiel chimique de l'élément (niveau de Fermi), donc de l'énergie libre standard de formation du minéral hôte [6].

Le modèle initial, empirique, a ainsi trouvé une validation théorique dans un domaine physico-chimique non encore exploré par les travaux sur les réactions en solution. Les lois qui régissent les milieux semiconducteurs permettent, à présent, le calcul plus rigoureux des différents paramètres et d'envisager de nouvelles applications.

V. BUT OPERATIONNEL.

L'utilisation d'équations mathématiques, liant les données d'entrée (analyses d'eaux) aux paramètres indicateurs (sortie), place cet outil dans la catégorie des modèles déterministes. En outre, le passage d'une matrice numérique à une matrice alphanumérique, par identification des paramètres, constitue un système-expert simple pour la détermination de la composition minéralogique des arènes et sols (et de la roche-mère) et de la nature des phénomènes d'altération (néogénèses). Le "moteur d'inférence" consiste en une séquence de comparaisons (supérieur, inférieur, ou égalité) avec des seuils définis par une fourchette de 10% de part et d'autre de la valeur du paramètre b de référence pour chacune des espèces minérales répertoriées.

Un second modèle déterministe, complémentaire, en cours d'élaboration, procède au calcul des paramètres b en fonction de l'énergie libre standard de formation $\Delta G^{\circ}f$ des différentes espèces minérales et du nombre d'atomes n de l'élément considéré dans la formule structurale. Inversement, ce modèle calcule le rapport ($\Delta G^{\circ}f:n$) à partir des données analytiques de solutions naturelles (teneur et conductivité) lorsque cette valeur n'est pas connue.

Parallèlement, la possibilité de calcul des paramètres a et b débouche sur l'application aux éléments en trace dans les eaux, pour lesquels les analyses présentent un degré de précision moindre que dans le cas des éléments majeurs. Ce modèle permet, notamment, le diagnostic des teneurs anormales, liées à d'éventuelles minéralisations de substances d'intérêt économique. Il fournit une base logique et méthodologique pour l'exploitation des données des prospections hydrogéochimiques.

En outre, le présent modèle sert de base à des simulations des mécanismes de l'altération et de l'évolution chimique et minéralogique de bassins. L'étude des différents inventaires d'eaux a permis, à cet effet, de classer les valeurs de la conductivité électrique en fonction des conditions de drainage le long de versants, des débits dans les aquifères et les cours d'eau et du système d'écoulement (poral ou fissuré).

Enfin, la détermination de la mobilité des éléments dissous donne accès au calcul des coefficients de diffusion et, ainsi, à la cinétique des phénomènes de dissolution et de néoformation (datation).

VI BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. M. WACKERMANN, Thèse Doct. ès-Sciences U.L.P., Strasbourg, 1975, 373 p.
- [2] J. M. WACKERMANN, Sciences de la Terre, Sér.Inform. Géol., 14, 201, 1980, p. 201-217.
- [3] J. M. WACKERMANN et P. TREMBLAY, Cah. ORSTOM, sér. Géol., 12, 1, 1982, p.91-100.
- [4] S. M. SZE et J. C. IRVIN, Solid State Electronics, 11, 1968, p. 599.
- [5] A. VAPAILLE, Physique des dispositifs à semiconducteurs, Masson, 1970, 339 p.
- [6] A. RAHMAN et F. H. STILLINGER, J. Chem. Phys., 55, 1971, p. 3336.
- [7] J. M. WACKERMANN, C. R. Acad. Sci., Paris, (à paraître).

DÉFINITION D'UN MODELE GÉOLOGIQUE A PARTIR DE SA SIGNATURE MAGNÉTIQUE

**André LAPOUILLE, François MISSEGUE,
Annick LEGELEY, Yves ALBOUY**

I PRESENTATION DU PROBLEME

Les problèmes de géophysique interne ont en général pour but de déterminer, à partir d'un champ géophysique mesuré sur une surface (généralement la surface de la Terre), les structures géologiques responsables des variations, ou anomalies, de ce champ : il s'agit de définir les caractères physiques, la forme et la position des structures géologiques à partir de leur signature géophysique en surface.

Pour cela, on utilise souvent une méthode de résolution directe qui consiste à construire un modèle géologique qui rende compte des phénomènes observés : on se donne a priori un corps géologique caractérisé par ses paramètres physico-mathématiques qui servent à calculer l'anomalie géophysique correspondante sur la surface de mesure. Comparant l'anomalie calculée à l'anomalie observée, on modifie, par ajustements successifs, les caractères physiques (l'aimantation, ou la densité, ou la conductivité électrique ou thermique, ou la vitesse de propagation de telle ou telle onde,...) et/ou les paramètres géométriques du corps jusqu'à obtenir la meilleure concordance entre les deux anomalies. Dans le cas particulier où le phénomène géophysique mesuré est l'anomalie du champ magnétique, le problème revient à déterminer l'aimantation, outre la forme et la profondeur des structures.

Lorsque les isanomaies magnétiques sont allongées selon une direction préférentielle, le modèle géométrique le plus simple que l'on puisse utiliser est celui des prismes horizontaux de longueur infinie dans la direction des isanomaies (modèle bidimensionnel). Même lorsque l'hypothèse de la bidimensionalité n'est qu'approximative, elle donne néanmoins souvent une solution adéquate, bien qu'elle sous-estime les profondeurs par rapport à ce qu'elles sont réellement.

La section droite irrégulière de tout corps bidimensionnel pouvant être approximée par un polygone, le modèle est constitué de différentes structures prismatiques accolées affectées chacune d'une certaine aimantation $J(x,y) = J_A J(x,y)$ où J_A est le vecteur unitaire donnant la direction de l'aimantation supposée constante du prisme A et $J(x,y)$ est l'intensité scalaire de l'aimantation de ce prisme. On calcule les vecteurs correspondants du champ d'anomalies le long de la perpendiculaire aux structures sur la surface de mesure.

Le problème revient donc à proposer des distributions de sources dont les champs calculés rendent compte aussi bien que possible des champs observés sur la surface de la Terre. Or le champ magnétique terrestre dérivant d'un potentiel, il existe une infinité de distributions de sources qui donnent le même champ sur cette surface : une infinité de modèles peuvent satisfaire les conditions mathématiques.

Le nombre de solutions est cependant limité par des contraintes géologiques ou géophysiques : d'une part le principe de réalité géologique réduit le nombre de solutions mathématiquement acceptables, d'autre part ces solutions doivent être compatibles avec les ensembles de solutions déduites d'autres méthodologies géophysiques ou géologiques. Les contraintes géologiques sont, par exemple, la connaissance de l'aimantation par des mesures effectuées sur des échantillons en laboratoire, la connaissance de la profondeur du toit des sources déduite de la sismique-réflexion ou réfraction, l'estimation de la profondeur de la surface isotherme de Curie, représentant la température au-dessus de laquelle les minéraux ne sont pas aimantés (cette profondeur peut être obtenue approximativement par des mesures de flux de chaleur qui donnent une indication du gradient de température dans la zone étudiée).

La meilleure correspondance entre le profil d'anomalies calculé avec le profil observé se fait à l'oeil, par superposition des deux courbes. Il semble en effet difficile d'appliquer des critères mathématiques pour décrire la ressemblance des courbes : par exemple la cross-corrélation accorde beaucoup d'importance au maximum principal et peu de poids à la concordance des maxima secondaires qui ont cependant, d'un point de vue géophysique, autant d'importance, car c'est l'ensemble des variations des deux courbes qui sont à comparer, et non pas une anomalie individuellement.

Le principal inconvénient propre à toute méthode directe est qu'elle nécessite de nombreux tâtonnements et essais pour déterminer des paramètres rendant compte de l'anomalie observée. Un palliatif à cet inconvénient est de mettre en oeuvre un système interactif visualisant immédiatement le modèle et l'anomalie correspondante sur une console graphique au fur et à mesure des modifications apportées.

II CALCUL DE L'ANOMALIE MAGNETIQUE D'UN PRISME INFINIMENT LONG D'AIMANTATION CONSTANTE

II.1 COMPOSANTES DU VECTEUR ANOMALIE MAGNETIQUE

Considérons (Figure 1) un élément de volume $\Delta x \Delta y \Delta z$, de section droite ABCD dans le plan xOz, situé à la distance $R(x, y, z)$ du point O et d'aimantation constante (J).

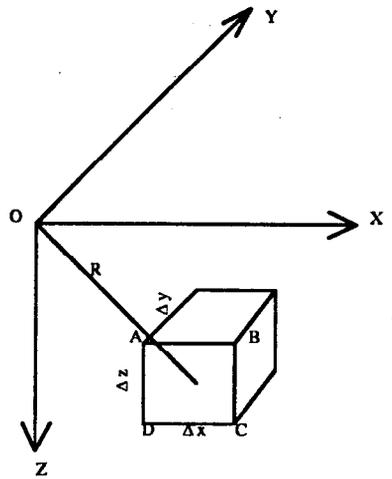


Figure 1

Son moment magnétique est

$M = J \Delta x \Delta y \Delta z$, et son potentiel magnétique au point O est :

$$M = \frac{M \cdot R}{R^3} = \frac{J \cdot R}{R^3} \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$\text{soit : } V = \frac{J_x \cdot X + J_y \cdot Y + J_z \cdot Z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \Delta x \Delta y \Delta z .$$

J_x, J_y, J_z étant les composantes du vecteur J selon les axes Ox, Oy, Oz .

Le potentiel d'un élément de prisme infini dans la direction Oy est :

$$V = \Delta x \Delta z \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{J_x \cdot X + J_y \cdot Y + J_z \cdot Z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dy$$

$$\text{soit : } V = \frac{J_x \cdot X + J_z \cdot Z}{(x^2 + z^2)^{3/2}} \Delta x \Delta z$$

et son champ magnétique est $H_a = - \text{grad } V$ dont les composantes selon les trois axes sont :

$$X = - \frac{\delta V}{\delta x}, \quad Y = - \frac{\delta V}{\delta y}, \quad Z = - \frac{\delta V}{\delta z},$$

$$\text{Soit : } \quad X = \frac{2}{(x^2 + z^2)^2} [(x^2 - z^2) J_x + 2 xz J_z] \Delta x \Delta z$$

$$Y = 0$$

$$Z = \frac{2}{(x^2 + z^2)^2} [2 xz J_x - (x^2 - z^2) J_z] \Delta x \Delta z$$

La composante selon l'axe Oy est nulle, et le vecteur anomalie magnétique H_a est donc dans le plan xOz, ses composantes pouvant s'écrire d'une façon générale :

$$X = K_1 J_x + K_2 J_z$$

$$Z = K_2 J_x - K_1 J_z$$

avec

$$K_1 = 2 \frac{x^2 - z^2}{(x^2 + z^2)^2} \Delta x \Delta z$$

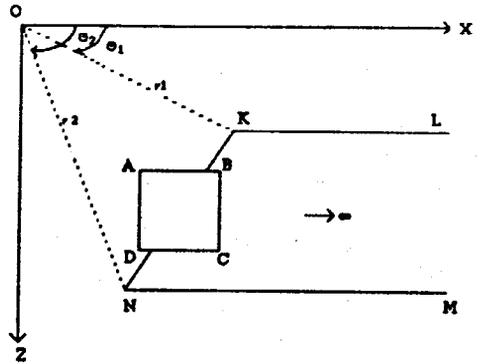
$$K_2 = 2 \frac{xz}{(x^2 + z^2)^2} \Delta x \Delta z$$

Pour le prisme dont la section droite dans le plan xOz est le polygone KLMN (Figure 2) infini dans la direction Ox et dont les coordonnées des sommets sont :

$$K(x_1, z_1) \text{ où } (r_1, \theta_1)$$

$$N(x_2, z_2) \text{ où } (r_2, \theta_2)$$

$$L(\infty, z_1) \text{ et } M(\infty, z_2)$$



Les valeurs de K_1 et K_2 s'obtiennent par double intégration :

$$K_1 = 2 \int_{z_1}^{z_2} \int_x^{\infty} \frac{x^2 - z^2}{(x^2 + z^2)^2} dx dz$$

$$K_2 = 4 \int_{z_1}^{z_2} \int_x^{\infty} \frac{xz}{(x^2 + z^2)^2} dx dz$$

soit :

$$K_1 = \frac{z_2 - z_1}{(z_2 - z_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \left[(z_2 - z_1)(\theta_1 - \theta_2) + (x_1 - x_2) \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right]$$

$$K_2 = \frac{z_2 - z_1}{(z_2 - z_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \left[(x_2 - x_1)(\theta_1 - \theta_2) + (z_1 - z_2) \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right]$$

Enfin, l'anomalie magnétique du prisme dont la section droite est le polygone irrégulier KNPQR (Figure 3) s'obtient en faisant la somme des anomalies produites par les polygones tels que KLMN, avec leur signe propre.

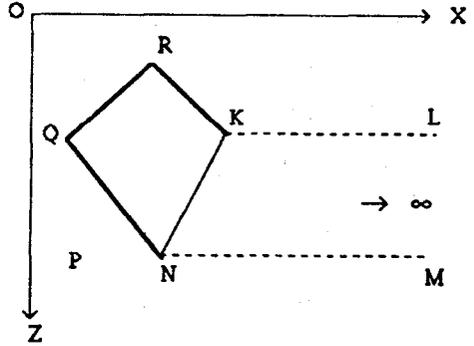


Figure 3

Le profil magnétique est alors calculé en déplaçant le point O le long de l'axe Ox.

II.2 COMPOSANTES DU VECTEUR AIMANTATION

On calcule les composantes J_x , J_y , J_z du vecteur aimantation J dans le système d'axes tri-orthogonaux précédent lié au prisme de section droite KNPQR (Figure 4)

Soient :

A : l'angle du vecteur aimantation avec le plan horizontal ;

B : l'angle de la projection horizontale JH du vecteur aimantation avec le nord géographique ;

C : l'angle entre la direction positive du profil et le nord géographique

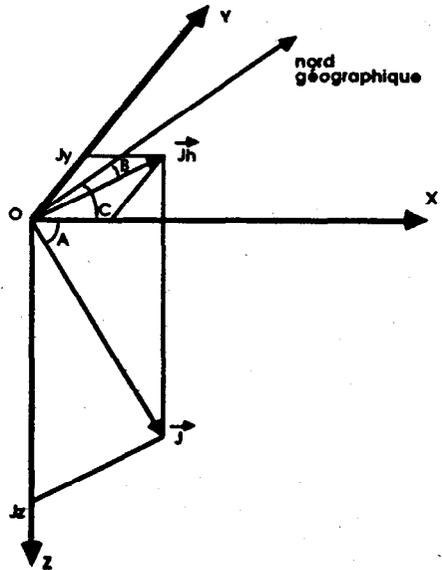


Figure 4

Dans le plan horizontal, les angles B et C sont mesurés positivement dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord géographique ; dans le plan vertical, l'angle A est mesuré positivement vers le bas.

Les composantes du vecteur J sont :

$$J_x = J \cos A \cos (C-B)$$

$$J_y = J \cos A \sin (C-B)$$

$$J_z = J \sin A$$

II.3 ANOMALIE DE L'INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE NORMAL

Soient H_n et le champ magnétique normal, H_a l'anomalie magnétique et

$H_t = H_n + H_a$ le champ magnétique total dont on mesure l'intensité OT (Figure 5).

Les mesures sont effectuées sur un plan horizontal dans un domaine dont les dimensions sont suffisamment restreintes pour que la surface terrestre soit considérée comme plane.

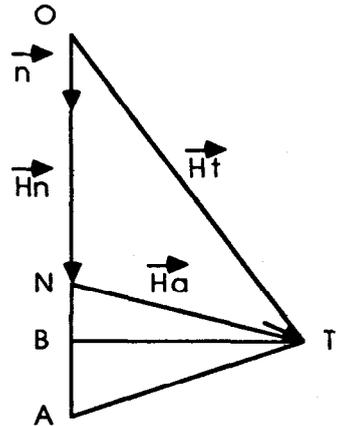


Figure 5

L'anomalie A de l'intensité (par rapport à celle du champ normal H_n) est :

$$A = OT - ON = OA - ON = NA$$

L'intensité NT de l'anomalie H_a étant petite (de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2}) par rapport à celle ON du champ normal H_n , considéré comme uniforme dans le domaine étudié, on a $NA \approx NB$.

On peut donc considérer l'anomalie A de l'intensité comme la projection du vecteur anomalie sur la direction du champ normal :

$$A = H_a \cdot n = -n \cdot \text{grad } V = -\frac{\delta V}{\delta n}$$

L'anomalie de l'intensité du champ magnétique normal est la dérivée du potentiel selon la direction de ce champ ; elle est donc égale à la somme des projections des composantes du vecteur anomalie sur cette direction.

Soient (Figure 6) :

I : l'angle du vecteur champ normal avec le plan horizontal (inclinaison) ;

D : l'angle de la projection horizontale H du champ normal avec le nord géographique (déclinaison) ;

C : l'angle entre la direction positive du profil et le nord géographique.

Les orientations des angles I, D, C sont les mêmes que celles des angles A, B, C du paragraphe 2, relatif au repérage du vecteur aimantation.

On a alors :

$$A = Z \sin I + A_n \cos I,$$

et comme $A_n = X \cos(C - D) + Y \sin(C - D)$ et que $Y = 0$ dans le cas du prisme infini dans la direction Oy, l'anomalie de l'intensité du champ normal se réduit à :

$$A = Z \sin I + X \cos I \cos(C-D)$$

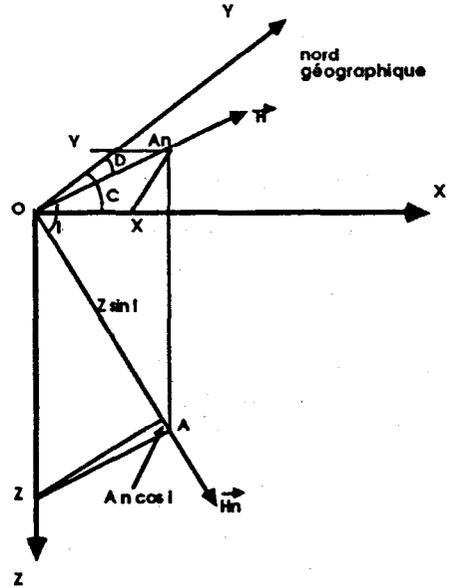


Figure 6

III. EXEMPLE DE MODELISATION BIDIMENSIONNELLE.

On présente ici un exemple de programme de calcul du champ magnétique dans le plan de la section droite d'un corps bidimensionnel et sa représentation graphique.

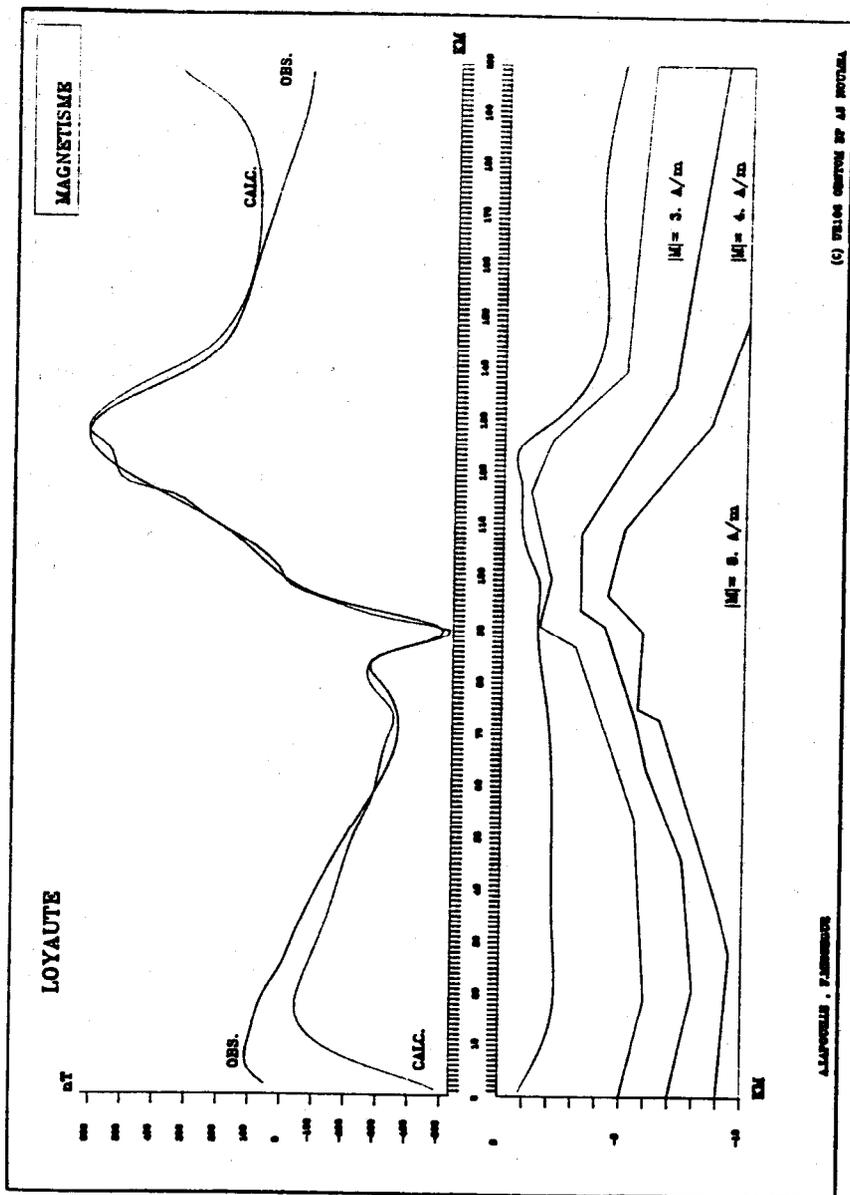


Figure 7

Ceprogramme, que l'on a fait exécuter par un micro-ordinateur COMMODORE PC 20 de 512 Ko de mémoire vive avec sortie graphique sur une imprimante BROTHER-M 1509, a pour origine un programme édité par TALWANI et HEIRTZLER pour la partie calcul ("Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional structures of arbitrary shape". Stanford Un. Publ. Geol. Sc., 1964). Nous y avons adapté un programme de saisie des caractéristiques géométriques et magnétiques des polygones constituant la section droite du modèle et des programmes de tracés de ce modèle et de son champ magnétique calculé ainsi que des tracés de l'anomalie magnétique observée et du fond bathymétrique, ces deux courbes étant définies, à partir de quelques points de mesures, par un programme d'interpolations cubiques.

L'exemple utilisé représente une coupe transversale de la ride sous-marine des Loyaute, structure située au nord-est de la Nouvelle Calédonie et parallèle à celle-ci.

L'aimantation, ou moment magnétique par unité de volume, est exprimée en Ampères/mètre dans le système MKSI. Les champs magnétiques calculés et observés sont exprimés en nanoteslas, ou 10^{-9} Weber/m², tandis que les distances ont pour unité le kilomètre sur notre représentation graphique.

Le modèle finalement adopté est constitué d'un noyau central représentant le corps de la ride, de composition basaltique, fortement aimanté ($M = 8$ A/m), entouré par des couches à aimantation décroissante ($M = 4$ à 3 A/m). Il est surmonté par des dépôts sédimentaires dont l'aimantation est négligeable par rapport à celle du socle océanique modélisé.

On a pris pour direction de l'aimantation : A (inclinaison) = -45° et B (déclinaison) = 0° , le champ actuel étant défini par : DIP (inclinaison) = -45° , D (déclinaison) = 12° E et F (intensité) = 45000 nanoteslas.

A chacune des extrémités du modèle on constate une divergence, avec tendance vers l'infini, de la courbe calculée par rapport à la courbe observée. Cet "effet de bord" est dû à ce que le champ magnétique observé en un point quelconque est créé par un volume infini de croûte terrestre, le poids de chaque élément de volume étant proportionnel à l'inverse du cube de la distance, alors que le modèle présenté a une largeur finie.

Theme :
MODELES SPATIAUX

Coordinateur :
JEAN-MARC IRIS

LES TRANSFERTS D'ECHELLE EN PEDOLOGIE: UNE REVUE

Jean Marc IRIS

I INTRODUCTION:

Il n'existe pas de définition précise du modèle spatial; il s'agit d'une notion floue qui exprime l'environnement dans lequel on se place dès qu'on envisage un transfert d'échelle. Plutôt que chercher à le préciser par des définitions conceptuelles complexes, nous allons l'exprimer à travers des exemples tirés de deux domaines d'études pédologiques: l'évolution des modes de description de la couverture pédologique, et l'évolution de l'estimation zonale du fonctionnement hydrique du sol.

Ces deux exemples permettent également de suivre la prise de conscience des modèles spatiaux par les naturalistes et les physiciens du sol.

II L'EVOLUTION DE L'APPROCHE NATURALISTE : LA REPRÉSENTATION SPATIALE DES SOLS.

II.1 LE PEDON OU LA REPRÉSENTATION MINIMALE.

On dit que la Pédologie naquit telle qu'on l'entend actuellement en Russie dans les années 1870. Son fondateur Vassili Vassilievitch DOKOUTCHAEV (1846-1903) fut chargé en 1877 d'estimer les effets de

deux années de sécheresse dans les steppes de sols noirs (chernozem) du Sud de la Russie (Boulaïne 1984). Il publia ses résultats en 1883 et étendit ensuite ses investigations à l'ensemble du pays, puis il ajusta une classification des sols à ses observations.

Dès sa création donc, la caractérisation du sol est associée à la mise en place d'un outil de classement pour sa représentation spatiale. Tout au long de la grande période d'inventaire des sols et de cartographie régionale, la classification des sols fut employée comme outil de description. En France, la classification CPCS subit de profondes modifications à mesure de l'évolution de la connaissance pédologiques. Sa dernière édition datée de 1967 est actuellement en réfection (CPCS 1967). L'unité de base y est le profil pédologique type, appelé pédon, la couverture pédologique est constituée par la juxtaposition plus ou moins complexe de pédons (figure 1).

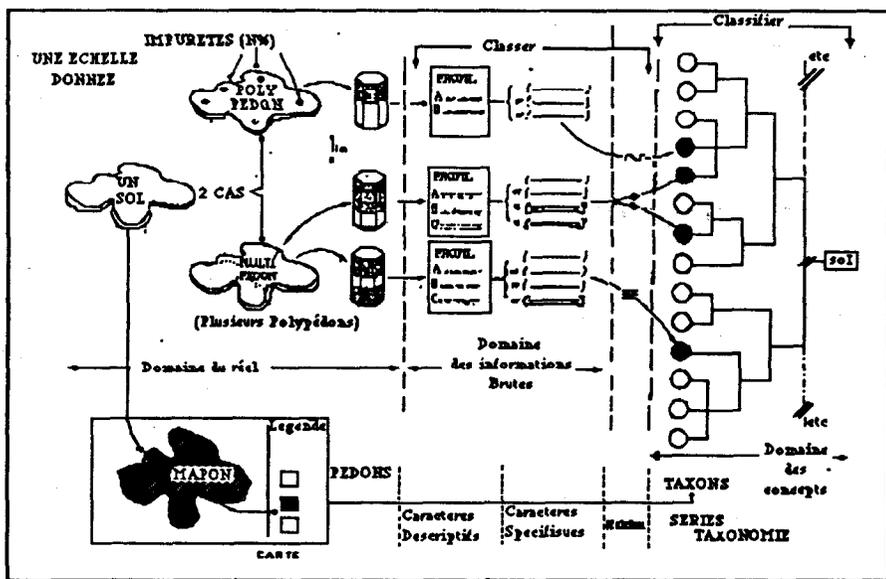


Figure 1- Schéma du modèle spatial taxonomique d'après Boulaïne 1982

Dans cette approche cartographique, le mode d'observation est adapté à l'échelle de la représentation. Le plus souvent l'équilibre entre la qualité de la représentation et le coût de l'étude est atteint avec une observation pour 1 cm² de carte.

Le pédon intègre la définition du sol dans sa totalité, il est indivisible. Différents auteurs ont cherché à assouplir cette contrainte en introduisant des représentations de l'hétérogénéité intra-pédon (Girard 1967,

Boulaine 1978), ou des appréciations empiriques, mais sans parvenir réellement à exprimer les variations pédologiques observées sur le terrain.

Les principales critiques qui ont été faites à l'égard de cette première conception du transfert d'échelle en Pédologie sont liées à son incapacité à décrire les variations continues de façon satisfaisante. De plus la référence à un profil pédologique type, également appelé "idéal", constitue une interprétation réalisée pendant une phase descriptive. A ces critiques, Boulaine (1984) a répondu par la définition de volumes élémentaires qui peuvent être associés de différentes manières, par juxtaposition, par association, en chaîne ou en séquence, sans remettre en cause l'existence d'un niveau de base homogène.

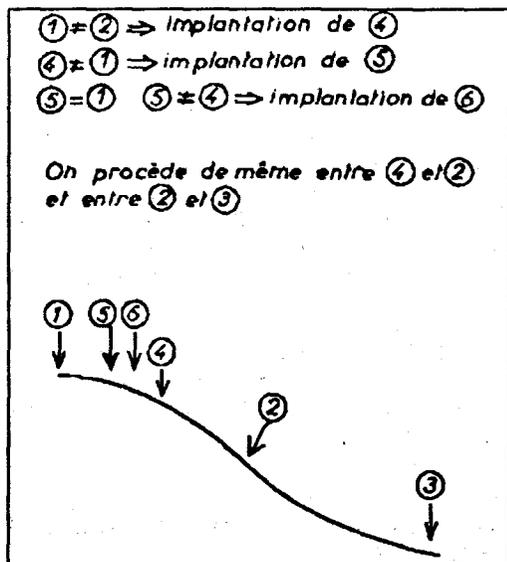
Ce mode de description est employé dans de nombreuses études cartographiques aux échelles régionales, nationales et internationales. A des échelles plus fines les pédologues de l'ORSTOM ont développé une méthode de représentation des couvertures pédologiques présentant des variations continues.

II.2 L'ANALYSE STRUCTURALE¹ : DE LA TOPOSÉQUENCE AU "PLAT DE NOUILLES".

G. Bocquier (1971) imagina cette nouvelle approche qui décrit l'organisation d'une séquence pédologique linéaire induite le plus souvent par des liens génétiques entre les "matériaux pédologiques" qui la constitue. Cette méthode a ensuite été appliquée par R. Boulet (1974) en Haute-Volta, puis par A. Chauvel (1977) en Casamance.

¹Le terme structural est employé ici dans le sens que lui ont donné les concepteurs de la méthode présentée.

Figure 2- Méthode de description "structuraliste" d'après Boulet et al 1983



Sur le terrain, une reconnaissance aussi précise que possible des constituants du sol le long de la séquence doit permettre de relier latéralement toutes les transformations observées dans les profils pédologiques (figure 2).

Cette reconnaissance entend s'appliquer à toutes les échelles supérieures à celle de la séquence. Les discontinuités et les organisations les plus fines sont décrites dans les fosses pédologiques.

La démarche suppose la continuité des matériaux, et l'expression de leur filiation au travers d'observations le plus souvent qualitatives. Les analyses de sols sont effectuées pour caractériser les matériaux charnières qui jouent un rôle important dans l'évolution du sol. Cette filiation est définie par la succession chronologique de deux matériaux et se traduit par des relations géométriques: à partir du moment où un axe général d'évolution pédologique est reconnu, l'organisation spatiale est supposée représenter une organisation chronologique. Ainsi le plus souvent le long d'un versant il est admis que les sols du sommet sont moins transformés que les sols à sa base.

La représentation de la séquence est facilitée par le mode d'observation mis en oeuvre: l'absence d'incertitude sur les parties non décrites de la couverture pédologique permet de tracer des courbes isofactorielles et des schémas synthétiques d'organisation pédologique (figure 3).

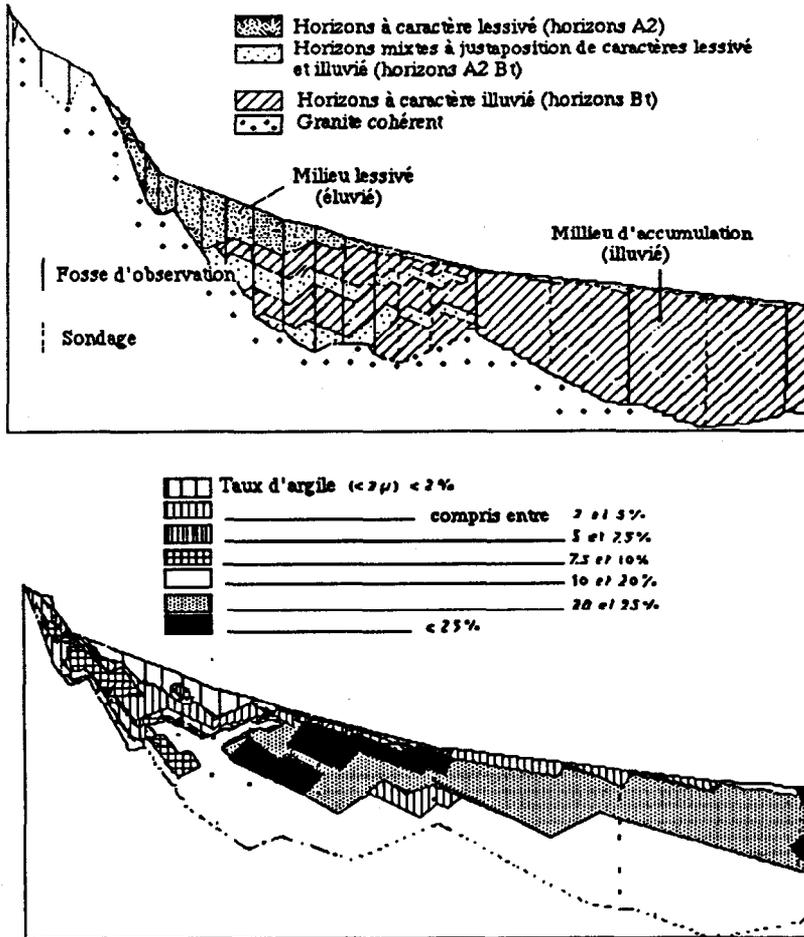


Figure 3- Représentation d'une toposéquence d'après Bocquier 1971

La quantité d'information recueillie n'est pas liée à l'échelle de la représentation mais au degré de complexité du milieu, elle est donc le plus souvent extrêmement importante. De plus aucune phase de synthèse n'est tolérée pendant la description du milieu.

C'est en utilisant cette démarche qu'il a été possible de représenter et de comprendre les principaux modes de différenciation des sols. On a pu ainsi définir des liens entre des profils qu'on croyait indépendants. L'extrapolation rigoureuse constitue ici un moyen d'analyse sûr du fonctionnement pédogénétique des versants.

Cette méthode a été appliquée par la suite à des petits bassins versants élémentaires en Guyane (R. Boulet 1981) et en Côte d'Ivoire (E. Fritsch et al 1988). La représentation cartographique est une juxtaposition de lignes isovales des différents paramètres pris en compte qui s'apparente à une représentation spatiale multivariée (figure 4). L'interprétation de ces documents est très difficile et leur aspect leur a donné le nom de "plat de nouilles".

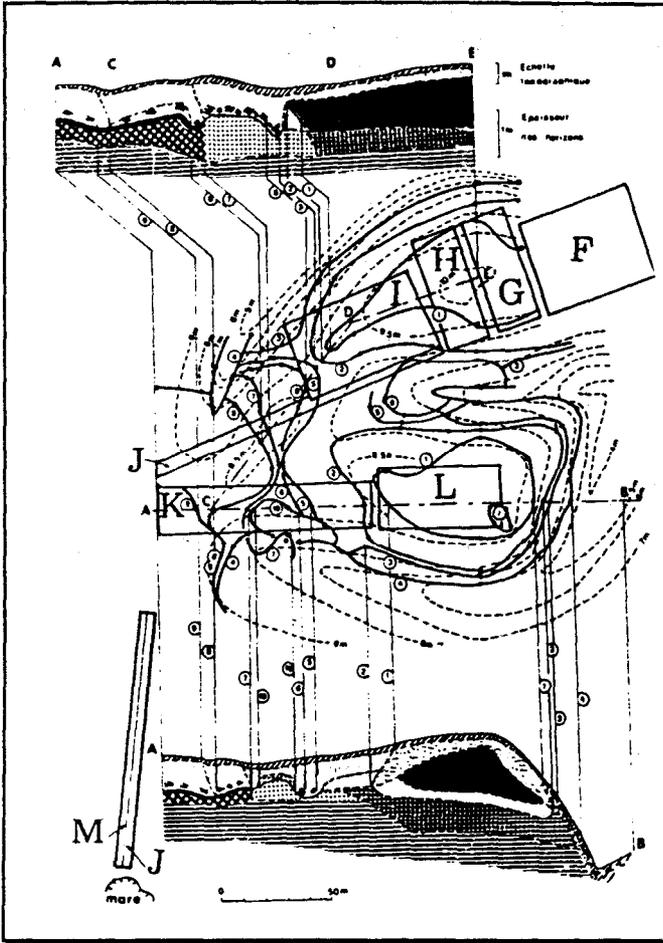


Figure 4- Représentation cartographique d'un site d'après Boulet et al 1982

La démarche "structuraliste" est reconnue pour constituer un excellent moyen d'analyse; son emploi est cependant limité à des petites surfaces par son coût et par l'absence d'outil de synthèse adapté à la quantité et à la nature des informations recueillies pendant la phase descriptive.

II.3 CHOISIR: L'EXACTITUDE OU LE RÉALISME ÉCONOMIQUE.

Bien que les approches "taxonomiques" et "structuralistes" soient incompatibles, un compromis existe, et a été largement employé en Côte d'Ivoire et dans la plupart des pays de l'Ouest Africain. Cette méthode, dite de description "morpho-pédologique", n'a été jamais été clairement formalisée. Partant du principe de la différenciation des sols le long des versants, ceux-ci sont considérés comme les axes de variabilité maximum et donc caractérisés finement par une forte densité d'observations. Différentes formes de modelé sont identifiés, et à chacun de ces modelés correspond un type de différenciation également identifié. La représentation pédologique s'effectue en deux temps: d'une part la représentation des modelés dans une carte des "paysages" qui exprime les grands modes de différenciation des sols; d'autre part une carte des sols basée sur une classification et dont les limites suivent les courbes du niveau topographique (figure 5). Le degré d'interpolation étant très fort entre les séquences reconnues le long des versants, la précision y est moindre et l'échantillonnage doit être adapté à l'échelle de la représentation cartographique.

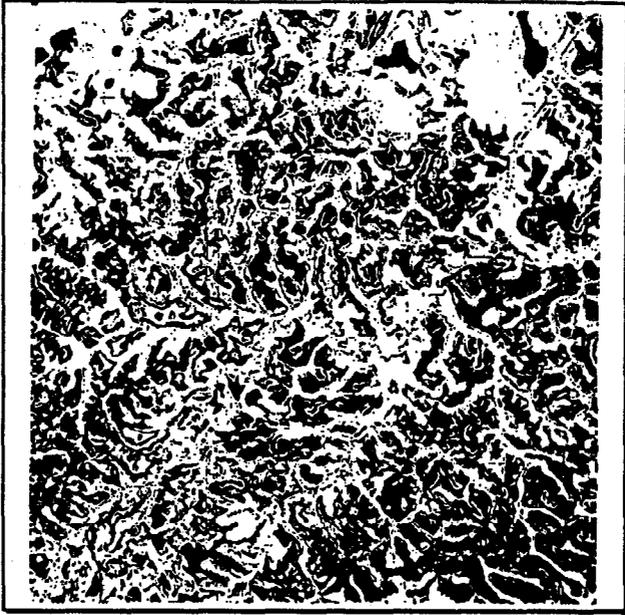


Figure 5- Représentation cartographique par la méthode morpho-pédologique d'après Boulver 1975

L'existence de ce compromis ne doit pas cacher les différences fondamentales entre les deux précédentes méthodes qui sont induites par deux modèles de répartition des sols.

Le modèle "taxonomique" ne fait pas d'hypothèse sur la distribution spatiale des sols, mais une hypothèse contraignante sur leur nature, exprimée par la définition des profils types de la classification de référence et la représentativité des volumes élémentaires. Le modèle spatial implicite est, de ce fait, aléatoire. Les difficultés rencontrées lors de la mise en oeuvre de cette méthode sont liées à l'existence de milieux organisés impossibles à décrire selon ce modèle aléatoire.

Le modèle "structural" suppose l'existence d'une organisation très stricte de la couverture pédologique qu'il s'agit d'identifier sans contrainte sur la nature des sols ou des matériaux. La rigueur de cette organisation est imposée par l'établissement ultérieur d'une relation entre les variations observées dans l'espace et les transformations pédologiques dans le temps. Cette relation est vérifiée dans bien des cas lorsqu'on dispose de séquences observées à des stades de transformations différents comme c'est le cas en Casamance (Chauvel 1977) ou en Guyane (Frisch 1984). Le modèle pédologique sous-jacent au modèle spatial exclue la présence d'une distribution spatiale aléatoire des paramètres ce qui limite

l'application de la méthode "structurale" à des milieux anciens et non remaniés.

De plus, pour être appliquée, cette méthode s'appuie sur un échantillonnage exhaustif, faute d'outil d'identification d'une organisation à partir d'un échantillonnage incomplet. A l'extrême les pédologues "structuralistes" souhaitent posséder un échantillonnage total de leur séquence par l'ouverture d'une tranchée continue afin de s'affranchir du modèle spatial pour représenter le milieu.

Aucune des deux méthodes n'est vraiment satisfaisante car les modèles spatiaux implicites qui les déterminent sont trop figés dans leur définition. Leurs concepteurs ont été forcés de choisir entre une répartition aléatoire des sols ou un ordre stricte alors que, dans la plupart des cas, la répartition des sols présente à la fois un aspect ordonné et un aspect aléatoire. L'absence d'alternative dans le choix du modèle spatial est la conséquence d'une carence en outil descriptif des organisations spatiales appliqué à la répartition des sols. Bien que des progrès aient été faits dans ce domaine depuis une dizaine d'année, cette carence se perpétue encore actuellement.

III. L'EMERGENCE D'UNE APPROCHE PROBABILISTE: LE TRANSFERT D'ÉCHELLE DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES DES SOLS.

III.1 LA THEORIE DU TRANSFERT D'ECHELLE: L'EXPRESSION D'UNE LOI.

La caractérisation expérimentale des propriétés hydriques des sols est toujours soumise au problème de sa validation à une échelle différente de l'expérimentation. Le plus souvent les mesures s'effectuent sur des échantillons de sol, des colonnes "recomposées" au laboratoire ou in-situ dans des profils. L'extension des résultats obtenus ponctuellement à des parcelles ou des bassins versants entiers est délicate. Penchés sur ce problème Miller et Miller (1956) ont développés la théorie de la Mise en Facteur d'Echelle des propriétés hydrodynamiques des sols.

Selon cette théorie c'est l'organisation des milieux poreux qui détermine les flux hydriques microscopiques, et il existe une similitude de fonctionnement hydrique dans des milieux poreux similaires, c'est à dire qui ne diffèrent que par l'échelle de leur organisation. Dans des milieux similaires un coefficient, appelé "facteur d'échelle", permet de décrire les variations du fonctionnement hydrique par rapport à une organisation de référence.

L'intérêt de cette théorie est de s'affranchir des mesures hydrodynamiques longues et coûteuses, à condition de connaître le facteur d'échelle entre le milieu étudié et l'organisation de référence. De nombreux travaux expérimentaux ont permis de valider cette théorie dans des sables homogènes de différentes tailles granulométriques (Klute et Wilkinson 1958, Marshall 1958, Elrick et al 1959, Millington et Quirk 1959, Wilkinson et Klute 1959)(figure 6). Elrick et al (1959) ont cependant observés qu'une faible proportion d'argile mélangée à du sable modifie l'organisation porale de façon significative et perturbe la similitude du fonctionnement avec le sable pur (figure 7).

A la suite de ces expérimentations il faut attendre 1972 et les travaux de Reichardt pour retrouver des traces de cette théorie dans la littérature: Reichardt et al (1972) déterminent expérimentalement le facteur d'échelle sur des échantillons de texture "naturelle". Reichardt et al (1975) publient une seconde série d'expériences sur des sols de provenances très différentes. Ils montrent que la théorie de la mise en facteur d'échelle peut s'appliquer à des milieux hétérogènes.

L'objectif de Miller et Miller (1956) était la définition d'une loi de transfert d'échelle du comportement hydrodynamique des sols. La limite de cette loi est apparue rapidement comme une restriction à son champs d'application: la relation entre l'organisation du milieu et son comportement est en effet trop stricte pour être transposée à des sols.

III.2 LA PRATIQUE DU TRANSFERT D'ECHELLE: DE LA DESCRIPTION STATISTIQUE À L'ANALYSE DE STRUCTURE.

De nombreux chercheurs voient alors dans cette théorie un méthode pratique de caractérisation de l'hétérogénéité spatiale du fonctionnement hydrique: Peck et al (1977) utilisent le facteur d'échelle pour modéliser le fonctionnement hydrique du sol dominant d'un bassin versant de 97 ha. Le facteur d'échelle n'est plus mesuré mais estimé par une procédure statistique simple qui définit un milieu poreux moyen sur le site.

A la rigueur contraignante de la théorie ces auteurs substituent un principe admis: dans des milieux voisins, donc peu différent, on suppose la théorie applicable. L'évaluation des facteurs d'échelle est menée statistiquement à partir d'un échantillon de mesures, puis leur validation est conduite en comparant les résultats de divers modes de calcul. Les caractéristiques du milieu de référence sont obtenus arbitrairement par des caractéristiques d'un milieu moyen représentatif de l'ensemble du site. La dispersion autour de ce milieu est donnée par la dispersion des facteurs d'échelle par rapport à leur valeur moyenne.

Warrick et al (1977) et Simmons et al (1979) cherchent ainsi à déterminer des valeurs moyennes des paramètres hydrodynamiques à partir

de la distribution statistique du facteur d'échelle (figure 8). Ces paramètres sont utilisés par Warrick et Amoozegard-Fard (1979) dans un modèle hydrodynamique qui évalue l'effet de la variabilité des paramètres hydrodynamiques sur le fonctionnement global du site. De nombreux auteurs ont ensuite vérifié et appliqué cette méthode dans des situations diverses au laboratoire (Sharma et Luxmoore 1979, Luxmoore et Sharma 1980, Russo et Bresler 1980). Sharma et al. (1984) ont travaillé sur des mesures effectuées au champs ainsi que Vaucelin et al (1981).

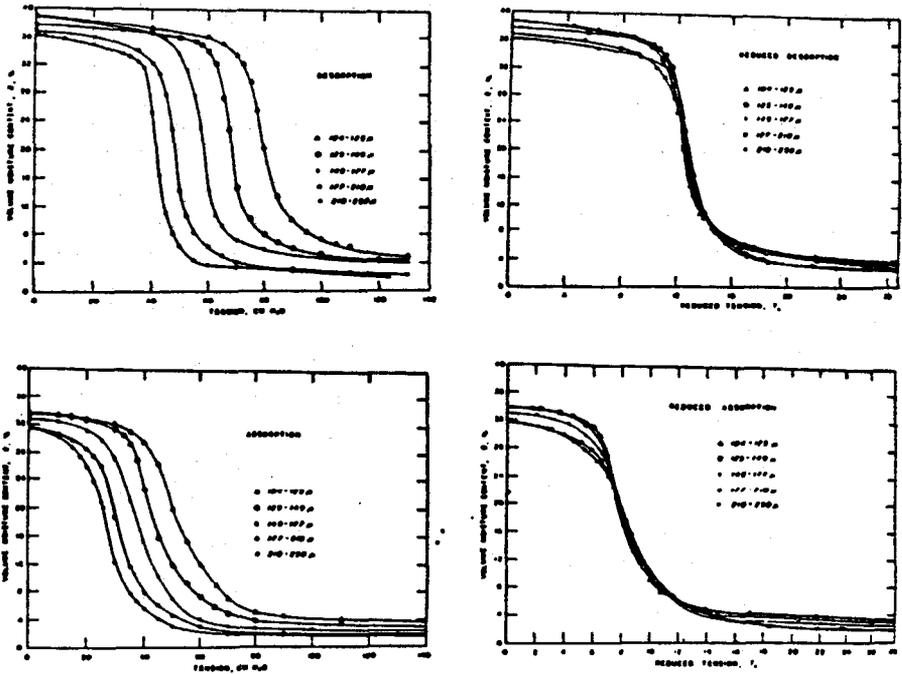


Figure 6- Réduction des courbes d'absorption et de désorption d'après Klute et Wilkinson 1958

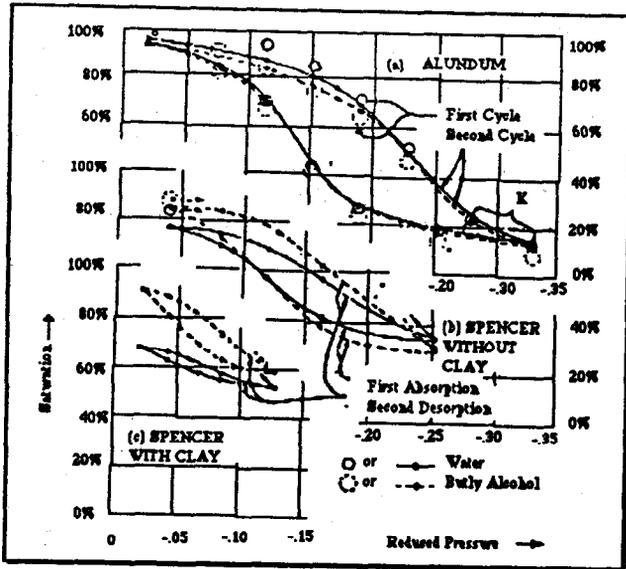
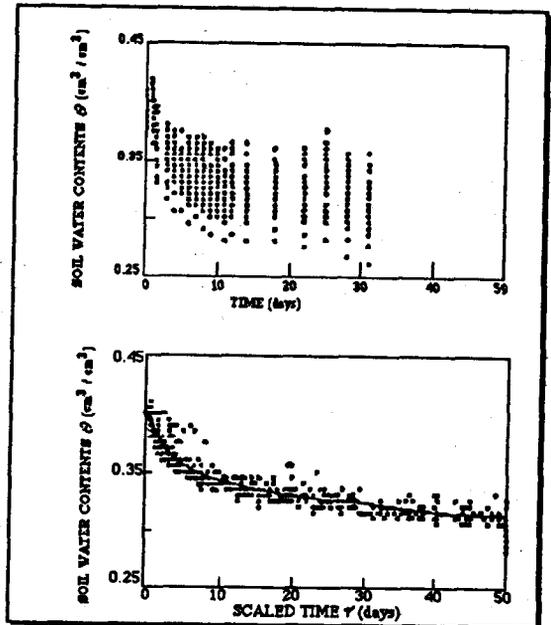


Figure 7- Illustration des limites de la mise en facteur du fonctionnement hydrodynamique du sol d'après Klute et Wilkinson 1958

Figure 8- La mise en facteur d'échelle de la désorption d'après Simons et al 1979



Le modèle spatial de la mise en facteur d'échelle est aléatoire: les distributions des facteurs d'échelle calculés sont soit normales, soit log-normales et aucune dépendance spatiale n'est prise en compte.

Cependant les travaux de Maller et Sharma (1981,1984) mettent en évidence le fait que le fonctionnement hydrique moyen diffère largement de la moyenne des fonctionnements sur un site. Cela ne s'accorde pas avec l'hypothèse d'un modèle spatial aléatoire. Ils cherchent l'origine de cette divergence dans l'existence de relations entre les paramètres hydrodynamiques. Ils améliorent la précision de leur résultat par rapport à une simulation hydrodynamique spatialisée.

Le modèle spatial aléatoire ne suffit donc pas à décrire le comportement zonal, dans un article récent Sharma et al (1987) testent l'effet de la dépendance spatiale entre les facteurs d'échelle sur le comportement hydrodynamique d'une parcelle.

Cette dépendance est mesurée par le variogramme qui constitue le principal outil d'analyse structurale en géostatistique. Introduit en Pédologie par Burgess et Webster (1980), il est maintenant fréquemment employé pour décrire la variabilité d'un paramètre ou sa représentation spatiale (Imbernon 1981, Viera et al 1983, Iris 1986). La structure spatiale est donnée par l'évolution moyenne de l'hétérogénéité dans l'espace à partir d'un point quelconque du site étudié. La géostatistique a été développée pour évaluer l'organisation des données dans un cadre conceptuel aléatoire (Matheron 1978).

Dans leur étude Sharma et al. (1987) simulent le comportement d'une parcelle selon quatre types de dépendances spatiales: absente, faible, moyenne et forte. A ces quatre types correspondent autant de modèles spatiaux: aléatoire, faiblement et moyennement structuré et ordonné. Les résultats (figure 9) montrent l'influence considérable du modèle spatiale sur le comportement zonal de la parcelle: le choix d'un modèle spatial ordonné produit un engorgement à l'aval de la parcelle.

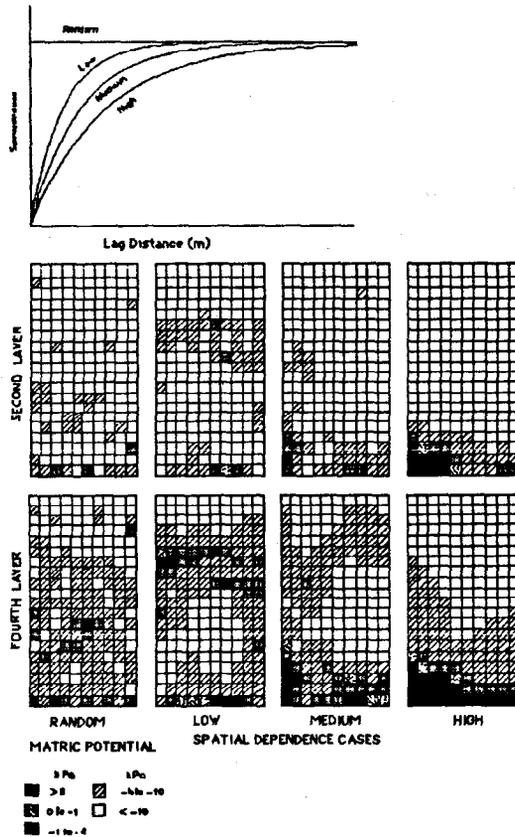


Figure 9- Les structures et leur effet sur le fonctionnement hydrodynamique d'une parcelle d'après Sharma et al 1987

La description de l'hétérogénéité du milieu par le facteur d'échelle s'est développée par suite de l'incapacité de la théorie de la similitude des milieux poreux à décrire et à estimer le fonctionnement des milieux naturels. Elle ne présente cependant aucune information spatiale sur ce fonctionnement et, de ce fait, ne décrit pas la totalité de l'information nécessaire au transfert d'échelle. L'application de la géostatistique a comblé ce vide sans imposer un modèle spatial contraignant: la structure donnée par le variogramme décrit un ordre dans un environnement aléatoire. Sa mesure nécessite cependant un grand nombre de données que Sharma et al. (1987) ont simulé.

IV. CONCLUSION: L'IDENTIFICATION DES MODELES SPATIAUX.

Bien que manipulant des données de natures différentes les deux approches du transfert d'échelle qui illustrent cet article présentent des carences similaires dans la définition des modèles spatiaux dans lesquelles elles évoluent. Cette définition n'est pas évidente pour deux raisons: tout d'abord les modèles spatiaux sont le plus souvent implicites et, de ce fait, ignorés. Ensuite, lorsqu'on a pris conscience de leur importance, la définition d'un modèle spatial est un choix difficile parce qu'il conditionne l'ensemble de l'environnement dans lequel on se place. Si l'on admet qu'un modèle ordonné est trop contraignant, et qu'un modèle aléatoire ne l'est pas suffisamment, il paraît impossible a priori de doser un modèle optimal sans information sur la structure spatiale des données traitées.

Les outils de mesure de cette structure font leur apparition en Pédologie malgré le fait qu'ils soient encore mal adaptés. Ils permettent actuellement de caractériser la structure spatiale de données numériques disponibles en grand nombre. Le dernier exemple cité illustre cependant l'intérêt de leur utilisation.

V. BIBLIOGRAPHIE

1. BOCQUIER G. (1971) Génèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse Sci. Strasbourg. Mem. ORSTOM 62, 1973, 350p.
2. BOULAIN J. (1978) Les unités cartographiques en Pédologie. Analyse de la notion de Génon. Sc. du Sol (1) 1978.
3. BOULAIN J. (1982) Typologie des Sols. Sols INA-PG 2: 139 et 159p.
4. BOULAIN J. (1984) Matériaux pour une histoire de la pédologie. Sols INA-PG 144p.
5. BOULET R. (1974) Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatiques. Thèse Sci. Strasbourg. Mem. ORSTOM 85 272p.
6. BOULET R. (1981) Etude pédologique des bassins versants ECEREX. Bilan de la cartographie. L'écosystème guyanais. Bull. de liaison du groupe de travail ECEREX (4) 4-21.
7. BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y. (1982) Analyse structurale et cartographie en pédologie. Cah. ORSTOM Ser. Pédol. XIX (4) 309-351.
8. BOULVERT Y. (1975) Carte pédologique de l'OUHAM. Rep. Centrafricaine ORSTOM 152p.
9. BURGESS T.M. ET WEBSTER R. (1980) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I the semi-variogram and punctual kriging. Jour. of Soil Sci. (31) 315-331.
10. CHAUVEL A. (1977) Recherche sur les transformations des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saison contrastée. Thèse Sci. Strasbourg. Trav. et doc. ORSTOM 62 532p.
11. CPCS 1967 Commission de pédologie et de classification des sols. ENSA Grignon Lab. Pédologie Géologie 87p.
12. ELRICK DE. SCANDRETT JH., MILLER EE. (1959) Test of capillarity flow scaling. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23 329-332.
13. FRITSCH E., PLANCHON O. (1986) Cartographie des sols d'un petit bassin versant de Côte d'Ivoire. Rapp. ORSTOM Adiopodoumé.
14. GIRARD MC. (1967) Approche statistique de la notion de série. Thèse 3ème cycle INA-PG 200p.
15. IMBERNON J. (1981) Etude de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal. Thèse 3ème cycle INPG 150p.
16. IRIS JM. (1986) Analyse et interprétation de la variabilité spatiale dans trois matériaux ferrallitiques. Sci. du Sol (24) 245-256.
17. KLUTE A. ET WILKINSON GE. (1958) Some tests of the similar media concept I Reduced capillary conductivity and moisture characteristic data. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22 278-281.

18. LUXMOORE RJ. ET SHARMA ML.(1980) Runoff response to soil heterogeneity: Experimental and simulation comparisons for two contrasting watersheds. WRR 16 (4) 675-684.
19. MALLER RA.ET SHARMA ML.(1981) An analysis of areal infiltration considering spatial variability. Jour. of Hydr. (52) 25-37.
20. MALLER RA.ET SHARMA ML.(1984) Aspects of rainfall excess from spatially varying hydrological parameters. Jour. of Hydr. (67) 115-127.
21. MARSHALL TJ.(1958) A relation between permeability and size distribution of pores. Jour. of Soil Sci. 9 (1) 1-8.
22. MATHERON G.(1978) Estimer et choisir. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau 175p.
23. MILLER EE. ET MILLER RD.(1956) Physical theory of capillarity flow phenomena. J. Appl. Phys. (27) 324-332. Millington RJ. et Quirk JP.(1959) Permeability of porous media. Nature (183) 387-388.
24. PECK AJ., LUXMOORE RJ. ET STOLZY JL.(1977) Effects of spatial variability of soil hydraulic properties in water budget modeling. WRR 13 (2) 348-354.
25. Reichardt K., Libardi PL. et Nielsen DR.(1975) Unsaturated hydraulic conductivity determination by a scaling technique. Soil Sci. 120 (3) 165-168.
26. REICHARDT K., NIELSEN DR. ET BIGGAR JW.(1972) Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.(36) 241-245.
27. RUSSO D.ET BRESLER E.(1980) Scaling soil hydraulic properties of a heterogeneous field. Soil Sci. Soc. Amer. Jour. (44) 681-684.
28. SHARMA ML. ET LUXMOORE RJ.(1979) Soil spatial variability and its consequences on simulated water balance. WRR 15 (6) 1567-1573.
29. SHARMA ML.ET AL. (1987) Subsurface water flow simulated for hillslopes with spatially dependent soil hydraulic characteristics. WRR 23 (8) 1523-1530.
30. SIMMONS CS. NIELSEN DR. ET BIGGAR JW.(1979) Scaling of field measured soil-water properties. Hilgardia 47 (4) 77-173.
31. VAUCLIN M., VACHAUD G. ET IMBERNON J. (1981) Spatial variability of the soil physical properties over one-hectare field plot . AGU Chapman Conference Fort-Collins . July 1981
32. Viera SR., Hatfield JL. Nielsen DR et Biggar JW.(1983) Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia 51 (3) 75p.
33. WARRICK AW., MULLEN GJ. ET NIELSEN DR.(1977) Scaling field measured soil hydraulic properties using a similar media concept. WRR 13 (2) 355-362.
34. WARRICK AW.ET AMOOZEGARD-FARD A.(1979) Infiltration and drainage calculation using spatially scaled hydraulic properties. WRR 15 (5) 1116-1120.
34. WILKINSON GE. ET KLUTE A.(1958) Some tests of the similar media concept II Flow system data. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23 434-437.

MVR - AUTOMATISATION D'UN MODELE D'INFORMATION PLUVIOMETRIQUE REGIONALE

Gérard COCHONNEAU, Gérard HIEZ, Patrick SÉCHET

I RESUME

La méthode du vecteur régional modélise l'information pluviométrique régionale (ensemble de séries chronologiques d'observations collectées en des stations voisines), sous la forme d'une suite d'indices représentatifs de la pluviométrie annuelle sur la région, tout en permettant de quantifier la contribution relative de chaque poste. Elle s'appuie sur un processus itératif convergent de recherche des valeurs modales des distributions expérimentales des valeurs observées, des indices représentatifs et des coefficients de proportionnalité spécifiques de chaque station.

La méthode a été mise au point dans un double souci de critique (les observations sont traditionnellement entachées d'erreurs), mais aussi de synthèse d'information. Le *vecteur régional* obtenu présente en effet la tendance pluviométrique de la zone considérée sous une forme compacte et facile à prendre en compte dans les études d'inventaire ou de mécanismes climatiques de grande extension spatiale.

Un progiciel d'automatisation permettant la génération du modèle est en cours de réalisation, de façon à en rendre possible l'exploitation systématique à l'aval des grandes bases de données pluviométriques

(PLUVIOM, en particulier). L'utilisation d'une méthodologie professionnelle de développement de logiciel tend à rendre celui-ci convivial et très souple, de mode à disséminer l'utilisation du modèle et surtout d'en étendre considérablement le champ d'application. Des applications deviendront donc possibles en climatologie, hydrologie, océanographie, géophysique, etc..

II INTRODUCTION

La connaissance des précipitations pluviométriques, de leur évolution dans le temps et de leur répartition dans l'espace, est essentielle pour de nombreuses activités de l'homme dans son milieu (production agricole, alimentation en eau des concentrations urbaines et industrielles, protection contre les crues, etc.).

La variabilité qui caractérise les phénomènes atmosphériques, oblige à en appréhender l'intensité par le biais d'un réseau d'observations ponctuelles, qui fournit un échantillonnage spatio-temporel. Ainsi, lorsque l'on individualise une région pour une étude de la pluviométrie, l'information de base collectée peut être représentée par une matrice de données (A) où chaque colonne représente un point d'observation (station ou poste) et chaque ligne une date d'observation déterminée (figure 01).

Malheureusement, comme pour toute acquisition de données par sondage, les données recueillies sont entachées d'erreurs de toute nature, qui tiennent autant au caractère individuel de la mesure qu'aux défauts qui peuvent intervenir dans le système (site, capteur, lecture ou enregistrement, transmission, etc.) de collecte de l'information. De plus, toute absence d'observation en une station et à une date déterminée provoque une lacune dans la matrice des données.

Dans la mesure où le réseau d'observation considéré est suffisamment dense pour fournir un certain degré de redondance dans les informations recueillies, non seulement une critique systématique des données est possible (et nécessaire), mais encore il est envisageable de présenter les mesures de la pluviométrie régionale sous une forme plus synthétique et plus facile à prendre en compte dans les applications.

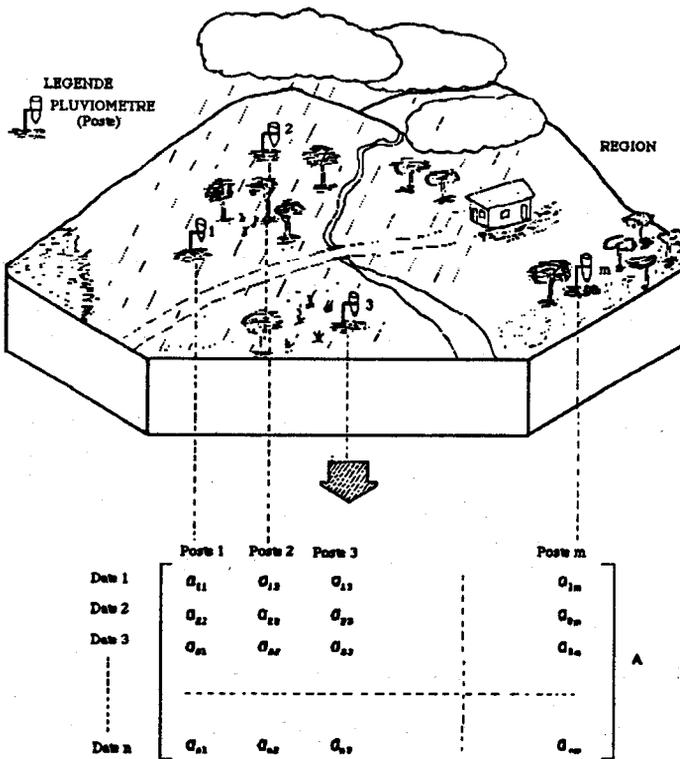


Figure 1 - Pour une région déterminée, les observations pluviométriques collectées à chaque date et en chaque poste fournissent la matrice initiale A

C'est dans ce double objectif que Gérard Hiez, hydrologue à l'ORSTOM, a développé un modèle conceptuel : la méthode du vecteur régional (Gérard Hiez 1977).

III. HYPOTHESES

L'hypothèse fondamentale consiste à admettre que l'ensemble des stations sélectionnées obéit à une tendance climatique régionale unique, chacune d'elles n'étant par conséquent qu'une représentation de cette tendance, déformée à la fois par de possibles anomalies locales et par d'éventuelles erreurs d'observation. C'est le principe de *pseudo-proportionnalité* des totaux pluviométriques entre postes voisins.

Dans ces conditions, on conçoit que l'information pluviométrique pour une date i déterminée, qui est fournie globalement par l'ensemble des stations, contient une valeur estimative L_i plus représentative de celle donnée par l'une quelconque des stations, prise isolément.

IV. LE MODELE

La méthode du vecteur régional (MVR) fournit une estimation du vecteur de référence formé par l'ensemble des indices pluviométriques L_i . Sur la matrice des données, le principe de la *pseudo-proportionnalité* des postes se traduit par la *quasi-colinéarité* des vecteur-colonnes qui la constituent.

Autrement dit, et toujours en faisant abstraction des fluctuations aléatoires propres à chaque poste, la matrice initiale est *peu différente* d'une matrice dégénérée, que l'on peut considérer comme le produit d'un vecteur-colonne L par un vecteur-ligne C (figure 02). Il est clair que les coefficients C_j sont propres à chaque station, tandis que les L_i sont les indices pluviométriques (inhérents à chaque date) recherchés.

1) Modèle : $A = B + E$, où

A est la matrice des données observées;

B est la matrice des données "théoriques" ;

E est la matrice de erreurs (ou anomalies)

2) Application du principe de "pseudo-proportionnalité"

$$B = L \times C$$

ou

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_1 & \dots & C_n \end{bmatrix} = B$$

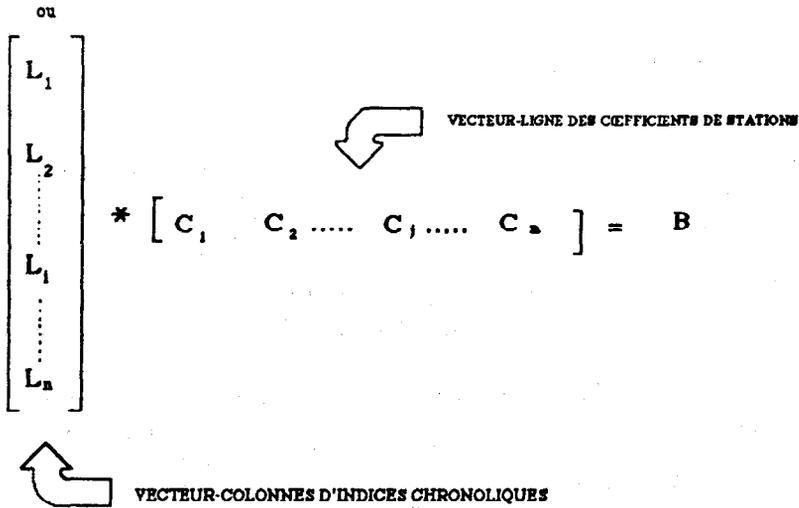


Figure 2- La matrice initiale (A) est "peu différente" (aux anomalies près) d'une matrice dégénérée (B), obtenue à partir du produit d'un vecteur colonne (L) par un vecteur-ligne (C)

Le modèle théorique constitué par la matrice dégénérée, résultat du produit $L \cdot C$, représente l'information à caractère linéaire qu'il est possible d'extraire des données de base. La différence entre la matrice initiale et la matrice dégénérée est appelée matrice des résidus E ($E = A - L \cdot C$).

V. CALAGE DU MODELE

La détermination des coefficients C_j , $j=1..m$ et des indices L_i , $i=1..n$ correspond au calage du modèle proposé : puisqu'il s'agit d'un système de $n \cdot m$ équations (correspondant à chaque élément de la matrice initiale) à $n+m$ inconnues, celui-ci doit être réalisé en cherchant à minimiser la matrice des résidus.

Plutôt que de réduire quantitativement la masse des résidus, en introduisant le critère de distance défini à partir de la norme euclidienne (méthode des moindres carrés), MVR choisit d'en réduire le nombre. Ceci revient à dire que les vecteurs L et C sont correctement estimés lorsque la valeur la plus probable des résidus est nulle.

Il s'avère en fait plus intéressant d'utiliser les valeurs relatives des résidus, de telle sorte que la valeur la plus fréquente de celles-ci sera zéro,

si la valeur modale de $\frac{A_{ij}}{L_i \cdot C_j}$ est l'"unité", ce que l'on écrira $M(\frac{A_{ij}}{L_i \cdot C_j}) = 1$. Ainsi, en fixant une colonne (j) de la matrice A, on peut écrire :

$\frac{M(\frac{A_{ij}}{L_i})}{C_j} = 1$, soit $C_j = M(\frac{A_{ij}}{L_i})$, étant donné que $M(\frac{1}{C_j}) = \frac{1}{M(C_j)} = \frac{1}{C_j}$. De même, pour toute ligne (i) de la matrice : $L_i = M(\frac{A_{ij}}{C_j})$.

Autrement dit, si l'on suppose les C_j connus, il suffit de normaliser la suite des valeurs $\frac{A_{ij}}{C_j}$ pour obtenir L_i et, inversement, si l'on suppose les L_i déjà calculés, le mode de l'échantillon des $\frac{A_{ij}}{L_i}$ fournira C_j . Ainsi, si l'on dispose d'un moyen de calcul du mode, une solution peut être trouvée par un processus itératif : on initialisera (par exemple) tous les L_i à 1 pour calculer une première approximation des C_j , puis on calculera les L_i à l'aide de ces valeurs et on utilisera les nouveaux L_i pour commencer une deuxième itération.

L'auteur ayant mis au point une méthode non paramétrique de détermination de la valeur modale d'un échantillon quelconque, la démarche d'élaboration du vecteur régional repose finalement sur un procédé itératif d'estimation du mode des lignes et des colonnes de la matrice initiale (*traitement LC*). Le processus se poursuit tant que la variation des L_i et C_j , d'une itération à l'autre, est supérieure à un seuil prédéterminé.

VI VALIDATION DU MODELE

Il est facile d'éprouver la fiabilité et la sensibilité de l'algorithme mis en oeuvre. En partant d'une matrice dégénérée artificielle dans laquelle on introduit des anomalies locales, on peut constater que le procédé permet de retrouver, sans aucune erreur, le vecteur-ligne et le vecteur-colonne d'origine. Tel test, réalisé sur une matrice 9x5, est entièrement décrit dans l'article de 1977.

Par ailleurs, un exemple portant sur une série composée de 7 postes, permet de montrer que si l'on applique une déviation systématique sur trois d'entre eux, le vecteur régional reste inchangé et les graphiques de double-cumul effectués entre le vecteur et ces mêmes postes mettent en évidence une *cassure* pendant la période affectée par la déviation. Si l'on ajoute la même déviation sur un quatrième poste, le vecteur régional *bascule* et les cassures observées se transportent sur les trois postes inchangés.

Ce dernier test montre bien la sensibilité de la méthode : il en fournit aussi les limites, dans la mesure où il indique que les résultats obtenus pourront être systématiquement faussés si, par exemple, les postes sélectionnés n'obéissent pas tous à la même tendance climatique (mauvais choix du groupement régional, ne permettant pas de respecter l'hypothèse fondamentale).

VII. MISE EN OEUVRE

La méthode du vecteur régional, comme outil d'analyse ponctuelle (critique des données observées en chaque station) et comme outil de synthèse, prend toute sa valeur si elle est appliquée sur de grandes régions, pour l'homogénéisation de la pluviométrie annuelle (par exemple). La rendre disponible à l'aval des bases de données pluviométriques existantes, est donc un préalable à une utilisation systématique.

La phase d'opérationnalisation du modèle a franchi un certain nombre d'étapes, qui se traduisent à chaque fois par la mise au point d'un, ou plusieurs, programmes adaptés à l'environnement informatique de la structure d'accueil.

Un premier programme, expérimental, a été développé en 1973 sur IBM 370-168, pour le bureau central hydrologique à Paris. A la suite de l'affectation de G.Hiez au Brésil, deux versions ont été adaptées, l'un sur IBM 1130 à l'université de Fortaleza, l'autre sur IBM 360-30 (sous DOS) à la Sudene (superintendance pour le développement du nordeste) à Recife. L'une comme l'autre ont dû migrer, respectivement pour un environnement DEC 10 à Fortaleza, et sur IBM 370-145 (sous DOS-VSE) à Recife.

Ces deux dernières versions ont donné lieu à l'amélioration des algorithmes et des sorties imprimées d'une part, à des applications de grande envergure, pour le tracé des isohyètes de l'état du Cearà et l'homogénéisation des données de l'état de la Paraíba (Jacon 1982), d'autre part.

Depuis 1983, une adaptation est en cours de réalisation au département national (brésilien) des eaux et de l'énergie électrique (DNAEE), administration chargée de centraliser les données hydropluviométriques collectées sur le territoire brésilien. Celle-ci, intégrée au système national d'informations hydrologiques (SIH) qui catalogue plus de 10 000 postes, permettrait une exploitation de la méthode à grande échelle.

Un travail important a déjà été réalisé dans le but d'appliquer systématiquement la méthode : les grandes lignes du travail à réaliser ont été tracées et les produits attendus ont été précisés (Brasil 1983). En particulier, on a défini un échantillonnage objectif de l'espace en régions iso-

morphes basé sur un réseau de mailles hexagonales de 12 500 km² de superficie (elles-mêmes parfois regroupées en macrorégions, ou au contraire subdivisées en microrégions, de façon à prendre en compte les grandes variations du nombre de stations par région). Il a ainsi été possible de fournir quelques résultats intéressants sur les fluctuations climatiques, au niveau de grandes régions (Brasil 1986)

VIII. PROBLEMES RENCONTRES

L'implantation se heurte toutefois à un certain nombre de difficultés qui, jusqu'à présent, n'ont pu être totalement surmontées. Au-delà des contraintes entraînées par l'adaptation à une nouvelle configuration matérielle (IBM 3081 et 4381) et du système d'exploitation (VM/CMS sur MVS), gênantes mais rapidement contournables, la mise en place effective affronte deux obstacles importants : difficulté d'interfaçage avec le SIH, géré sous ADABAS et incapacité du site de traitement à assimiler les programmes développés en Fortran, dans un environnement axé sur l'utilisation du Cobol et du PL/1, et d'outils plus spécifiques (SAS, Natural, etc.).

Plusieurs tentatives infructueuses d'adaptation partielle, ou de développement d'un système fondé sur les programmes développés par l'auteur du modèle, ont conduit à proposer un schéma de travail fondamentalement différent, susceptible d'aboutir à une version totalement opérationnelle.

IX. SOLUTION

L'idée est venue de constituer une équipe de développement pour assister l'auteur de la méthode à la mise au point d'un logiciel, suffisamment complet et cohérent pour être utilisé de manière autonome, indépendamment de l'environnement informatique de la base de données. Le travail à réaliser prend alors une toute autre dimension, dans laquelle la génération du vecteur régional se réduit à une fonction parmi d'autres, mais occupe toutefois une position centrale.

La finalité de cette nouvelle opération est évidemment de valoriser les résultats obtenus par un chercheur, tout au long d'une partie significative de sa carrière, en transformant la méthode mise au point en un outil facilement utilisable et pouvant être mis à profit par plusieurs équipes. Dans la mesure où le modèle sous-jacent faisait déjà l'objet d'un large consensus auprès de la communauté hydrologique, ce projet a été facilement approuvé.

X CONCEPTION DU LOGICIEL

Un dossier de conception détaillé a été établi (Séchet & Hiez, 1988), selon une méthode d'analyse (Gane & Sarson, 1979) déjà éprouvée et largement utilisée par les analystes de l'équipe dans d'autres programmes.

Le diagramme de flot de données du système à développer, présenté figure 3, en montre les principales fonctionnalités :

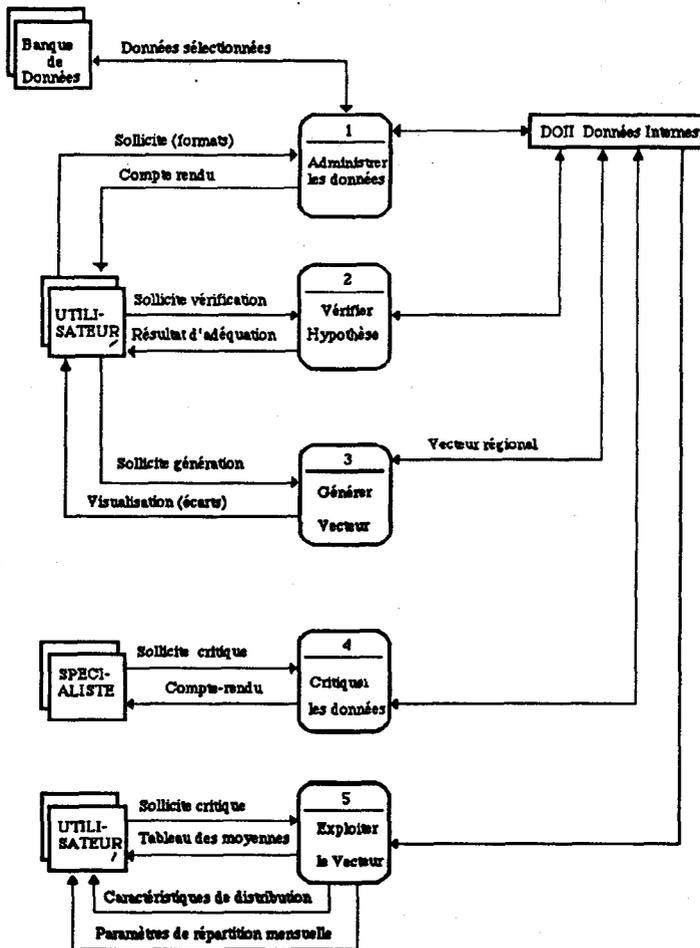


Figure 3 - Le diagramme de flux de données présente les fonctionnalités du logiciel MVR

- la fonction *administrer les données* prévoit l'entrée d'un lot de données dans le système MVR, soit par saisie directe, soit par lecture dans un fichier de format prédéfini, et toute mise à jour qui s'avèrerait nécessaire. Elle permettra de la même façon l'extraction des résultats et l'émission automatisée d'un certain nombre de documents de travail. Elle inclut également un processus fondamental de sélection, dans le lot initial, de la région et de la période à traiter (fournissant par conséquent la matrice de données A) ;

- *vérifier les hypothèses* est un processus qui s'appuie sur des tests opérés sur la matrice d'autocorrélation des séries sélectionnées pour déterminer si l'hypothèse de *pseudo-proportionnalité* des stations est respectée. Dans le cas contraire, il interdit l'utilisation de la méthode sur l'échantillon choisi ;

- la fonction *générer le vecteur* constitue le noyau central du système. Elle prévoit le calcul du vecteur régional, tant au niveau annuel que mensuel, et autorise la visualisation graphique des écarts cumulés (ou simples cumuls), méthode utilisée pour mettre en évidence les fluctuations pluviométriques régionales. Elle fournira également une matrice de *données reconstituées*, obtenue par estimation de la valeur de la pluie en chaque poste, à partir du vecteur régional et du coefficient C_j propre à chaque poste ;

- les deux dernières fonctions permettront la mise en oeuvre des applications classiques du vecteur régional : critique des données observées à une station et production d'un certain nombre de paramètres régionaux, par exploitation du pouvoir de synthèse du vecteur régional.

Chaque fonction fait l'objet d'une décomposition en processus, chacun d'entre eux dûment documentés, à la fois en ce qui concerne la logique à codifier et les flux d'entrée et de sortie qui interviennent. Par exemple, la figure 4 montre le détail de la critique des données et fait apparaître un processus interactif, le spécialiste (hydrologue) s'appuyant sur un tracé graphique de doubles cumuls entre le vecteur régional et un poste déterminé, pour définir les corrections à appliquer sur ce dernier.

4. CRITIQUES DES DONNEES

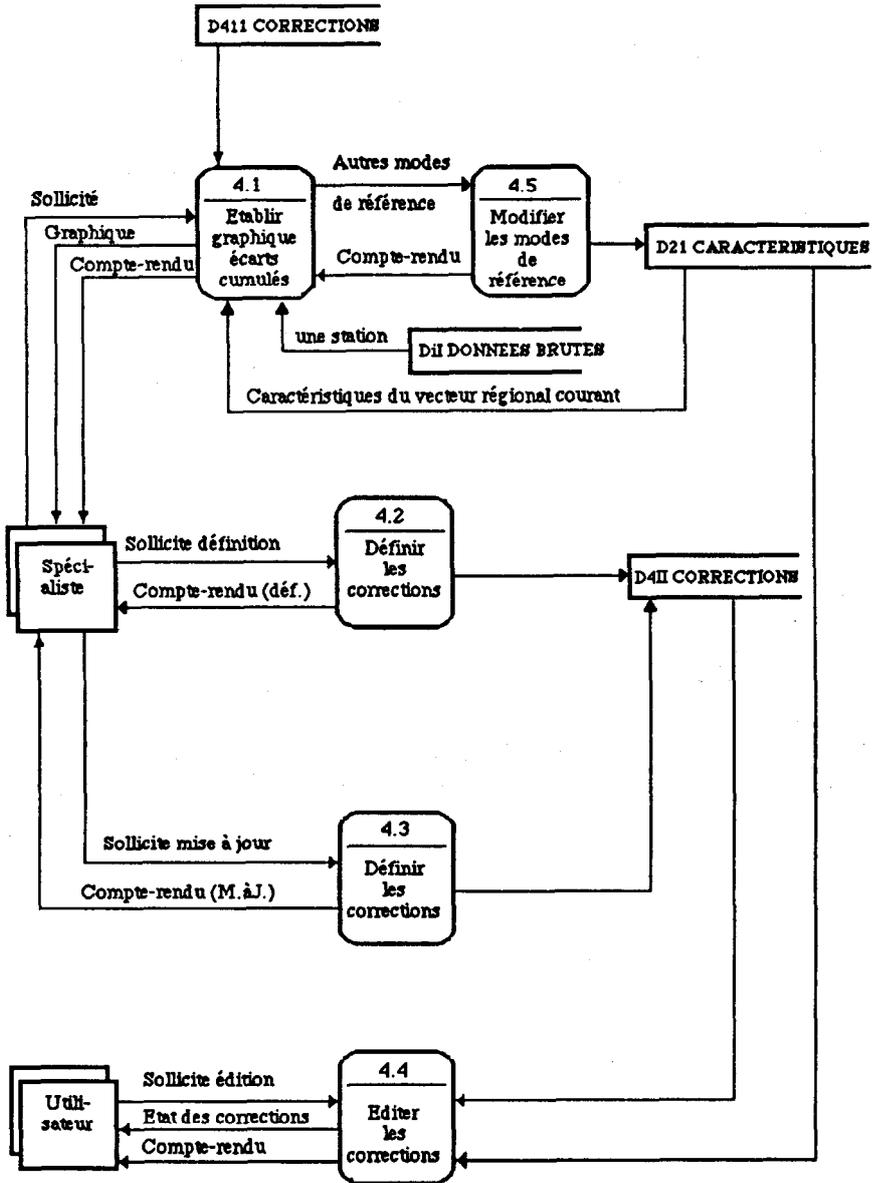


Figure4 - La correction des données, poste par poste, fait appel à une fonction interactive

XII. PROGRAMMATION DU LOGICIEL

Le dossier de conception élaboré ne compromet aucun élément de la définition du logiciel par rapport à une configuration particulière, de telle sorte qu'il a été décidé de développer une première version sur un micro-ordinateur au standard IBM PC-XT, permettant d'en percevoir une ample dissémination. D'ailleurs, une version expérimentale rudimentaire, développée par Gérard Hiez courant 1987, en a largement montré l'intérêt et la faisabilité, même si l'addition d'un coprocesseur arithmétique apparaît comme quasiment indispensable pour rendre les temps de traitement acceptables.

La programmation proprement dite de MVR est réalisée en deux étapes. Dans une première phase, dite de spécification, le choix de toutes les structures de données est arrêté, ainsi que toutes les modalités de l'interface système-utilisateur (écrans, formats des sorties imprimées, documentation d'utilisation et aide en ligne) et les programmes sont définis, dans un environnement d'atelier-logiciel. La codification est alors réalisable par plusieurs programmeurs différents, la cohérence de l'ensemble étant garantie, à la fois par les outils communs et par l'utilisation du dictionnaire de variables produit au cours de l'étape de conception. La conclusion de la première version opérationnelle est prévue pour fin 1988.

XII. CONCLUSION

Bien qu'il soit prématuré de compter dès maintenant sur un produit encore en cours de mise au point, les bénéfices que l'on peut tirer, d'ores et déjà, de cette expérience ne sont pas négligeables.

En premier lieu, il convient de remarquer que les principes de base de la méthode ont été énoncés il y a plus d'une quinzaine d'années. Les années suivantes ont été surtout mises à profit pour perfectionner les algorithmes et diffuser la méthodologie auprès de la communauté scientifique : même si les quelques adeptes de la première heure ont à leur actif des applications intéressantes, il faut bien reconnaître que l'on a pas exploité tout le potentiel de MVR. En ce sens, la production d'un outil logiciel, facilitant la mise en oeuvre et l'exploitation de la méthode, crée une expectative prometteuse de diffusion et d'assimilation de la technologie correspondante.

Une importance toute particulière revient au travail de conception effectué, qui aura été l'occasion d'une totale remise en question des aspects liés à la mise en oeuvre de la méthode. A l'occasion de l'analyse fonctionnelle correspondante, des modules autonomes ont été définis, ainsi que l'interfaçage de cette application avec les bases de données, en précisant

clairement un protocole de communication et les fonctions propres à l'une et l'autre. De plus, il a été jugé nécessaire de mieux distinguer certaines fonctions, dont l'accès sera réservé au spécialiste, par exemple en ce qui concerne l'application des corrections suggérées par la méthode.

Cette étape s'est accompagnée d'une réflexion sur les possibilités de généralisation de MVR, susceptible d'être utilisé dans plusieurs domaines scientifiques, où l'on manipule des ensembles d'observations spatio-temporelles de phénomènes continus (climatologie, océanographie, géophysique, etc.). L'intégration de la fonction de vérification des hypothèses, d'une part, la possibilité de saisie directe de la matrice initiale d'autre part, vont dans ce sens.

On notera pour conclure que cette opération s'insère parfaitement dans une politique de valorisation des acquis scientifiques de l'Institut, en venant couronner un travail de longue haleine mené individuellement par un chercheur, par la réalisation, avec l'aide d'ingénieurs informaticiens, d'un logiciel susceptible de devenir l'un des grands produits de l'ORSTOM dans ce domaine.

XIII. BIBLIOGRAPHIE

Brasil, DNAEE. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. Vektor regional. Brasília, 1983. 34p. (Informativo técnico,3).

Brasil, DNAEE. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. O vetor regional e as flutuações climáticas. Brasília, 1986. 16p. (Informativo técnico,7).

GANE, C. & SARSON, T. Structured system analysis: tools and techniques. Prentice-Hall, Inc., New York, 1979.

HIEZ, G. L'homogénéité des données pluviométriques. In: Cahiers ORSTOM, sér. hydrol. Paris, 14(2), pp.129-72, 1977.

HIEZ, G. Bases théoriques du "vecteur régional". Les premières applications et leur mise en oeuvre informatique. In: Premières journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, Coll. & Sémin., ORSTOM, Paris, 1986.

HIEZ, G. & RANCAN, L. Aplicação do método do vetor regional no Brasil. In: Simpósio brasileiro de hidrologia recursos hídricos, 5, Blumenau, 1983. Trabalhos apresentados. USP/EESC, Blumenau, SC, pp.242-66.

JACCON, G. As precipitações anuais da região paraibana: homogeneização e análise regional. Recife, SUDENE/DRN, 1982, 97p.

SÉCHET, P & HIEZ, G. Méthode du vecteur régional. Dossier de conception détaillé. Brasília, 1988, 140p., diff.rest.

MODELISATION STATISTIQUE DE LA STRATIFICATION D'UN ESPACE REGIONAL POUR L'ESTIMATION DE LA SUPERFICIE D'UN THEME AU SOL

Haja ANDRIANASOLO

I PRESENTATION

Vouloir connaître les réalités d'une région, même restreintes aux seules superficies de thèmes quelconques (cultures, forêts,...) a toujours posé des problèmes tels que le recours aux démarches de l'estimation statistique est nécessaire. Démarches dont l'utilisation demande la définition, de population ou univers, d'individus élémentaires ou unités de sondage, de base de sondage, d'échantillon, de stratification, de grappe, etc... Or dans les pays en voie de développement il est très rare que l'incomplétude des éléments disponibles, permette effectivement la constitution de ces divers éléments. Si en pays riches il est envisageable de mettre en oeuvre de façon rigoureuse de telles méthodes, c'est parce que sont disponibles des listes d'exploitations agricoles dans le cas d'enquêtes d'exploitants, et qu'existent des cartes à grandes échelles ou des moyens de prises de photographies aériennes dans le cas de sondages aréolaires.

Ces capacités rendent possibles le travail sur une représentation la moins "fausse" possible de la réalité. En effet par exemple dans le cas d'enquêtes d'exploitants agricoles, le modèle "mental" que l'on a est que toute culture où qu'elle soit et quoi qu'elle soit, dans la région est le fait d'un exploitant. Et qu'en échantillonnant des exploitations on échantillonne les cultures.

Pour l'affinement des précisions et des extrapolations, viennent ensuite les notions de découpage de l'univers en strates. Malheureusement dans le contexte des pays sous développés, le concept d'exploitant agricole est assez difficile à utiliser, puisque la majeure partie de la population cultive toujours quelque part, ou fait cultiver, sans parler des imbrications familiales, sociales et économiques. La base de sondage serait la population entière, dont on n'a aucune connaissance exhaustive, loin s'en faut. De même pour les méthodes aréolaires l'inexistence de cartes, cadastres à jour ou photographies aériennes est un facteur très limitatif sinon rédhibitoire. Il manque donc l'essentiel: une représentation de la réalité.

Or les données images satellitaires, de par leurs nature et caractéristiques, constituent aujourd'hui un modèle de choix représentant les réalités d'une région. En effet elles couvrent exhaustivement de grandes superficies, sont prises périodiquement, et rendent compte des phénomènes présents, en subdivisant l'aire couverte en éléments élémentaires: les pixels, qui suivants l'état de ceux-ci prennent une valeur déterminée (la valeur prise par un pixel est caractérisée par une intégrale des réflectances de l'ensemble des phénomènes couverts). Ainsi suivant les longueurs d'onde, les résolutions spatiales et spectrales, peut-on avoir une certaine représentation des états et types de phénomènes, de leurs forme, géométrie, extension, et localisation. Et même par induction sur la base de modèles adéquats, et d'études de l'agencement des objets représentés est-il possible d'obtenir des éléments de compréhension et de définition du mode d'organisation de l'espace par les hommes: capacité à appréhender la relation entre système naturel et système social.

Profitant de ce raccourci technologique, les pays en voie de développement, ont alors la possibilité d'avoir une idée de leurs réalités, du moment que des modèles basés sur les images satellitaires sont produits.

Notre propos est de fournir une modélisation possible de la stratification pour l'estimation de surface à partir de ce type de représentation.

II IDENTIFICATION DU MODELE GÉNÉRAL.

Ainsi que vu ci-dessous, les modèles d'estimations basés sur les notions telles que celles d'exploitants agricoles, rencontrent difficilement les spécificités des pays pauvres. Aussi nous orienterons-nous vers celui de l'estimation aréolaire, dont les concepts sont par ailleurs simples: partition de la superficie totale à étudier en N surfaces élémentaires, tirage aléatoire d'un échantillon de m d'entre eux, enquêtes des éléments de cet échantillon, et estimation pour la population des N éléments par expansion directe en multipliant le résultat de l'échantillon par N/m .

II.1 DESCRIPTION DU MODELE.

Soient (voir figures a et b) :

- une aire S
- une culture quelconque i

L'objectif est d'estimer l'extension de i dans l'aire S.

Définition: on appelle **segment** une portion de territoire, aux limites bien définies (E. Houseman, 1979).

Dans les méthodes d'échantillonnage d'aires, la surface totale S est subdivisée en segments. Un segment constitue l'unité élémentaire d'échantillonnage.

Soient:

- N le nombre total de segments de l'univers ($N=S/s$, où s: aire d'un segment)
- E un échantillon de m segments ($m < N$)
- j un segment quelconque

Par enquête on obtient $x_{i,j}$ la surface de i dans j faisant partie de E

Ce qui permet l'obtention de la superficie moyenne de i par segment:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{i,j}$$

Un estimateur de l'extension totale de i dans S est par expansion directe:

$$\hat{x}_i = N * \bar{x}_i$$

Dont la variance est:

$$\text{var}(\bar{x}_i) = \frac{N-m}{N-1} * \frac{1}{m(m-1)} \sum_{j=1}^m (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2$$

D'autre part étant démontré que tout découpage de l'univers en strates est source de gain, dans le cas de ce modèle il suffit de considérer chaque strate séparément et de sommer les résultats sur toutes les strates.

Pour une stratification en H strates, on aurait si h représente une strate:

$$\bar{x}_{i,h} = \sum_{j=1}^{m_h} \frac{x_{i,h,j}}{m_h}$$

où :

m_h nombre de segments de h

$x_{i,h,j}$ extension de i dans le segment j de h

$\bar{x}_{i,h}$ extension moyenne de i par segment de h

L'estimateur est : $\hat{x}_i = \sum_{h=1}^H N_h * \bar{x}_{i,h}$

où :

$\bar{x}_{i,h}$ extension moyenne de i par segment dans h

N_h nombre total de segment de h

Figure a-

Identification du modèle d'estimation statistique (sondage aréolaire)

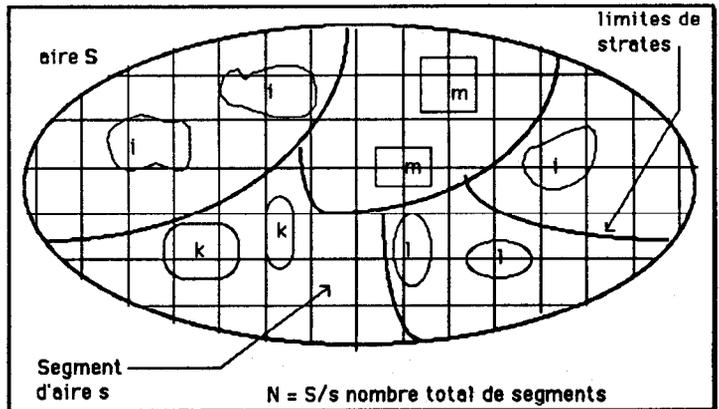
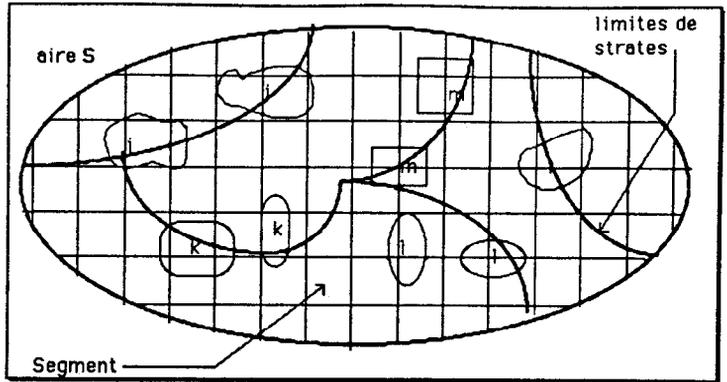


Figure b-Cas d'une mauvaise stratification



Dans la relation de décomposition de la variance: $T = W + B$

W est grand (la variance intra des strates est grande)

B est petit (la variance inter des strates est petite)

Chaque phénomène ciblé se retrouve dans plusieurs types de strate.

Une strate est un magma (mélange) de phénomènes.

Les phénomènes sont à cheval sur plusieurs strates.

Cependant malgré son apparente simplicité, la mise en oeuvre pratique et efficace de ce modèle d'estimation exige que certaines conditions soient remplies. En particulier que la variation entre segments soit la plus petite possible (que chaque segment possède tous à peu près les mêmes proportions des phénomènes existant), et qu'ils soient tous à peu près de la même taille. La contrainte de la minimisation des variations inter-segments, exige formellement une partition en strates efficace de l'aire étudiée. En effet plus les strates sont "pures" du point de vue des phénomènes ciblés, plus les variations entre les segments dans chaque type de strate diminuent. A la limite dans le cas où une strate correspond à un phénomène (culture), il suffirait de ne faire les enquêtes que dans cette strate, pour estimer ce phénomène dans l'univers.

Un point crucial est donc l'élaboration d'un modèle apte à générer des strates tel que leur variance interne soit minimisée, sur le critère mesuré sur les segments.

III. IDENTIFICATION DU MODELE DE STRATIFICATION.

III.1 RÉALITÉS: PROTOTYPE ET ENVIRONNEMENT.

Ainsi que précédemment vu, les données image satellitaires étant une traduction synthétique des réalités d'une aire géographique quelconque, ont un énorme potentiel d'information. Très rapidement ont été rappelés que peuvent y être approchés les phénomènes présents par leur état qua-

litatif, leur forme, leur agencement, leur organisation etc...Elles constituent donc une réalité complexe. Aussi selon l'approche en modélisation nous restreindrons nous à certains aspects de cette réalité, qui nous seraient utiles.

III.1.a Prototype.

L'objectif est la capacité à l'obtention de partitions de l'espace tel que la variance des phénomènes ciblés y soit la plus petite possible. Le problème est donc la découverte (dé-couvrir) des limites de ces parties de l'espace, sous la contrainte qu'à la limite ce phénomène, ne se retrouve que dans l'une d'entre elles. La découverte de ces limites constitue le sujet de la modélisation.

Etant donnée la richesse des données satellitaires, la recherche de ces limites pourrait être conduite du point de vue des différents états qualitatifs présents, des différentes formes présentes, des agencements et organisations de celles-ci, ou de tout autre élément participant de cette réalité. Le *prototype* que nous tenterons d'approcher est la *stratification par les états qualitatifs*. Pourquoi?

On sait que les données satellitaires sont un modèle de représentation du monde, dans lequel les objets prennent une valeur précise suivant leur réflectance, dans les différentes bandes de longueur d'onde de prélèvement de l'information. Il y a relation directe entre réflectance et objets sources de ces réflectance. Ces objets étant eux-mêmes définis par une infinité d'attributs possibles, mais dont l'un des plus importants au niveau de la télédétection est justement l'état qualitatif (la qualité). En particulier au niveau de cultures (phénomènes végétatif), la nature de l'objet intervient (arbre, fleurs,...), mais plus encore l'état de cette nature est primordial. La télédétection fait une différenciation entre, par exemple, arbre vert (un état) et arbre dont les feuilles jaunissent (un autre état). Si donc on se dote d'un modèle faisant ressortir les limites de ces différents états qualitatifs, l'objectif serait atteint. En effet supposons que nous ayons une culture cible, dans un état particulier, le fait d'arriver à découvrir une/des strates la circoncrivant tout spécialement, nous rapproche sensiblement de l'objectif, puisque sa dispersion dans les strates tend alors à décroître. Et ici un autre attribut des données image satellitaires prend toute son importance: la date de la prise de vue. Car s'il y a des dates auxquelles la majeure partie des thèmes présents sont dans des états qualitatifs semblables, il y en a d'autres où elles ne le sont pas. Mais cet aspect dépasse le cadre de cette modélisation (abordé par l'auteur dans sa thèse, voir bibliographie). De ce qui précède il ressort que le modèle s'appuiera essentiellement sur l'aspect spectral des données satellitaires.

III.2 IDENTIFICATION.

III.2.a Le modèle.

Suivant notre approche, le modèle doit fournir des classes-strates tel que la variance intra-strate soit la plus petite possible, ce qui tendrait à regrouper les individus pixels selon leur état qualitatif représenté par la valeur radiométrique. La minimisation de cette variance intra constitue alors le critère de classification.

Sachant que lorsqu'une population est divisée en classes, sa variance totale T se décompose en la somme $T = W + B$ de:

- la variance à l'intérieur des classes W ,
- la variance entre les classes B ,

le critère veut que la classification recherchée soit telle que W soit minimisée (respectivement que B soit maximisée, puisque T est une donnée constante).

Or de tels modèles de classification statistique existent, et sont reconnus sous le nom de "classification par réallocations et optimisation (du critère ci-dessous)". A titre d'exemple on peut mentionner ceux de Forgy (1965), Jancey (1966), MacQueen (1967), etc...

III.2.b Les variables.

L'identification du modèle en soi n'est pas nécessairement suffisant. Suivant les variables décrivant les individus pixels, les partitions se modifieront. Cela veut dire qu'au niveau de l'optimisation du critère, il faut inclure une identification de celles-ci. Identification qui à priori semble devoir être empirique.

En effet au départ on ne dispose que des valeurs des pixels, dans les différentes bandes de prélèvement des capteurs ("canaux"). Ainsi les données "MSS Landsat" disposent de quatre bandes, "Spot" de trois, "Thematic Mapper" de sept, etc... Théoriquement on pourrait donc s'en contenter. Cependant, de façon tout aussi empirique, il peut être fait usage d'autres variables communément admises en télédétection: les indices, et les axes factoriels.

Les indices sont des rapports de combinaisons linéaires de canaux, et sont répertoriés. Ainsi peuvent être mentionnés pour les données "MSS Landsat":

- l'indice de végétation verte $\frac{K7-K5}{K7+K5}$.
- l'indice de brillance $\frac{K6-K4}{K6+K4}$.
- l'indice des sols $\frac{K4-K5}{K4+K5}$.
- etc...(K_i représentant le canal i).

Quant aux axes factoriels, ils sont classiquement le résultat de la transformation des variables, en combinaisons linéaires successives maximisant la variance résiduelle, tout en exigeant l'indépendance de ces combinaisons. Les facteurs sont tels qu'ils expliquent la totalité de la variance des individus.

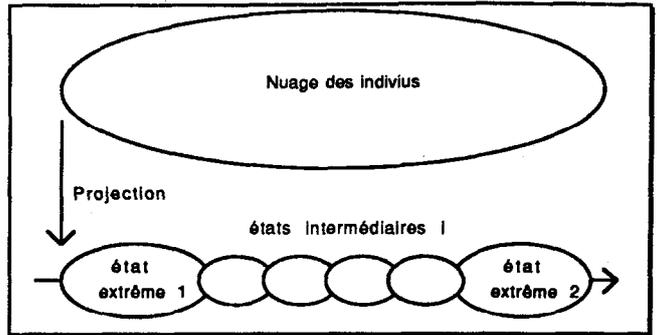
Dans la phase d'estimation, ces variables seront testées suivant un plan d'expérience, qui permettra la détermination du meilleur ensemble. Par itération, ultérieurement c'est cet ensemble qui devrait être utilisé.

Cependant suivant la problématique et la logique de l'approche du modèle adopté, une identification conceptuelle peut conduire à un ensemble de variables supplémentaires.

La variable répondant le plus aux critères du modèle devrait être telle qu'à travers elle, les différences entre les divers états présents dans les données, soient exacerbées. Que les variances entre ces classes d'état y soient maximisées.

Sachant que ces classes existent structurellement dans les données, et sachant qu'elles traduisent les réalités régionales (classes de sols nus, sols inondés, sols partiellement recouverts de végétation, complètement recouverts, tel que la végétation puisse être de très chlorophyllienne (verte), à peu (scénéscente), etc...), le fait de projeter et de maximiser la dispersion entre ces états sur une telle variable, équivaldrait à les ordonner d'une certaine manière sur celle-ci. Ordonnement qui devrait s'organiser suivant une échelle organisant les données entre les deux structures les plus fortes qu'elles contiennent (voir figure 1.)

Figure 1



Cette variable doit donc rendre compte de façon optimale des différences entre états. Supposant que les classes sont connues, elle doit avoir une variance maximale entre les classes, et minimale en leur intérieur. Le rapport (variance inter/variance intra) doit être maximum. Ce modèle est celui d'un axe d'une fonction discriminante sur des classes d'une partition.

Mais sur quelles classes calculer cet axe?

Au sens des structures existant dans les données, il y en a deux qui caractérisent les oppositions les plus fortes. Travaillant sur des représentations qui sont des états sur le terrain, les deux oppositions les plus fortes pourraient, par exemple être entre "eau profonde" et "sols nus en plein soleil". Entre ces deux états extrêmes, viennent s'organiser les autres états "intermédiaires". L'objectif est donc de construire l'axe de la fonction discriminante sur l'ensemble des individus pixels organisés en deux classes. Mais deux classes dont les caractéristiques doivent être telles que les critères présidant à leur formation s'inscrivent dans la logique du modèle, et de l'approche. Car l'efficacité d'un axe discriminant dépend directement de l'éloignement des classes (variance inter (B) grande) et de leur compacité (variance intra (W) petite). L'organisation en deux classes nécessaire est donc tel que, dans la relation d'analyse de la variance:

$$T = W + B$$

- W soit minimisée
- B soit maximisée

C'est là le critère du modèle général de stratification (classification) que nous avons retenu précédemment. Nous l'utiliserons donc aussi dans la phase relative aux variables.

(Le propos étant une stratification, et non une reconnaissance de cultures, l'application présentée dans la partie "estimation" montre que le calcul sur une partition en deux classes satisfait les contraintes du modèle).

IV. ESTIMATION.

Les données sont sur une région du nord-ouest de Madagascar, qui constitue une partie d'image de 1000 pixels sur 920. Les données satellitaires sont des images "Landsat MSS", de l'année 1981 du mois d'avril, voir images 1 à 13 (pour comparaison une image du mois d'août a aussi été utilisée. Les calculs illustratifs sont sur le mois d'avril).

Se situant dans le cadre de l'estimation de superficies de cultures, dont celle concernée est ici le riz.

Les estimations rigoureuses des paramètres pour le calcul des variables, doivent théoriquement être menées suivant les règles usuelles de l'échantillonnage. A savoir que pour des estimations de la moyenne de population, pour des niveaux de confiance donnés, il est possible d'obtenir la taille de l'échantillon nécessaire. Ainsi peut-on rappeler que si N est une taille d'échantillon:

$$N = \frac{r^2 \cdot \text{var}'(x)}{\frac{l^2}{4}} \text{ où :}$$

- r: valeur associée au niveau de précision désirée. (r = 1.96 pour un niveau de confiance de 95%)
- var'(x): estimation de la variance sur x
- l: amplitude de l'intervalle de l'estimation de la moyenne, autour de celle de la population.

Cependant dans le cas présent, les dimensions de la partie d'image utilisée ont permis un calcul direct sur la totalité de celle-ci. L'univers est donc restreint à cette partie d'image

Les indices suivants ont été calculés directement (Ki désignant le canal i)

$$\frac{K7-K5}{K7+K5} \text{ "végétation verte", } \quad \frac{K6-K4}{K6+K4} \text{ "végétation jaune", } \quad \frac{K4-K5}{K4+K5} \text{ "sols"}$$

Images de la région test
d'après les canaux originaux



Image 1 - Canal 4



Image 2 - Canal 5



Image 3 - Canal 6



Image 4 Canal 7

Images de région test
d'après les axes factoriels



Image 5 - Axe 1



Image 6 - Axe 2



Image 7 - Axe 3



Image 8 - Axe 4

Images de la région test
d'après les indices et l'axe unique modélisé



Image 9 - "IVG"
(végétation verte)



Image 10 - "IVJ"
(végétation jaune)



Image 11 - "SOL"



Image 12 - Axe "UNIQUE"

Les coefficients des combinaisons pour les axes factoriels:

$$\text{axe 1: } 0.566 * K4 + 0.586 * K5 - 0.306 * K6 - 0.493 * K7$$

$$\text{axe 2: } 0.418 * K4 + 0.361 * K5 + 0.673 * K6 + 0.227 * K7$$

$$\text{axe 3: } 0.699 * K4 - 0.624 * K5 - 0.266 * K6 + 0.227 * K7$$

$$\text{axe 4: } 0.125 * K4 - 0.371 * K5 + 0.619 * K6 - 0.681 * K7$$

Calcul de l'axe fonction discriminante:

a) caractéristiques des deux classes les plus fortes:

- classe 1:

canal 4: moyenne 37.0, variance 9.1

canal 5: moyenne 41.1, variance 31.3

canal 6: moyenne 45.4, variance 34.7

canal 7: moyenne 31.5, variance 62.2

- classe 2:

canal 4: moyenne 36.3, variance 10.0

canal 5: moyenne 38.7, variance 47.0

canal 6: moyenne 68.5, variance 105.4

canal 7: moyenne 66.7, variance 196.1

b) coefficients des canaux pour l'axe de la fonction discriminante:

$$\text{axe: } -0.012092 * K5 + 0.079628 * K7$$

Remarquons que dans tous les cas, les variables utilisées ont été centrées réduites.

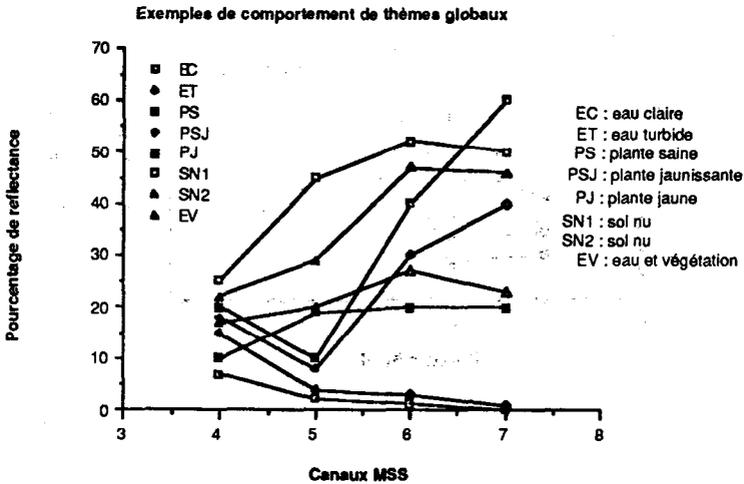
IV.1 PARTITION DE L'IMAGE.

En règle générale, pour une variable de contrôle donnée, le gain d'une stratification est sensible avec six à huit classes, et même si apparemment l'augmentation du nombre de strates pourraient apporter plus, le gain n'est plus aussi déterminant par rapport aux autres éléments de la mise en oeuvre: coûts, complexité, etc... Les données satellitaires du fait de leur

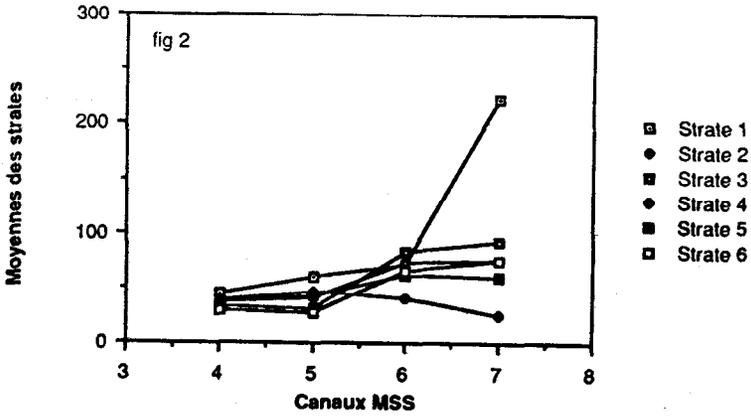
aspect synthétique, pourraient facilement permettre de générer un grand nombre de strates. Ainsi que l'on vient de le mentionner, ceux sont les éléments d'ordre pratique (compromis coûts et précision) de mise en oeuvre qui sera déterminant dans la limitation du nombre de strates (cependant dans le cadre de l'évolution de la présente modélisation, les problèmes de détermination du nombre de classes d'une partitions seront ultérieurement abordés). Dans la cas actuel, une partition en six classes est utilisée.

IV.1.a Description des partitions.

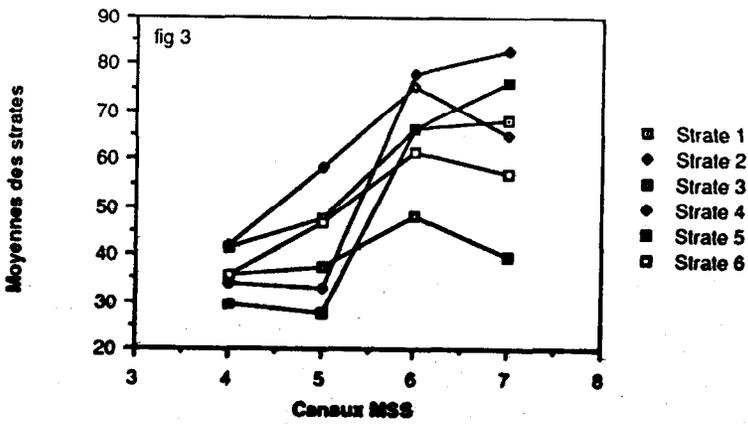
Bien qu'une analyse précise et détaillée des classes obtenues puisse être faites d'un point de vue strictement télédétection, nous n'en effectuerons les descriptions qu'en rapportant les comportements des classes obtenues sur les canaux originaux. Des exemples de comportements globaux de thèmes sont donnés dans la figure suivante, au moyen desquels il est possible de situer thématiquement les résultats des partitions. Ainsi peut-on constater que les classes générées n'ont pas du tout de comportements identiques, voir figures 2 à 7 toutes relatives au mois d'avril, et les images 14 à 19.



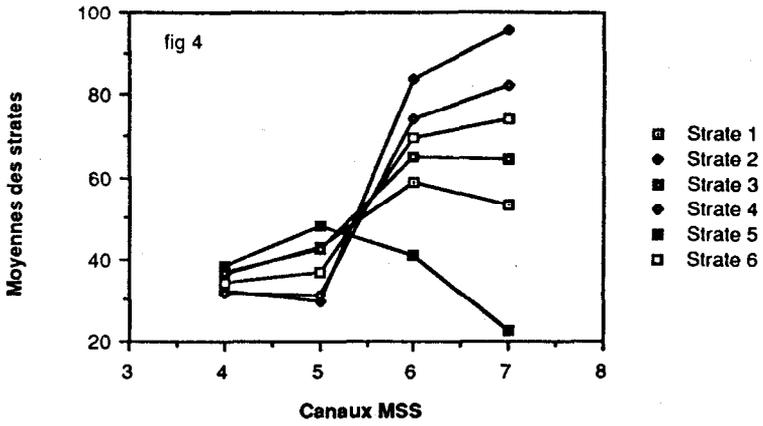
Partitions par les canaux originaux (avril)



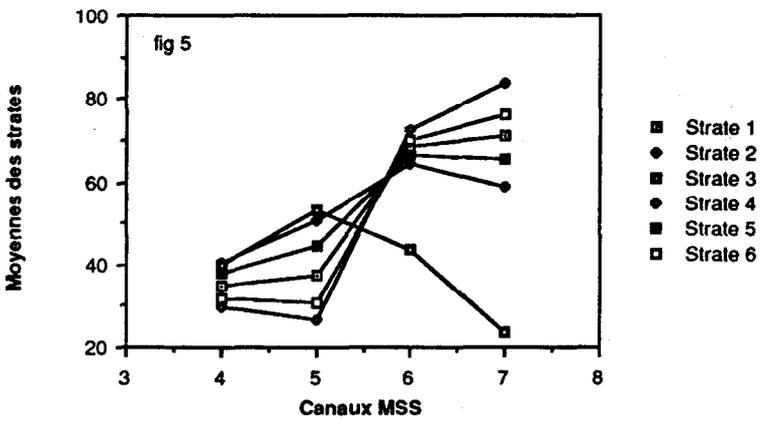
Partition par les axes factoriels (avril)



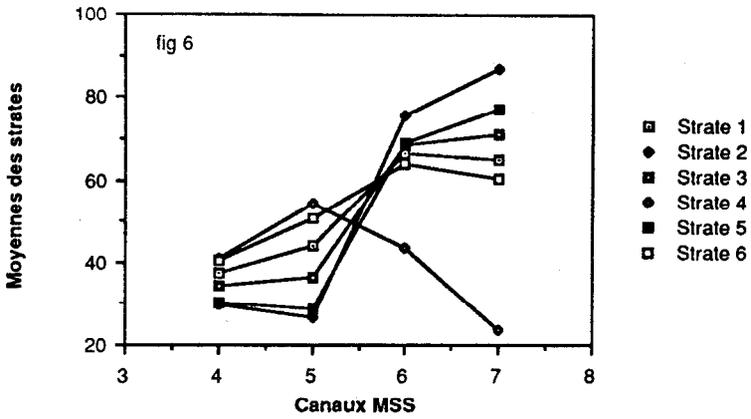
Partition par l'axe unique (avril)



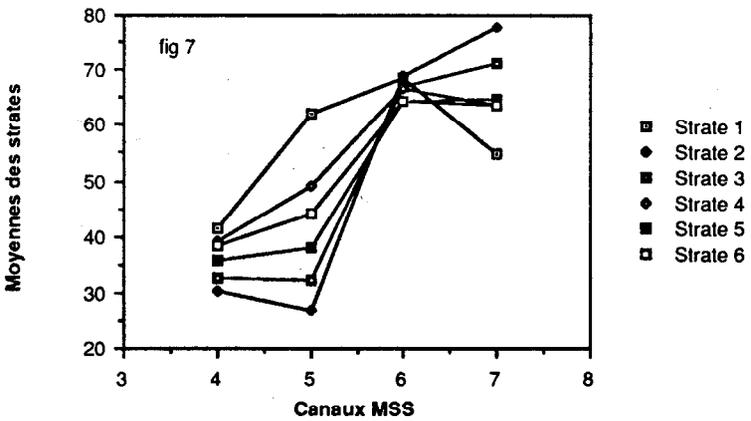
Partitions par indice de végétation verte



Partition par indice végétation jaune



Partition par indice des sols (avril)



V. VALIDATION.

Une stratification efficace conduit à minimiser la variance interne W , et par la même occasion maximiser $\frac{B}{T}$ qui est le rapport de la variance entre les strates à la variance totale: rapport de corrélation. Plus ce rapport tend vers 1 meilleure est la stratification. En effet cela veut alors dire que, W tendant à zéro, tous les individus de chaque strate prise une par une, tendent tous vers une même valeur moyenne. Inversement si il tend vers 0, toutes les strates ont la même valeur moyenne, et donc théoriquement il n'est pas besoin de stratification.

Dans l'utilisation des données satellitaires qu'en fait ce modèle, les strates obtenues représentent une partition suivant des états qualitatifs. En particulier si on ne s'intéresse qu'à une culture, celle-ci ne sera pas seule dans la ou les strates où elle se trouverait. En effet tout autre phénomène dans le même état qualitatif qu'elle, se retrouvera à ses côtés. Ce qui entraîne que dans les calculs des paramètres de W et B , la culture cible se retrouve noyée. Ainsi si on code en 0/1 l'absence/présence de la culture, la moyenne qu'on en obtiendra tendra vers des valeurs très petites, puisqu'en terme d'effectif, le sien est très inférieur à celle de la strate. Ce qui a une incidence directe sur la valeur du rapport de corrélation. En effet on se retrouve avec des strates qui apparemment tendent toutes vers une moyenne de zéro, puisque la majorité des individus y sont codée à zéro (seule le thème cible est à 1). Ce qui fait aussi tendre B vers de petites valeurs, inférieures à W . Une conclusion trop rapide serait que la stratification est inadéquate, de même que le modèle.

En fait le point fondamental, dont une validation doit être réalisée, est que le thème (*culture, etc...*) auquel on s'intéresse se retrouve localisé dans un minimum de strates, et que dans la relation décomposant sa variance, W soit nettement inférieur à B et que le rapport $\frac{B}{T}$ tende vers 1. Ceci car en fait, la population réellement étudiée est justement composée des individus pixels représentant le thème ciblé (population qui peut être étendue à un ensemble de phénomènes se trouvant dans un même état qualitatif). Le cas idéal étant qu'il soit dans une seule et unique strate. L'étape de validation se décompose alors en deux:

- Au niveau des ensembles de variables vérifier lequel est le plus efficace, et au niveau des applications ultérieures l'utiliser, puisqu'il aura été identifié et validé. Ce que nous ferons au moyen de la comparaison des différentes valeurs de W au niveau des strates, suivant les variables utilisées. Ce qui constituera aussi une validation globale au niveau de tous les thèmes présents, car on peut considérer -étant donné le modèle de représenta-

tion qu'est la télédétection- que chaque strate tend à ne comporter que des phénomènes à des états qualitatifs identiques. Pour le vérifier il suffit de considérer qu'on peut, dans le cas présent, admettre que le riz constitue la totalité des phénomènes pouvant se trouver dans le même état qualitatif que lui. Ainsi une strate où il se trouverait ne serait composée que de riz. Le rapport de corrélation tendrait alors vers 1, puisque les strates sont d'opposition maximale (0/1 soit présence/absence), et que les individus les composant sont soit à zéro, soit à un (inexistence de mélange).

- Au niveau du modèle lui-même, élaborer: identifier et estimer, un paramètre qui puisse effectivement le valider. C'est un paramètre qui devra traduire la "détermination" du thème par la stratification, et le montrer clairement si tel est le cas. Ce niveau de validation doit tenir compte du nombre de strates comportant le thème. Plus il y en a, moins la stratification est efficace. L'objectif est d'assurer un coefficient de détermination élevé et remplir les conditions de minimisation de W sur le thème ($T = W + B$).

Ces deux conditions impliquent l'existence d'une relation d'ordre entre partitions. Relation qui les ordonne suivant la dispersion (dispersion spatiale) du thème dans les classes. Et le coefficient rendant compte de la corrélation thème/stratification doit en tenir compte.

Ces deux niveaux de validation peuvent paraître redondants. Cependant nous les effectuerons toutes deux, au moins durant cette modélisation, car si le premier ne peut traduire une détermination élevée -ainsi que nous l'avons précédemment vu- vis à vis d'un thème, nous attendons du second qu'il le fasse.

Le premier niveau concerne plus les variables: lesquelles sont les plus efficaces?; et le second le modèle: les strates déterminent-elles vraiment le thème ciblé?.

Images de la région test
d'après les différentes partitions

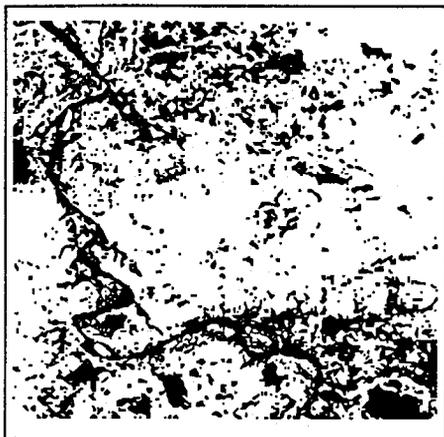


Image 14
par les canaux originaux

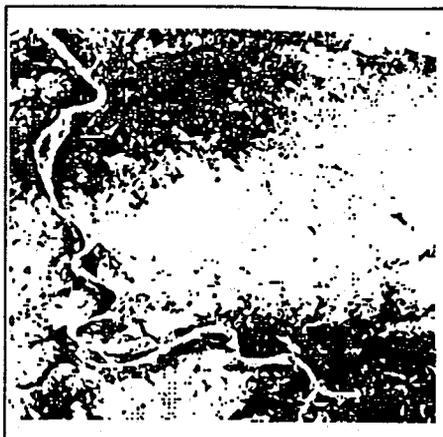


Image 15
par les axes factoriels



Image 16 - par "IVG"



Image 17 - par "IVJ"

Images de la région test
d'après les différentes partitions



Image 18 - par "SOL"

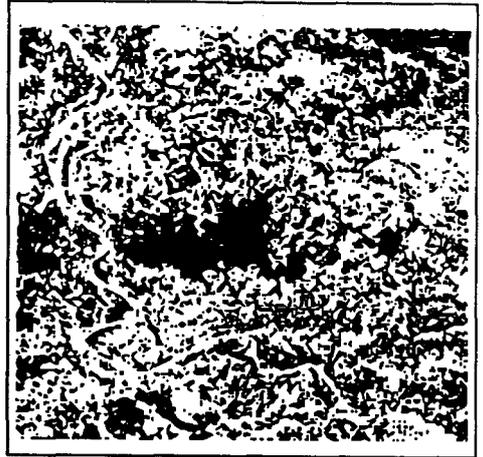


Image 19 - par l'axe "UNIQUE"

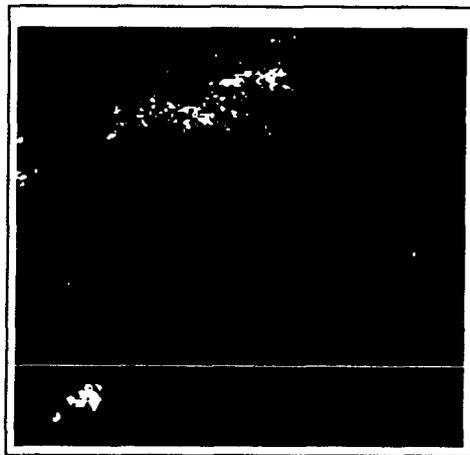


Image 13 - La "Vérité terrain riz"

V.1 PREMIER NIVEAU DE VALIDATION: LES VARIABLES.

Dans les figures 8, 9, 10 et le tableau 1 sont reportées les différentes valeurs obtenues pour W, B, et le rapport de corrélation $\frac{B}{T}$.

La comparaison porte sur trois groupes de variables:

- fin du mois d'avril 1981, fin de saison des pluies (rizières inondées). Variables utilisées: les canaux originaux, les axes factoriels, les indices de végétation verte, jaune et de sol, l'axe unique ci-dessous modélisé.

- fin du mois d'août, en saison sèche (riz à maturité, peu avant la récolte). Variables utilisées: canaux originaux, axes factoriels, axe unique modélisé.

- avril et août simultanément, sur les variables: canaux originaux, axes factoriels, et axes uniques modélisés.

TP	Within	Between	Neta2
O1	0,01556967	0,00139391	0,0822
F1	0,01579522	0,00116703	0,0688
U1	0,01543219	0,00151823	0,0896
G1	0,01594395	0,00099359	0,0587
S1	0,01684339	0,00009253	0,0055
Y1	0,01623219	0,00073421	0,0433
O2	0,01493044	0,00201515	0,1189
F2	0,01529999	0,00165379	0,0975
U2	0,01335295	0,00360181	0,2124
O3	0,01593457	0,00101447	0,0599
F3	0,01526979	0,00146480	0,0875
U3	0,01309894	0,00386572	0,2279

Tableau 1-Légende du tableau 1 (valable pour toute la suite):

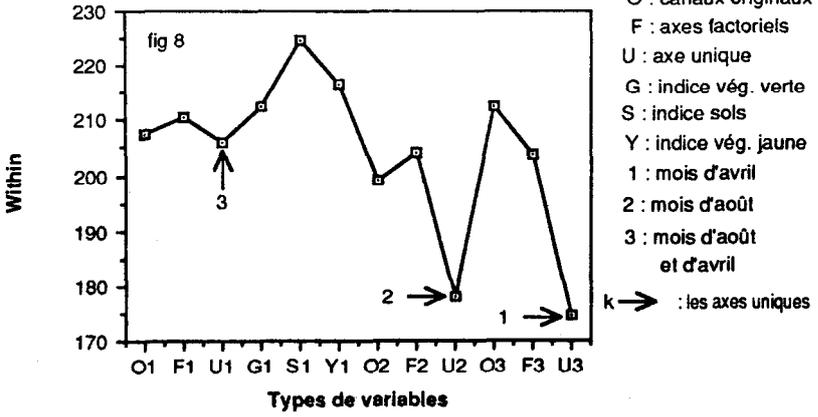
- O : canaux originaux - F : axes factoriels
- U : axe unique modélisé
- G : indice végétation verte
- S : indice des sols
- Y : indice végétation jaune

- 1 : mois d'avril - 2 : mois d'août

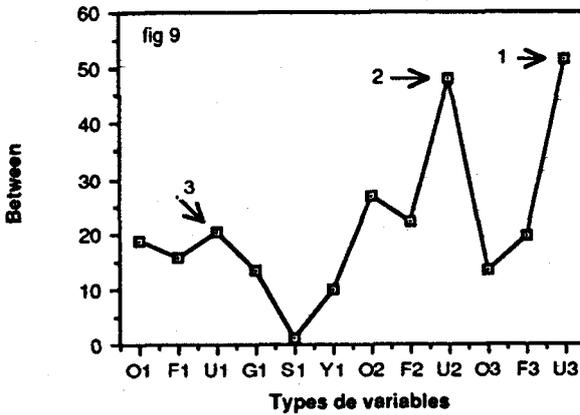
- 3 : mois d'avril et d'août

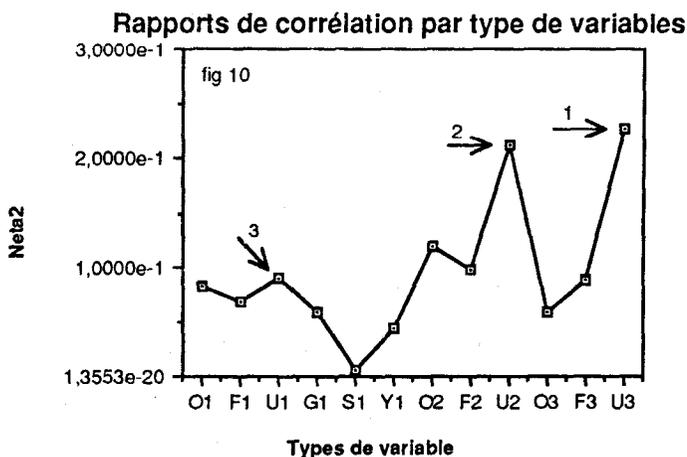
Par exemple: "U3":
"axes uniques modélisés au mois d'avril et d'août"
"O2": "les canaux originaux du mois d'août"

Variations Intra (W) des strates



Variations inter (B) des strates par types de variables





A travers ces trois groupes seront analysés l'efficacité relative des dates et des variables en combinaison.

D'emblée constatons que dans tous les cas les variances dans les strates sont très inférieures à celles entre les strates. Il est donc impossible à ce niveau de conclure sur le degré de signification de la détermination du thème par les stratifications. Le coefficient associé est en effet très bas, en fait il tend systématiquement vers zéro (voir la figure 10).

Ne pouvant avoir des certitudes sur l'hypothèse de dépendances ou d'indépendance des strates et du thème, on se restreint ici à l'analyse des variables.

a) Dans tous les cas de dates, l'axe unique modélisé s'avère être le plus efficace. En particulier avec ce type de variable, l'utilisation de deux dates semble apporter un certain gain. Bien qu'il faille remarquer que les résultats du mois d'août (saison sèche) s'en rapprochent: 48.02 de part de la variation totale de la population, contre 51.54 pour les deux dates.

b) Dans le cas d'utilisation d'une seule date, les canaux originaux s'avèrent toujours supérieurs aux axes factoriels. C'est uniquement dans le cas de l'utilisation des deux dates en même temps que les axes factoriels sont plus efficaces que les canaux originaux.

c) Les différents indices, testés uniquement sur le mois d'avril, sont peu efficaces. Pour celui des sols cela est explicable assez facilement: en effet ils ne sont guère visible à cette date, ou assez peu.

d) Mis à part le cas de la variable unique modélisée, l'utilisation des deux dates n'apporte en rien le gain, qu'on aurait été en droit d'espérer. En ef-

fet l'axe unique modélisé en avril, les canaux originaux, les axes factoriels et l'axe unique modélisé en août, le surclassent nettement.

Ainsi sans parler de ses avantages supplémentaires: facilité d'interprétation des classes, volume de données plus faible, etc..., l'axe unique modélisé s'avère toujours supérieur à tout autre ensemble de variables. Du moins est-ce le cas avec celles qui sont comparées ici, et qui regroupent la majorité de celles usuellement utilisées en télédétection jusqu'à présent.

(Rappelons qu'il s'agit ici de stratification).

V.2 SECOND NIVEAU DE VALIDATION: LE MODELE.

Dans ce second niveau, il nous faudra montrer si de façon significative ou non, le thème visé est déterminé par la mise en oeuvre du modèle. Il faut donc tester l'hypothèse H_0 de l'indépendance de la stratification et de la localisation/dispersion spatiale du thème. Pour cela, il a été vu que les partitions doivent être classées.

Le modèle que nous nous proposons de mettre en oeuvre ici, est tel qu'une partition en un nombre k de classes, est d'autant meilleure que -le thème étant dans un état qualitatif donné-, celui-ci se trouve dans un minimum de strates. Ce qui veut dire que la stratification sert effectivement à quelque chose. Car si en effet le thème se retrouve éparpillé sur un grand nombre de strates, la variance B s'en trouve réduite, de telle façon qu'un modèle stratifié ne se justifie pas. Aussi les classes d'une partition seront-elles classées de deux manière: l'une par rapport à la vérité terrain de localisation du thème, et l'autre par rapport à la classification proposée par le modèle. Ces deux classements feront ensuite l'objet d'une comparaison qui devra conclure sur la validité ou non du modèle.

Supposons que parmi les k classes d'une partition, 1 contiennent le thème. Alors ces 1 sont classées de 1 à 1 sur la partie modèle. Ceci car plus il y a de strates contenant le thème, moins celui-ci est déterminé par le modèle qui est d'autant moins efficace. Dans le classement dit de "vérité terrain", toutes ces strates sont classées à 1: la vérité terrain est par définition la référence.

Ainsi:

- Si seule une strate contient le thème -le meilleur cas- l'accord sera total entre les deux classements, puisque cette unique strate est classée à 1 dans les deux cas.

- Si deux strates contiennent le thème, l'accord diminue, car si sur l'une les deux classements sont respectivement à 1, sur l'autre elle est de 2 sur la partie modèle et de 1 sur la partie "vérité terrain".

Ainsi de suite jusqu'au cas où 1 strates contiennent le thème.

Les strates qui ne contiennent pas le thème sont dans les deux classements mis identiquement à (1+1), pour un accord total sur elles.

Ainsi on reconnaît un modèle où deux relations d'ordres partielles classent des individus, qui dans notre cas sont des classes-strates. La comparaison et le test de l'indépendance de telles relations, rencontrent les spécificités de la corrélation de rang de Spearman ou du "taux" de Kendall, dont l'efficacité par rapport au coefficient de Pearson, dans le cas où celui-ci s'applique, est de 91%.

V.2.a Estimation.

Suivant les variables utilisées dans le cadre du modèle global, nous allons relever le nombre de strates contenant le thème, réaliser les classements, estimer le r_s de Spearman, et tester l'hypothèse H_0 d'indépendance des deux classements.

Les partitions sont en six classes. Le nombre de strates comprenant le thème va donc de 1 -meilleur cas- à 6, en fait ici de 1 à 5. Les résultats (tableau 2) sont visualisés sur la figure 11.

V.2.b Etude des résultats.

Avec l'axe unique modélisé, aux mois d'avril, d'août, d'avril et d'août simultanément, et avec les axes factoriels du mois d'août, la probabilité de rejeter H_0 alors qu'elle est bonne est de 0.01. On peut donc dire avec un niveau de confiance de 99% que la stratification détermine efficacement le thème. Le modèle est le plus efficace avec l'axe unique utilisé en août, et en avril et août simultanément, avec r_s à 1. Viennent ensuite l'axe unique en avril et les axes factoriels en août, avec r_s à 0.9714286.

Avec un niveau de confiance de 95% les canaux originaux aux mois d'août, d'avril et d'août simultanément, déterminent aussi efficacement le thème. La valeur de r_s est alors de 0.8571429.

Les autres variables s'avèrent inefficaces au niveau de la détermination du thème. Ainsi:

- les axes factoriels en avril
- les canaux originaux en avril

- les indices de végétation verte et jaune en avril
 - l'axe des sols en avril
 - les axes factoriels en avril et août simultanément
- sont dotés d'un r_s de 0.6.

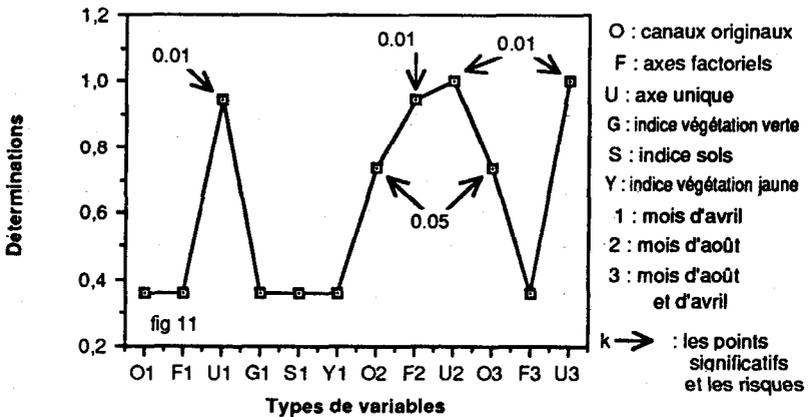
TP	CO	RS
O1	--%	0,6000
F1	--%	0,6000
U1	99%	0,9714
G1	--%	0,6000
S1	--%	0,1428
Y1	--%	0,6000
O2	95%	0,8571
F2	99%	0,9714
U2	99%	1,0000
O3	95%	0,8571
F3	--%	0,1428
U3	99%	1,0000

Tableau 2 - TP : types de variable

- CO : niveaux de confiance

- RS : coefficients de Spearman

Détermination du thème par les stratifications



VI APPLICATIONS.

Mise à part cette application ayant servi de support à la démonstration du modèle, celui-ci, en particulier la partie relative à la construction de classes par décomposition de la variance totale, a été utilisée pour une étude de l'éco-système en zone semi-aride (application sur l'Egypte) d'une part, et d'autre part pour l'étude et l'analyse de l'évolution d'un paysage sahélien (application sur la mare d'Oursi Burkina-Faso). Dans ces deux cas la stratégie d'utilisation et d'analyse de l'espace suivant un nombre croissant de classes, développé et mis au point par l'auteur dans sa thèse (voir bibliographie), pour en faire ressortir les hiérarchisations successives, basé sur ce modèle d'élaboration de partitions, a permis l'obtention de résultats dont l'exploitation par les thématiciens concernés s'est révélé correspondre aux besoins et attentes.

VII CONCLUSION.

La conclusion qui s'impose après l'étape de validation, est qu'effectivement le modèle global de stratification auparavant identifié, est efficace d'une part; et d'autre part qu'il l'est systématiquement le plus avec l'axe unique lui aussi identifié et modélisé. Nous proposons donc ce modèle: partition par décomposition de la variance totale par minimisation de la variance intra W et utilisation de l'axe unique modélisé, qui est celui d'une fonction discriminante sur deux classes, pour la construction de strates ou de grandes classes de phénomènes sur une région quelconque. En effet il est basé directement sur la représentation (spectrale) que fait la télédétection des réalités au sol, et des différences maximales entre ces réalités prises comme un tout.

VIII BIBLIOGRAPHIE

VIII.1 TELEDETECTION.

ANDRIANASOLO H. Paris - 1987. Analyse statistique des données de télédétection Statistiques agricoles Application sur Madagascar

Manual of remote sensing American Society of Photogrammetry 1983.

BARRETT E. C., CURTIS F. Introduction to environmental remote sensing Chapman and Hall, London - 1976.

BAUER M., HIXSON M., BIEHL E., DAUGHTY C., ROBINSON B., STONER E.

Agricultural scene understanding Johnson Space Center - 1978.

VIII.2 CLASSIFICATION.

COOLEY W., PAUL R., COHNES Multivariate data analysis John Wiley and Sons, New-York - 1971.

DUDA HART Pattern classification and scene analysis John Wiley and Sons, New-York - 1973.

ANDERBERG Cluster analysis for applications Academic Press - 1973.

HARTIGAN Clustering algorithm

John Wiley and Sons, New-York - 1975.

GENDRE FRANCIS Analyse statistique multivariée Librairie Droz - 1976.

VIII.3 STATISTIQUE.

HOUSEMAN E. Area frame sampling in agriculture Department of Agriculture Washington DC. - 1979.

WARREN GILCHRIST Statistical modelling John Wiley and Sons - 1984.

COCHRAN W. Sampling techniques John Wiley and Sons, New-York - 1977.

DESABIE J. Théorie et pratique des sondages Dunod - 1966.

SIEGEL Non parametric statistics Mac Graw Hill - 1956.

MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE EN TÉLÉDÉTECTION. SUPERPOSITION ET RECTIFICATION DE DONNÉES SATELLITAIRES ET SPATIALISÉES

Dominique DAGORNE

I INTRODUCTION

Nous présentons dans cette communication, divers travaux méthodologiques réalisés au sein d'une équipe thématique pluridisciplinaire (océanographie, climatologie,...) en application de la télédétection à partir des satellites météorologiques.

Ils concernent principalement divers aspects "géométriques" sur des données satellitaires, avec les problèmes de restitution "cartographique" et de superposition d'images et d'informations spatialisées.

Pour la télédétection en général, et plus spécialement celle à partir des satellites météorologiques défilants ou géostationnaires, c'est un préalable à l'utilisation de données multisources - multitemporelles.

Les méthodes classiques de mise en correspondance d'images par points d'amers étant inapplicables, divers modèles déterministes sont nécessaires pour mener à bien ces restitutions.

Les méthodes développées sont implantées au sein d'un logiciel général de traitement de données satellitaires, logiciel intégrant cet aspect sou-

vent peu pris en compte pour ce type de donnée, dont le traitement ne se résume pas à la simple technique du "traitement d'images".

II BUT

Ces travaux ont pour but, le développement d'outils applicables dans divers programmes de recherche ou d'exploitation.

Ils trouvent un emploi de "routine" pour diverses applications au sein de multiples réalisations auprès des chercheurs utilisateurs des données satellitaires météorologiques traitées à Lannion.

Les points d'intérêt énoncés ci-après sont la même expression de la formulation générale mis au point. Il n'est fait aucune référence particulière au type de données ou de restitution, ce qui garantit la réutilisation des outils développés pour d'autres types de sources, non traitées dans nos applications (imagerie de télédétection terrestre, radar, image de synthèse à 2 dimensions,...).

II.1 SUPERPOSITION D'INFORMATIONS "SPATIALISÉES"

Ces informations sont extérieures au domaine "télédétection". Les données utilisées sont définies en coordonnées "géographiques", latitude et longitude, et peuvent être d'origine et de types différents :

- type "base de données cartographique", défini en points (stations synoptiques,...) ou en segments par des points reliés entre eux (trait de côte, réseau hydrographique,...) ;

- type "champ" de valeurs discrètes ou ordonnées, valeurs expérimentales assurées ou résultats d'analyse et de modèle (krigeage, analyse objective,...) avec les représentations associées à ce type de données (isolignes, vecteurs de "flux",...), par exemple Modèle Numérique de Terrain, relevé de précipitation...

II.2 RESTITUTION CARTOGRAPHIQUE

Celle-ci sera réalisée pour une donnée image ou "spatialisée", suivant un type de projection et à une échelle déterminée. Dans cette restitution, les problèmes "matériels", liés au mode de représentation, sont très importants.

II.3 SUPERPOSITION DE DONNÉES "MULTISOURCES - MULTITEMPORELLES"

Elle est réalisée principalement pour des images satellitaires, obtenues à partir de couple vecteur (satellite) et capteur (radiomètre), de résolutions spatiales et temporelles pouvant être très différentes.

La maîtrise de cette superposition est un préalable à l'utilisation des données satellitaires météorologiques défilants (AVHRR/NOAA), ou contrairement au géostationnaire, aucune image d'une même zone n'est superposable directement avec une autre donnée de même source.

L'utilisation des méthodes dites par "point d'amers" est inutilisable sur nos images, si l'on considère l'absence de tels points (domaine océanique, nuages,...), les déformations très importantes (domaine vaste, rotation de la terre,...) ainsi qu'une mise en oeuvre qui serait fastidieuse sur des données de dimension et de répétitivité élevée.

L'objectif final est la restitution "cartographique", d'une image satellitaire quelconque avec des informations extérieures. La superposition entre images "multisources et multitemporelles" est alors effectuée dans un référentiel commun.

III MOYENS

Nous évoquons ici, certains problèmes techniques, liés aux représentations de données spatialisés à 2 dimensions image ou non. Il est d'abord indispensable de distinguer la "donnée" proprement dite de sa représentation.

III.1 DONNÉE

Celle-ci peut-être sous forme d'une image ou d'un "champ", ordonné ou non, de valeurs.

Pour des "champs" ordonnés sous forme de grille et pour l'image, la formulation est identique sous forme de matrice. La distinction tient aux valeurs représentées et à un mode d'accès "informatique" différent lié à la taille de l'information.

Les valeurs "pixel image", codées sur 1 ou 2 octets, sont souvent des données "physiques", la valeur radiométrique ayant une signification au-delà de sa donnée brute en compte numérique "qu'il est d'ailleurs indispensable de prétraiter pour obtenir une information quantitative ;

III.2 REPRÉSENTATION

2 types d'approches avec des dépendances matériels très marqués.

- approche "raster" (ou image) avec l'information restitué sous forme de pixel (classiquement codée sur 1 octet soit 256 valeurs).

C'est la représentation immédiate de la donnée image (après une adaptation possible de dynamique), par une teinte de couleur (ou de noir et blanc) par compte numérique.

C'est également un moyen de représentation synthétique de données à 2 dimensions utilisés pour les champs ordonnés de valeurs, après interpolation aux points de grille.

- approche "vecteur" (ou graphique), où l'on cherche à représenter une donnée par divers moyens graphiques tel isolignes, "vecteurs flux", représentation 3 dimensions,...

Il est toujours possible de représenter un graphique, isous forme raster, en prenant une profondeur d'image de 1 ou plusieurs bits (monochrome ou non).

Ces 2 représentations, apparemment proches mais opposées au niveau matériel, peuvent avoir une influence non négligeable lors de la mise en oeuvre pratique d'un logiciel.

Les problèmes d'échelle dans les données image, liés à la taille du pixel élémentaire du périphérique de restitution, en sont une illustration. De même les problèmes de "portabilité" des applications, ne sont pas à sous estimer, certaines représentations étant dépendantes de l'environnement (périphérique,...).

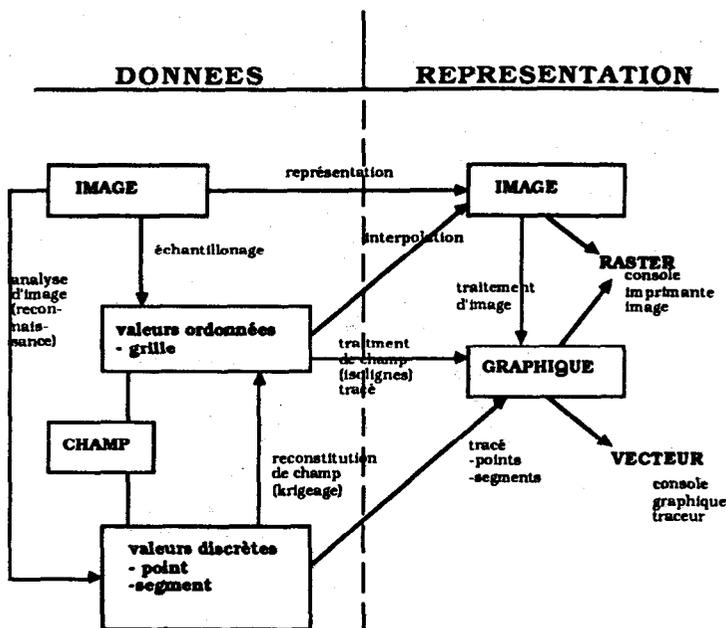


Figure 1 données et représentation en télédétection

IV METHODOLOGIE

Celle-ci repose sur les relations entre 3 systèmes de coordonnées, pour les utilisateurs de télédétection.

- IMAGE en ligne et pixel, pour la donnée satellitaire brute et la représentation "raster" de toute autre information.

L'origine est pris classiquement en haut et à gauche de l'image, avec la première ligne compté à 1 (0 zéro sur les consoles images "), la dimension de l'image étant son nombre de ligne et de pixels par lignes (avec sa profondeur classiquement 1 octet - 1 ou 2 octets pour les données -, et son nombre de canaux dans le cas d'image multispectrale).

- GEOGRAPHIQUE pour des données terrestres sous formes de points ou de segments (points jointifs).

Elles sont exprimées en degrés, et repérées classiquement en latitude et longitude sur la sphère terrestre.

- CARTOGRAPHIQUE en abscisse et ordonnée (x et y en millimètre), l'origine et l'orientation de ces axes étant dépendant du type de référentiel choisit pour la représentation.

Les inter-relations entre ces 3 systèmes d'axes sont illustrées sur la figure suivante.

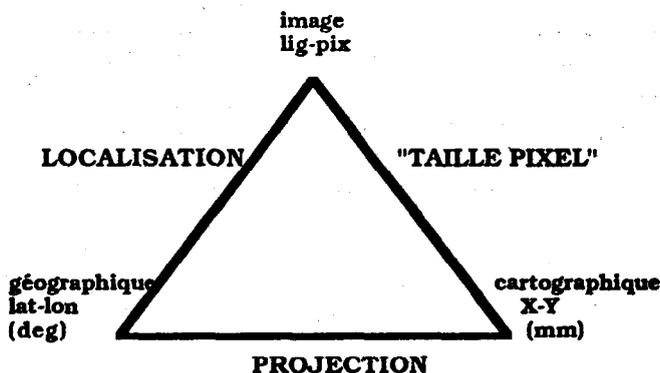


Figure 2 Référentiel de télédétection

Chacune des relations, donne naissance à un "modèle" plus ou moins complexe dont nous détaillons ci-après les fonctionnalités.

IV.1 TAILLE DU PIXEL

Il s'agit de mettre en relation 2 systèmes de coordonnées différents, mais surtout de tenir compte du type de chacune des "mesures" de ces deux systèmes.

LIG - PIX <----> X - Y

Dans la représentation cartographique ; cette mesure est continue (approche graphique), alors que dans le référentiel image celle-ci est discrète (approche raster).

La taille élémentaire du "pixel restituteur image" est l'élément de passage, avec les interpolations (informatiques) entre type réel (graphique) et entier (image).

Celui-ci dépend des périphériques utilisés, donc une dépendance non négligeable avec l'environnement.

IV.2 PROJECTIONS

Il s'agit des relations directes et inverses entre coordonnées géographique et coordonnées cartographiques.

LAT - LON <-----> X - Y

Celles-ci dépendent en plus des hypothèses sur la géométrie de la sphère terrestre :

- du type de projection : variable en fonction de l'utilisation finale des données. Celles-ci sont classiquement répartis en projections azimuthale, conique et cylindrique et moins classiquement suivant certaines utilisations "spécialisées" (1),

- de l'échelle : depuis des représentations locale de quelques mètres jusqu'à des cartographies mondiales.

IV.3 LOCALISATION IMAGE

C'est le passage direct et inverse des coordonnées images vers les coordonnées géographiques.

LIG - PIX <----> LAT - LON

Cette localisation en tout point des pixels de l'image peut être calculée suivant la nature de l'image considérée.

IV.3-1 Image satellitaire "brute"

Modèle de navigation et de localisation.

Ceux-ci font appel aux hypothèses (simplificatrices) de la mécanique céleste pour l'orbitographie du satellite ainsi qu'aux paramètres de visée image depuis ce vecteur sur la surface terrestre en rotation.

Si pour les satellites géostationnaires, en principe immobile au sous point, la localisation d'une image de référence est quasi immédiate, les calculs induit pour les orbites "défilants" peuvent atteindre une grande complexité, en fonction des hypothèses retenues pour la recherche d'une meilleure précision. Cette précision, indispensable pour une localisation précise, est elle même très sensible aux paramètres "instantanée" de visée (attitude de plate forme, paramètres orbitaux de l'orbite,...).

IV. 3-2 Image "rectifiée".

C'est l'image obtenue dans un repère cartographique c'est-à-dire suivant une projection et une échelle donnée.

Le calcul est un chaînage de modèle de projection et de passage à une image. Il est alors possible d'élaborer une localisation pour toute image "cartographique de référence" dans une projection donnée. La prise en compte du "facteur d'échelle" est soit directement intégré dans ce calcul, ou ultérieurement lors de la "restitution" proprement dite en agissant sur le paramètre incontournable de la taille du pixel restituteur du périphérique (zoom image en facteur réel).

V MODELES PRELIMINAIRES

Nous présentons succinctement, les fonctionnalités de 3 modules indépendants, avant leur intégration dans la chaîne générale de "traitement géométrique".

V.1 PROJECTIONS CARTOGRAPHIQUES

Nous utilisons les équations en mode direct et inverse, décrite dans la référence citée.

Les modes de projections retenus, recouvrent les types principaux utilisés dans notre activité, par divers thématiciens, avec les avantages et inconvénients de chacune d'elles (déformations exagérées, représentation conforme ou équivalente, zone d'intérêt,...).

- projection type stéréo-polaire pour des applications "météorologiques" d'un hémisphère ;
- projection type Lambert, utilisé en "géographie", principalement continentale pour des aires "réduites" ;
- projection type Mercator, chère aux océanographe ;
- projection "cylindrique équidistante" ; cette projection cylindrique courante (iso lat - iso lon), présente l'avantage immédiat de repérer des données de type "champ" ordonnée sous forme de grille (résultat de modèles divers, modèle numérique de terrain, climatologie statistique,...)

Les calculs nécessitent des données de référence, c'est-à-dire la définition de l'origine du référentiel considérée (1 longitude, 1 ou 2 latitudes)

La seule hypothèse est la nature de la "sphère" terrestre, considérée sphérique ou elliptique. Ce dernier cas implique des calculs itératifs lors du passage inverse.

Toute nouvelle projection est facilement intégrable dans ce module, à partir de la programmation des équations.

Ce module peut également servir de base, à une chaîne cartographique "vecteur", par application simple des formules de transformations, en relation avec des bases de données cartographique définies par des segments de points.

V.2 NAVIGATION D'UNE IMAGE SATELLITAIRE BRUTE

Ce module rassemble en plus de la localisation proprement dit, tous les calculs géométriques d'angles liés aux visées satellitaires et du soleil (astronomie).

Un module de navigation doit exister par couple satellite - radiomètre c'est-à-dire par type d'image

Dans la plupart des cas les données utiles de géométrie satellitaires (angles, localisation,...) sont fournis par le distributeur de la source, après prétraitement (cas du MASTER distribué par SATMOS, du GAC et du LAC distribué par NOAA/NESDIS, du CZCS/NIMBUS,...).

Cependant il est bon de pouvoir maîtriser parfaitement cette information essentielle avec quelques autres (veillissement d'orbites, prévision des passages et des acquisitions, angles de poursuite,...), dans le cas d'une station d'acquisition (projet ORSTOM) pour intégrer ces données dès le stade du prétraitement (1 localisation par acquisition NOAA).

A l'heure actuelle, nous disposons des modules élémentaires suivants : (en plus des modules spécialisés de décodage satellitaire)

- localisation des images des satellites NOAA obtenus par le radiomètre à balayage AVHRR, ainsi que de divers calculs s'y rapportant (cercle d'acquisition, poursuite antenne...)

Ce module est d'origine (2) et distribuée par le groupement SATMOS.

La précision obtenue, dépend grandement de la validité des paramètres orbitaux (dépendance suivant origine et modèle de veillissement).

C'est la méthode utilisée pour le calcul de localisation des images NOAA distribuée par le groupement SATMOS, pour la zone d'acquisition de LANNION.

- localisation d'images pour un satellite géostationnaire quelconque (de référence à une position donnée), et pour un radiomètre à balayage (angles instantanés de prise de vue, vitesse de balayage,...)

Ce module trouve une utilité dans les calculs de nos images Météosat, image parfaitement superposable à la réception après traitement au centre de DARMSTADD.

- localisation d'images CZCS du satellite NIMBUS7 (3), l'originalité réside en une visée oblique en avant de la trace du satellite.

V.3 LOCALISATION IMAGE CARTOGRAPHIQUE

Celle-ci est définie par le type de projection. En fonction du résultat recherché, il est possible de prendre en compte directement l'échelle de la projection, ou de travailler sur les dimensions d'image à une échelle locale fictive.

Il s'agit simplement de relations entre la taille de l'image calculée par le modèle de projection (X-Y) et sa taille raster (lig - pix), par le biais des caractéristiques du périphérique de restitution image.

VI MODELE DE BASE

VI.1 DONNÉE DE LOCALISATION

Afin de généraliser, la notion de localisation à une image quelconque (brute ou rectifiée, satellitaire ou non), nous introduisons la notion de "localisation" associée à une image.

Celle-ci est calculée à partir des modèles précédents (projection, navigation image brute) en certains points d'une grille de ligne et de pixels de l'image.

Aux points de calculs, on élabore un champ à 2 composantes (latitude et longitude). Ces points sont obtenus par la donnée des vecteurs de localisation d'une image en ligne et pixel dans l'intervalle des dimensions de celle-ci. Ceci permet la prise en compte de maillage de localisation non régulièrement réparti avec des densités de points plus importantes aux endroits intéressants (centre d'images pour les satellites défilants - cas de la donnée de localisation lues dans la source de CZCS/NIMBUS).

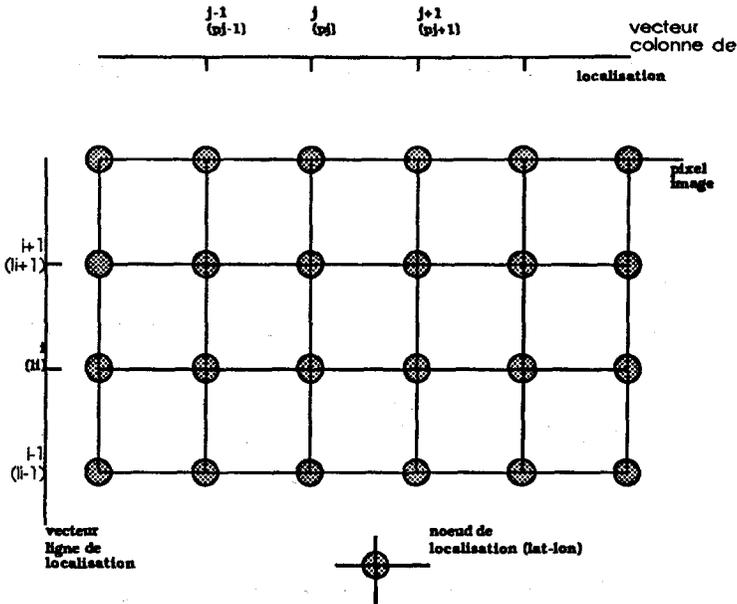


Figure 3 Image et localisation

Cette donnée permet de s'affranchir des particularités de chaque calcul de transformations lig - pix <----> lat - lon, dans le cadre d'une approche générale.

C'est une partie intégrante de la donnée satellitaire, pour les manipulations géométriques envisagées.

Les pas de localisation étant paramétrables, il est possible d'être aussi précis que désirée en calculant (à la limite), une localisation pour chaque pixel de l'image considérée.

Avec l'expérience et compte tenu de l'appréciation des déformations d'images, il est possible de trouver un compromis entre la taille de cette localisation et la précision que l'on attends lors des calculs qui suivent.

Par exemple pour les images AVHRR/NOAA distribuée par MASTER, le pas en ligne et pixel est de 32 soit 64 données pour une ligne de localisation (2048 pixels par ligne image), et près de 150 lignes de localisation pour une image complète d'acquisition de près de 5000 lignes images).

VI.2 INTERPOLATIONS DANS LA MATRICE DE LOCALISATION

VI.2.1 Direct

Passage lig - pix ---> lat - lon

Celle-ci est réalisée en deux temps :

- interpolation monodimensionnelle dans les vecteurs de localisation en ligne et pixel ;

- interpolation bidimensionnelle en valeurs (latitude et longitude), à partir des données aux coins du quadrilatère de localisation ainsi défini.

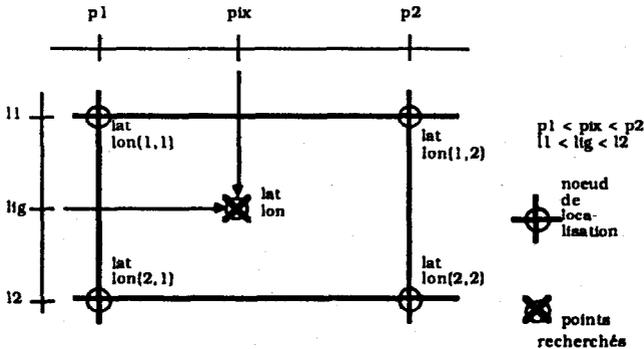


Figure 4 lig-pix ---> lat-lon

VI.2.2 Inverse

passage de lat - lon ---> lig - pix

Le schéma d'interpolation est plus complexe. On recherche tout d'abord le quadrilatère de localisation inscrit dans le point courant. Le résultat est positif si les produits vectoriels des paires de vecteurs sous tendants les côtés du quadrilatère sont de même signe.

Dans ce cas, on réalise une interpolation "intérieure" sur les hauteurs des triangles élémentaires ainsi définis.

Sinon, on recherche itérativement un nouveau quadrilatère inscriptible, par une méthode d'extrapolation linéaire "extérieure" (calcul des gra-

dients : accroissement des coordonnées cartographique et image, puis résolution d'un système linéaire).

Les sorties "anormales" sont prise en compte (impossibilité, point non trouvé,...).

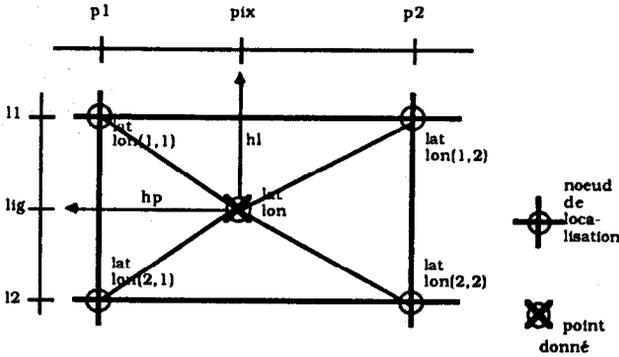


Figure 5 lat - lon ---> lig - pix

VI.3 UTILISATION

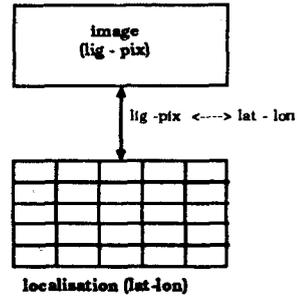
L'utilisation des deux modules décrit précédemment est capitale puisqu'elle permet :

- de positionner un point quelconque en latitude et longitude sur une image localisée :

Positionnement de données discrètes, trace de segment "cartographique" (base de donnée), trace de représentation cartographique diverses définit en latitude et longitude (isoligne),

- de donner les coordonnées géographiques d'un point quelconque d'une image localisée

Figure 6 Traitement géométrique d'une image



La mise en oeuvre de ces méthodes suppose évidemment d'avoir pris en compte, plusieurs cas "à problème", c'est-à-dire:

- point n'appartenant pas à l'image,
- point image mais n'appartenant pas à la sphère terrestre (visée espace des géostationnaires),
- point de l'image non référencable (image avec information satellitaire plus petite que le domaine localisable...).

Il est de plus indispensable de prévoir des outils de manipulation de la donnée de localisation :

- cas de l'échantillonnage d'une sous image,
- ajustement de la localisation calculée, après un décalage en lignes et pixel. C'est le cas général des images AVHRR/NOAA ou cet ajustement sur 1 point d'amers reste malgré tout nécessaire pour compenser un décalage ligne liée à l'imprécision des paramètres orbitaux de calcul (temps de référence de l'orbite, 6 lignes d'images étant générées par seconde).

VII - RECTIFICATION REDRESSEMENT D'IMAGES

Il s'agit des méthodes de reconstitution d'une image destination "en fonction des données d'une image" source.

Elles reposent sur l'utilisation de deux procédures "classiques" en technique de télédétection et de traitement

d'images, avec 2 modèles :

- modèle de déformation d'une image,

- modèle de rééchantillonnage image.

VII.1 DÉFORMATION

Il s'agit de mettre en relation chaque point (lig - pix) de l'image "destination" avec des coordonnées de l'image "source".

soit

$$\text{image DEST} = f(\text{image SOURCE})$$

où f est la fonction de déformation

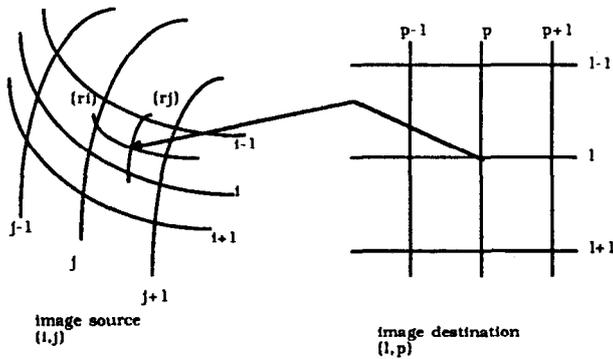


Figure 7 fonction de déformation

Le cas d'un modèle linéaire, obtenu après la prise de points d'amers a été détaillé dans (4).

Pour la méthode à partir des localisations, le schéma d'extraction est le suivant :

$$(\text{lig/pix}) \text{ Dest} \rightarrow (\text{lat/lon}) \rightarrow (\text{lig/pix}) \text{ Source}$$

Il est réalisé par appel aux modèles élémentaires décrits précédemment.

Le résultat est une donnée de "déformation" (matrice), par couple image source et destination, mettant en relation au point de localisation de l'image destination, les coordonnées de l'image source correspondante.

Une interpolation bilinéaire, dans le quadrilatère de déformation, permet de restituer pour chaque points (lig/pix) de l'image de destination les coordonnées réelles (lig/pix) de l'image source.

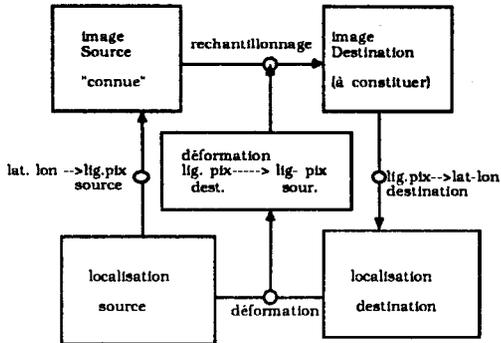


Figure 8 Rectification

VII.2 RÉÉCHANTILLONNAGE IMAGE

C'est la reconstitution de la valeur du pixel destination en fonction du pixel théorique précédemment calculé (exprimées en réel) de l'image source.

Plusieurs schéma d'interpolation, existe :

- le plus simple : approximation au plus proche voisin en ne retenant que les valeurs entières du pixel SOURCE le plus proche.
- interpolation bilinéaire dans le quadrilatère considéré (ligne et ligne + 1, pixel et pixel + 1)
- interpolation par des méthodes plus compliquées en considérant également les pixels proches (bicubique, spline).

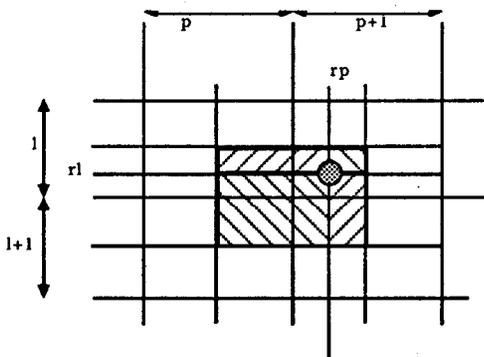


Figure 9 Interpolation pixel destination

Le choix du schéma d'interpolation dépend essentiellement des tailles relatives des pixels dans les images source et destination.

- cas sur-échantillonnée, la méthode au plus proche voisin est satisfaisante (technique proche de l'échantillonnage d'une image).

- cas sous-échantillonné : la méthode simple donne un résultat qui manque de finesse, les pixels de l'image source étant simplement déformés. Les méthodes plus élaborées, recrée de l'information (interpolation), et donne une image d'aspect plus lissé, avec certains problèmes de seuil pour certaines images (transitions terre/mer par exemple).

On a donc tout intérêt, à rectifier des images, proche de la résolution "nominale" brute pour conserver le maximum d'information.

Des études plus théoriques restent à réaliser pour pouvoir quantifier exactement les erreurs ainsi commises et choisir à bon escient la méthode ad-hoc.

La réalisation du rééchantillonnage image, est facilitée par l'accès à la "mémoire virtuelle" du calculeur, qui conserve la totalité de l'information source en mémoire centrale, sans s'obliger à une réalisation segmentée de la rectification "par morceaux" avec les accès disque et les problèmes de recollage aux bords des segments.

VIII REALISATION PRATIQUE

La mise en oeuvre des méthodes précédentes, a suivi la démarche qui prévaut à l'élaboration de tout logiciel (de modélisation ou non)

- demande "thématique" et tentative de rédaction d'un cahier des charges avec les utilisateurs concernées.

Cet aspect n'est pas le moindre, puisqu'il a fallu informer les utilisateurs potentiels de la puissance (et des limites) de l'outil informatique. De plus l'absence de moyens, puis de temps de développement, à considérablement freinée l'avancement de ce projet (les premières réflexions sur ces problèmes de rectification date de maintenant 3 années..) (5).

La décision de réalisation a été motivée par l'absence effective d'un tel outil "généraliste", surtout au niveau de sa disponibilité (programmes) et de son utilisation auprès de non spécialistes.

- réflexion sur les outils, les méthodes et les techniques à mettre en place pour réaliser le travail, en essayant de généraliser un maximum l'approche retenue (données, représentations, outils mathématiques...) indépendamment des spécificités applicatives à court terme.

La mise au point d'outils numérique de base (interpolation essentielle) et la définition de structures de données (localisation, déformation) ont été les points essentiels du développement.

- réalisation informatique, et ce n'est pas la moindre part, compte tenu d'approches courantes dans certains milieu de recherche scientifique, à savoir la réalisation de "programmes qui tournent", sans se soucier de sa validité, de son évolution et de son réemploi (voire de son utilisation rendu pratiquement impossible par tout autre programmeur que celui de l'écriture initiale...).

Dans le cas présent de ce produit, les 3 composantes ont été réalisées par la même et unique personne, qui se doit de rassembler des compétences multiples.

J'insisterais plus spécialement sur la mise en place pratique des méthodes exposées, au sein d'un logiciel général de traitement de données satellitaires tel qu'il a été réalisé à l'Antenne ORSTOM de Lannion, pour plusieurs utilisations (développement, applicatifs, libre service...).

Ce logiciel, dénommé TRISKEL est détaillé dans (6).

Le logiciel développé est un ensemble de programmes et de structures de données. Il a été écrit avec le souci d'une "qualité logicielle", à savoir :

- à l'exploitation, conviviale auprès de non spécialiste,
- à la maintenance et à l'évolution du produit,
- à la réutilisation de celui-ci sur d'autres sites (portabilité) ou avec d'autres applications.

Ceci conduit à une réalisation informatique tant à l'analyse qu'à l'écriture, structurée, hiérarchique et modulaire.

Concernant la portabilité effective du logiciel, celui-ci dépend pour les parties imagerie (restitution, visualisation), des facilités offertes sur le site de développement.

Le logiciel TRISKEL intègre différents modules de traitement des données de télédétection :

- couche d'accès aux données et aux représentations (image, champ, localisation...),
- module de décodage satellitaires,
- module "image" avec traitement et la partie spécifique de restitution (impression, visualisation),

- module "champ".
- modules de projection cartographiques et navigation satellitaire,
- module de rectification permettant :
 - * l'élaboration de localisation pour diverses images (satellitaires, projection cartogra- phique...)
 - * l'élaboration de "déformation",
 - * la rectification par rééchantillonnage d'une ou de plusieurs images (constitution de mosaïques)
- module de positionnement dans une image,
- module graphique, en mode raster, avec la constitution de carte à partir de base de données (trait de côte, frontière politique, réseau hydrogra- phique), et de données spatialisées ordonnées,
- un interface graphique (vecteur), à la norme GKS, permettant l'utilisation des modules de haut niveau fournies dans le progiciel NCAR (isolignes,...).

Cet ensemble permet la superposition et restitution d'informations images (rectifiées ou non) et de données spatiali- sées (champ, cartogra- phie).

La chaîne actuelle, privilégie sans doute l'approche "raster" avec la consti- tution de fichiers de type image, visualisable et imprimable dépendant du matériel sur le site. Ceci est dû au fait de l'absence de moyens décent en matière d'infographie à l'Antenne ORSTOM de Lannion (pas de console graphique, ni de traceur).

IX APPLICATIONS

Celles-ci sont nombreuses et sont devenues "banalisées" pour les cher- cheurs de l'Antenne de Lannion, tant pour des travaux à caractères opéra- tionnels (Veille Climatique Satellitaire) ou de traitement en libre service pour divers programmes de recherches.

La généralité des outils en place ne faisant aucune hypothèse sur le type de données satellitaires (météorologiques dans ce cas), en font un outil puissant pour de multiples utilisations, avec l'environnement existant.

X CONCLUSIONS

Nous avons présenté une méthodologie de traitement géométrique d'images de télédétection, permettant rectification "cartographique" et superposition de données "multisources" de données images ou non.

Ces méthodes ont été implantés au sein d'un logiciel général de traitement de données satellitaires, logiciel utilisé en routine par les chercheurs sur le site de LANNION.

L'étape prochaine (89) de développement méthodologique, est l'utilisation de données cartographique, ses relations avec l'image satellitaire proprement dit et l'élaboration de méthodes "unifiées" (normalisées) en représentation d'images et de graphiques indépendamment du matériel.

XI BIBLIOGRAPHIE

- 1 - PASQUAY, Cours de géodésie, projections, ENSTA 1971
- 2 - P. BRUNEL, A. MARSOUIN, Positionnement géographique des images AVHRR des satellites NOAA, Cahier SATMOS N° 2, Centre de Météorologie Spatiale de Lannion, Février 86
- 3 - W.H. WILSON, R.C. SMITH, J.N. NALTEIN, The CZCS geolocation algorithms, University of Californian, San Diego, Scripps institution of Oceanography, La Jolla, California, October 81
- 4 - D. DAGORNE, Rectifications par points d'amers, Note interne ORSTOM/Lannion, 1984
- 5 - Avant projet 2B, Collaboration Bretagne Image, sous thème : images satellitaires, 1985
- 6 - D. DAGORNE, Traitement des données satellitaires à l'Antenne ORSTOM de Lannion: Le logiciel TRISKEL, Veille Climatique Satellitaire n° 23, Août 88

Theme :
**MODELES DE CROISSANCE ET
MODELES DE DYNAMIQUE DES
POPULATIONS**

Coordinateur :
JEAN ARCADY MEYER

MODELES GLOBAUX DE DYNAMIQUE DES POPULATIONS MARINES EXPLOITÉES ET ASPECTS DE LA PECHE ARTISANALE SÉNÉGALAISE

Francis LALOE

I LE MODELE GLOBAL GÉNÉRALISÉ

L'approche globale de la dynamique d'une population marine exploitée consiste à décrire l'évolution de sa biomasse sous l'effet de l'activité de la pêche. Dans la mesure où les variations seront d'autant plus importantes que la biomasse l'est elle-même, on raisonne à partir du taux de variation de la biomasse.

Le modèle le plus classiquement utilisé, sous le nom de "modèle global généralisé" (Pella et Tomlinson, 1969) est défini par l'équation:

$$\frac{1}{B_t} \frac{dB_t}{dt} = H.(B_t^{m-1} - B_v^{m-1}) - q.f_t \quad (1)$$

B_t est la biomasse au temps t , f_t est l'effort "instantané" déployé au temps t

(la quantité d'effort déployée entre t_1 et t_2 est : $\int_{t_1}^{t_2} f_t \cdot dt$ et la capture réalisée est : $\int_{t_1}^{t_2} q \cdot f_t \cdot B_t \cdot dt$)

les paramètres du modèle sont:

- la capturabilité "q", probabilité qu'une unité de biomasse soit capturée lorsqu'une unité d'effort est déployée, la biomasse B_t est donc en fait la biomasse exploitée par la pêche.
- la biomasse vierge " B_v ", biomasse à l'équilibre lorsqu'il n'y a pas d'effort de pêche,
- les constantes "H" et "m".

Lorsque $m=2$, on obtient l'expression du modèle de Graham Schaefer (Graham 1935, Schaefer 1954, 1957) et lorsque $m \rightarrow 1$, on obtient le modèle "logarithmique" (Garrod 1969, Fox 1970) défini par l'expression:

$$\frac{1}{B_t} \cdot \frac{dB_t}{dt} = H \cdot (\text{Log}(B_t) - \text{Log}(B_v)) - q \cdot f_t.$$

Pour toute valeur d'effort appartenant à un intervalle $[0, f_{\max}]$, la valeur f_{\max} , éventuellement infinie, dépendant des paramètres du modèle, il existe une valeur B_f de biomasse positive telle que dB_t/dt est nulle, correspondant à une situation d'équilibre stable. La capture par unité d'effort (CPUE) est alors égale à $q \cdot B_f$ et la capture par unité de temps est égale à $q \cdot f \cdot B_f$.

Les représentations graphiques des relations à l'équilibre entre CPUE et effort et entre prise et effort sont présentées sur la figure 1 pour différentes valeurs du paramètre m . On observe qu'il existe une valeur notée f_{PME} d'effort conduisant à une prise maximale à l'équilibre (PME). Il est possible de modifier l'expression du modèle afin de faire apparaître directement ces deux quantités dans sa formulation (Fletcher 1978). La valeur f_{PME} a été par le passé considérée comme l'objectif à atteindre pour une "bonne" gestion de la population étudiée. A l'heure actuelle le

couple (PME, f_{PME}) n'est plus guère vu que comme donnée "importante" pour cette gestion (Larkin 1977, Sissenwine 1978).

Si la connaissance des relations à l'équilibre est un objectif dont l'intérêt est évident, disposer de plusieurs états d'équilibre dans l'histoire d'une pêcherie permettant d'ajuster directement les paramètres décrivant les relations à l'équilibre n'est que très exceptionnel. Les méthodes d'ajustement doivent donc tenir compte des situations de déséquilibre. Deux approches sont principalement utilisées.

- On peut intégrer l'équation différentielle et ainsi suivre l'évolution de la biomasse et en déduire les prises et CPUE théoriques. On cherche alors les valeurs des paramètres conduisant aux prises estimées les plus proches possibles des prises observées, selon un critère de "moindres carrés". Cette approche a été bien décrite par Rivard et Bledsoe (1978).

- La CPUE est supposée proportionnelle à la biomasse. En période de déséquilibre, cette biomasse B_t n'est pas la biomasse à l'équilibre B_f . On peut rechercher quel serait l'effort f tel que $B_t = B_{f_t}$. Bien estimer ces efforts "à l'équilibre" permet alors d'estimer directement les paramètres régissant les relations à l'équilibre. Les méthodes existantes pour l'estimation de ces efforts consistent à effectuer une moyenne éventuellement pondérée de l'effort au temps t et des efforts exercés au cours de périodes antérieures, le nombre de période étant choisi en fonction de la longévité de l'espèce étudiée (Gulland 1971, Fox 1975).

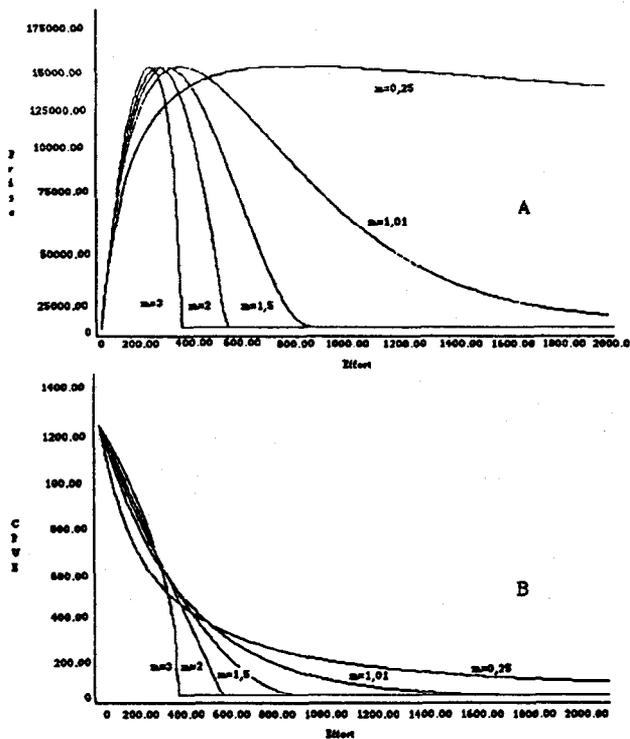


Figure 1 Relations à l'équilibre pour différentes valeurs du paramètre "m" avec un modèle global généralisé. A: Prise-Effort B: CPUE -Effort

De nombreuses adaptations ont été proposées pour tenir compte de caractéristiques biologiques des populations étudiées. le renouvellement de la biomasse exploitée au temps t est ainsi en partie assuré par l'arrivée de poissons en âge d'être pêchés. Le nombre de ces poissons peut dépendre de la biomasse présente au temps t-tr de leur naissance. Des formulations incluant cette biomasse ont été proposées (Marchesseault et al., 1976, Walter 1973). Il est également possible que la capturabilité dépende de la biomasse exploitée. Elle sera fonction croissante de la biomasse si son aire de répartition diminue avec sa valeur, ou décroissante dans le cas contraire. La formulation:

$q=q_0 \cdot B^\alpha$ a ainsi été proposée (Fox 1974, Mac Call, 1976), et Tsoa et al.

(1985) ont "compliqué" cette relation en écrivant: $q=q_0 \cdot B^\alpha f^\beta$

Deriso (1980) a proposé une formulation générale, incluant les phénomènes de recrutement (biomasse de poissons parvenant en âge d'être pêchés) et des paramètres décrivant la croissance et la mortalité naturelle des poissons. Schnute (1985) a présentée une théorie générale incluant la plupart des modèles existants comme cas particuliers.

Malgré leur indéniable intérêt théorique, ces adaptations n'ont pas, dans la pratique, connu beaucoup de succès. Ceci peut être dû au fait que, en tant que boîte noire, le modèle global généralisé présente une très grande souplesse pour décrire des relations décroissantes entre CPUE et effort (cf. fig. 1) mais que l'interprétation biologique des paramètres du modèle peut être quasi impossible comme l'indique l'exemple suivant, obtenu en étudiant une adaptation de la formulation.

Une des caractéristiques de la pêche artisanale sénégalaise est d'être constituée d'unités ayant un rayon d'action limité, ne leur permettant pas d'exercer leur effort sur l'ensemble de l'aire de répartition des stocks exploités. Ceci n'est pas sans conséquence et dans certains cas on a conclu (Fréon 1986) à des phénomènes de surexploitation locale. Dans ces conditions, la formulation (1) du modèle peut être inadaptée puisque la même quantité B_t de biomasse est considérée comme biomasse "exploitée" et biomasse "productrice". Pour mieux décrire cette situation,

nous avons adapté la formulation du modèle en supposant qu'il existe une certaine quantité de biomasse inaccessible à la pêche et pouvant s'exprimer comme une fraction $\alpha \cdot B_v$ de la biomasse vierge. Nous avons supposé $m=2$, nous rapprochant ainsi du modèle de Graham Schaefer, on a donc l'expression:

$$\frac{dB_t}{dt} = H \cdot B_t \cdot (B_t - B_v) - q \cdot f_t \cdot (B_t - \alpha \cdot B_v) \quad (2)$$

En fait les ajustement tentés avec cette expression, à partir de données pourtant susceptibles d'en "bénéficier", ont conduit à des estimations du paramètre α affectés de coefficients de variation généralement supérieurs à 100% et donc sans aucun intérêt. En fait on rencontre le même problème lorsqu'on essaie d'estimer le paramètre "m" du modèle global généralisé, et en observant (fig.2) les relations à l'équilibre entre prises et effort obtenues avec des modèles issus de l'équation (2) pour différentes valeurs de α , on constate une forte analogie avec celles obtenues avec la formule (1) pour différentes valeurs de m.

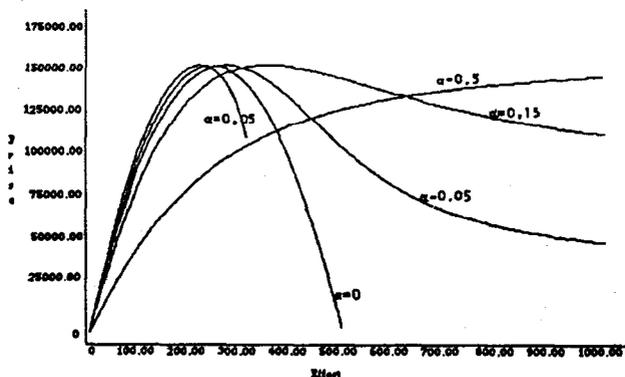


Figure 2 Relations "Prise-Effort" à l'équilibre pour différentes valeurs du paramètre " α " avec un modèle global supposant l'existence d'une quantité $\alpha \cdot B_v$ de biomasse inaccessible.

Nous avons simulé une pêcherie exerçant son effort au cours de 15 périodes sur un stock dont la dynamique est régie par le modèle:

$$\frac{dB_t}{dt} = H \cdot B_t \cdot (B_t - B_v) - q \cdot f_t \cdot (B_t - \alpha \cdot B_v)$$

en supposant la biomasse B_0 , au début de la première période égale à 2100, et avec $\alpha = 0.1$, $B_v = 2400$, $PME = 500$, $f_{PME} = 188$

Les valeurs d'efforts et les captures réalisées au cours de chaque période sont présentées dans le tableau suivant:

Effort	Prise
100	486
120	525
150	590
450	1185
450	667
550	527
350	298
180	213
150	259
100	236
100	299
150	487
180	564
150	463
100	334

Nous avons ensuite recherché à ajuster ces données à l'aide d'un modèle généralisé. Nous avons obtenu un ajustement tout à fait excellent avec

$$1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^{15} (P_i - \hat{P}_i)^2}{\sum_{i=1}^{15} (P_i - \bar{P})^2} \right| > 0.99$$

Les représentations graphiques des modèles sont données sur la figure 3. Les valeurs vraies des paramètres et les valeurs estimées par l'ajustement sont présentées dans le tableau ci-dessous

paramètre	B0	Bv	PME	fpme	m ou α
vraies valeurs	2100	2400	500	188	α=0.1
valeurs estimées	1810	2400	498	197	m=1.05

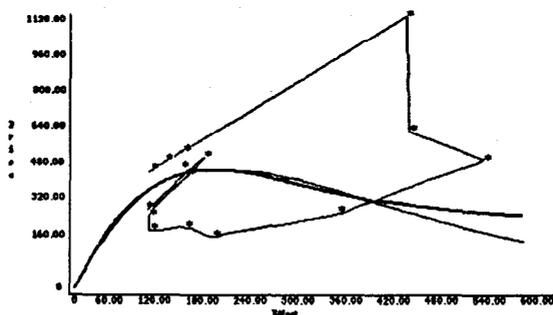


Figure 3 Résultats (Prises et efforts) d'une pêcherie et ajustée par un modèle généralisé (trait fin).

Une telle adaptation ne semble pas donc susceptible d'apporter un progrès significatif par rapport aux formulations existantes, mais elle fait apparaître qu'un bon ajustement ne permet guère d'interpréter quoique ce soit. Il apparaît aussi que le modèle généralisé possède une souplesse lui permettant de rendre compte de situations non prévues ce qui lui confère donc une bonne qualité de "boîte noire", en particulier il est possible de décrire des situations où l'hypothèse de constance de la capturabilité n'est pas satisfaite.

Le modèle défini par l'expression (2) peut présenter un intérêt non négligeable s'il existe des informations annexes permettant décrire d'éventuelles variations de la quantité de biomasse inaccessible. Ce peut être le cas lorsque l'aire fréquentée par les unités de pêche s'accroît régulièrement. On peut alors modéliser certains changements de modèles relativement facilement (Laloë 1987). D'une manière générale, il semble que les adaptations du modèle global généralisé n'aient d'intérêt pratique que dans la mesure où elles intègrent des informations supplémentaires. Ainsi Fréon (1983, 1986) a-t-il amélioré la modélisation de la pêche de petits pélagiques côtiers au Sénégal en introduisant une relation entre la production de biomasse et l'intensité des vents responsables de l'upwelling et donc de l'enrichissement du milieu.

L'hypothèse de constance de la capturabilité "q" est souvent présentée comme la plus importantes pour la validité du modèle généralisé et pour l'estimation de ses paramètres. En effet si cette hypothèse est satisfaite, la capture par unité d'effort (CPUE) est une quantité proportionnelle à la biomasse et son évolution permet de suivre celle de la biomasse étudiée. Les utilisateurs sont donc amenés, par des opérations parfois lourdes de standardisation, à "corriger" les données d'efforts des différents "métiers" et des différentes unités de pêche afin de tenir compte de leurs efficacités respectives (puissances de pêche).

Si on s'intéresse à une pêcherie constituée d'unités de pêche utilisant toutes la même méthode, adaptée à la recherche d'individus d'une population cible bien précise, on peut espérer que les hypothèses nécessaires à la validité du modèle pourront être satisfaites. Lorsqu'on aborde l'étude d'une pêcherie dont les unités peuvent mettre en oeuvre de nombreuses tactiques, et peuvent rechercher plusieurs espèces cibles, l'utilisation du modèle sera probablement plus délicate. En effet les unités de pêches pourront rechercher systématiquement les espèces les plus disponibles et ainsi avoir tendance à "accentuer" les variations naturelles de ces disponibilités. On peut alors se poser la question de la nature de la standardisation à opérer.

Les recherches pour l'application de l'approche globale aux ressources multi-spécifiques ont initialement porté sur la prise en compte des interactions "biologiques", relations de compétition ou relations "prédateurs-proies" (Pope 1976, Horwood 1976). Si de telles relations existent, leur description et leur mise en évidence est très difficile (Sissenwine et al. 1982) et on s'intéresse plus actuellement à la prise en compte des interactions "technologiques" (présence de plusieurs espèces dans les captures résultant de mêmes opérations de pêche) et à la dynamique des flottilles, c'est-à-dire à la capacité des unités de pêches à générer des mortalités variables sur les différents stocks exploités par leur aptitude à changer de tactique ou de méthode de pêche.

Nous terminerons cette présentation en indiquant, comment peut être prise en compte la dynamique de la flottille dans un exemple caricatural.

Supposons qu'une pêcherie soit constituée de N unités de pêche chacune d'elles pouvant mettre en oeuvre deux tactiques de pêche possibles. La première tactique ne permet de capturer que des poissons d'un stock \mathcal{A} , et la seconde ne permet de capturer que des poissons d'un stock \mathcal{B} . On suppose que la dynamique du stock est régie par un modèle de Graham-Schaefer, et que celle du stock \mathcal{A} est régie par un modèle avec une fraction inaccessible égale à 20% de sa biomasse vierge. On peut définir que pour un nombre donné d'unités de pêche l'équilibre sera atteint lorsque les efforts se répartiront de telle sorte que les rendements (CPUE tenant compte des coûts engendrés par la pêche et valeur de chaque espèce) issus de la mise en application de chaque tactique seront égaux. Il y aura alors en moyenne N_1 unités qui utiliseront la première tactique et N_2 unités qui utiliseront la seconde.

Si, par des opérations de standardisation d'effort, on parvient à connaître la dynamique du stock \mathcal{A} , on mettra en évidence, puisqu'elle est régie par un modèle de Graham-Schaefer une relation linéaire décroissante entre CPUE et effort (cf. Fig. 1). On pourra alors chercher à prévoir l'impact d'un accroissement de l'effort. En fait cette opération sera rendue délicate par la présence du second stock dont la dynamique ne correspond pas au même modèle. Pour le stock \mathcal{B} en effet, la décroissance des CPUE en fonction des efforts n'est pas une fonction linéaire de l'effort, et en particulier, elle reste toujours strictement positive (si on ne prend pas en compte les coûts), quelque soit l'effort appliqué. En conséquence lorsque le nombre N d'unités de pêche change, les modifications des efforts à l'équilibre N_1 et N_2 ($N_1 + N_2 = N$) sur chacun des stocks ne se font pas dans les mêmes proportions. Nous avons recherché à décrire (fig.4) ces relations pour dans le cas de deux stocks dont les dynamiques sont régies par les équations:

$$\frac{dB_{\mathcal{A}t}}{dt} = B_{\mathcal{A}t} \cdot H_{\mathcal{A}} \cdot (B_{\mathcal{A}t} - Bv) - q_1 \cdot N_1 \cdot B_{\mathcal{A}t}$$

$$\frac{dB_{\mathcal{B}t}}{dt} = B_{\mathcal{B}t} \cdot H_{\mathcal{B}} \cdot (B_{\mathcal{B}t} - Bv) - q_2 \cdot N_2 \cdot (B_{\mathcal{B}t} - \alpha \cdot Bv)$$

$$\text{avec } Bv_{\mathcal{A}} = Bv_{\mathcal{B}} = 1000, \quad H_{\mathcal{A}} = -0.001, \quad H_{\mathcal{B}} = -0.0005$$

$$q_1 = q_2 = 0.01 \quad \alpha = 0.2$$

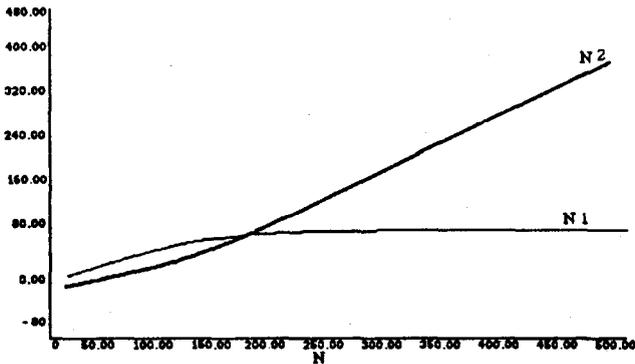


Figure 4 Répartition des efforts sur deux stocks en fonction du nombre d'unités de pêche. Le trait fin présente le nombre d'unités recherchant le stock et le trait gras celui concernant le stock A.

Il existe donc une cohérence entre le nombre d'unités de pêche et l'effort, mais celle-ci est largement dictée par l'existence d'un second stock. Dans l'exemple traité il n'y a pas d'interaction biologique ni de co-occurrence de captures de représentants des deux stocks pour une même opération de pêche. C'est la dynamique de la flottille qui introduit l'interaction.

II. DISCUSSION EN RELATION AVEC LA PECHE ARTISANALE SÉNÉGALAISE

La pêche artisanale sénégalaise est constituée d'un très grand nombre d'unités de pêche ayant pour la plupart d'entre elles la possibilité de choisir entre diverses "tactiques" de pêche. La dynamique de la flottille est donc un thème majeur d'étude.

Décrire cette pêcherie implique la définition d'unités d'observation pouvant être différentes selon qu'on s'intéresse aux aspects socio-économiques de la pêche ou à la dynamique des stocks exploités. Dans un cas, on cherchera par exemple à décrire l'activité de personnes travaillant habituellement ensemble, dans l'autre, on cherchera à évaluer la mortalité subie par les stocks exploités en observant les captures réalisées au cours d'opérations de pêche.

Lorsqu'on aborde l'étude de l'impact des modifications de la pêcherie sur la dynamique des stocks, il convient de relier ces descriptions et donc les unités d'observation qui leurs sont associées.

On donnera ainsi deux définitions d'unités d'observation avec, pour chacune, une relation d'équivalence permettant la réalisation d'une classification.

- Les unités de pêche, identifiées par une pirogue, ce qui permet, au moins pour la pêche en mer, de respecter une définition d'unité de production. Deux unités seront considérées équivalentes si elles peuvent mettre en oeuvre les mêmes tactiques de pêche.

- Les sorties en mer, décrites à partir des observations réalisables à leur retour à terre.

On considère équivalentes deux sorties si la même tactique de pêche a été utilisée, une tactique étant définie par les mortalités par pêche exercées sur chaque stock pour une sortie. Ces mortalités peuvent dépendre de la date et du lieu de pêche.

On peut alors définir une matrice M de "possibilités" avec un nombre de lignes égal au nombre t_p de types d'unités de pêche, et un nombre de colonnes égal au nombre t_c de tactiques existantes. Le terme général m_{ij} de la matrice M est égal à 1 ou 0 selon que le $i^{\text{ième}}$ type d'unité de pêche a ou non à sa disposition la $j^{\text{ième}}$ tactique de pêche.

Au temps t, chaque unité de pêche a une probabilité p_{ijt} de mettre en oeuvre la $j^{\text{ième}}$ tactique, p_{ijt} étant nul si m_{ij} l'est.

La somme $\sum_{j=1}^{t_c} p_{ijt}$ est égale à 1.

Les unités de pêche peuvent évaluer au temps t les rendements qu'elles peuvent espérer avec chacune des tactiques dont elles disposent, rendements qu'on peut par ailleurs définir par:

$$r_{ijt} = \left(\sum_{h=1}^p m_{ij} \cdot q_{jht} \cdot v_{ht} \cdot B_{ht} \right) \cdot c_j$$

où q_{jht} est la capturabilité de la biomasse exploitée B_{ht} du $h^{\text{ième}}$ stock, v_{ht} une "valeur" au temps t de l'unité de biomasse

de ce stock, et c_j un "coût" de mise en œuvre de la tactique j .

Les valeurs $p_{ij,t+1}$ peuvent être recherchées à partir des valeurs $p_{ij,t}$ et rendements $r_{ij,t}$. A partir du nombre d'unités de pêche de chaque type, et en utilisant une approche globale pour la description de la dynamique des stocks exploités, on peut réaliser des simulations de pêcherie, décrivant à la fois les résultats et les efforts déployés. La prise en compte de la variabilité réelle ou supposée des conditions d'environnement en amont et en aval de la pêche peut se faire en introduisant des variables stochastiques à divers niveaux. L'efficacité de ces simulations peut être évaluée par l'analogie entre les résultats et l'activité de la pêcherie simulée avec ceux de la pêcherie étudiée.

Si une bonne analogie est obtenue, on peut discuter des modifications de la pêcherie s'exprimant bien sûr en termes de nombre d'unités de pêche de chaque type, mais aussi, et peut-être surtout, en termes de modification de la nature de ces unités.

III. BIBLIOGRAPHIE

- BINET D. 1982. Influence des variations climatiques sur la pêche de *Sardinella aurita* ivoiro-ghanéennes : relation sécheresse-sur-pêche. *Océanologica Acta* 1982 vol.5 N°4 pp. 443-452.
- DERISO R.B. 1980. Harvesting strategies and parameters estimation for an age structured model. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 268-282.
- FLETCHER R.J. (1978). On the restructuring of the Pella- Tomlinson system. *Fish Bull* US.76,pp. 515-521.
- FOX W.W., 1970. An exponential surplus yield model for optimizing exploited fish population. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 99(1),pp 80-88.
- FOX W.W., 1974. An overview of production modeling. ICCAT workshop on tuna population dynamics, Nantes, France, 1974. *Rec Doc Scient CICTA*, III, pp 142-156.
- FOX W.W. 1975. Fitting the generalized stock-production model by least square and equilibrium approximation. *Fish Bull*, U.S., 73(1), pp. 23-37.
- FREON P. 1983. Production models as applied to substocks depending on upwelling fluctuations. In *Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*. San Jose, Costa Rica, 18- 29 april 1983. *FAO fish rep* 291 vol. 3.
- 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 l'exemple d Sénégal. Thèse doct. état, Univ. Aix Marseille.
- GARROD D.J. 1969. Empirical assessments of catch effort relationship in the North Atlantic cod stocks. *Res Bull ICNAF*, 6, pp 26-34.
- GRAHAM M. 1935. Modern theory of exploiting a fishery, and application to North Sea rawling. *J. Cons. perm. int. Explor Mer*, 10(2), pp. 264-274.
- GULLAND J.A. 1969. Manuel d'évaluation des stocks d'animaux aquatiques. Première partie: analyse des populations. *Man FAO Sci Halicut* 4, 160 p.
- GULLAND J.A. 1971. The fish resources of the oceans *FAO/fishing news (books), Ltd*, Surrey. 255 pages.
- HORWOOD J.W. 1976. Interactive fisheries: a two species Schaefer model. *ICNAF sel pap* 1, pp 151-155.
- LALOE F. 1987. A simple production model with unaccessed quantity of biomass. *ICES* 9-16 june 1987.
- LARKIN P.A. 1977. An Epitaph for the Concept of Maximum Sustainable Yield. *Trans. Am. Fish. Soc.* 106(1): 1-11.

LAUREC A., LE GUEN J.C. 1981. Dynamique des populations marines exploitées. CNEXO. Rapports scientifiques et techniques. 45, 117 p.

MAC CALL A.D. 1976. Density dependence of catchability coefficient in the California Pacific sardine (*Sardinops caerulea*) purse seine fishery. Calif Coop Ocean Fish Invest Rep, 18, pp. 136-148.

MARCHESSAULT G.D., SAILAS.D. and PALM W.J. 1976. Delayed recruitment models and their application to the American lobster (*Homarus americanus*) fishery. J Fish Res Board Can, 33 (8), pp. 1779-1787.

PELLA J.J., TOMLINSON P.K. 1969. A generalized stock production model. Bull IATTC, 13 pp.419-496.

POPE J.G. 1976. The effect of biological interactions on the theory of mixed fisheries. ICNAF sci pap 1, pp. 157-162.

RIVARD D., BLEDSOE L.J. 1978. Parameter estimation for the Pella-Tomlinson stock production model under non equilibrium conditions. Fish Bull U S 76 (3), pp. 523-534.

SCHAEFER M.B. 1954. Some aspects of the dynamics of population important to the management of the commercial marine fisheries. Bull Int Amer trop tuna comm , 1 (2), pp. 26-56.

SCHAEFER M.B. 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the Eastern Tropical Pacific. Ocean. Bull. Int. Amer; Trop. Tuna Comm. 2(6), pp; 247-285.

SCHNUTE J. 1985. A general theory for analysis of catch and effort data. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42: 414-429.

SISSEWINE M.P. 1978. Is MSY an adequate foundation for Optimum Yield. 1978. Fisheries vol 3 n°6, 22-24 et 37-42.

SISSEWINE M.P., BROWN B.E., PALMER J.E., ESSIG R.J. and SMITH W. 1982. Empirical examination of population interaction for the fishery off the northeastern U.S.A. In Mercer (ed.): Multispecies approaches to fisheries management advice. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 59: 82-94.

TSOA E, W.E. SCHRANK, and N. ROY. 1985. Generalizing fisheries models: an extension of the Schaeffer analysis. Can J Fish Aquat Sci. 42: 44-50.

WALTER G.G. 1973. Delay differential equation models for fisheries. J Fish Res Board Can. 30, pp. 939-945.

MODÉLISATION DÉTERMINISTE EN PROTECTION DES CULTURES: OBJECTIFS, DIFFICULTÉS ET PERSPECTIVES

Serge SAVARY

Les méthodes d'analyse de données utilisées en protection des cultures sont très nombreuses. Elles s'adressent à différents thèmes:

- la description des contraintes phytosanitaires dans le temps,
- la description des contraintes phytosanitaires dans l'espace,
- la prédiction de l'évolution des contraintes,
- la prédiction de l'effet des contraintes, c'est-à-dire, les pertes de récolte,
- l'analyse du système culture/contrainte.

Au cours de cette présentation, l'accent sera mis sur l'un des domaines où ces méthodes sont les plus appliquées, celui des pertes de récoltes, et spécialement sur l'une des approches disponibles, la modélisation déterministe.

Il est peut-être utile ici de donner quelques indications sur le statut général de ces techniques, et en particulier sur celui de la modélisation déterministe, dans le domaine de l'étude des pertes de récoltes. D'une manière très générale, ce sont les techniques de modélisation fixes qui prédominent largement, avec plusieurs types de régression, qui relient la perte de récolte au(x) niveau(x) de la contrainte considérée. Ces mé-

thodes sont relativement simples, efficaces, et très largement répandues; elles sont extrêmement utiles pour résumer l'information acquise au cours d'une expérimentation, et elles présentent souvent aussi une très bonne valeur prédictive (cette valeur dépend surtout des conditions dans lesquelles les données ont été acquises et du domaine dans lequel la prédiction doit être effectuée). Elles constituent, de ce fait, le corps des techniques utilisées en protection des cultures. Il demeure, cependant, que ces méthodes n'ont de valeur explicative que très limitée. C'est pourquoi d'autres techniques sont nécessaires pour aborder le volet explicatif de l'analyse des pertes de récoltes.

Une perte de récolte résulte d'une interaction continue entre une culture et une population de parasites ou de ravageurs, à un niveau donné de productivité. Les phytopathologistes évoquent souvent le triangle culture-maladie-environnement pour schématiser ces interactions. Il s'agit, en fait, d'un processus se déroulant au sein d'un système extrêmement complexe, et qui, pour cette raison, se prête assez bien à une approche globale, orientée vers l'élaboration de modèles de simulation dynamiques.

Les objectifs des modèles de simulation en protection des végétaux sont assez variés:

- analyse et synthèse de données sur la dynamique des contraintes (population de parasites ou de ravageurs)
- prédiction du niveau d'une contrainte,
- assistance à la sélection de variétés résistantes,
- assistance à l'emploi de pesticides,
- analyse des processus aboutissant aux pertes de récoltes,
- prédiction des pertes de récolte.

Il convient d'ajouter ici que cette approche constitue un cadre extrêmement utile pour l'optimisation des travaux dans le cadre d'un projet de recherches donné.

Les premiers modèles de simulation publiés dans le domaine de la protection des cultures sont assez anciens (Zadoks, 1971; Waggoner et al., 1972). Mais la progression de cette approche dans ce domaine de recherches a été, et est toujours, assez lente. Elle a été exposée à des critiques parfois extrêmement vives, mais souvent justifiées (Vanderplank, 1975). En réalité, de nombreuses difficultés sont rencontrées pour l'élaboration de tels modèles, et je voudrais tenter de les résumer, en m'appuyant sur un modèle de simulation qui est en cours de développement, sur la rouille de l'arachide.

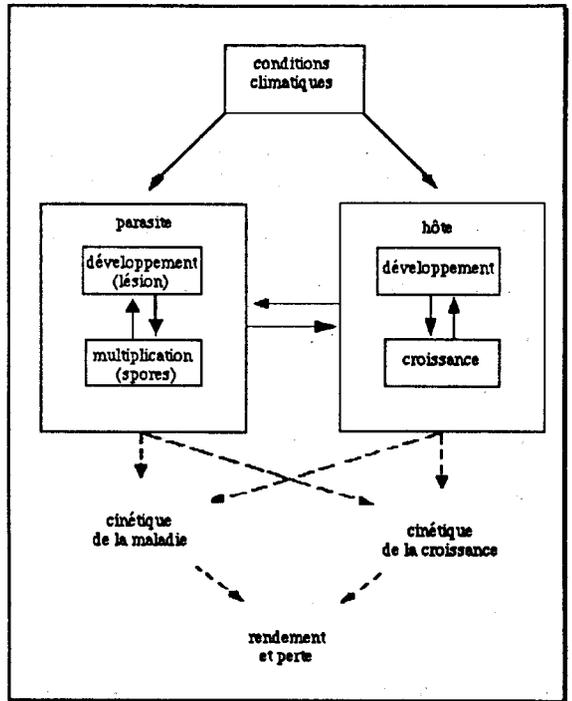
Les principales étapes du développement d'un modèle de simulation dynamique sont les suivantes (Teng, 1985; Teng & Bowen, 1985; Zadoks & Rabbinge, 1985):

- définition des éléments et des limites du système considéré,
- définition des constantes de temps des processus inclus dans le système et choix d'un intervalle d'intégration,
- élaboration d'un schéma initial du modèle,
- élaboration du schéma définitif et du programme de simulation,
- paramétrage du modèle
- initialisation du programme,
- estimation des paramètres et analyse de sensibilité,
- évaluation du modèle
- vérification
- validation.

I DÉFINITION DU SYSTEME CONSIDÉRÉ

La définition des limites du système que l'on souhaite modéliser constitue, en soi, une hypothèse initiale lourde de conséquences. En protection des cultures, le système considéré est constitué de deux sous unités: la culture et le parasite (Figure 1). Les premiers modèles, parce qu'ils étaient théoriques (Zadoks, 1971) ne spécifiaient pas toujours les dimensions physiques du système: on considérait une unité arbitraire de surface de la culture. En pratique c'est, le plus souvent, une unité de 1m² qui est envisagée, lorsqu'une culture de plein champ est envisagée (Waggoner et al., 1972; Rapilly & Jolivet, 1976), mais il est également possible de choisir une plante individuelle (Teng et al., 1980). Le choix de la dimension de l'unité simulée comporte l'hypothèse implicite d'une homogénéité des unités dans la culture, quelque soit l'attribut envisagé pour les comparer. Ce choix doit donc, notamment, tenir compte de la structure spatiale de la population de parasites ou de ravageurs, et de ses flux de dispersion.

Figure 1. Schéma général d'un modèle de simulation en protection des cultures. Le modèle comporte deux sous-unités : la contrainte phytosanitaire et l'hôte. Les fonctions de couplage, de même que le détail donné à chaque unité, dépendent des objectifs du modèle. Le modèle est alimenté par un ensemble de fonctions directrices, principalement climatiques, et de paramètres propres à l'hôte (caractéristiques du développement, paramètres physiologiques, caractéristiques de sensibilité à la contrainte phytosanitaire) ou au parasite.

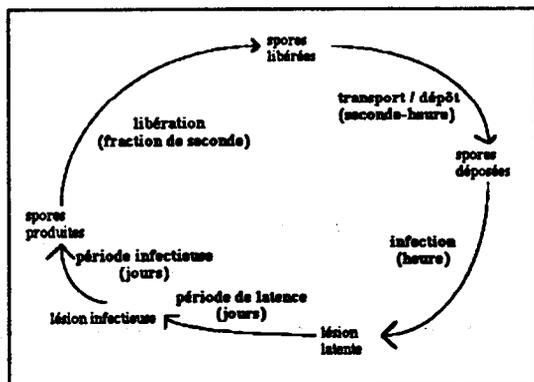


Le modèle qui doit être élaboré comporte donc un ensemble de processus qui se réfèrent soit à la population de l'hôte (la culture), soit à celle du parasite ou ravageur. Ces populations comprennent des niveaux d'intégration plus simples: les niveaux de l'individu (représentés par une plante individuelle, un insecte, ou une lésion), cellulaire et moléculaire. Chaque niveau d'intégration peut être considéré comme explicatif du niveau qui lui est immédiatement supérieur en complexité (Zadoks & Schein, 1979). Ainsi, pour expliquer la dynamique de la population de l'hôte et du parasite, c'est respectivement la plante individuelle et la lésion qui ont été choisies comme niveau explicatifs dans un modèle de simulation des épidémies de rouille de l'arachide. Il est apparu rapidement plus logique de rapporter ces sous-systèmes à une unité physique commune, c'est-à-dire $1m^2$ de culture.

II. CONSTANTES DE TEMPS ET INTERVALLE D'INTÉGRATION

L'échelle des niveaux d'intégration correspond généralement à une échelle de temps; plus le niveau est complexe, plus l'unité de temps qui permet de le décrire est grande. Cependant les processus qui se développent à un niveau donné peuvent présenter de grandes variations. Ainsi, dans le cas du cycle de multiplication de la rouille de l'arachide, on rencontre des processus dont les constantes de temps sont extrêmement différentes (de la fraction de seconde à la journée, Figure 2).

Figure 2. Représentation schématisée du cycle de la rouille de l'arachide. Les étapes décrites se situent au niveau d'intégration choisi pour la construction du modèle: celui de la lésion individuelle (et de la spore). Les constantes de temps correspondant aux différentes étapes varient très fortement en ordre de grandeur.



En pratique, l'intervalle d'intégration choisi est, le plus souvent, tributaire de la fréquence des données météorologiques qui seront utilisées pour le fonctionnement du modèle. Si un intervalle de une journée est choisi, on est alors amené à décrire les processus dont les constantes de temps sont inférieures à un jour sous la forme d'un résumé quotidien, qui leur attribue un taux moyen en fonction des conditions climatiques quotidiennes (Zadoks, 1971; Waggoner et al., 1972).

III. SCHÉMA INITIAL DU SYSTEME

III.1 L'HOTE

Le schéma de base pour la modélisation de la culture est souvent du type de celui représenté dans la figure 3 (Rabbinge & Rijdsdijk, 1981), avec une représentation sommaire de la photosynthèse, et des taux de répartition vers les différents types d'organes des plantes. Ces taux sont fonction de coefficients de partition, qui eux-même dépendent du stade de développement de la culture.

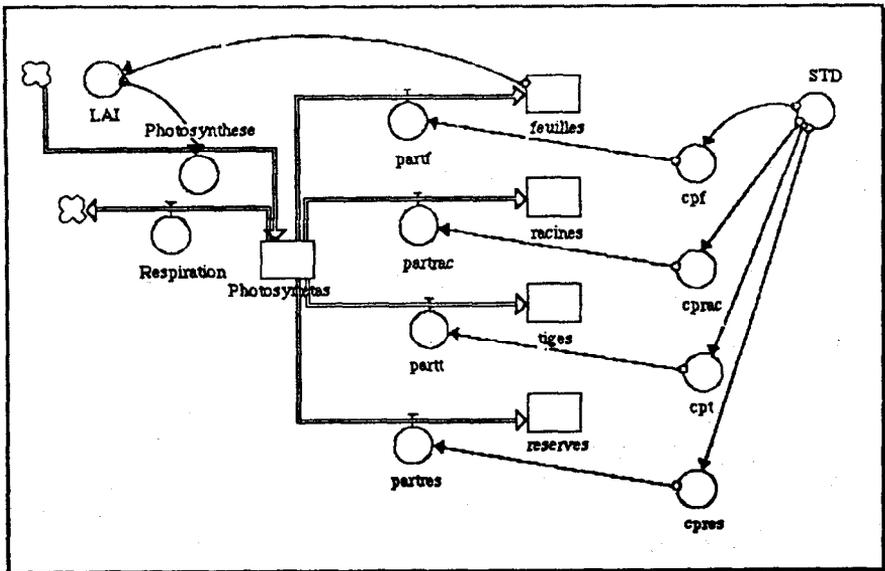


Figure 3. Architecture générale d'un modèle résumé de croissance et de développement d'une culture, couplable avec un modèle de contrainte.

III.2 LA CONTRAINTE PHYTOSANITAIRE

Les schémas utilisés pour représenter le développement et la croissance de la population de parasites ou de ravageurs sont beaucoup plus variés. Ils ont tous, cependant, en commun de comporter des enchaînements de stades successifs, qui représentent le développement de la population, qu'il s'agisse de stades de développement d'insectes (oeufs, stades larvaires, imagos) ou de lésions dues à un agent pathogène (lésion latente, infectieuse ou éliminée; Figure 4). Il s'agit donc de simuler dans le temps l'évolution d'une cohorte d'individus au travers d'une série de stades successifs. Au cours du passage d'un stade à un autre, un délai variable peut s'écouler, accompagné d'une dispersion des individus quant au délai requis pour ce transfert, et avec une certaine mortalité. Ce type de processus, typique du domaine biologique, peut être représenté en considérant, entre chaque stade envisagé, un train de stades fictifs (boxcar); la longueur de ce train de stades intermédiaires permet de rendre compte de la durée du transfert, de la dispersion et de la mortalité qui s'y produisent.

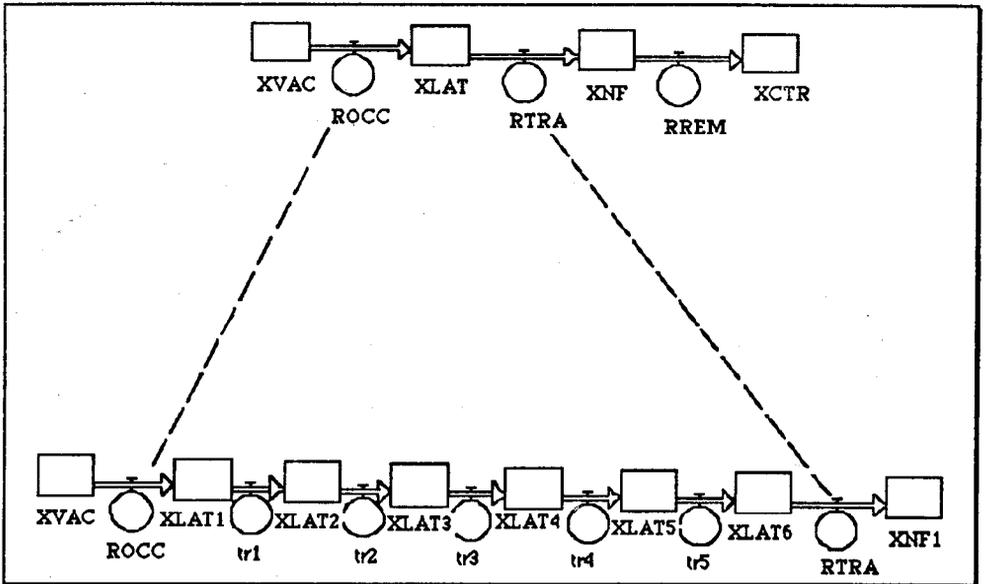


Figure 4. Modélisation des différentes étapes du développement d'un agent de contrainte phytosanitaire. La plupart des modèles de simulation comportent de tels chaînages de stades de développement. Ils font souvent appel à une représentation en trains de stades (boxcar train) pour rendre compte des délais de développement, de la dispersion des individus au cours du développement, et de la mortalité au cours du développement (non représenté).

III.3 COUPLAGE

Pour réaliser la fusion d'un modèle de croissance et de développement d'une culture avec un modèle de simulation d'une contrainte phytosanitaire, une première difficulté à surmonter est la différence entre les unités qui sont utilisées pour mesurer les variables d'état des deux modèles; en effet, un modèle de culture emploiera, par exemple, des biomasses d'organes, ou des surfaces de feuilles, tandis que la simulation d'une contrainte phytosanitaire fait plus souvent intervenir des nombres d'individus (nombres de lésions, d'insectes, par m^2). Ce couplage d'unités peut être effectué en utilisant dans le modèle des fonctions de conversion, ou coupleurs. La figure 5 représente le schéma d'un couplage entre un modèle simulant la croissance d'un couvert végétal comportant trois strates successives, couplé à la dynamique d'une contrainte phytosanitaire (par exemple un champignon foliaire), dont le cycle comporte trois stades successifs. Les fonctions de conversion assurent le passage de l'un à l'autre en considérant le nombre de spores produite par unité de surface foliaire parasitée ($N_{\text{parasite}} \cdot m^{-2}$; dans le sens hôte-parasite) et la surface

foliaire occupée par une colonie du parasite ($m^2 \cdot N_{\text{parasite}}^{-1}$; dans le sens parasite-hôte).

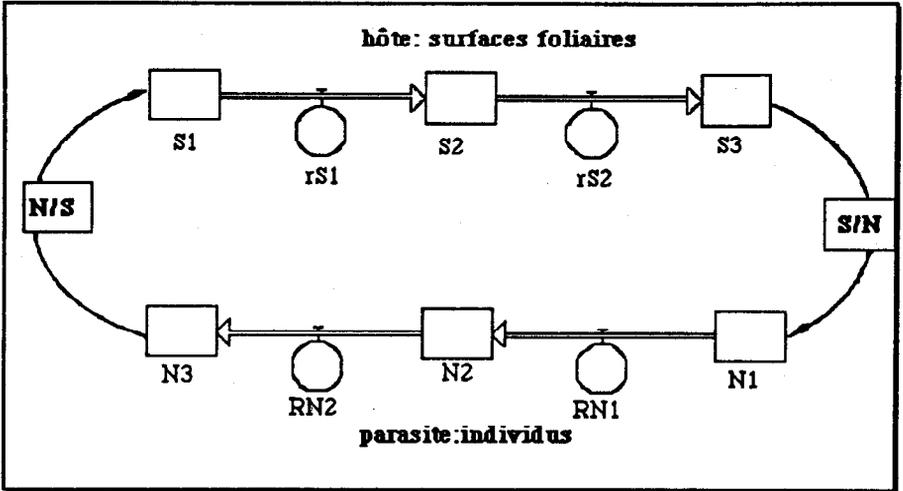


Figure 5. Schéma général du couplage entre deux sous-unités (Zadoks & Rabbinge, 1985) Le couplage élémentaire entre les modèles de la culture et de la contrainte phytosanitaire doit permettre une conversion entre les unités des variables d'état. Dans cet exemple, le couplage dans le sens culture-contrainte s'effectue en considérant le nombre de spores produites par unité de surface parasitée, et dans le sens contrainte-culture, en considérant la surface occupée par une lésion créée par le parasite.

Le couplage entre les deux modèles constitue une étape cruciale de l'élaboration du modèle final. Il convient de noter ici qu'il est nécessaire de rechercher un équilibre entre le détail apporté à la modélisation de la contrainte phytosanitaire, et celui avec lequel la culture est décrite; un modèle phytopathologique très détaillé, par exemple, serait mal valorisé par un modèle de croissance de la culture trop sommaire. Selon l'objectif qui est poursuivi, le détail à apporter dans cette section du modèle variera. S'il s'agit d'un modèle préliminaire de dynamique de population, une modélisation sommaire de la croissance de l'hôte sera suffisante, et des fonctions de couplage très simples, du type de la figure 5 pourront être utilisées. Si, au contraire, c'est une modélisation tournée vers la simulation des pertes de récolte qui est envisagée, alors des fonctions beaucoup plus complexes de couplage devront être établies, qui font intervenir le concept de dommage occasionné à la culture.

La perte de récolte occasionnée par une contrainte phytosanitaire à une culture peut être attribuée à un ensemble des dommages, qui chacun représentent une perturbation du processus d'élaboration du rendement. Chaque dommage peut être rapporté à un type donné (Boote et al., 1983; Tableau 1), selon la contrainte en cause. Pour que chaque type de dom-

mage puisse être simulé, il est nécessaire que les mécanismes physiologiques de l'élaboration du rendement qui sont affectés soient décrit en détail; en réalité, de tels modèles, où un équilibre est réalisé entre le détail donné au modèle de l'hôte et celui du parasite, sont très rares.

Tableau 1. Typologie des dommages occasionnés aux cultures par les contraintes phytosanitaires (liste simplifiée et non exhaustive; selon Boote et al., 1983).

Type de dommage	exemples de contraintes				
	champignon		insecte	nématode	virus
	biotrophe-nécrotrophe		suceur-défoliateur-autre		
réduction de la population de plantes			+		+
réduction du taux de photosynthèse	+		+		+
accélération de la sénescence foliaire	+				
réduction du rayonnement intercepté	+	+	+	+	+
détournement du flux de photosynthétats		+		+	+
consommation directe de tissus			+		+
réduction de turgescence	+		+	+	+

Dans le cas de la rouille de l'arachide, trois types, au moins, de dommages peuvent être considérés:

- une réduction de la surface photosynthétisante due à la colonisation du feuillage par les lésions,
- un détournement de photosynthétats vers la croissance des colonies du parasite et la production de spores,
- une dérégulation de l'équilibre hydrique au niveau de la feuille.

Pour que ces dommages puissent être simulés, il est donc nécessaire que le modèle de l'hôte comprenne une description détaillée de la photosynthèse, et de l'alimentation hydrique de la plante; le modèle actuel ne permet de prendre en compte que les deux premiers types de dommages envisagés.

Une solution parfois appliquée consiste à incorporer à un modèle de simulation dynamique d'une contrainte phytosanitaire un modèle fixe de régression multiple à partir duquel une estimation du rendement ou de la

Les rectangles représentent des variables d'état, reliées par des flux (flèches continues); le modèle fait intervenir des variables complémentaires (cercles), et des flux d'informations (flèches discontinues) qui commandent leurs variations et leurs effets sur les variables d'états. A chaque intervalle d'intégration (1 jour) l'état du système est réévalué en fonction des règles internes du modèle, et des variations des conditions d'environnement, représentées par des fonctions directrices (barres horizontales marquées d'un point).

Le modèle du parasite est fondé sur un ensemble de données expérimentales acquises soit en laboratoire (développement des lésions), soit en plein champ (dispersion). Le modèle de l'hôte est un modèle sommaire (SUCROS; Van Keulen et al., 1982) qui permet de simuler la croissance et le développement de l'arachide dans des conditions optimales de culture, c'est-à-dire, en l'absence de tout stress hydrique ou nutritionnel. Pour cette raison, il n'est donc possible de prendre en compte qu'une partie seulement des dommages occasionnés à la culture par la maladie. Il convient également de noter que ce modèle comprend également quelques fonctions de couplage permettant de relier le modèle de l'hôte à celui d'une autre maladie importante de l'arachide, la cercosporiose (qui est introduite dans le modèle sous forme d'une fonction directrice).

V. PARAMÉTRAGE DU MODELE

V.1 PARAMETRES INTERNES DU MODELE

Le tableau 2 fournit un exemple de données qui peuvent être directement incorporées dans le modèle sous forme de fonctions. Il s'agit, ici, de résultats concernant le déroulement de différentes étapes du cycle parasitaire de la rouille de l'arachide en fonction de la température. Au cours de l'élaboration du modèle, un équilibre doit être trouvé entre les travaux expérimentaux destinés à fournir les paramètres nécessaires et les travaux de modélisation proprement dit. En principe, c'est par le biais d'une analyse de sensibilité que la précision requise pour la mesure des paramètres est définie. En pratique, cependant, certains paramètres ne peuvent être estimés qu'avec une précision très faible, inhérente au matériel étudié.

températures (°C)							
	18	22	24,5	25,5	27	28,5	30
G	11,6	40,0	57,0	62,7	78,5	67,0	14,0
EI	0,29	0,28	0,34	0,27	0,27	0,11	0
L	29,5	12,5	11,3	11,0	10,5	11,3	-
I	13,5	21,6	-	-	26,5	12,9	-
SP	460	17000	-	-	40500	11300	-

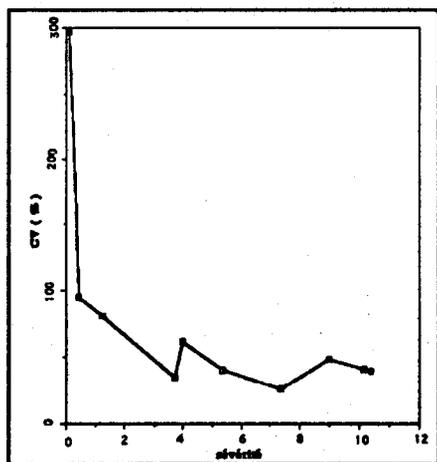
Tableau 2. Effets de la température sur le développement de la rouille de l'arachide (chez une variété sensible). - G : germination des spores [%],

EI : efficacité des infections [lésion.spore-1], - L : durée de la période de latence [jour], - I : durée de la période infectieuse [jour], - SP : intensité cumulée de sporulation [spore.lésion-1].

V.2 INITIALISATION

L'évaluation de l'état initial d'un système peut parfois causer des difficultés, et c'est en particulier le cas pour les contraintes phytosanitaires. En effet, l'initialisation du modèle doit comporter une valeur initiale de la population de parasite; dans une perspective de validation, ce paramètre a une très grande importance, mais sa mesure dans les conditions du champ s'accompagne le plus souvent d'une très forte imprécision, comme l'indique la figure 7.

Figure 7. Evolution du coefficient de variation de la sévérité de rouille en fonction de la sévérité observée. Lorsque la sévérité est inférieure à 1% (abscisses), c'est-à-dire, au début d'une épidémie, le coefficient de variation est habituellement supérieur à 100%.



VI EVALUATION DU MODELE

L'évaluation du modèle obtenu peut être effectuée en plusieurs étapes:

- vérification
- validation
- analyse du comportement du modèle.

L'étape de vérification peut consister en un simple contrôle du programme lui-même. Pour vérifier si le programme exécute bien les instructions dans l'ordre souhaité et selon les règles définies, il est souvent utile de l'alimenter avec des jeux de données factices susceptibles de mettre en évidence d'éventuelles incohérences.

La validation consiste à confronter le modèle, alimenté avec des jeux de données (climatiques, principalement), à des données réelles. Un exemple d'une telle confrontation est donné dans la figure 8, pour le modèle de simulation de la rouille de l'arachide. S'il s'agit d'un modèle comportant une simulation de croissance de l'hôte couplée à celle de la contrainte phytosanitaire, il est utile de tester simultanément des variables de sortie représentant ces deux unités. L'exemple donné indique que les simulations sont acceptables en termes de pentes des courbes et de valeurs maximales atteintes, mais sont loin d'être parfaites. En particulier, le modèle tend à surestimer la croissance de l'hôte - ce qui est logique, s'agissant d'un modèle de croissance dans des conditions optimales.

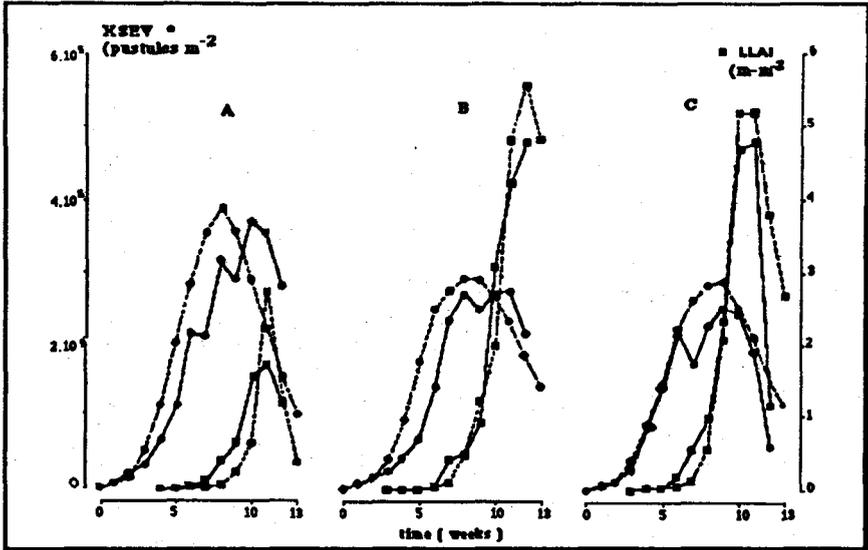


Figure 8. Evaluation d'un modèle de simulation des épidémies de rouille de l'arachide. Comparaison des courbes d'épidémie et de croissance du couvert simulées (traits discontinus) et observées (traits continus) au cours de trois essais d'observation.

La méthodologie qui est mise en oeuvre pour la validation de modèles de simulation de contraintes phytosanitaires est peu développée (Teng, 1981). Certainement, beaucoup serait à acquérir auprès de disciplines étrangères à la protection des cultures, où ces méthodes sont largement utilisées et codifiées.

La validation des modèles de simulation dans le domaine de la protection des cultures se heurte notamment à deux difficultés:

- l'acquisition de données fraîches, indépendantes de la construction du modèle, est souvent extrêmement fastidieuse. Dans de nombreux cas de modèles publiés, la qualité de la validation souffre du manque de données disponibles, recueillies spécialement dans ce but;
- les modèles de simulation des contraintes elles-mêmes (dynamique de populations d'insectes ou d'agents pathogènes) sont souvent extrêmement complexes; ce domaine est trop peu développé encore pour que des normes quant à l'architecture générale de ces modèles aient été largement acceptées et se soient répandues. Cette absence de transparence rend souvent leur évaluation très difficile.

En réalité, la complexité du système envisagé rend parfois illusoire l'espoir d'obtenir des simulations d'une précision élevée, sans la mise en

oeuvre de modèles sophistiqués, et de ce fait, peu transparents. Il peut, alors, s'avérer très utile de mettre en oeuvre des modèles simplifiés, peu ambitieux dans la précision de leurs simulations, mais suffisamment clairs pour qu'un jeu d'hypothèses facilement identifiable puisse y être incorporé, et testé.

Ainsi, dans certains cas, des travaux qui s'apparentent, dans leur démarche, à une analyses de sensibilité, peuvent revêtir la valeur d'une validation. La figure 9 représente les résultats d'une analyse de l'effet de différentes composantes de résistance sur la dynamique des épidémies de rouille de l'arachide. Cette analyse indique une hiérarchie claire entre quatre paramètres du modèle qui représentent, ensemble, le niveau de résistance d'une variété donnée. Ce résultat se trouve, par ailleurs, être en accord avec des expérimentations de laboratoire ou de plein champ; ce qui suggère qu'un tel modèle pourrait apporter une assistance dans la sélection des géniteurs et des variétés pour la résistance à la maladie.

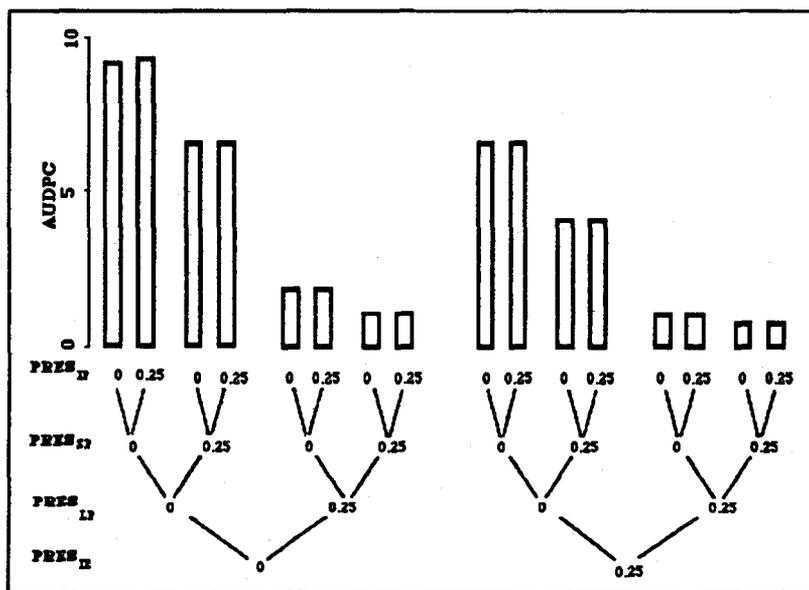


Figure 9. Comparaison des effets des variations des composantes de résistance sur les épidémies de rouille de l'arachide. Les composantes de résistance ($RRES_{1E}$, $RRES_{1P}$, $RRES_{SP}$ et $RRES_{1P}$) sont des paramètres du modèle. Les épidémies sont représentées par des aires sous les courbes de sévérité simulées (AUDPC). L'effet de $RRES_{1P}$ est très fort.

VII BIBLIOGRAPHIE

- BOOTE, K.J., JONES, J.W., MISHOE, F.W. & BERGER, R.D., 1983. Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. *Phytopathology* 73: 1581-1587.
- RABBINGE, R. & RIJSDIJK, F.H., 1981. Disease and crop physiology: a modeller's point of view. In: effects of disease on the physiology of the growing plant. P.J. Ayres, Ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge pp. 201-220.
- RAPILLY, F. & JOLIVET, E., 1976. Construction d'un modèle, EPISEPT permettant la simulation d'une épidémie de *Septoria nodorum* Berk. sur blé. *Revue de Statistiques Appliquées* 24: 31-60.
- TENG, P.S., 1985. A comparison of simulation approaches to epidemic modelling. *Annu. Rev. Phytopathol.* 23 : 351-379.
- TENG, P.S., 1981. Validation of computer models of plant disease epidemics: a review of philosophy and methodology. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 88: 49-63.
- TENG, P.S., BLACKIE, M.J. & CLOSE, R.C., 1977. A simulation analysis of crop yield loss due to rust disease. *Agric. Syst.* 2: 189-198.
- TENG, P.S., BLACKIE, M.J. & CLOSE, R.C., 1980. Simulation of the barley leaf rust epidemic: structure and validation of BARSIM I. *Agric. Syst.* 5: 85-103.
- TENG, P.S. & BOWEN, K.L., 1985. Disease modelling and simulation. In: *The cereal rusts Vol. II*. A.P. Roelfs & W.R. Bushnell, Eds. Academic Press, New York pp 435-466.
- VANDERPLANK, J.E., 1975. Principles of plant infection. Academic Press. New York. London, 216 p.
- VAN KEULEN, H., PENNING DE VRIES, F.W.T. & Drees, E.M., 1982. A summary model for plant growth. In: *Simulation of plant growth and crop production*. F.W.T. Penning de Vries & H.H. Van Laar, Eds. Pudoc, Wageningen pp 87-97.
- WAGGONER, P.E., HORSFALL, J.G. & LUKENS, R.J., 1972. EPIMAY, a simulator of southerncorn leaf blight. *Bull. Connecticut Agr. Exp. Sta.*, New Haven, N°279, 84 p.
- ZADOKS, J.C., 1971. Systems analysis and the dynamic of epidemics. *Phytopathology* 61: 600-610.
- ZADOKS, J.C. & RABBINGE, R., 1985. Modelling to a purpose. In: *Advances in plant pathology. Vol. 3. Mathematical modelling of crop diseases*. C.A. Gilligan, Ed. Academic Press, London pp 231-244.
- ZADOKS, J.C. & SCHEIN, R.D., 1979. *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press. New York 427 p.

APPROCHE MATHÉMATIQUE D'UN EQUILIBRE BIOLOGIQUE A TROIS ANTAGONISTES : EXEMPLE DU PALMIER A HUILE, DE *COELAENOMENODERA MINUTA* UH. ET DE SES PARASITES D'OEUF

René LECOUSTRE et Philippe DE REFFYE

I RÉSUMÉ

Les recherches menées initialement à la demande de l'IRHO/CIRAD et d'un organisme de développement agricole de Côte d'Ivoire ont eu pour but d'appliquer à la biologie les méthodes mathématiques de la recherche opérationnelle afin de développer de nouveaux types de modèles d'interactions biologiques performants et qui simulent au mieux les données naturelles observées.

Les modèles mis au point reposent sur la mise en équations d'interaction des paramètres biologiques clés des espèces ou des variétés antagonistes. Le modèle de dynamique des populations permet, en outre, de simuler, en vue de leur optimisation, les résultats d'interventions par pulvérisation de pesticides.

II INTRODUCTION ET HISTORIQUE

L'IRHO, Département Oléagineux du CIRAD, mène depuis 1972 un programme de lutte intégrée contre *Coelaenomenodera minuta*, principal ravageur de *Elaeis guineensis* en Afrique Occidentale. Ce programme de recherches a été entrepris à la demande de PALMINDUSTRIE, Société de Développement du Palmier à Huile en Côte d'Ivoire.

Des études sur la dynamique des populations au champ ont montré que, très généralement, les générations successives ne se recouvrent pas, ce qui entraîne une discontinuité dans les cycles préjudiciable au développement des parasites de larves et d'oeufs; ce sont ces derniers qui assurent l'essentiel du contrôle naturel des populations du ravageur.

L'introduction, en Côte d'Ivoire, de parasites larvaires d'autres hispines de palmacées de pays étrangers n'a pas permis de contrôler biologiquement le ravageur. Il est donc actuellement nécessaire d'intervenir avec une gamme étendue d'insecticides, pour varier leur utilisation, mais aussi les utiliser avec prudence et économie.

Pour optimiser leur emploi, une connaissance des interactions plante ravageur, hôte parasites, est donc indispensable ainsi que leur quantification. Seule une modélisation mathématique adaptée au problème permet, en effet, de simuler la dynamique des populations puis d'y tester l'action éventuelle d'interventions humaines ou d'accidents à effets connus.

III MODELISATION DES INTERACTIONS BIOLOGIQUES DE BASE

III.1 MESURE ET SIMULATION DE L'ATTAQUE DU PALMIER A HUILE PAR SON RAVAGEUR

III.1.a Etudes préliminaires

III.1.a-1 Distribution du nombre d'oeufs par lieu de ponte

Les femelles du ravageur pondent leurs œufs par groupes de 1 à 12. Les lieux de ponte les plus fréquents sont ceux à 2 ou 3 œufs.

La loi mathématique qui a servi à modéliser numériquement cette distribution caractéristique rend compte d'un phénomène de fragmentation de stocks, c'est la loi lognormale [1].

III.1.a-2 Architecture et croissance du palmier à huile

Le stipe du palmier est formé à partir d'un bourgeon orthotrope à croissance continue qui émet des palmes composées d'environ 300 folioles, les 100 de la partie médiane sont sensiblement de surface semblable. L'âge d'une palme est assez bien déterminé par sa localisation dans la couronne.

En première approximation, durant la phase continue de croissance de la plante (5-25 ans), la plus exposée aux attaques du ravageur, la surface foliaire d'une plantation reste constante par renouvellement des palmes tombées ou coupées.

III.1.b Mise en évidence du processus aléatoire de contagion

Nous avons pris le lieu de ponte comme unité d'attaque du ravageur sur le végétal. On distingue alors des attaques récentes, caractérisées par la présence d'au moins un œuf non incubé ou d'un parasite d'œuf vivant dans le lieu de ponte, et des attaques anciennes.

On peut schématiser, biologiquement, l'activité de ponte du ravageur comme suit: les œufs sont pondus sur les folioles selon une certaine loi d'arrivée, ils restent des œufs vivants jusqu'à la fin de l'incubation, jusqu'à ce qu'ils meurent, etc...

Nous nous situons dans un processus de file d'attente, bien connu en recherche opérationnelle. Sans perturbation biologique, le nombre de lieux de ponte vivants devrait alors suivre, selon cette théorie, une loi de Poisson.

Dans notre cas particulier, une forte déviation systématique est mise en évidence entre cette loi théorique et les distributions observées: il n'y a plus de folioles indemnes de lieux de ponte mais aussi plus de folioles très infestées pour une même attaque moyenne.

Un phénomène de contagion, mis en évidence par observation de folioles plus ou moins infestées, permet d'expliquer cette déviation. Le nombre de lieux de ponte déjà présents sur la foliole affecte, en augmentant sa probabilité, la loi d'arrivée des nouveaux cas.

La loi mathématique engendrée par ce phénomène est de la famille de la loi binômiale négative (LEGAY [4] et NEYMANN [8]). Cette loi est également très proche de celle du processus de croissance des populations développé par KENDALL [2].

Ce seul modèle mathématique, dont les paramètres se calculent aisément à partir de la moyenne et de la variance des distributions observées, permet de décrire et d'expliquer la distribution et la répartition

des attaques du ravageur sur un palmier, de les simuler en interfaçant un logiciel d'architecture des plantes [9]. Les feuilles les plus basses sont les plus attaquées car ce sont les plus vieilles, il y a accumulation des attaques dans le temps, contagion entre les attaques ce qui augmente encore le précédent phénomène.

III.2 MESURE DU PARASITISME ET DE LA MORTALITÉ DES OEUFS

L'observation montre qu'il existe des lieux de ponte vierges d'attaque de parasites, ou sans mortalité; d'autres, au contraire, entièrement parasités, ou morts ainsi que tous les cas intermédiaires. L'attaque des parasites, ou la mortalité sont donc aléatoires.

La distribution de ces événements doit, théoriquement, être binômiale. Or la confrontation des classes observées à cette distribution théorique fait apparaître une divergence systématique que ce soit pour des lieux de ponte à 2, 3, 4 ou 5 œufs.

En effet, les classes où tous les œufs sont parasités, ou morts, celles où tous les œufs sont sains sont, contrairement à la distribution binômiale, les plus représentées. Il faut donc en conclure l'existence d'une autocorrélation pour ces événements, phénomène déjà décrit par REFFYE [9].

On suppose, pour modéliser cette autocorrélation, que la réalisation d'un événement à l'étape K ne dépend que de la réalisation de l'étape précédente, K-1. Appelons r le taux de couplage, c'est-à-dire la probabilité pour que les événements des étapes K-1 et K soient les mêmes sans que le hasard en soit la cause. Les événements à K-1 et K se réaliseront avec les probabilités suivantes:

$$P(1,1) = rb + (1-r)b^2$$

$$P(1,0) = b(1-r)(1-b)$$

$$P(0,1) = (1-b)(1-r)b$$

$$P(0,0) = r(1-b) + (1-r)(1-b)^2$$

On remarque que si $r = 0$, on obtient la distribution binômiale $(2,b)$ et que si $r = 1$ le couplage est total et seules sont représentées les classes extrêmes.

Les probabilités pour des groupes de 3, 4, 5, 6 et 7 événements successifs se calculent aussi aisément. Les ajustements des classes observées à cette distribution théorique, dont les paramètres sont calculés par le maximum de vraisemblance confirment la validité de ces hypothèses.

Notons que les événements œuf mort et œuf parasité peuvent être confondus en un seul événement œuf détruit, les ajustements restent alors tout à fait satisfaisants, ce qui laisse pressentir une corrélation entre ces deux événements.

Des expériences biologiques conduites dans ce sens mettent en évidence que les parasites s'attaquent indifféremment à des œufs normaux ou non embryonnés, ces derniers se dessèchent généralement s'ils ne sont pas parasités et sont comptabilisés alors comme œufs morts. On montre également que certains œufs parasités ne permettent pas le développement du parasite, que celui-ci y meure ou que l'œuf, trop lésé, se décompose ou se dessèche avant le développement total du parasite.

Dans les lieux de ponte à 3 œufs on peut alors ajuster parfaitement, en calculant les 6 paramètres par le maximum de vraisemblance, les 10 classes observées à la loi théorique explicitée ci-dessous pour des lieux de ponte à 2 œufs.

Solent P, M, D les probabilités respectives des événements parasité, non embryonné ou anormal, dessèchement après parasitisme et R_p, R_m, R_d leurs taux de couplage respectifs. Nous noterons v, un œuf vivant, m un œuf mort et p un œuf parasité lors de l'observation.

Les événements composés se réalisent avec les probabilités suivantes:

$$P(v,v) = (1-P)((1-R_p)(1-P)+R_p)(1-M)((1-R_m)(1-M)+R_m)$$

$$P(v,m) = (1-P)((1-R_p)(1-P)+R_p)2M(1-M)(1-R_m)+2P(1-R_p)(1-P)D(1-M)$$

$$P(m,m) = (1-P)((1-R_p)(1-P)+R_p)M((1-R_m)M+R_m)$$

$$+ 2P(1-R_p)(1-P)(1-D)M+P((1-R_p)P+R_p)D((1-R_d)D+R_d)$$

$$P(p,m) = 2P(1-R_p)(1-P)(1-D)M+P((1-R_p)P+R_p)2D(1-D)(1-R_d)$$

$$P(p,v) = 2P(1-R_p)(1-P)(1-D)(1-M)$$

$$P(p,p) = P((1-R_p)P+R_p)(1-D)((1-R_d)(1-D)+R_d)$$

IV. MODELISATION ET SIMULATION DE LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS DE COELAENOMENODERA ET DES INTERACTIONS AVEC SES PARASITES D'œUFS ET LE PALMIER A HUILE

IV.1 ETUDE DE L'EVOLUTION DE CERTAINS PARAMETRES CLES EN CONDITIONS SEMI NATURELLES

D'importantes études biologiques ont été réalisées sur la reproduction du ravageur, la réduction de ses populations et sur les évolutions respectives des populations au sein des mêmes plantations.

Ces études précisent les convergences d'évolution de divers paramètres clés de la dynamique des populations (LECOUSTRE, MARIAU comm. pers.) tout en démontrant l'existence de différences systématiques de fécondité moyenne liées aux arbres sur lesquels sont installées les cages d'élevage du ravageur. La fécondité moyenne des femelles du ravageur, la mortalité indépendante du parasitisme sont très liées au climat, en particulier au déficit de saturation de l'air; le taux de parasitisme évolue simultanément sur tous les sites d'une même plantation.

Ces considérations montrent que même si les mesures diffèrent d'un palmier à l'autre, les évolutions des populations sont synchrones. Ainsi la plante, son ravageur et ses parasites d'œufs forment un système clos au sein d'une plantation de palmiers à huile.

IV.2 MODELISATION D'UN EQUILIBRE BIOLOGIQUE A TROIS ANTAGONISTES PALMIER, COELAENOMENODERA, PARASITES

Les fondements théoriques des équilibres biologiques ont été établis par LOKTA, VOLTERRA et KOSTITZIN [3], ils reposent sur un certain nombre d'hypothèses indispensables qui ne sont pas en accord avec le problème présent. En particulier, les phénomènes de croissance des populations d'insectes ne sont pas continus, la dynamique de la surface foliaire des palmiers relève plutôt d'un processus d'usure et de renouvellement que d'un processus de naissance et de mort.

IV.2.a MODELISATION DE LA CROISSANCE DU PALMIER

La surface foliaire est comptabilisée en unités qui correspondent à la consommation d'un ravageur au cours de son développement; la surface d'un palmier est alors d'environ 15 000 "équivalents *Coelaenomenodera*". Les attaques sont alors modulées selon les surfaces disponibles et donc selon le degré de défoliation et l'âge des palmes.

La croissance du palmier dans sa phase continue produit une surface foliaire sensiblement constante, le modèle de croissance de la plante comportera donc un palier qui résulte du renouvellement approximativement constant du feuillage.

IV.2.b MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS DE COELAENOMENODERA

Si on part du temps 0, avec un effectif F_0 de ravageurs au stade œufs: ceux-ci vont éclore, se développer en larves, nymphes et finalement adultes qui vont, à leur tour, se mettre à pondre selon une courbe caractéristique de l'espèce. Cette courbe est la réponse à l'impulsion F_0 par analogie à la théorie du signal (soit $G(x)$ cette courbe).

Le développement d'une population du ravageur, en système clos, sans autre contrainte qu'une mortalité $(1-C_i)$ à chaque instant donnerait au temps T:

$$F_T = \sum_{i=0}^{T-1} \sum_{j=1}^{T-i} C_j F_i G(T-i)$$

IV.2.c MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DES PARASITES d'OEUFS

La connaissance biologique de ces parasites est moins précise que celle concernant le ravageur. Cependant les données acquises sur des espèces voisines permettent de considérer que le développement est équivalent à celui de *Coelaenomenodera*, avec un cycle biologique trois fois plus court.

IV.2.d ETUDE DE L'EQUILIBRE COELAENOMENODERA PALMIER

A chaque ponte du ravageur, on fait attaquer le feuillage du palmier par les effectifs larvaires survivants, chaque palme est défoliée proportionnellement à sa surface restée indemne.

Avec cette seule interaction, on remarque la disparition totale des cycles de population que l'on observe dans la nature. La limitation des populations du ravageur donne lieu à un palier.

IV.2.e ETUDE DE L'EQUILIBRE COELAENOMENODERA PARASITES

On confronte chaque émergence de groupes de parasites avec le stock d'œufs dans lesquels ils peuvent pondre. Les modalités de l'attaque sont telles que la recherche des œufs par les parasites est très active.

Avec cette seule interaction, les cycles naturels sont restitués fidèlement; la localisation et l'ampleur des pics de population sont respectées.

IV.3 APPLICATIONS PRATIQUES

Des simulations effectuées, à partir de populations naturelles observées sur une parcelle de plantation, montrent que la variation de la valeur d'un seul des paramètres du modèle peut modifier notablement l'évolution conséquente de la dynamique des populations.

La souplesse de ce modèle permet, en outre, de simuler toutes sortes d'accidents et d'interventions humaines qui modifie l'un ou l'autre des paramètres, en particulier les interventions chimiques par pulvérisation de pesticide.

Le seul stade vulnérable aux insecticides est le stade adultes, lorsque ceux-ci se trouvent à l'extérieur des feuilles. Les adultes des parasites sont eux aussi vulnérables dans ce cas.

L'objectif actuel des traitements est de tuer le maximum d'adultes du ravageur, avant que les femelles n'aient eu le temps de pondre. On remarquera qu'on ne tient pas compte des données biologiques relatives aux réductions naturelles de populations, en particulier de l'action des parasites oophages. Or, dans le cas d'un équilibre à trois antagonistes, l'efficacité d'une intervention est complexe car elle entraîne des mortalités chez le ravageur et ses parasites. L'efficacité différée du traitement est parfois alors inverse de l'efficacité attendue de l'effet instantané.

Pour simuler une intervention, on caractérise le traitement appliqué par son efficacité instantanée sur le ravageur et ses parasites ainsi que par ses dates de réalisation. En faisant alors varier empiriquement le nombre et les dates des interventions, on trouve des solutions d'intervention meilleures que d'autres.

V. CONCLUSION

La modélisation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur d'Afrique de l'Ouest a permis de mettre en évidence un certain nombre de paramètres nécessaires pour décrire entièrement la situation. Les phénomènes d'accumulation et de contagion ont été dégagés.

L'enchaînement des événements liés au parasitisme, au dessèchement des œufs a été entièrement décrit et les équations de probabilité des événements posées. Il est alors possible de donner un meilleur estimateur de la mortalité hors parasitisme et de fournir le seul estimateur abordable de la mortalité des parasites.

Il a été possible de réaliser, à partir des hypothèses biologiques issues des observations effectuées depuis plusieurs années, un modèle discret d'équilibre biologique à trois entre le palmier à huile, le *Coelaenomeno-dera minuta* et ses parasites d'œufs. Ce modèle repose sur des paramètres clés et des équations qui rendent compte de la croissance, du développement des populations et de leurs interactions.

Ce modèle doit permettre de réaliser des essais d'optimisation d'interventions chimiques.

VI BIBLIOGRAPHIE

[1] AITCHISON J., BROWN J.A.C., 1981. The lognormal distribution with special references to its uses in economics.

University of Cambridge, Dept of Applied Economics, Monograph:5 Cambridge University Press, U.S.A., 1981.

[2] KENDALL M.G., 1945. Naissance de populations. *Biometrika*, 35, p. 6-15, 1945.

[3] KOSTITZIN V.A., 1939. *Mathematical Biology*. Harrap, London, 1939.

[4] LEGAY J.M., 1963. A propos de la répartition de la Cécydomyie du hêtre, *Mikiola fagi*. Un exemple de distribution binômiale négative. *Ann. Epiphyties*, 14 (1), p49-56, 1963.

[5] LECOUSTRE R., de REFFYE Ph., 1984. Contribution à la mise au point d'une lutte intégrée contre *Coelaenomenodera minuta* Uh., principal ravageur de *Elaeis guineensis* en Afrique de l'Ouest - Modélisation de la dynamique des populations de *Coelaenomenodera* et applications pratiques. *Oléagineux*, Vol. 39, n°10, Octobre 1984.

[6] LECOUSTRE R., de REFFYE Ph., 1986. Contribution à la mise au point d'une lutte intégrée contre *Coelaenomenodera minuta* Uh., principal ravageur de *Elaeis guineensis* en Afrique de l'Ouest - Approche mathématique d'un équilibre biologique naturel palmier, *Coelaenomenodera minuta* et ses parasites. Document IRHO, 226 pp., LA ME BP13 BINGERVILLE Côte d'Ivoire.

[7] LECOUSTRE R., de REFFYE Ph., 1986. Contribution à la mise au point d'une lutte intégrée contre *Coelaenomenodera minuta* un., principal ravageur de *Elaeis guineensis* en Afrique de l'Ouest - Théorie de la mesure et de la simulation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur - Théorie de la mesure et de l'estimation de l'extension des attaques du ravageur sur les plantations de palmiers à huile - applications pratiques. *Oléagineux*, Vol. 41, n°8-9, Août-Septembre 1986.

[8] NEYMAN , 1965. In: *Problèmes d'Écologie: l'échantillonnage des peuplements animaux des milieux terrestres*. Masson et C^{ie}. Paris, 1965.

[9] de REFFYE Ph., 1979. Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *Coffea robusta*. Thèse Université Paris Sud, Centre d'Orsay, 17 Sept. 1979.

TRANSMISSION DES FILARIOSES : DU MODELE DESCRIPTIF AU MODELE HEURISTIQUE

Gaston PICHON

Les Filaires adultes sexuées parasitent des hôtes vertébrés. Au cours de leur vie (de l'ordre de dix ans), les femelles pondent des millions d'embryons, ou microfilaries, qui doivent être absorbées par des Arthropodes hématophages (Acariens, Tiques, Simulies, Moustiques...). Au cours de leur développement chez le vecteur (environ deux semaines), les microfilaries ont à affronter différents obstacles suivant le type de celui-ci : dents pharyngiennes, coagulation du sang, membrane péritrophique, paroi stomacale, ... etc, et d'autres réactions de l'hôte (lyse ou encapsulation), y compris la mort du vecteur par hyper-parasitisme (qui équivaut à un suicide collectif).

Une approche quantitative, d'abord globale, a été menée (Pichon, 1974) sur le système *Aedes polynesiensis* *Wuchereria bancrofti*, responsable de l'endémie filarienne en Polynésie. Elle a consisté à nourrir des cages de moustiques sur des volontaires présentant différents niveaux de microfilarémie, et à comparer le nombre moyen de microfilaries absorbées $X = E(x)$ au nombre moyen de larves infectantes $Y = E(y)$, à l'issue de la période intrinsèque de développement du parasite.

On observe que les points (X, Y) paraissent suivre une hyperbole, d'équation :

$$Y = \frac{j \cdot h \cdot X}{j \cdot X + h} \quad (1)$$

Ce modèle présente plusieurs avantages :

a) sa simplicité.

b) des paramètres aisément interprétables en termes parasitologiques :

- h, asymptote de la courbe, représente le nombre moyen maximum de larves infectantes qu'un vecteur peut héberger.

- j est la probabilité de réussite des parasites quand leur nombre moyen tend vers zéro.

Grâce à ces deux paramètres, on peut donc mesurer et comparer objectivement la compatibilité réciproque de différents systèmes vecteur-parasite.

c) la nature homographique de l'équation de l'hyperbole: si X est une fonction (1) de V, et si V est une fonction (1) de W...etc, la courbe représentative de Y en fonction de V, W...etc demeure une hyperbole. Ce modèle "gigogne" pourrait donc s'appliquer à un parasite qui subirait différents barrages (comme ceux déjà cités) au cours de son développement chez son vecteur.

C'est effectivement ce que l'on observe dans le travail de Brengues et Bain (1972), qui ont limité leur champ d'étude au franchissement de la paroi stomacale pour différents couples parasite-vecteur.

Cependant, un tel modèle demeurerait purement descriptif, et difficilement interprétable, donc inexploitable épidémiologiquement : il permettait peut-être de prévoir l'évolution de la transmission du parasite pour un individu complètement isolé, entouré d'une population stable de vecteurs, mais l'extrapolation à l'échelle d'un village exigeait de comprendre les mécanismes susceptibles d'engendrer ce premier résultat.

Il convenait d'explorer :

- la distribution de fréquences des moustiques ingérant différents nombres de microfilaries.
- la probabilité pour un parasite de traverser la paroi stomacale d'un moustique.
- la pathogénicité parasitaire pour l'hôte.

Les essais préliminaires montrant une importante hétérogénéité, il fallait, contrairement à ce qui avait été pratiqué par nos prédécesseurs, mettre en oeuvre des effectifs importants : un travail en collaboration (avec mes collègues Jacques Prod'hon, François Rivière et tout le laboratoire d'Entomologie de l'Institut Malardé à Tahiti) a permis la dissection de plus de 3000 moustiques et le dénombrement de leurs parasites aux différents stades de leur évolution.

I MODÉLISATION DE L'INGESTION DES PARASITES.

Les travaux antérieurs sur le thème de la distribution des parasites chez les moustiques débouche sur des interprétations hétéroclites : cette distribution était qualifiée d'aberrante et de capricieuse, ou considérée comme un mélange de distributions (dont une seule serait capable d'évoluer chez l'hôte), ou -le plus souvent- comme log-normale (avec 2 ou 3 paramètres), sans autre justification que celle liée au vocable "normal" (la "norme" n'est pas forcément gaussienne, surtout pour un parasite !).

Pour chacune des huit distributions étudiées (Pichon, Prod'hon et Rivière, 1980), on constate que les fréquences successives, loin d'être imprévisibles, varient d'une façon exponentielle. On obtient un excellent ajustement de la distribution géométrique :

$$\text{Prob } \{x=i\} = (1 - R) R^i \quad (i=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

$$\text{de raison } R = \frac{\mu}{\mu + 1}$$

On vérifie que cette distribution est suffisamment générale, car elle s'applique aussi aux distributions publiées pour d'autres systèmes parasite-vecteur, et qu'elle n'a aucun rapport avec l'évolution ultérieure du parasite : on l'observe aussi bien pour des couples naturels qu'expérimentaux.

C'est un cas particulier remarquable (paramètre $k = 1$) de la distribution binomiale négative (BN), considérée par Crofton (1971) comme le modèle fondamental du parasitisme. Une valeur infinie de k correspond à la distribution de Poisson, et l'inverse de ce paramètre, mesure la "surdispersion", la contagiosité, l'agrégation (clumping, togetherness) qui caractérise un système hôte-parasite donné. Au niveau d'un foyer de filariose de Bancroft, par exemple, la distribution des microfilarémies est fortement surdispersée ($k = 0.3$) et on rencontre le même indice en Polynésie, en Afrique ou dans l'Océan Indien, dans des conditions épidémiologiques extrêmement différentes (Pichon et al., 1977).

Bien que cette distribution BN soit produite par des situations aisément traduisibles en termes parasitologiques, May (1977) reconnaît que très généralement elle est employée pour des raisons purement phénoménologiques. Nous faisons exception, car la mise en évidence d'un paramètre k statistiquement indistinguable de 1 (écart-type : 0.06) autorise à envisager une interprétation théorique simple pour la distribution observée : elle pourrait résulter de la combinaison de deux processus stochastiques de Poisson, qui entraîneraient dans les capillaires des "files d'attente", dont on démontre que la taille suivrait une distribution géométrique (voir animation). Ceci est concevable, compte-tenu de la taille relative des microfilaires et des capillaires où les moustiques les absorbent. D'ailleurs la formation de "grappes" avait déjà été observée par Gordon & Lumsden (1939).

II. MODÉLISATION DE LA PERMÉABILITÉ STOMACALE.

La non-proportionnalité entre le nombre de parasites ayant réussi à franchir la paroi stomacale d'un vecteur et le nombre de parasites qu'il a ingérés peut être représentée par un modèle simple, qui s'approche de la distribution géométrique. On suppose que chaque parasite qui réussit affecte d'un facteur constant r la probabilité de réussite du suivant (Prod'hon, Pichon, Rivière, 1980).

La "perméabilité" pour le x ème parasite sera de la forme:

$$\text{perm}(x) = r \cdot \text{perm}(x-1) = p_1 \cdot r^{x-1} \quad 0 < p_1, r < 1 \quad (3)$$

où p_1 est la perméabilité élémentaire pour le premier parasite.

Une exception d'importance concerne le couple *Anopheles gambiae* - *W. bancrofti*, responsable de l'endémie en Afrique de l'Ouest (Bregues et Bain,). Dans ce cas, le rendement parasitaire, au lieu de diminuer (cas général : limitation), augmente avec le nombre de parasites ingérés (facilitation). Le modèle précédent demeure applicable, en remplaçant la probabilité de réussite par la probabilité d'échec.

Le nombre attendu de parasites passés y_L pour x microfilaires ingérées suit une régression exponentielle asymptotique (loi de Gause) :

$$y_L = \frac{p_1}{1-r} (1-r)^x \quad (4)$$

Pour la facilitation, on aura :

$$y_F = x - y_L \quad (4')$$

L'adéquation de ce modèle aux données observées se montre satisfaisante.

D'autre part, nous avons calculé que la combinaison de ce modèle à une distribution BN de moyenne X et d'exposant k donne

$$Y = \frac{p_1}{1-r} \left[\frac{1}{(1-r)X+k} \right]^k \quad (5)$$

Pour $k = 1$ (distribution géométrique), en écrivant $j = p_1$ et $h = \frac{p_1}{1-r}$, on obtient la fonction homographique initiale.

Empirique au départ, l'équation (1) acquiert donc le statut de modèle théorique. Ce résultat est également satisfaisant parce qu'il en découle pour l'ensemble des modèles une certaine cohérence.

III. MODÉLISATION DE LA MORTALITÉ VECTORIELLE DUE AU PARASITISME

Par analogie avec les modèles exponentiels de survie en fonction du temps, on peut supposer que chaque parasite supplémentaire affecte d'une manière constante la probabilité de survie du vecteur. (Pichon, Prod'hon, Rivière, 1975). Celle-ci serait donc une fonction exponentielle de la charge parasitaire x :

$$s = \frac{N'}{N} = m.t^x \quad 0 < m, t < 1 \quad (6)$$

où m est la survie naturelle pendant la période intrinsèque de développement parasitaire, et t la probabilité de survie qui découle de la présence d'un parasite.

Cette loi simple donne une description satisfaisante des mortalités observées.

D'autre part, ce modèle présente une propriété intéressante : on calcule que, si on l'applique à une distribution BN de moyenne X et de paramètre k , la distribution résultante est une BN de même paramètre k et de moyenne X' , avec à nouveau la relation homographique du type (1) :

$$X' = \frac{kX}{X(1-t) + k} \quad (7)$$

d'où l'on peut tirer t :

$$t = \frac{X'(X+k)}{X(X'+k)} \quad (8)$$

Cette relation permet d'estimer la pathogénicité d'un parasite pour son vecteur dans les conditions naturelles. Fondée jusqu'alors principalement sur des observations de laboratoire, (pour lesquelles nous trouvons effectivement un paramètre t proche de 0.95), celle-ci était généralement sous-estimée, voire niée par certains auteurs, alors que l'on calcule que l'indice t est de l'ordre de 0.7, ce qui représente une mortalité différentielle proche de 90 % pour un fardeau dépassant 5 parasites.

La survie vectorielle globale est donnée par :

$$\frac{N'}{N} = m \left[\frac{k}{X(1-t) + k} \right]^k \quad (9)$$

Par le produit : $Y \cdot \frac{N'}{N}$ des équations (5) et (9), on peut donc calculer comment évolue la transmission au niveau d'un foyer subissant une endémie stable, et élaborer une stratégie antifilarienne adaptée. (Pichon, Prod'hon, Rivière, 1980)

On constate que la facilitation et la limitation produisent des situations épidémiologiques fondamentalement différentes : dans le premier cas, il y a une forte instabilité de l'endémie, qui explique l'aspect dispersé des foyers en Afrique, et la relative facilité pour l'éradiquer (le plus souvent indirectement, grâce à la lutte antipaludique qui s'attaque au même vecteur). La limitation au contraire, est analogue à un effet de feed-back : les éradications spontanées étant improbables, les foyers ont tendance à être jointifs, et une prophylaxie de masse qui réduit la population parasitaire entraîne pour les parasites qui subsistent des chances supérieures de survie. (Pichon, et al, 1974)

IV. CONCLUSION

Cette présentation s'est voulue davantage didactique que scientifique : plutôt qu'un exposé logique, allant du plus simple au plus complexe, nous avons préféré retracer le cheminement -parfois sinueux- d'une recherche. A partir d'un modèle global empirique et difficilement interprétable a priori, mais dont les propriétés nous séduisaient et nous "interpelaient", il a paru nécessaire de disséquer (au propre comme au figuré) les mécanismes qui pouvaient l'engendrer. Il s'est avéré qu'un modèle à la fois très simple et reposant sur des hypothèses biologiquement sensées (la fonction exponentielle / géométrique) était capable de rendre compte de ces mécanismes aux différents niveaux : processus stochastiques de répartition des parasites dans les capillaires, distribution des prises de microfilaires par les vecteurs, perméabilité de la paroi stomacale, et mortalité vectorielle due au parasitisme. Il en découle pour l'ensemble une certaine cohérence, et une certaine confiance pour utiliser ces résultats dans la stratégie anti-filarienne.

V. BIBLIOGRAPHIE

- BRENGUES, J., BAIN, O. (1972) Cah.O.R.S.T.O.M., sér.Ent.méd. Parasitol., 10 : 235-50.
- CROFTON, H.D. (1971) Parasitology, 75:343-64.
- GORDON, R.M., LUMSDEN, W.H.R (1939) Ann.trop.Med.Parasit., 33 : 259-78.
- MAY, R.M. (1977) Parasitology, 75, 259-76.
- PICHON, G. (1974) Comptes Rendus Acad.Sci. (Paris), 278 : 3095-97.
- PICHON, G.et al. (1977) Tropen Med und Parasitology, 26 : 37-53.
- PICHON, G.et al. (1974) Bull. Org. mond. Santé, 51:517 - 24 .
- PICHON G., PROD'HON J., RIVIERE F. (1980) Comptes Rendus Acad. Sci. (Paris), (D) 290 : 1011-13.
- PICHON G., PROD'HON J., RIVIERE F. (1980) Comptes Rendus Acad. Sci. (Paris), (D) 290 : 1011-13.
- PICHON G., PROD'HON J., RIVIERE F. (1980) Cah. ORSTOM, série Ent. méd. Parasitol., 1:24-47
- PROD'HON J., PICHON G., RIVIERE F. (1975) multigraphié OMS/WHO/FIL/75.139, 24 p

MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS DE VERS DE TERRE GEOPHAGES DE LA SAVANE DE LAMTO (COTE D'IVOIRE):LE MODELE SOLTROP

Serge MARTIN

I INTRODUCTION.

Les sols peuvent être considérés comme des systèmes hiérarchisés dont les éléments sont distribués selon des échelles de temps et d'espace qui augmentent avec leur taille. Le climat et le substrat géologique sont situés au niveau supérieur de cette structure et, en conséquence, constituent les facteurs déterministes les plus importants. Lorsque l'on descend dans cette hiérarchie on trouve ensuite les systèmes biologiques, lesquels recouvrent plusieurs niveaux.

Les vers constituent généralement la principale biomasse animale dans les sols dès lors que le gel ou la sécheresse ne limitent pas leurs populations. Ils remplissent un rôle important dans l'élaboration et la conservation de la structure physique du sol aussi bien que dans la régulation du cycle du carbone et des nutriments. Ainsi les vers et la drilosphère (c'est à dire le sol et la microflore soumis à leur influence) forment la partie essentielle de plusieurs niveaux hiérarchiques du "système sol".

La volonté immédiate de synthétiser des connaissances issues tantôt d'observations de terrain, tantôt d'expériences en laboratoire et d'en éprouver la cohérence, mais aussi le but plus lointain de mieux comprendre le fonctionnement de l'écosystème entier nous ont conduits à

juger nécessaire de disposer d'un outil qui permette de formuler avec précision et de simuler sur de longues périodes les propriétés de la drilosphère et de ses principales composantes.

Le modèle SOLTROP que nous présentons s'appuie sur divers travaux réalisés dans la savane de Lamto en Côte d'Ivoire et, en particulier, sur ceux concernant le ver de terre géophage *Millsonia anomala*. Cette espèce représente à elle seule de 40 à 60% de la biomasse de vers de terre dans les différents faciès de savane. Plusieurs années d'échantillonnage sur le terrain et d'expérimentation en laboratoire ont permis de bien connaître le mode de vie de *Millsonia anomala*, la dynamique de ses populations et les divers éléments de ses bilans énergétiques (Lavelle, 1978)

II LE SYSTEME NATUREL

II.1 SITUATION, CLIMAT ET PAYSAGE

La station d'Ecologie de Lamto est située à la pointe Sud du "V Baoulé", une étendue de savanes qui pénètre profondément dans le bloc forestier de la Côte d'Ivoire méridionale (Cf. figure 1).

Le climat est de type tropical humide.

La mise à feu régulière, au mois de janvier, est la seule action humaine touchant la réserve de Lamto. Cette pratique qui existe depuis des temps immémoriaux modèle véritablement la savane en empêchant l'évolution du paysage vers son véritable climax, la forêt.

Les sols, développés essentiellement sur granite, sont surtout de type ferralitique.

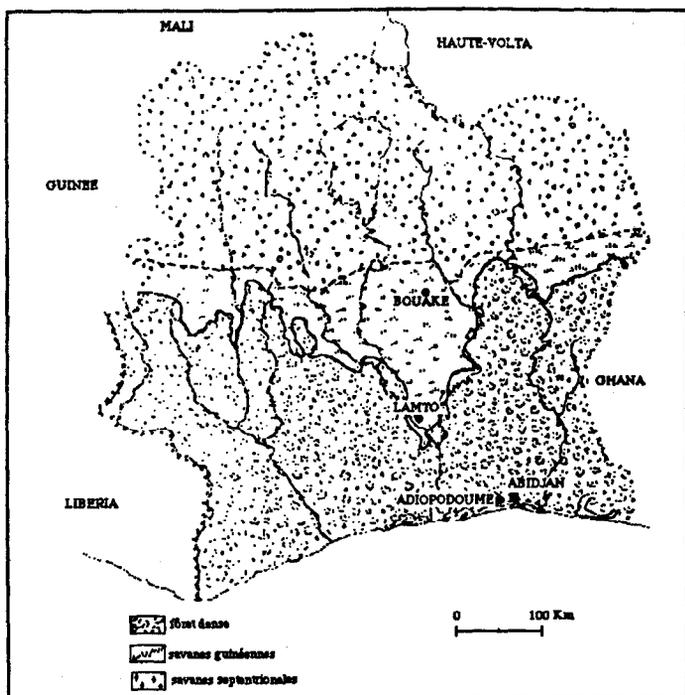


Figure-1 Situation géographique de la station de Lamto (Côte d'Ivoire)

II.2 MODE DE VIE DE *MILLSONIA ANOMALA*

Millsonia anomala vit principalement dans les 20 premiers centimètres du sol.

Ces vers se nourrissent exclusivement de terre. Compte tenu de la faible valeur nutritive de la terre les vers doivent en ingérer d'énormes quantités. La majeure partie de l'énergie assimilée est utilisée pour l'activité musculaire.

L'appareil reproducteur des vers de terre est hermaphrodite et la reproduction est en général croisée.

La reproduction des vers de terre s'effectue par ponte de cocons. Chez *Millsonia anomala* chaque cocon contient un seul embryon et les périodes de ponte sont très courtes et espacées dans le temps. Les cocons, protégés par leur enveloppe imputrescible et résistante, supportent mieux les conditions climatiques défavorables que les jeunes et les adultes. Néan-

moins, leur vitesse d'incubation est fortement diminuée lorsque le milieu est défavorable.

L'espérance de vie de *Millsonia anomala* est de l'ordre de six mois et rares sont les individus de plus de deux ans.

La mortalité paraît essentiellement liée aux conditions de milieu et à la sénescence.

Millsonia anomala peut se protéger des conditions climatiques défavorables en fuyant vers les couches profondes du sol. Mais la nourriture disponible y est moins abondante. Les vers de terre de cette espèce peuvent également entrer en quiescence pour mieux résister à la sécheresse: ils se déshydratent, vident leur tube digestif et s'enroulent en pelotes serrées. Ils reprennent leur activité lorsque l'humidité du sol est à nouveau suffisante.

III. LE MODELE.

III.1 LA PLACE DU MODELE DANS LE SYSTEME "SOL"

Le modèle a été élaboré à partir de connaissances et de données qui appartiennent à deux niveaux distincts dans la hiérarchie du système de savane tropicale. Les entrées sont ainsi constituées par:

- les caractéristiques physiques et chimiques de l'environnement dans le sol,
- le comportement individuel de *Millsonia anomala*.

Les sorties, quand à elles, s'adressent dans cette hiérarchie, à des niveaux intermédiaires entre celui du climat et celui de l'individu ver de terre: les niveaux d'une population de *Millsonia anomala* et de la drilosphère associée.

III.2 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU MODELE.

Le modèle est essentiellement déterministe et la plupart des équations qu'il contient ne sont pas linéaires. Il est écrit en FORTRAN 77 et utilise le logiciel GDDM (graphic design display management) pour les sorties graphiques. Le travail a été réalisé sur l'ordinateur IBM 4341 de l'Ecole Normale Supérieure.

L'élaboration du modèle a commencé sur la base du travail réalisé pour le modèle "Allez les Vers" (Lavelle & Meyer, 1983)

III.3 STRUCTURE GÉNÉRALE DU MODELE (CF. FIGURE 2).

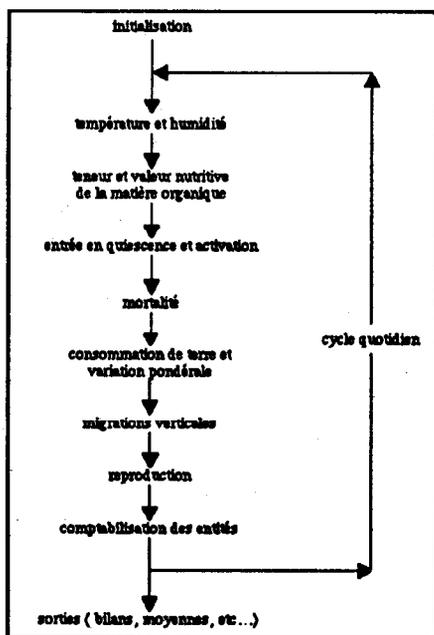


Figure 2 - Structure générale du modèle SOLTROP

Chaque ver de terre, jeune ou adulte, constitue une entité. Les cocons pondus par un même ver et pendant une même période de ponte sont également considérés comme une seule entité: l'entité "incubation".

Les propriétés de chaque entité sont représentées dans les mémoires de l'ordinateur par une série de mots (Cf. figure 3).

1	E(I,J) DU VER I	E(I,J) DE L'INCUBATION I
1	2• = VER 0• = MORT	1• = INCUBATION 0• = MORT
2	VER TEMOIN 1• = OUI 0• = NON	
3	REPRODUCTIVITE SET	INTERUPT• LIST 1• = OUI 0• = NON
4	AGE	DELAI INCUBATION
5	DEPTH	DEPTH COCONS
9	WEIGHT	WEIGHT COCONS
7	NB• PONTES	NB• COCONS
8	DEL• PONTES	DUREE INTERUPT•
9	CROISSANCE RAP•	
10	ACTIVITY 1• = OUI 0• = NON	
11	DP• POS•	
12	DEP• NEG•	
13	HUMIDITY	HUMIDITY
14	GRAD• HUMIDITY	
15	TEMPERATURE	TEMPERATURE
16	GRAD• TEMPERATURE	
17	CONSOMMATION	

Figure 3 -Propriétés des entités dans le modèle SOLTROP

L'environnement ambiant de chaque entité est évalué par le modèle .

Les états du système varient dans le modèle de manière discrète avec un pas de temps constant. La nature des phénomènes modélisés et des données disponibles nous ont amené à choisir un pas de temps égal à la journée. Chaque simulation porte sur une année.

Après une phase d'initialisation en début de cession, le modèle actualise à chaque pas de temps les propriétés de chaque entité en traitant successivement les différents aspects de la vie d'un ver de terre.

A la fin de chaque pas de temps, les entités sont comptabilisées.

Les sorties du modèle concernent, d'une part, l'état de la population de *Millsonia anomala* et, d'autre part, son rôle dans le système sol.

III.4 DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU MODELE.

III.4.a Les entrées du modèle.Le sous modèle environnemental.

Aucune série de mesures de température ni d'humidité n'étant directement utilisable par le modèle SOLTROP nous avons eu recours à des données simulées, celles que génère le modèle de Clément (Clément,1980).

III.4.b Les processus quotidiens.

III.4.b.1 Température et humidité ambiantes.

Chaque jour, le modèle SOLTROP lit dans un fichier externe les valeurs moyennes de température et d'humidité à différentes profondeurs générées par le modèle de Clément. Un sous-modèle d'interpolation linéaire calcule ensuite les valeurs correspondants à la profondeur de chaque ver de terre.

III.4.b.2 Entrée en quiescence et activation.

Lorsque le taux d'humidité devient inférieur à 9% le modèle SOLTROP confère aux vers de terre une certaine probabilité d'entrer en quiescence. Cette probabilité varie de 0 à 1 quand le taux d'humidité passe de 9% à 5%.

Une fois qu'un ver est entré en quiescence il faut que le taux d'humidité dépasse à nouveau 10% pour qu'il redevienne actif.

III.4.b.3 Consommation de terre, variation pondérale.

Des observations effectuées en élevage ont montré que la quantité de terre consommée chaque jour par un ver dépendait de quatre facteurs (Lavelle, 1978):

-le poids du ver.

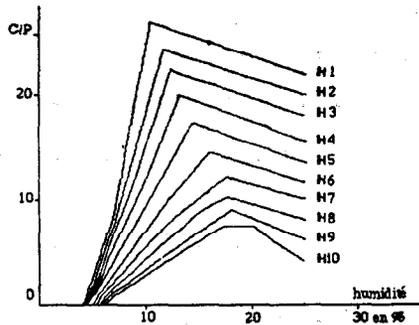


Figure 4 Consommation relative (consommation/poids individuel) d'individus de différents poids en fonction de l'humidité du sol (pF 4,2=5%; pF 2,5=12%); H₁: p<0,1125g; H₂: 0,125g<p<0,175g; H₃: 0,175g<p<0,3g; H₄: 0,3g<p<0,6g; H₅: 0,6g<p<1g; H₆: 1g<p<2g; H₇: 2g<p<3g; H₈: 3g<p<4g; H₉: 4g<p<5g; H₁₀: 5g<p<6g.

En outre, pour tenir compte du tassement de la croissance observée en laboratoire lorsque l'humidité était restée assez forte pendant une longue durée, la consommation de terre d'un ver est supposée se réduire de 10% quand il a subi un taux d'humidité supérieur à 14% pendant plus de 90 jours consécutifs.

On aboutit ainsi à l'équation suivante:

$$(\text{consommation}) = (\text{poids}) \times f_1 (\text{profondeur, humidité, poids})$$

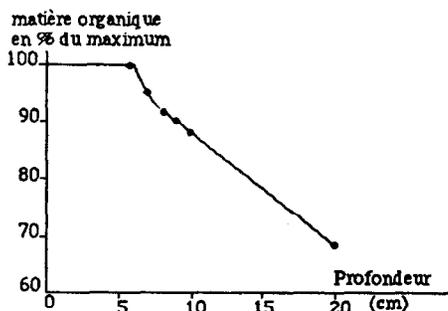
$$\times f_2 (\text{densité}).$$

$$\times f_3 (\text{humidité des 90 jours précédents})$$

La fonction f_1 provient des courbes de la figure 4.

La teneur en matière organique décroît quand la profondeur augmente. La courbe de décroissance est supposée constante tout au long de l'année (Cf. figure 5).

Figure 5 Variation de la teneur en matière organique du sol en fonction de la profondeur (en % de la valeur maximale)



La valeur nutritive de la matière organique varie au cours de l'année. Les observations effectuées à Lamto indiquent qu'elle est minimale aux mois de février et de mars, à la fin de la grande saison sèche et qu'elle prend ses valeurs maximales entre les mois de juillet et de décembre. Ne disposant pas d'informations plus précises à ce propos, nous l'avons déterminée en calibrant manuellement le modèle sur l'année 1972. Nous en sommes arrivés aux valeurs présentées par la figure 6.

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
90	70	70	80	90	90	90	90	100	100	100	100

Figure 6 Valeur nutritive de la matière organique du sol en 1972 (en % de la valeur maximale)

Des études en laboratoire (Lavelle, 1978) ont montré que le rendement de la consommation (augmentation de poids / énergie ingérée) dépendait du poids des vers (Cf. figure 7).

Figure 7 Taux d'accroissement pondéral journalier (dp/p en %) de vers de terre de différents poids (voir courbes H) en fonction de la quantité de terre consommée.

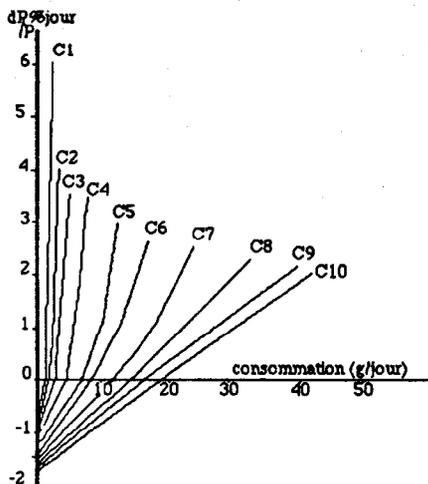
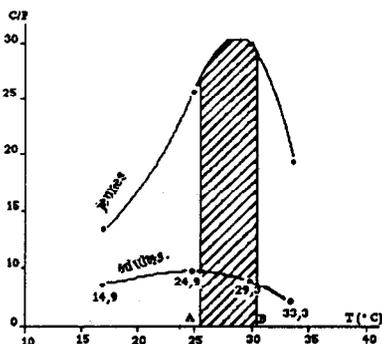


Figure 8 Variations de la consommation de terre par *Millsonia anomala* en fonction de la température du sol. A et B représentent les limites des valeurs moyennes mensuelles observées en conditions naturelles en 1972.



Si le ver est en quiescence sa consommation de terre est évidemment nulle. Ne disposant pas d'information précise sur la perte de poids d'un ver en quiescence, nous l'avons supposée égale à 1% de ce qu'elle serait en période d'activité avec une consommation nulle.

On parvient finalement à l'équation suivante:

augmentation de poids=

$$f_4 (\text{consommation}) \times (\text{teneur en MO}) \times (\text{valeur nutritive de la MO}) , (\text{poids}))$$

$$\times f_5 (\text{état d'activité})$$

III.5 MORTALITÉ.

Dans le modèle SOLTROP nous avons considéré que les facteurs de mortalité pour les vers étaient les suivants:

- un poids inférieur à 0,02g.
- un taux d'humidité inférieur à 3%.
- une température supérieure à 38°C.
- un age supérieur à 780 jours.
- une longue période de perte de poids. Plus précisément la probabilité quotidienne de mortalité est de 0,05 quand le nombre de jours consécutifs de perte de poids dépasse une valeur dépendant du poids des vers.

III.6 DÉPLACEMENTS ET MIGRATIONS.

Seuls les déplacements verticaux des vers de terre sont pris en compte dans le modèle SOLTROP. Il s'effectuent sous l'effet de trois facteurs:

-l'humidité. Le *preferendum* d'humidité d'un ver de terre est supposé correspondre aux taux d'humidité auquel on observe, en élevage, que le ver de terre consomme la plus grande quantité de terre. Ce taux dépend du poids du ver de terre(Cf. figure 4).

-la température. L'influence de la température sur les déplacements des vers de terre est simulée d'une manière comparable à celle de l'humidité. Le *preferendum* de température est supposé correspondre à la température à laquelle la consommation de terre est maximale. Les courbes de la figure 8 nous ont amenés à retenir comme *preferendum* de température 29°C pour les vers de terre de moins d'un gramme et 25°C pour les autres.

-le taux de matière organique. Les vers de terre sont censés rechercher les endroits les plus riches en matière organique. Plus exactement ils sont censés séjourner de préférence là où la matière organique est la plus abondante.

Dans ce qui précède nous n'avons envisagé que des déplacements "moyens" des vers de terre. En effet, il s'agit d'une part de déplacements moyens sur le pas de temps de la journée. D'autre part, ce sont des moyennes par classe de poids. Nous avons en effet jusqu'à présent considéré que tous les vers de terre d'un même poids se comportaient de la même manière dans des conditions d'environnement identiques, leurs déplacements étant uniquement guidés par la recherche de leur *preferendum* commun. Il est bien évident qu'une telle situation ne s'observe

jamais dans la nature où, même si le poids peut avoir une influence sur les déplacements des vers de terre, on peut en trouver de poids très variés à la même profondeur. De plus, on peut observer en élevage (Lavelle, 1975) que les vers de terre sont amenés à s'éloigner par moments de leur *preferendum* car ils doivent se déplacer pour ingérer de la terre et la rejeter derrière eux.

Ne disposant pas de données expérimentales précises sur le déterminisme du comportement migratoire individuel des vers de terre, nous avons introduit un quatrième facteur de déplacement. Ce facteur que l'on peut qualifier d'aléatoire, engendre chaque jour et pour chaque ver de terre un déplacement dont l'amplitude maximale est proportionnelle à la quantité de terre consommée par le ver de terre dans la journée.

L'ensemble des considérations précédentes peuvent se résumer dans l'équation suivante:

(déplt. quotidien) =

$$f_1(\text{gradient d'hum.}) \times I(\text{hum. locale}) - (\text{préf. d'hum.}) \frac{I}{K_1}$$

$$+ f_2(\text{gradient de temp.}) \times I(\text{temp. locale}) - (\text{préf. de temp.}) \frac{I}{K_2}$$

$$+ f_3(\text{gradient de teneur en MO}) \times K_3$$

$$+ f_4(\text{ver.jour}) \times (\text{consom. quot.}) \times K_4$$

Les fonctions f_1 , f_2 et f_3 prennent les valeurs -1, 0 ou +1 selon les gradients d'humidité, de température et de teneur en matière organique.

La fonction f_4 prend pour chaque ver et chaque jour une valeur choisie de manière aléatoire entre -1 et +1.

Les valeurs des paramètres K_1 , K_2 , K_3 et K_4 mesurent les importances respectives des quatre facteurs que nous avons retenus. Aucune donnée expérimentale ne nous permettant de déterminer directement ces paramètres, nous avons procédé à une calibration du modèle.

Plus précisément, nous avons calculé, chaque mois, la somme des carrés des différences entre les effectifs simulés et les effectifs calculés des classes de poids. La calibration a consisté à chercher l'ensemble des valeurs des quatre paramètres K_1 , K_2 , K_3 et K_4 qui minimisait la somme de ces douze valeurs mensuelles. Cela revient à chercher le minimum

d'une fonction "erreur" de quatre variables, la fonction étant formée à partir du modèle lui-même.

Ce problème n'ayant, bien évidemment, pas de solution algébrique, nous avons eu recours à une technique d'analyse numérique particulière, la méthode SIMPLEX (Daniels, 1978).

Nous avons trouvé les valeurs suivantes pour les paramètres dont dépendent les déplacements verticaux des vers de terre (les distances étant mesurées en centimètres):

$$K_1 = 11.1 \text{ cm}^{-1}$$

$$K_2 = 9.70 \text{ }^\circ\text{C.cm}^{-1}$$

$$K_3 = 0.661 \text{ cm}$$

$$K_4 = 0.168 \text{ cm.g}^{-1}$$

Nous avons ensuite réalisé une calibration similaire avec les données de l'année 1969, en utilisant comme valeurs de départ du processus d'optimisation les quatre valeurs trouvées ci-dessus pour 1972. Il est apparu que ces quatre valeurs correspondaient également sensiblement au minimum de la fonction "erreur" en 1969. Nous avons donc décidé de conserver pour la suite ces quatre valeurs.

IV. LA REPRODUCTION.

IV.1 LES PONTES.

Nous n'avons pas trouvé dans la bibliographie de données sur les facteurs de déclenchement de la ponte des vers de terre. Les observations effectuées à Lamto suggèrent que ces facteurs ne se situent pas uniquement au niveau de l'individu mais également à celui de la population.

Pour ce qui est des individus, nous avons considéré qu'il fallait qu'ils satisfassent aux conditions suivantes:

- être actifs,
- avoir un poids supérieur à 2.8g,
- être en croissance depuis au moins quinze jours consécutifs,
- ne pas avoir pondu pendant les quinze jours précédents
- se trouver dans une humidité ambiante d'un taux inférieur à 18%.

En ce qui concerne la population, les observations effectuées à Lamto nous ont amené à retenir deux critères:

- le plus gros des vers pèse au moins 3g,
- la biomasse de la population a tendance à croître.

IV.2 L'INCUBATION DES COCONS.

L'incubation des cocons s'interrompt si l'humidité est inférieure à 6%.

Les cocons ont des chances d'être détruits si l'incubation a été interrompue pendant plus de 40 jours consécutifs, si l'humidité est inférieure à 3% ou bien si la température dépasse 38°C.

IV.3 L'ÉCLOSION DES COCONS.

L'éclosion des cocons se produit après 23 jours d'incubation effective.

IV.4 LA CALIBRATION DU MODELE.

Le modèle a été calibré sur les effectifs par classe de poids, mesurés en 1972, année de pluviosité moyenne. Cette calibration a été effectuée, comme nous l'avons vu:

- de manière systématique, en utilisant un algorithme, pour les paramètres régissant les migrations,
- manuellement, par examen critique des sorties du modèle, pour les autres paramètres dont la valeur était inconnue ou bien mesurée avec une précision insuffisante. Il s'agissait en particulier de la valeur nutritive de la matière organique et des facteurs de déclenchement des pontes.

IV.5 LA VALIDATION DU MODELE.

Le modèle a été validé sur 1969, année particulièrement sèche.

IV.6 LES SORTIES DU MODELE.

Les sorties possibles du modèle sont très variées: effectifs des vers de terre et des cocons, propriétés de ces entités, quantités de terre consommées. Le modèle permet facilement de suivre l'évolution de ces grandeurs au cours du temps, de les croiser, de visualiser leur répartition en profondeur à un moment donné, de calculer des moyennes et des bilans. (Cf. figures 9 et 10).

Figure 9 Consommation annuelle simulée de terre par couche de sol en 1972 (g/12m²).

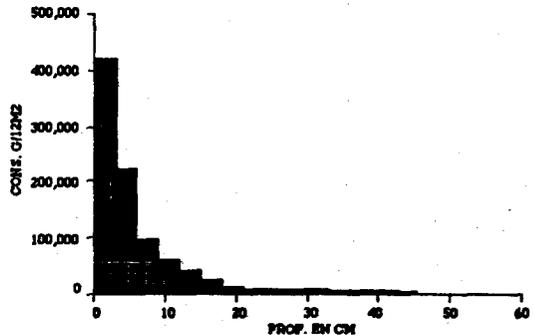
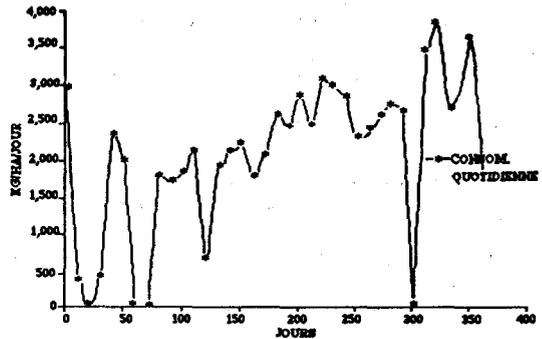


Figure 10 Variations simulées de la consommation quotidienne de terre au cours de l'année 1972 (Kg/ha)



V. CONCLUSION.

Le modèle SOLTROP, malgré sa formulation simplifiée de la réalité, reproduit de manière satisfaisante les dynamiques observées des populations de *Millsonia anomala* étudiées (Cf. figure 11). La croissance des individus de la dernière cohorte est un peu trop rapide et leur mortalité est trop forte. Il semble difficile de beaucoup améliorer le modèle compte-tenu de l'absence ou l'imprécision de nombre de données expérimentales.

Le modèle a mis en évidence l'importance de certains phénomènes sur lesquels on ne possède actuellement que peu de connaissances comme les déplacements verticaux des vers de terre ou les variations au cours de l'année de la valeur nutritive de la matière organique.

Les sorties du modèle, bien que ne pouvant servir de base à des démonstrations scientifiquement rigoureuses, fournissent des enseignements sur la valeur de certaines données indispensables à la compréhension du rôle des vers de terre dans leur écosystème comme, notamment, les quantités de terre consommées par jour et par couche de sol.

On peut ainsi dire que le modèle constitue un outil d'investigation de la drilosphère. Les développements qui lui seront donnés concerneront:

- son adaptation à d'autres écosystèmes tropicaux avec d'autres espèces de vers de terre,
- des études fines de sensibilité par rapport à des paramètres comme la température ou l'humidité,
- la réalisation de modèles complémentaires utilisant ses sorties en entrées et allant plus loin dans l'étude du rôle des vers de terre dans le sol.

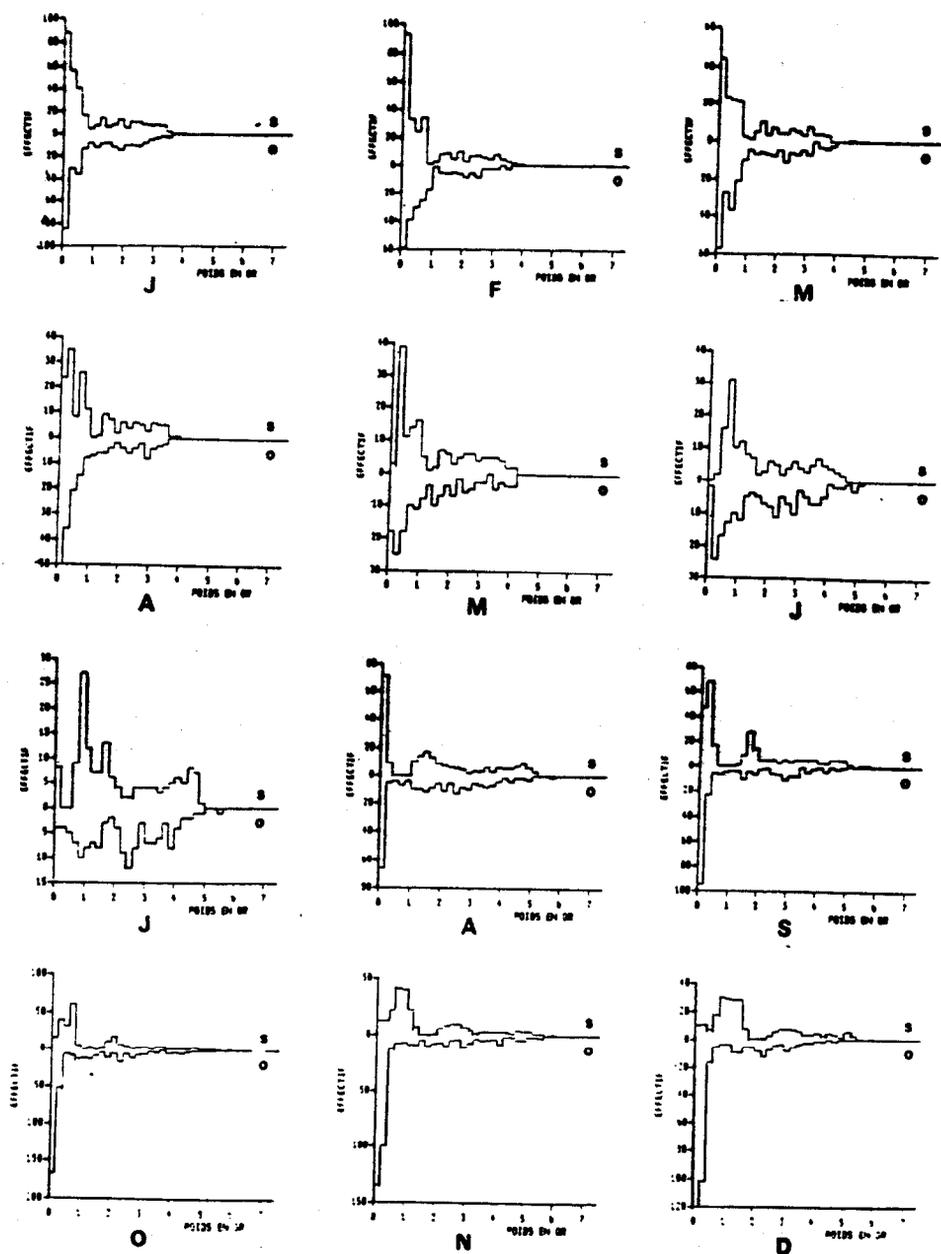


Figure 11 Comparaison des structures de populations observées et simulés pour l'année 1972

VI BIBLIOGRAPHIE

DANIELS (R.W.) 1978.- An introduction to numerical methods and optimization technics.- North Holland.

LAVELLE (P.) 1975.- Consommation annuelle de terre par une population naturelle de Vers de terre (*Millsonia anomala* Omodeo, Afcanthodrilidae-Oligochetes) dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire).- *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 12:11-24.

LAVELLE (P.) 1978.- Les Vers de terre de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire): peuplements, population et fonctions dans l'écosystème.- Thèse Doctorat, Paris VI, Publ. Labo. Zool. ENS. 12, 301 p.

LAVELLE (P.) & MEYER (J.A.) 1983.- ALLEZ LES VERS, a simulation model of populations dynamics and effect on soil of *Millsonia anomala* (Oligochaeta, Megascolecidae).- In: PH. LEBRUN et al., (eds.): *New Trends in Soil Biology*, 503-519. Dieu Bricart, Louvain la Neuve.

MODELES ET POLITIQUES DE POPULATION : POINTS DE REPERE

Patrick LIVENAIS, Koffi N'GUESSAN

I INTRODUCTION

Dans le langage commun, un modèle désigne ce qui sert ou fait l'objet d'imitation. C'est aussi d'une manière très générale "une représentation simplifiée, une réduction, d'un processus ou d'un système" (dictionnaire ROBERT).

L'usage scientifique du mot modèle recoupe une exigence nouvelle de compréhension et de prévision. Il s'agit certes toujours de réduire - "il n'existe pas de plus grand succès en science qu'une réduction réussie" POPPER, K. (1985) - mais dans le sens où le modèle lui-même est le produit de la méthode réductive. La question principale est alors de connaître les parts réservées au déterminisme et à l'indéterminisme lors de cette réduction méthodologique, et d'identifier les "philosophies" qui les inspirent ¹.

Les premiers modèles démo-économiques ² furent élaborés au lendemain de la deuxième guerre mondiale. Aujourd'hui, quarante années après, ils constituent un peu la "vitrine de la recherche": la formalisation conférant

¹ Voir par exemple COLE, H. et alli (1974) au sujet du modèle le version du MIT et pour un point de vue plus global ARTHUR, W. B. et Mc NICOLL, G. (1975).

² Il faut citer ici les travaux des années 50 de S. ENKE qui appliqua la méthode coûts-avantages aux questions démographiques dans les modèles de planification de l'investissement.

aux modèles mentaux qui les sous-tendent une "qualité scientifique" qui correspond à la mode mais qui également a été rendu nécessaire par les exigences de planification d'un monde en constante évolution.

On peut considérer que, parmi d'autres éléments, les résultats auxquels aboutissent ces modèles contribuent d'une part à la justification (a priori ou a posteriori) de politiques spécifiques de population (concernant la fécondité, la croissance urbaine, la redistribution de la population...) et, d'autre part, à l'élaboration de stratégies globales de développement incluant la prise en compte de la population (au plan national ou international).

Ce sont ces aspects qui sont abordés ici, ceux de la relation entre les modèles et les politiques de population. Etant donné l'étendue du sujet il a fallu faire un choix et fixer des objectifs. Le choix a consisté en l'adoption d'une démarche pragmatique plutôt qu'académique et les objectifs ont été de privilégier les modèles en "relation directe" avec les politiques de population contemporaines.

Plus précisément, nous sommes parti des constatations suivantes :

1- L'actualité de certains modèles de "la première heure" est toujours forte, et en tout cas sans relation avec l'intérêt scientifique qui leur est aujourd'hui reconnu. Force est de remarquer que les politiques de populations qu'ils sous-tendent ne sont pas toujours aussi intégrées aux politiques globales de développement qu'elles ne sont sensées l'être. Nous faisons allusion ici bien évidemment aux politiques de limitation des naissances et, eu égard à leur généralisation dans le tiers monde il nous a paru nécessaire de revenir sur le modèle de COALE et HOOVER étant donné l'impact qu'il a exercé et qu'il exerce encore sur l'adoption de telles politiques.

2- Un problème délicat aux plans politique et scientifique est la prise en compte de ce que les économistes appellent les externalités négatives. Il s'agit du fait que ce qui paraît logique ou avantageux au niveau de la société dans son ensemble peut très bien représenter un handicap pour les familles ou les individus, et inversement.

Certains modèles visent à la conciliation des plans macro-structurels et micro-comportementaux, il nous a semblé intéressant d'en donner une illustration et notre choix s'est porté sur le modèle de TODARO qui met en scène comportements individuels migratoires et situation de l'emploi urbain.

3- Avec le temps, l'exigence de compréhension dans les modèles a été supplantée par l'exigence de prévision et par des exercices de simulation-prospective qui désormais intègrent la planification du développement

économique et social des pays ou inspirent les stratégies de développement préconisées par les institutions internationales ¹.

Il a été décidé de présenter un de ces modèles et le choix s'est porté sur le modèle BACHUE qui est sans doute actuellement le plus opérationnel.

Notre plan consistera donc à aborder trois thèmes importants au sujet desquels on constate un lien entre modèle et politique de population :

- Le Modèle de COALE, A.J. et HOOVER E.M. traite du thème de la croissance démographique et du développement économique, il conduit aux politiques anti-natalistes isolées.

-Le Modèle de TODARO, M.P. aborde la question des migrations de l'emploi et du développement économique et conclut à la nécessité de politiques concertées de l'emploi, de l'éducation au plan rural comme au plan urbain.

-Le Modèle bachue embrasse au niveau global les inter-relations entre l'économie et la population, son but est d'envisager les différentes stratégies de développement possibles ayant comme objectif la satisfaction des besoins essentiels.

Pour chacun de ces thèmes la démarche suivie sera la même : position du problème, exposé du modèle puis bilan et critiques. D'autre part, au cours de ces trente dernières années, la modélisation s'est considérablement sophistiquée au plan formel. L'informatique aidant, on est passé de la plus grande simplicité à la plus extrême complexité ². Le coeur des modèles, la "boîte noire" est désormais l'affaire des spécialistes et la tentation est grande pour les utilisateurs de "s'en remettre purement et simplement à ses oracles par listing interposés" (LORIAUX, M. 1984). Un mythe s'est donc développé ainsi que la critique à ce mythe, l'ensemble emprunt fortement de stéréotypes. On a donc pensé que, dans la mesure où la simplicité des modèles de COALE, A.J. et HOOVER, E.M. et TODARO, M.P. nous le permettait, il était intéressant d'ouvrir leur boîte noire. La présentation formelle de ces modèles a été placée en annexe.

Enfin une vue d'ensemble sera proposée.

¹ Il s'agit essentiellement des Modèles TEMPO de la Général Electric, du Modèle de LIN, W.L. et MARTOS, B. de la FAO, des modèles BACHUE du BIT, ainsi que des modèles spéculatifs à plus long terme du type de celui de la Fondation Barloche (dit modèle Latino-américain) ou du modèle mondial élaboré par LEONTIEF, W., CARTER, A.P. et PETRI, P. à la demande des Nations Unies.

² Le modèle mondial de LEONTIEF, W. CARTER, A.P. et PETRI, P. (1977) prend en compte 2669 variables et se compose de 2625 équations (175 pour chacune des 15 régions du modèle).

II LA CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE ET LE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE

II.1 POSITION DU PROBLEME

C'est en 1945 que sont énoncés les termes de la théorie de la transition démographique qui subordonne les changements démographiques intervenus en occident au 19ème et au début du 20e siècle au développement de la "modernité". Mais dès le début des années 1950, avec la prise de conscience de l'explosion démographique du Tiers Monde, les auteurs de cette théorie (THOMPSON, W. NOTESTEIN, F. W. et KIRK, D.) remettent en cause implicitement son pouvoir prédictif universel. L'argumentation est la suivante :

- "Dans ces régions le danger réside dans le fait qu'à court ou moyen terme il ne se produira qu'une amélioration économique et sanitaire modérée qui ne pourra s'accompagner des changements sociaux qui affectent la fécondité" (NOTESTEIN, F. 1948). il est alors suggéré que :

- "les efforts actuels pour développer les régions appelées sous-développées auraient beaucoup plus de probabilités de succès si le changement démographique précédait et non suivait le changement économique" (KIRK, D. 1955).

De nombreuses institutions anglo-saxonnes s'engagent alors dans la planification familiale : la Fondation Rockefeller et la Fondation Ford (dès 1950), le Population Council (créé en 1952), l'I.P.P.F. (créé en 1952), l'Association for Voluntary Sterilization (A.V.S. créé en 1943), le Pathfinder Fund (créé en 1957), pour ne citer que les plus importants.

Mais en élargissant ses objectifs anciennement définis par M. SANGER (affirmation du Birth Control en tant que droit fondamental de l'homme et en tant que tâche humanitaire) au domaine du développement économique et social, les partisans du planning familial se devaient d'expliquer pourquoi la baisse de la fécondité conduirait à une amélioration du niveau de vie des populations.

Les travaux de S. ENKE (1957), en particulier, vont s'inscrire dans une telle direction. Ensuite et parmi beaucoup d'autres viendra l'étude de COALE, A.J. et HOOVER, E.M. sur l'Inde qui aura un retentissement tout particulier.

En 1962, l'Assemblée Générale des Nations Unies abordera pour la première fois la question de la population pour elle-même. Puis viendront les conférences de BUCAREST (1974) et de MEXICO (1984). Aujourd'hui, on considère que plus de 40 pays du Tiers Monde ont défini les termes de politiques visant explicitement la limitation de la natalité.

Nous allons revenir maintenant plus en détail sur le modèle de COALE et HOOVER.

II.2 LE MODELE DE COALE, A.J. ET HOOVER, E.M.

L'objectif du Modèle de COALE, A.J. et HOOVER, E.M. construit pour l'Inde en 1956 est la comparaison des perspectives de développement économique obtenues à partir d'une alternative d'évolution démographique (fécondité constante ou en baisse de 50 % sur une période de 25 ans).

La formulation du modèle est exposée en annexe 1.

Les hypothèses sur lesquelles il repose sont les suivantes :

a) La croissance économique est le fruit de l'accumulation du capital. En conséquence la fonction de production adoptée (du type Harrod-Domard) fait dépendre l'augmentation du revenu de l'investissement productif et d'un coefficient marginal de capital en augmentation avec le temps (équation (1)).

b) Les dépenses de croissance - ou investissements totaux - se décomposant en investissements en biens d'équipement et en investissements en ressources humaines, les premiers étant considérés plus productifs que les seconds (équation (2)).

c) L'effectif et la productivité du facteur travail sont considérés constants sur la période de 25 ans, et donc indépendants de l'évolution de la population et de la consommation (équation (2)).

d) L'épargne est une fonction linéaire croissante du revenu et décroissante de la population, c'est le "leg keynesien" (équation (6)).

L'introduction dans le modèle des résultats de la projection alternative de la population sur une période de 30 ans réalisée par étapes successives de 5 ans conduit, alors à une différence de 40 % dans les revenus par tête obtenus, en faveur de la population dont la fécondité a diminué de moitié par rapport à la population ayant maintenu sa fécondité constante (voir tableau 1 : "Basic projection 1").

II.3 BILAN ET CRITIQUES

II.3.a Bilan

De par la nature même du modèle, un bilan, une vérification empirique, est impossible. Pour l'Inde on ne peut que constater en termes globaux la lente mais régulière progression du PIB par tête : + 1,6 % par an sur la

période 1965-1984 (Banque Mondiale, 1986), en parallèle avec un accroissement régulier de la population à un taux annuel voisin de 2 % (échec des différents programmes de planification des naissances).

Pour le Mexique, second pays de l'étude de COALE, A.J. et HOOVER, E.M. le bilan n'est pas plus aisé. Entre 1950 et 1970 (ou entre 1955 et 1975), ce pays a connu un développement important de sa production industrielle et agricole totale et par tête (en même temps qu'un fort accroissement des inégalités sociales), l'espérance de vie est passée de 48 ans à 62 ans, l'alphabétisation a progressé de 26 %, tout ceci en parallèle avec un accroissement considérable de la population dû au maintien d'une fécondité élevée (la population passe de 30 millions à 60 millions en 20 ans, le taux de natalité restant toujours supérieur à 40 %.¹ Vingt ans après, COALE, A.J. maintiendra cependant son argumentation, affirmant que les résultats économiques du Mexique auraient été supérieurs si la fécondité avait baissé (COALE, A.J. 1982).

II.3.b Critiques

Si le bilan est difficile, des critiques concrètes peuvent par contre être apportées au modèle. Ces critiques reviennent à remettre en cause la validité de la quasi totalité des hypothèses de départ. On trouvera un exposé complet de ces critiques dans CHESNAIS, J.C. (1986). Nous reprendrons ici trois objections fondamentales.

i) La première concerne la fonction d'épargne Keynésienne qui apparaît particulièrement mal adaptée aux cas des pays en développement (et en tout cas à l'Inde, comme le souligne G. MYRDAL (1968)). En effet, dans ces pays, l'épargne monétaire dont il est question est très peu réalisée par les populations à faible revenu qui sont majoritaires, et l'effet d'une baisse de la fécondité pour ces populations se traduirait probablement par une augmentation de la consommation sans variation de l'épargne.

ii) la seconde objection concerne l'exogénéité des facteurs démographiques par rapport aux facteurs économiques : l'évolution de la population n'influe pas sur l'offre ni sur la demande (celle-ci d'ailleurs n'intervient pas dans le modèle); ainsi que l'exogénéité des facteurs démographiques entre eux : a des rythmes différents d'évolution de la fécondité ne correspond qu'un rythme unique de baisse de la mortalité. On note, en outre, qu'aucun effet rétroactif de l'économie sur la population n'est envisagé.

¹ Au Mexique, le "Ley de Poblacion" est promulguée en 1974, mais la baisse de la fécondité apparaît surtout après 1977 et particulièrement en 1979 et 1980 avec l'intensification de la stérilisation.

iii) En troisième lieu il faut souligner le caractère tautologique et arbitraire du modèle : les conclusions découlent directement de la structure des relations privilégiées et des valeurs des coefficients empiriques, alors que ni les unes ni les autres n'ont été testées de manière satisfaisante (KUZNETS, S. 1960).

III. MIGRATIONS, EMPLOI ET DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE

III.1 POSITION DU PROBLEME

Les théories classiques puis néo-classiques du développement ne se posaient pas directement la question de l'allocation des ressources humaines, en particulier la migration de la campagne à la ville était perçue comme un phénomène allant de soit. La conception duale de l'économie, c'est-à-dire la juxtaposition d'un secteur traditionnel à productivité marginale très faible ou nulle, a-monnaire (LEWIS) ou faiblement monétaires (le salaire "institutionnel" de FEI et RANIS est égal au minimum vital), et d'un secteur moderne capitalistique tourné vers l'extérieur (à traditionnel et moderne sont substitués, selon les auteurs, rural ou agricole et urbain ou industriel), cette conception donc, induisait certes, et de manière fondamentale la ré-allocation du surplus de main-d'oeuvre agricole ("chômage déguisé" rural) dans le secteur moderne-urbain, mais en tant que phénomène auto-régulé, dans le cadre d'un système global en équilibre, caractérisé entre autres par le plein emploi urbain que garantissait une "offre illimitée de travail".

Les situations concrètes relevées dans un grand nombre de pays en développement dès les années 60 ont apporté un démenti à ces théories (LIVENNAIS, P., QUESNEL, A. 1987). Les faits observés peuvent être résumés de la manière suivante :

- situation de sous-emploi urbain en constante augmentation,
- développement du "secteur informel",
- surprélèvement de la main-d'oeuvre agricole,
- détérioration interne des termes de l'échange entre milieu urbain et milieu rural.

Dès lors une des questions ayant attiré l'attention a été l'analyse du chômage urbain en relation avec l'exode rural et la formulation de politique d'emploi et migratoire appropriées. Parmi d'autres, les travaux de TODARO, M.P. vont dans ce sens.

III.2 LE MODELE DE TODARO, M.P.

La démarche adoptée par l'auteur consiste à rechercher une explication du fait migratoire et, partant, d'analyser les conditions de l'emploi en milieu urbain. Les conclusions auxquelles il aboutit sont autant de garde-fous pour l'action gouvernementale en ce qui concerne la politique salariale, la création d'emploi et l'éducation ou la formation professionnelle. Une conclusion forte du modèle de TODARO réside dans la nécessité de lier les politiques de développement rurales et urbaines. Examinons ces différents points.

III.2.a La démarche

Le modèle de base et les différents prolongements auxquels ils a donné lieu ont été présentés par l'auteur dans plusieurs articles¹. Nous avons choisi ici de reprendre de façon synthétique le modèle de base et le développement réalisé de ce modèle pour appréhender les conséquences possibles d'une action visant à resorber le chômage par la création directe d'emplois urbains (voir annexe 2).

Les hypothèses de départ du modèle de TODARO sont les suivantes :

a) La migration est déterminée par des considérations économiques rationnelles

b) La migration a lieu si le montant actualisé de la différence de revenu urbain et rural escomptée pendant une période de temps jugée acceptable, diminuée du coût du voyage est positive (équation (1))

c) La probabilité d'obtenir un emploi urbain augmente avec le temps (équation (2)).

L'introduction de ces hypothèses dans un modèle dynamique d'équilibre entre l'offre et la demande de main-d'oeuvre en milieu urbain (équation (3) et suivantes) permet alors d'arriver aux conclusions suivantes :

- un accroissement inconsideré des taux de salaire urbains sans compensation au niveau des revenus ruraux peut produire une accélération des migrations et conduire à un sous emploi urbain plus important;

- dans le cas de création d'emplois urbains: "le niveau absolu du chômage s'élève si l'élasticité de l'offre de main- d'oeuvre urbaine par rapport à la différence de revenu escomptée entre la ville et la campagne dépasse le rapport entre cette différence et le salaire urbain multiplié par le taux de

¹ TODARO, M.P. (1969); HARRIS, J.R. et TODARO, M.P. (1970); TODARO, M.P. (1971) EDWARDS, E.D. et TODARO, M.P. (1973); TODARO, M.P. (1976).

chômage" (TODARO M.P. 1976). Cette élasticité est appelée fonction de "réaction de migration" (cf. annexe 2). D'après l'auteur, puisqu'il semble que pour une majorité de pays en développement, et particulièrement en Afrique, la valeur critique de cette élasticité soit très faible, on peut s'attendre à ce qu'une politique ponctuelle de création d'emplois conduise à une augmentation non recherchée du chômage.

- L'attribution des nouveaux emplois urbains se fait de manière croissante par le biais d'un système de sélection basé sur le niveau d'éducation des candidats. Mais la "demande d'éducation" lorsqu'elle entraîne une accélération incontrôlée des investissements au plan éducatif peut conduire à l'augmentation du volume des chômeurs diplômés. Cette question étant délicate car l'enseignement est d'une certaine manière une priorité et correspond à terme à l'exigence pour un pays d'une main-d'oeuvre plus qualifiée.

- En définitive, pour TODARO, M.P., toute solution sérieuse visant à une réduction du chômage urbain et des migrations passe par un traitement plus égalitaire des économies rurales et urbaines (volume de l'investissement, salaires, infrastructures, termes de l'échange)¹.

III.3 BILAN ET CRITIQUES

III.3.a Bilan

L'intérêt soulevé pour le modèle de TODARO, M.P. a entraîné de nombreuses tentatives de vérification, en Asie, en Amérique Latine et en Afrique (cf. Population Report 1984). Nous ne prendrons ici en considération que les travaux réalisés sur le continent africain où les résultats sont contradictoires.

Pour la Tanzanie les travaux de BARNUM, H.N. et SABOT, R.H. (1977) proposent un test minutieux des hypothèses de TODARO pour lequel le résultat semble concluant.

HOUSE, W.J. et RAMPPEL, H. (1976) au terme d'une étude effectuée au Kenya arrivent à la même conclusion de validité mais indirectement cette fois car c'est un lien entre taux de migration et salaires pondérés par les taux de chômage dans les zones d'arrivée qui est mis en évidence. Pour ce même pays, l'analyse réalisée avec le recul des conséquences de l'accord

¹(TODARO (1971) est aussi favorable à deux "mesures à long terme", qui si elles ne découlent pas de son modèle ne lui paraissent pas moins "évidentes" : la limitation de la croissance démographique (pour son incidence sur le volume de l'épargne et de l'investissement : on retrouve un raisonnement analogue à celui de COALE, A.J. et HOOVER); et la mise au point de techniques locales à haut coefficient de main-d'oeuvre.

tripartite de 1964¹ semble aussi confirmer la thèse de TODARO selon laquelle une politique directe de création d'emplois peut conduire à une aggravation du chômage par le biais d'un accroissement incontrôlé des migrations (GHAI, D.P. 1970).

Par contre, dans le cas du Ghana, de GRAFT-JOHNSON (1974) souligne la difficulté de détermination du revenu rural (ou de la consommation qui est parfois utilisée comme substitut au revenu). Selon cet auteur les différences entre salaires agricoles et urbains ne seraient pas très élevées (jusqu'en 1970 et pour le Sud Ghana) et la migration des campagnes vers la ville pourrait être expliquée plutôt par une différence importante au niveau des sous-emplois ruraux et urbains.

III.3.b Critiques

Une certaine unanimité existe pour reconnaître que le revenu est une motivation économique essentielle dans le processus migratoire

On peut toutefois remarquer que dans nombre de sociétés - et particulièrement en Afrique - la décision de migrer peut être rapprochée utilement de la condition (au sens large) de l'individu dans la zone d'origine (blocage dû à la situation foncière, évolution des structures familiales produite par la baisse de la mortalité, etc...); ou de la possibilité ou non de bénéficier de solidarités villageoises transposées en ville (hébergement par un proche).

Mais la critique la plus fondamentale qui peut être faite au modèle réside dans le fait qu'il ne prend en compte ni les éléments structuraux responsables des niveaux de revenus ni les formes institutionnelles de contrôle du marché du travail (SIMMONS, A.B. 1985).

Malgré ces lacunes, l'intérêt du modèle de TODARO est réel car il suggère très simplement que les migrations et le chômage urbain ont leur origine dans la situation économique des zones rurales autant que dans celle des villes. Par anticipation il rejoint une constatation effectuée souvent aujourd'hui : les politiques migratoires ou de redistribution de la population sont vouées à l'échec, car le plus souvent elles entrent en contradiction avec les objectifs mêmes de la politique économique.

¹ Cet accord entre gouvernement, employeur et syndicats stipulait que les deux premiers augmenteraient respectivement de 15 et 10 % le nombre des emplois créés et que les syndicats ne demanderaient pas de hausse des salaires pendant un an.

IV. ECONOMIE, POPULATION ET SATISFACTION DES BESOINS ESSENTIELS

IV.1 POSITION DU PROBLEME

L'OIT est une des plus anciennes institutions internationales. Mais 57 années ne se sont pas seulement écoulées entre la 1ère Conférence Internationale du Travail de 1919 et la conférence mondiale tripartite sur l'emploi, la répartition du revenu, le progrès social et la division internationale du travail de 1976¹, il y a eu également Bucarest, 1974, c'est-à-dire la 1ère Conférence mondiale inter-gouvernementale sur la population.

La volonté de porter une considération nouvelle - quoique ambiguë - aux questions démographiques, qui caractérise cette conférence de Bucarest, rencontre alors le constat effectué dans de nombreuses études par l'OIT : l'inadéquation du concept d'emploi correspondant aux théories néo-classiques de développement (i.e l'emploi est le résultat simple d'un calcul économique du ménage). Dès lors, et en tant que parties intégrantes du Programme Mondial de l'Emploi défini en 1976, des programmes de recherche de démographie pure et de démographie économique sont mis en place par le BIT, ils culminent dans la série des modèles démo-économiques du type BACHUE. (CAIRE, G. 1983).

IV.2 LES MODELES BACHUE

IV.2.a Objectifs

Les modèles BACHUE du BIT² ont été élaborés afin de mieux appréhender au niveau d'un pays les conséquences des liens existants entre les phénomènes démographiques et économiques - pour ces derniers, en particulier, l'emploi et la distribution des revenus.

Ils correspondent à une intégration de la structure et du mouvement de la population à la planification du développement économique et social.

¹ Conférence au cours de laquelle est mise en avant la nécessité d'étude de stratégies de développement basées sur la satisfaction des besoins essentiels (Santé, éducation, alimentation, répartition des revenus)

² Après une formulation théorique globale, plusieurs versions - pays de ce modèle furent mises au point : Philippines, Kenya, Yougoslavie, Brésil, (cf. Bibliographie). Ces modèles ont été conçus par une équipe du BIT composée de : BLANDY, J.J.; EMERIJ, L.; HOPKINS, M.J.D.; RODGERS, G.B. et WERY, R. Une comparaison des différentes versions de BACHUE existe dans MORELAND, R.S. (1981).

Ce faisant, et selon les objectifs du BIT, BACHUE vise à identifier "les politiques et les stratégies de développement qui contribuent à une utilisation plus efficace de la main-d'oeuvre productive, qui évitent ou réduisent les inégalités entre la croissance de la population et celle du nombre d'emplois, et qui assurent une croissance des revenus à la fois rapide et équitable" (WERY, R. 1979).

IV.2.b Description

Utilisant l'approche systémique, BACHUE se présente sous la forme d'un modèle dynamique de grande dimension permettant la simulation à moyen ou à long terme des inter-relations entre un grand nombre de paramètres économiques et démographiques. Il est impossible ici d'exposer l'ensemble du modèle étant donné sa complexité formelle¹, mais on peut essayer d'en illustrer le contenu et la structure à l'aide de deux représentations schématiques. Le premier schéma concerne le champ et l'étendue des variables prises en compte par le modèle, et le second indique pour les variables déterminées par le système (variables endogènes) les diverses connexions retenues (voir Annexe 3).

Dans ses grandes lignes (HOPKINS, M.J.D., RODGERS, G.B. et WERY, R. 1976; BOURCIER DE CARBON, P. 1977; CAIRE, G. 1983) le modèle se compose de trois sous-systèmes liés (sous systèmes : économique, démographique et éducation pour BACHUE I; économique, de l'emploi et de la répartition des revenus, démographiques pour BACHUE II).

Les traits caractéristiques les plus importants du système sont une très forte endogénéité, un degré élevé de désagrégation ainsi que l'intégration qu'il réalise de modèles micro-sociaux-démographique à un modèle macro-économique.

Par exemple, pour le sous-système démographique, sont prises en considération les variables suivantes = l'âge, le sexe, la localisation, l'activité, le niveau éducatif, l'état matrimonial. L'évolution structurelle de la population se fait par un système d'équations relatives à des cohortes (groupes d'âge quinquennaux). Les événements : naissance, mariage, activité, sont le produit de modèles comportementaux faisant intervenir un processus de décision familial, ressortir le dualisme entre la ville et la campagne, et, pouvant être infléchis par des actions gouvernementales portant sur l'éducation ou le "birth control". C'est également le cas pour les migrations dont le traitement est particulièrement sophistiqué : les migrants au sein de la famille sont liés au déplacement des hommes d'âge actif, et la migration est déterminée par le niveau éducatif, la situation de l'emploi moderne urbain, les différences de revenu moyen entre ville et campagne

¹On trouvera une telle présentation dans BLANDY, R. et WERY, R. (1973) et dans BIT (1974).

et la caractéristique (effectif de population) des zones de départ et d'arrivée.

IV.2.c Résultats

Nous présentons en annexe 3 les résultats provenant d'une série de tests effectués par les auteurs à l'aide de BACHUE Philippines (HOPKINS, MJD, RODGERS, G.B. et WERY, R. 1976).

Par rapport à une estimation du niveau de revenu moyen correspondant à la satisfaction des besoins essentiels¹ en 1965, les résultats obtenus pour l'an 2000 (tableau 3) sont autant d'indicateurs socio-économiques qui renvoient à l'impact d'une série de mesures (R2 à R13 : tableau 2) visant à réduire les inégalités en référence à un scénario de base R1 représentant les tendances actuelles du pays.

La réduction des inégalités ressort :

- au niveau des revenus moyens (rural, urbain) du décile de population le plus pauvre - qui restent cependant très inférieurs aux montants moyens permettant la satisfaction des besoins essentiels -

- à la valeur du coefficient de Gini (légèrement atténuée),

- au plan de différents indicateurs sociaux : instruction, santé.

On relève aussi que les solutions dans leur ensemble ont un impact sur l'évolution démographique, et même pour certaines d'entre elles, une influence à peine moins forte que l'unique solution démographique (R13).

3- Bilan et critiques

Dans la mesure où les modèles BACHUE n'ont pas pour objectifs de se substituer aux modèles mentaux des politiciens, dans la mesure où ils ne prétendent qu'à servir de laboratoire d'essai à la recherche et à la planification, leur intérêt semble certain.

Ces modèles permettent "une comparaison directe de l'importance relative de différentes politiques [combinées ou isolées], alors que la connaissance immédiate (ou intuitive) n'autorise guère qu'un jugement sommaire sur le sens et l'intensité des effets" (LORIAUX, M. 1984).

¹ Les auteurs font remarquer que le revenu moyen fixé (3700 pesos Philippines par ménage et par an en 1965) est une première ébauche permettant l'approche en terme de satisfaction des besoins essentiels, lesquels avaient pour l'époque été cernés en ces termes : ration calorifique minimale FAO, 9 années d'école, 5-7 m² de superficie de logement par personne, objectif d'espérance de vie maximale.

Cependant, et ceci n'est pas un paradoxe, mais plutôt une évidence première, dans BACHUE "bien des aspects de la réalité sont nécessairement simplifiés à l'excès [et] les données ou la compréhension des phénomènes essentiels sont souvent pauvres [et] nombre de questions sont trop vastes ou trop mal délimitées pour être incorporées dans un modèle quantitatif" (HOPKINS, M.J.D., RODGERS, G.B. et WERY, R. 1976).

V. VUE D'ENSEMBLE

L'examen des modèles démo-économiques fait ressortir leur caractère ambigu. Cette équivoque provient :

- des limites de la formalisation en elle-même : le niveau de désagrégation est souvent insuffisant, des variables sont ignorées, il y a une absence de prise en compte des effets de rétroaction et parfois l'oubli de certaines contraintes etc... En d'autres termes, les modèles ne font que donner l'illusion qu'ils restituent la complexité des relations existant entre phénomènes démographiques, économiques et sociaux - un modèle aussi sophistiqué que BACHUE n'échappe pas à cette critique : "malgré ses 250 équations et ses 160 relations bivariées incorporées, BACHUE Philippines ne recoupe que 4 % de toutes les relations possibles identifiées par la matrice des Nations Unies¹ " (LORIAUX, M. 1984). Bien évidemment, le but d'un modèle étant d'opérer une réduction, on pourrait objecter que tout simplement un choix a été effectué des relations les plus fondamentales. Mais est-ce bien un choix raisonné parmi l'ensemble des relations possibles - et donc supposées connues - qui se réalise à chaque fois lors de l'élaboration d'un modèle ?

- des "mystifications" qu'entraîne la quantification. C'est ici le problème général de l'utilisation de méthodes quantitatives à des fins de recherche causale en sciences sociales. Il est tentant d'attribuer à certaines variables directement quantifiées un pouvoir explicatif, alors qu'elles ne sont que le reflet de processus globaux difficilement quantifiables. L'âge en démographie en est un exemple. Comme le souligne LE BRAS, H., l'âge n'explique pas les rôles ou les statuts, il en est le reflet : "La répartition des rôles [entre les individus d'une population] est le résultat d'un lent processus d'ajustement et de compensation entre les générations. Cette répartition dépend de l'évolution des structures d'âge, mais c'est le seul lien entre ces rôles et l'âge, alors que les démographes attribuent les rôles à l'âge" (LE BRAS, H. 1975).

¹ La matrice dont il s'agit ici est un essai de conceptualisation des interrelations entre population et économie (cf. Nations Unies, 1981).

- de l'utilisation inconsidérée de paramètres dont les valeurs sont parfois d'une détermination hasardeuse, et, de relations insuffisamment établies : "nous n'avons pas testé, ni même évalué l'ordre de grandeur des coefficients empiriques avec lesquels pondérer les divers effets positifs et négatifs de la croissance démographique. Lors même que nous sommes capables de distinguer le sens d'une relation nous ne pouvons en général rien dire de la forme de la fonction qui serait censée la représenter" (KUZNETS, S. 1960). Dans ce sens, les modèles sont à l'image de l'état d'avancement de la recherche en sciences sociales sur le thème population et développement. On serait presque tenté de dire que les synthèses sont encore prématurées et que l'actualité est toujours à la recherche pionnière, à la monographie.

- en fin de la pratique économétrique courante qui consiste en :

- "la diffusion d'une musique d'ambiance mathématique, gage d'expertise à peu près aussi convaincant que l'eût été vers 1900 la connaissance du Latin et du Grec;

- le recours à l'argument d'autorité;

- l'assouplissement injustifié d'hypothèses trop rigides;

- l'utilisation de modèles réduits ("toy economics") pour établir un résultat;

- et enfin le recours à l'analogie" (COUTY, P. 1983)¹.

Cette pratique revient, en définitive, et au même titre que d'autres pratiques, à permettre la traduction logique de la dimension idéologique de l'objet économique.

Nos remarques finales sont au nombre de trois :

1. Tout autant que la science, c'est l'idéologie qui fait le lien entre les modèles et les politiques actuelles de population.

2. Les modèles simplistes de la première heure ont laissé place à des exercices de simulation plus complexes qui revêtent un intérêt réel : celui de permettre aux chercheurs et aux planificateurs de progresser dans la voie de l'appréhension des inter-relations multiples entre l'économique, le social et la population. En particulier pour ce qui nous intéresse ici, ces modèles pourraient aider à mieux cerner les modalités de l'intégration des phénomènes démographiques aux processus de développement éco-

¹ COUTY, P. (1983) se réfère à un article de Mc CLOSKEY, D. (1983) dans lequel il est question de l'"à peu près méthodologique de l'économiste". Sur ce sujet voir également l'article de M. BEAUD dans le journal LE MONDE du 17/3/87.

nomiques et sociaux. Ceci étant, d'une part, le perfectionnement de ces modèles dépendra toujours de la poursuite de l'accumulation des résultats de la recherche explicative de base, dont ils se nourrissent; et d'autre part, la définition de politiques de population devrait demeurer une toute autre histoire, et, en bonne logique scientifique être subordonnée à la définition préalable, précise, des besoins démographiques à long terme d'une situation de développement donnée (SINGER, P. 1974). Et les modèles n'en sont pas encore là !!!

3. L'étude des politiques de population doit être prioritairement abordée par le biais de l'analyse politique des politiques publiques, analyse qui renvoie au cadre de l'organisation sociale du pouvoir (interne au gouvernement et à l'Etat, par rapport aux autres Nations et aux institutions internationales). De telles études ont été développées surtout en Amérique Latine¹, elles suggèrent que le premier fondement des politiques de population est un fondement politique.

Le temps de la démographie politique est donc venu - tel que défini par WEINER, M. (1971) le champ de cette discipline est :

- de traiter des conséquences politiques des changements démographiques
- d'aborder l'analyse des déterminants politiques des changements démographiques
- d'étudier les pratiques et la connaissance que les populations démontrent avoir des questions démographiques, en relation au discours qui leur est proposé.

VI CONCLUSION

En attendant les bio-politiques de population², les populations, traditionnellement régies par les crypto-politiques de population³, sont aujourd'hui confrontées aux politiques de population issues de BUCAREST 1974.

Les modèles de population n'en sont qu'accessoirement responsables.

¹ Cf. les travaux de ATRIA, R., CARDONA, R., BORSOTTI, C. et URZUA, R. sous l'égide du PISPAL (PISPAL, 1977).

² D'après FOUCAULT cité par CHASTELAND (1985) nous sommes déjà entrés dans une ère où les bio-politiques font partie intégrante de l'art de gouverner les hommes.

³ Les crypto-politiques sont l'ensemble des règles sociales et culturelles (concernant l'union, la transmission du patrimoine, l'attitude face à la vie et donc la mort, etc...) qui produisent dans une société donnée un régime démographique (VERRIERE, J. 1978).

ANNEXE 1 : LE MODELE DE COALE, A.J. ET HOOVER, E.M.

La formulation du modèle présentée ici s'inspire dans sa démarche de l'exposé détaillé contenu dans ROBINSON, C.W. et HORLACHER, D.E. (1971). On trouvera une présentation semblables chez J.C.CHESSNAIS (1986).

Nous avons cependant conservé la notation de COALE, A.J. et HOOVER, E.M. (1958), ce qui permet la lecture directe du tableau 1 qui reprend les résultats auxquels aboutirent les auteurs pour l'Inde sur la période 1956-1986.

L'équation de base du modèle est :

$$Y_{t+2.5} = Y_t + \frac{2-5G}{R_t} \quad (1)$$

où Y_t représente le revenu national au temps t . G les dépenses de croissance ("équivalent growth outlays") et R_t le coefficient marginal de capital.

Soit F l'investissement total et K le stock de capital, alors si $G = F = \Delta K$ et $R = \frac{\Delta K}{\Delta Y}$, on a $\frac{G}{R} = \Delta Y$ et l'augmentation de R avec le temps s'écrit : $R_t = m + nt$

G est construit de la manière suivante :

$$G = D + l_c W_c + l_i W_i)L + (l_c W_c + l_i W_i)_{t-15} (1-L)_{t-15} \quad (2)$$

où D est l'investissement en biens productifs (équipement-matériel); W_c et W_i les investissements en ressources humaines pour respectivement la population initiale et la population additionnelle; l_c et l_i les coefficients de productivité comparée de ces investissements par rapport à celle de l'équivalent D , L le taux de l'activité; et où le troisième terme représente le produit du montant pondéré des investissements sociaux réalisés 15 ans auparavant par la population inactive d'alors.

D étant donné par la politique de développement, il s'agit pour obtenir G de calculer W_c et W_1 . Soit C la population (comptée en équivalents de consommateur adulte), et ω_c l'investissement humain correspondant par tête; on pose :

$$W_c = \omega_c C = h Y \quad (3)$$

$$W_1 = 10 \omega_c \Delta C \quad (4)$$

on obtient $\frac{W_1}{W_c} = 10 p$ où p est le taux d'accroissement de la population :

$$p = \frac{\Delta C}{C}$$

L'investissement total F s'écrit :

$F = D + W_c + W_1$, c'est-à-dire

$$F = D + (1 + 10 p)hY \quad (5)$$

L'investissement étant implicitement égal à l'épargne, on a :

$F=E$, $E = C \left(\frac{F_0}{C_0} + a \left(\frac{Y}{C} - \frac{Y_0}{C_0} \right) \right)$, c'est-à-dire que l'épargne par habitant est

égale à l'épargne (ou l'investissement) en début de période : $\frac{F_0}{C_0}$ plus une

fraction a de la variation de revenu par tête : $\frac{Y}{C} - \frac{Y_0}{C_0}$

E peut encore s'écrire :

$$E = aY - \frac{aY_0 - F_0}{C_0} C \text{ et donc :}$$

$$F = E = aY - bC \quad (6)$$

Dès lors, les paramètres l_c , l_1 , a, m, n et h étant posés ou estimés à partir de la comptabilité nationale et C (et donc P) étant donné par la démographie, la projection s'effectue comme suit : les équations (5) et

(6) permettent de calculer Y , lequel détermine W_c , W_i et donc G et en définitive le revenu de la période suivante par l'intermédiaire de l'équation de base (1)

La projection peut être réalisée suivant différentes hypothèses de variation de population dont la détermination reste exogène au modèle. On peut alors comparer les revenus (ou les revenus par tête) obtenus.

Les résultats de la projection de abse effectuée par COALE, A.J. et HOOVER, E.M. figurent au tableau 1, où sont aussi présentés les tests effectués en faisant varier a , l_c , l_i et m et n .

Source : COALE, A.J. et HOOVER, E.M. (1958).

	Percentage Ratio of Low-Fertility to High-Fertility Per-Consumer Income							Projection 1986 Income per Consumer (1956 = 100)	
	1956	1961	1966	1971	1976	1981	1986	High Fertility	Low Fertility
Basic Projection 1 ($a = .30$) ($e_1 = 0$) ($e_2 = .5$) ($R = 3.0 + .02t$)	100	101	103	107	114	126	141	138	195
Alternative Projections Testing Effect of Different Marginal F/Y Ratios:									
Projection 2 ($a = .25$)	100	101	103	107	113	124	138	129	177
Projection 3 ($a = .35$)	100	101	103	107	115	127	145	150	217
Alternative Projections Testing Effect of Different Imputations of Growth Effects to D. W_c and W_i Outlays:									
Projection 4 ($e_1 = e_2 = 0$)	100	101	103	107	116	130	148	157	233
Projection 5 ($e_1 = e_2 = .5$)	100	101	103	107	113	124	138	138	191
Alternative Projections Testing Effect of Different Trends in R:									
Projection 6 ($R = 3.0$)	100	101	103	107	115	126	143	155	221
Projection 7 ($R = 3.0 + .04t$)	100	101	103	107	114	125	140	126	176

Tableau 1 : Evolution du rapport des projections effectuées du revenu par tête selon l'hypothèse alternative de fécondité (Inde 1956-1986)

ANNEXE II : LE MODELE DE TODARO, M.P.

Nous reprenons ici, avec une légère modification de présentation, le modèle TODARO, M.P. présenté par l'auteur dans TODARO, M.P. (1971).

L'équation fondamentale du modèle de TODARO est :

$$V(0) = \int_{t=0}^n [p(t) \cdot Y_u(t) - Y_r(t)] e^{-it} dt - C(0) \quad (1)$$

où $V(0)$ représente la valeur actualisée du flux de revenu urbain et rural net escompté pendant la période t envisagée par le migrant, $Y_u(t)$ et $Y_r(t)$ les revenus moyens respectivement en zone urbaine et rurale, n le nombre d'années de la période t , i le taux d'actualisation reflétant la degré de préférence temporelle du migrant, $C(0)$ le coût de la migration et $p(t)$ la probabilité d'avoir en t un emploi urbain au niveau de revenu moyen de la période t .

Soit $\pi(t)$ la probabilité d'avoir été choisi l'année t , alors :

$$p(t) = \pi(0) + [1-\pi(0)]\pi(1) + \dots + [1-\pi(0)][1-\pi(1)]\dots[1-\pi(t-1)]\pi(t)$$

qui s'écrit encore :

$$p(t) = \pi(0) + \sum_{x=1}^t \pi(x) \prod_{\Delta=0}^{x-1} [1-\pi(\Delta)] \quad ; \quad \frac{\delta p(t)}{\delta t} > 0 \quad (2)$$

Soit maintenant, et indépendamment de la période, S la main d'oeuvre totale urbaine disponible, N le niveau de l'emploi, γ le taux net de création d'emploi, π la probabilité d'obtenir un emploi urbain, ω la salaire urbain effectif et r le revenu rural effectif, enfin, d l'écart de revenu escompté entre la ville et la campagne défini tel que ci-avant.

On a alors les relations suivantes :

$$S = f(d) \text{ par hypothèse même du modèle} \quad (3)$$

$$d = \pi \omega - r \text{ ou encore}$$

$$d = \frac{\gamma N}{S-N} \omega - r, \text{ c'est à dire : } d = g(\gamma) \quad (4)$$

On pose que γ , le taux de création de l'emploi dépend à la fois du salaire ω et d'un paramètre a , dit de politique gouvernementale visant à accroître l'emploi, donc : $\gamma = h(\omega, a)$ (5)

Par suite l'effet d'une politique gouvernementale sur la main d'oeuvre totale disponible S (l'offre de main d'oeuvre) s'écrit : $\frac{\delta S}{\delta a}$ et est telle que :

$$\frac{\delta S}{\delta a} = \frac{\delta S}{\delta d} \frac{\delta d}{\delta \gamma} \frac{\delta \gamma}{\delta a} \quad (6)$$

et l'effet d'une politique gouvernementale sur la demande de main d'oeuvre s'écrit : $\frac{\delta(\gamma N)}{\delta a}$ avec

$$\frac{\delta(\gamma N)}{\delta a} = N \frac{\delta \gamma}{\delta a} \quad (7)$$

Le nombre des chômeurs urbains augmentera si :

$$\frac{\delta S}{\delta a} > \frac{\delta(\gamma N)}{\delta a} \quad (8)$$

c'est-à-dire si :

$$\frac{\delta S}{\delta d} \frac{\delta d}{\delta \gamma} \frac{\delta \gamma}{\delta a} > N \frac{\delta \gamma}{\delta a}$$

en substituant $\frac{\delta d}{\delta \gamma}$ par sa valeur calculée en (4), on obtient après

simplification : $\frac{\delta S}{\delta d} > \frac{d S-N}{\omega S}$ et en composant par $\frac{d}{S}$:

$$\frac{\frac{\delta S}{S}}{\frac{dd}{d}} > \frac{d S-N}{\omega S} \text{ ou encore :}$$

$$\frac{\frac{\delta S}{S}}{\frac{dd}{d}} > \frac{\pi\omega-r S-N}{\omega S} \quad (9)$$

L'élasticité de l'offre de main d'oeuvre urbaine par rapport à la différence de revenu escompté entre la ville et la campagne $\frac{\frac{\delta S}{S}}{\frac{dd}{d}}$ est appelé fonction de "réaction de migration".

ANNEXE 3 : LE MODELE DE BACHUE

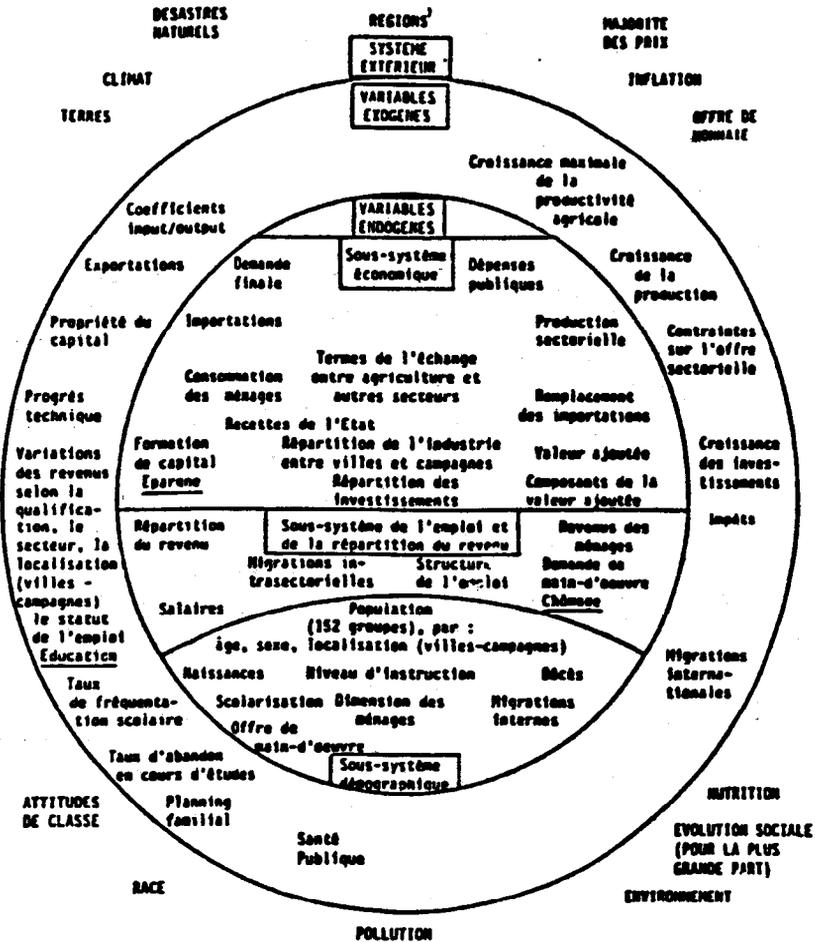


Schéma 1: Champ et situation des variables contenues dans BACHUE Philippines (Source : WERY, R. 1979)

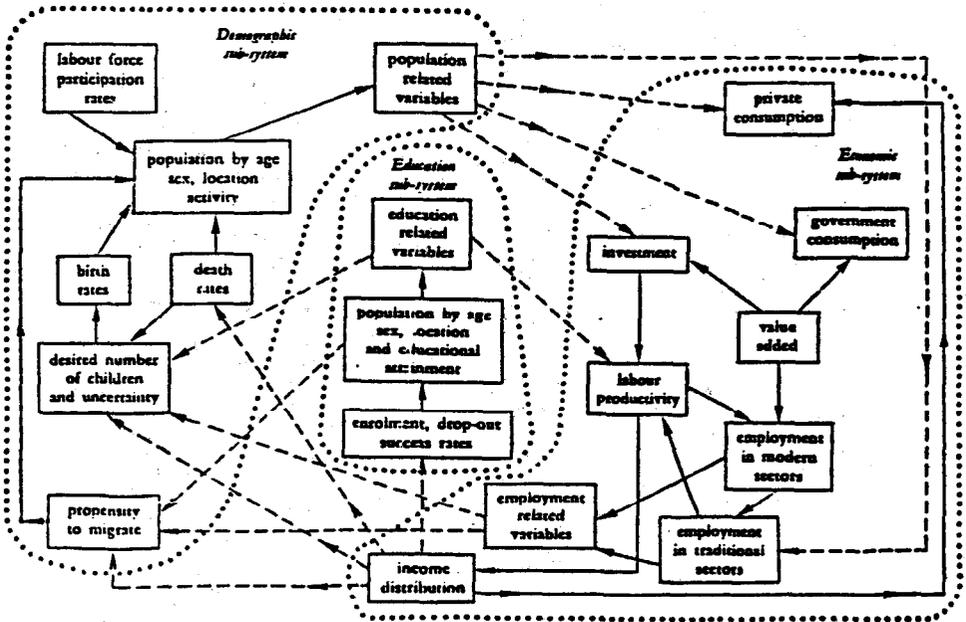


Schéma 2 : Les relations entre variables endogènes de BACHUE I. (Source : World employment programme, research in retrospect and prospect). GENEVE, 1976).

Tableau 2 : Description des expériences réalisées

Solution	Mesures cumulatives
R-1	Solution de base. Augmentation annuelle de la production et des investissements limitée à 7 pour cent. Croissance maximum de la productivité du travail agricole fixée à 3 pour cent par an. Exportations, remplacement des importations et progrès technique déterminés en dehors du modèle.
R-2	Nationalisation progressive des secteurs modernes (40 pour cent de leur production nationalisée en l'an 2000). Les bénéfices nationalisés s'ajoutant aux ressources de l'Etat, accroissement concomitant de ses investissements.
R-3	Promotion de la petite industrie, simulée par une augmentation de 5 pour cent par an, entre 1976 et 1980, des emplois indépendants dans le secteur moderne.
R-4	Adoption de techniques à forte densité de main-d'œuvre: réduction de 50 pour cent du rythme du progrès technique dans le secteur moderne et accroissement de 1,5 pour cent par an de la demande de main-d'œuvre non qualifiée dans le secteur moderne.
R-5	Augmentation de 1 point du taux maximum de croissance de la productivité du travail dans l'agriculture.
R-6	Augmentation de la croissance des taux de réussite dans les écoles rurales et urbaines pour atteindre 3 pour cent par an pour l'enseignement primaire et 1,5 pour cent pour l'enseignement secondaire (l'un et l'autre 0,7 pour cent par an dans la solution de base).
R-7	Programme de travaux publics de moyenne dimension simulé par l'accroissement des dépenses de l'Etat consacrées à la construction et aux programmes d'emploi rural (au début environ 19 pour cent des dépenses publiques ou 4 pour cent du PIB). Extension de ce programme au rythme de 8 pour cent par an afin d'éviter l'érosion de sa valeur avec l'augmentation du revenu.
R-8	Modification de la composition du commerce extérieur afin d'accélérer l'absorption de la main-d'œuvre: diminution des importations agricoles, augmentation des importations de produits manufacturés et de biens d'équipement, accroissement des exportations du secteur primaire et des exportations traditionnelles et réduction des exportations de produits manufacturés du secteur à forte densité de capital.
R-9	Réforme agraire de faible envergure, simulée par une réduction de 20 pour cent de la dispersion des revenus agricoles traditionnels et de 10 pour cent de la dispersion des revenus des cultures d'exportation et de la sylviculture.
R-10	Accroissement exogène de la propension à l'exode rural (pour commencer, augmentation de 70 pour cent de la migration nette par rapport à la solution de base, allant décroissant jusqu'à 35 pour cent en l'an 2000).
R-11	Augmentation des transferts de l'Etat par un impôt négatif sur le revenu: introduction d'un régime de subventions salariales. Financement partiel par la majoration des impôts directs sur les plus hauts revenus.
R-12	Réduction à 70 pour cent des valeurs originales de la dispersion des revenus dans chaque catégorie de main-d'œuvre (ne compris les changements impôts/transferts introduits dans la solution R-11). Se reporter au texte pour plus de détails.
R-13	Réduction exogène de la fécondité de 2 pour cent par an entre 1976 et 1985, contre 1 pour cent dans la solution de base (ne comprend pas les changements introduits dans la solution R-12).

Notes: Tous les changements sont introduits en 1976 et maintenus jusqu'en l'an 2000. Toutes les solutions jusqu'à R-11 sont cumulatives. Par exemple, la solution R-3 est la même que la solution de base R-1, plus les changements apportés dans R-2 et R-3. Toutefois, la solution R-13 comprend toutes les solutions jusqu'à R-11, mais à l'exclusion de R-12, laquelle inclut toutes les solutions jusqu'à R-10, mais exclut R-11.

(Source : HOPKINS, M.JD - RODGERS, G.B. et WERY, R. (1976).

VII BIBLIOGRAPHIE

VII.1 MODELE DE COALE, A.J. ET HOOVER E.M.

VII.1.a Le modèle

COALE, A.J. et HOOVER, E.M. : Population growth and economic development in low income countries. A case study of India's prospect. Princeton University Press, 1958.

COALE, A.J. : Crecimiento de la poblacion y desarrollo economico : El Caso de Mexico. in Lecturas Sobre temas demograficos. El Colegio de Mexico, 1982.

VII.1.b L'analyse et la critique du modèle

CHESNAIS, J.C. : La transition démographique. Etapes, formes, implications économiques. Travaux et documents de l'INED. Cah. n° 113, INED-PUF, 1986.

KUZNETS, S. : Population change and the Aggregate Out put. Conférence Princeton. 1960.

MYRDAL, G.: Asian Drama. An Inquiry into the Poverty of Nations Random House. New York. 1968.

ROBINSON, W.C. et HORLACHER, D.E. : Accroissement de la population et bien-être économique in Bulletin de démographie et de planning familial. Population Council, 1971, n° 6.

VII.2 MODELE DE TODARO, M.P.

VII.2.a Le modèle

TODARO, M.P. : A model of labour migration and urban unemployment in less developed countries. The American economic review, 59 (1) 1969.

HARRIS, J.R. et TODARO M.P. : Migration, Unemployment and development : A two sector analysis. in The American Economic Review, 60 (1), 1970.

TODARO, M.P. : L'exode rural en Afrique et ses rapports avec l'emploi et les revenus. in Revue Internationale du Travail. Vol 104, n° 5, nov. 1971.

EDWARDS, E.O. et TODARO, M.P. : Educational demand and supply in the context of growing unemployment in LDC. in World development, 1 (3-4), 1973.

TODARO, M.P. : Exode rural, chômage et probabilités d'emploi : Recherches théoriques et empiriques récentes. Colloques internationaux du CNRS, n° 550 : les aspects économiques de la croissance démographique. CNRS 1976.

VII.2.b L'analyse et la critique du modèle

BARNUM, H.N. et SABOT, R.H. : Education, employment probabilities and rural-urban migration in Tanzania. in : Oxford Bulletin of economics and Statistics 39 (2), May 1977.

HOUSE, W.J. et REMPEL, H. : Labour market pressures and wage determination in less developed countries : the case of Kenya. in : Economic development and cultural change 1976.

de GRAFT-JOHNSON, K.T. : Rapport entre la croissance démographique et l'exode rural, notamment au Ghana. in : Revue Internationale du Travail.

GUILLAUMONT, P. : Economie du développement. (Tome 2). P.U.F., "themis", Paris 1985.

Population Reports : Migration, croissance démographique et développement. Sujets spéciaux : série M, n° 7, oct. 1984.

GHAI, D.P. : Employment performance, prospects and policies in Kenya. East Africa Journal, 7(11), 1970.

SIMMONS, A.B. : Contrôle institutionnel, migration et offre de main-d'oeuvre : application aux mouvements historiques en Amérique Latine. In : Les changements ou les transitions démographiques dans le monde contemporain en développement. Colloques et séminaires ORSTOM. Sept. 1985, Paris.

VII.3 MODELE BACHUE

VII.3.a Le modèle

BLANDY, J.J. et WERY, R. : Population, croissance et emploi : Bachue. Revue Internationale du travail, mai 1973.

HOPKINS, M.J.D., RODGERS, G.B. et WERY, R. : L'utilisation de BACHUE pour évaluer les politiques démographiques et une stratégie des besoins essentiels. in : Revue Internationale du Travail. Vol. 114, n° 3, Nov.-Déc. 1976.

RODGERS, G.B. et ANKER, R. : Urban Employment in the 1980's : the case of Kenya and the Philippines. Population and Employment, Working paper n° 63, GENEVE, ILO, Mai 1978.

MACURA, M., POPOVIC, B. et RASEVIC, M. : Bachue Yugoslavia : Regionalised Policy simulation economicdemographic model of Yugoslavia. Population and employment, Working Paper n° 55. Geneve ILO. Juillet 1977.

de BRAGANCA, S.L., de FIGUEIREDO, J.B., da CUNHA RATO, M.H. : The simulation of Economic and demographic development in Brazil. World Employment. Programme. Geneve, ILO, Avril 1980.

MORELAND, R.S. : Modelling Labor Markets. In Dép. de démographie de l'UCL. Chaire Quetelet 1980 : Perspectives de population, d'emploi et de croissance urbaine. Liège, ORDINA, 1981.

VII.3.b L'origine, l'analyse et la critique du modèle

CAIRE, G. : Démographie et programme mondial de l'emploi. Revue Tiers Monde, t. XXIV, n° 95, 1983.

BOURCIER de CARBON, P. : A propos de quelques modèles démoéconomiques de développement. Population 1977, vol. 32, n° 3.

WERY, R. : Les modèles démo-économiques Bachue : quelques traits de leur développement. in : Dép. de démographie de l'U.C.L. Chaire Quetelet 1978 : Approche systémique en sciences de la population. Liège, ORDINA, 1979.

VII.4 AUTRES REFERENCES CITEES

ARTHUR, W.B. ET Mc NICOLL, G. : Large scale simulation models in population and development : What use to planners ? In : Population and Development Review. Vol. 1, n° 2, 1975.

BEAUD, M. : Une science ? Le Monde 17/3/1987.

CHASTELAND, J.C. et SZYKMAN, M. : Evolution récente de la fécondité dans le tiers monde 1960-65/1980-85. Revue Espace, populations, sociétés n° III, 1985. Université de Lille I.

COLE, H. et alli : L'anti-Malthus. Une critique de "Halte à la croissance". Paris, Seuil, 1974.

COUTY, P. : Les dominations en science économique. in Bulletin de liaison n° 1, dép. H. ORSTOM 1983.

ENKE, S. : Speculations on Population Growth and Economic Development. In : Quaterly Journal of Economics. 71 (1), Fév. 1957.

KIRK, D. : Dynamics of human populations. In : Eugenics quaterly, 2, 1955.

LE BRAS, H. : Dynamique des populations In : Les méthodes d'analyse en démographie économique. Dossiers et Recherches n° 1, sept. 1975, INED-Paris.

LEONTIEF, W. CARTER, A.P. et PETRI, P. : 1999, l'expertise de Wassily Leontief (traduction de l'Anglais). DUNOD, Paris 1977.

LIVENAI, P. et QUESNEL, A. : Population et développement : évolution du débat dans les milieux scientifiques et les institutions internationales depuis l'après guerre. Séminaire SATEC-ISD. Paris Janv. 1987.

LORIAUX, M. : Economie, population et politique démographique. In : Politique de population. Etudes et document n° 3-4 Déc. 1984. CIACO Editeur. Louvain La Neuve.

Mc CLOSKEY, D. : The rhetoric of Economics in : Journal of Economic Literature, vol. XXI, n° 2 Juin 1983.

NOTESTEIN, F. : Summary of the demographic background of problems of under developed areas. In : Milbank Memorial Fund quaterly. Vol. 22, 1948.

POPPER, K. : Plaidoyer pour l'indéterminisme. HERMANN, Paris 1984.

SINGER, P. : Intervention à la tribune "La croissance démographique et le rôle du monde en développement". Conférence de BUCAREST, 1974.

VERRIERE, J. : Les politiques de population. P.U.F. Le géographe Paris 1978.

WEINER, M. : Political demography : an inquiry into the political consequences of population change. John Hopkins Press. Baltimore 1971.

Banque Mondiale : Rapport sur le développement dans le monde. 1986.

Nations Unies :The work of the Task force on Interrelation ships between population an development. New York 1981 Doc. ESA/P./WP.

PISPAL Estructura politica y política de poblacion Cuadernos del PISPAL. El Colegio de Mexico. 1981.

Theme :
MODELES COGNITIFS

Coordinateur :
ODILE PALLIES

UN MODELE COGNITIF DE L'INVENTION DANS LA PHARMACOPEE TAHITIENNE TRADITIONNELLE

Yves LEMAITRE

I INTRODUCTION

Le modèle présenté résulte de recherches d'anthropologie médicale en cours à Tahiti et dans les îles avoisinantes. Ces recherches sont menées principalement sous forme d'interviews en langue tahitienne auprès de guérisseurs et d'informateurs divers.

II LA MÉDECINE TAHITIENNE TRADITIONNELLE

La médecine tahitienne traditionnelle reste très vivace dans la société actuelle. Les tahitiens reconnaissent deux grandes catégories de maladies : les maladies "naturelles" et les maladies "surnaturelles", la médecine européenne étant d'ailleurs impuissante devant ces dernières, pensent-ils. Le système traditionnel des maladies découpe la réalité biologique suivant des catégories assez éloignées des notions de la nosologie scientifique. Les guérisseurs sont essentiellement des herboristes, des masseurs et des chamanes. Parmi les divers traitements qu'ils utilisent l'usage des médicaments occupe la première place. Ils sont utilisés pour combattre les maladies tant "naturelles" que "surnaturelles". Les processus de construction des connaissances, des croyances et des idées diverses que

représente la pharmacopée traditionnelle restent en grande partie énigmatiques.

III. LES INCONNUES DE LA CONNAISSANCE

Les médicaments sont, en règle générale, constitués de plusieurs ingrédients qui, sauf exception, proviennent de plantes, communément 4 ou 5 plantes, mais parfois 10 ou 20 et exceptionnellement 100. Les substances animales et minérales sont très peu utilisées. L'explication de la composition des recettes et de leur invention est donc compliquée par la multiplicité des paramètres que sont les divers ingrédients, leur maîtrise empirique semble difficile.

On sait d'une part que l'association de plusieurs substances actives ne produit pas nécessairement une additivité des effets physiologiques, il peut y avoir synergie ou antagonisme. Et il ne semble pas, d'autre part, que l'efficacité thérapeutique due aux substances actives que contiennent parfois les médicaments, puisse donner une explication générale de leur existence et de leur composition. Sans doute, certains cas de guérison assez bien établis peuvent-ils raisonnablement être attribués à cet effet, mais les voies de la guérison sont diverses. On connaît l'effet placebo, l'action du réconfort psychologique, ou bien les guérisons par terminaison du rôle de malade sans véritable atténuation des symptômes. Enfin la satisfaction procurée par les traitements n'est pas toujours celle de la guérison, mais elle peut être la confirmation expérimentale d'une certaine vision du monde, permettant d'expliquer la maladie, la souffrance et l'échec des tentatives de guérison (Young 1973). La pharmacopée traditionnelle n'est donc pas seulement une connaissance positive accumulée par expérimentations successives, mais aussi un système d'interprétation symbolique de l'environnement social et naturel (comme le reste des idées médicales : Augé 1986).

La médecine et la pharmacopée traditionnelle ont souvent été présentées comme des "traditions immuables" (critique de Dos Santos 1986), dont l'origine se perd dans la nuit des temps. L'historien de la médecine bien connu Ackerknecht a même été tenté d'attribuer à l'instinct de l'homme malade ou du "pré-homme" (Acherknecht 1958) le choix des plantes médicinales qui le guérissent. Au contraire, l'observation de la société tahitienne contemporaine semble montrer que la pharmacopée qui nous occupe, peut être décrite comme un système dynamique où s'affrontent l'ordre des recettes établies et le désordre de l'invention (Lemaître 1988). Le pouvoir des recettes est attribué au mana des ancêtres. Les propriétaires des recettes possèdent non seulement la connaissance de la liste des ingrédients de la recette, mais aussi le pouvoir hérité des ancêtres qui accompagne la recette et sans laquelle elle n'est rien. Les recettes sont transmises aux vivants par les ancêtres suivant deux voies, si

l'onse réfère aux idées qui ont cours dans cette culture. La chaîne des ascendants est la voie indirecte : les guérisseurs sont directement en relation avec leurs ancêtres qui leur donnent des recettes. Le rôle du rêve dans l'invention n'exclut pas l'expérimentation (exploration des plantes introduites), ni les modèles (le modèle de l'accumulation produisant des panacées). Il permet de donner une légitimité aux recettes nouvelles, qui peuvent ainsi puiser leur pouvoir symbolique à la même source que les recettes établies : le mana des ancêtres. On peut supposer que suivant le schéma proposé ci-après qui comporte une boucle de régulation, une sorte de screening se produit à long terme, sélectionnant des recettes qui donnent satisfaction, et parmi celles-ci, quelques unes qui comportent des substances actives utilisées à bon escient, avec la dose convenable évitant ainsi la toxicité ou l'absence d'effet.

IV. QUELQUES PROPRIÉTÉS STATISTIQUES DES RECETTES

La culture tahitienne ancienne, exclusivement orale, connaissait des "traditions cadencées sur le corps humain" selon le médecin français Comeiras qui écrivait en 1845. Actuellement les recettes sont notées dans des cahiers, les puta tupuna "livres d'ancêtres" contenant les généalogies, ou les puta pa'ari "livres de sagesse". J'ai écrit un programme de saisie pouvant noter de manière aussi exhaustive que possible l'ensemble des informations contenues dans deux cahiers de recettes ayant appartenu à des guérisseurs tahitiens aujourd'hui décédés. Ces deux recueils, dont le plus ancien date peut-être du début du siècle, présentent l'intérêt d'être des corpus de recettes bien définis qui permettent des comparaisons. Le recueil VRO comprend 108 recettes, le recueil PIR, 142 recettes. Les occurrences des citations d'espèces de plantes médicinales et d'ingrédients divers sont respectivement au nombre de 475 et 621 dans ces recueils.

Les recettes médicinales tahitiennes utilisent un peu plus d'une centaine d'espèces de plantes sur les 1200 espèces (approx.) qui étaient présentes dans ces îles avant l'arrivée des Européens. Les recettes médicinales sont très nombreuses, elles sont obtenues par la combinaison de diverses caractéristiques des ingrédients telles que : l'espèce des plantes, la partie des plantes retenues pour le médicament, la quantité des plantes, le dosage du médicament. Les catégories sont fractionnées en sous-catégories qui en augmentent la complexité : sexe symbolique des plantes suivant leur morphologie, couleur, état de maturité, présence ou absence de fleurs, de feuilles. Il est donc possible de créer un nombre pratiquement illimité de recettes à partir de cette centaine de plantes.

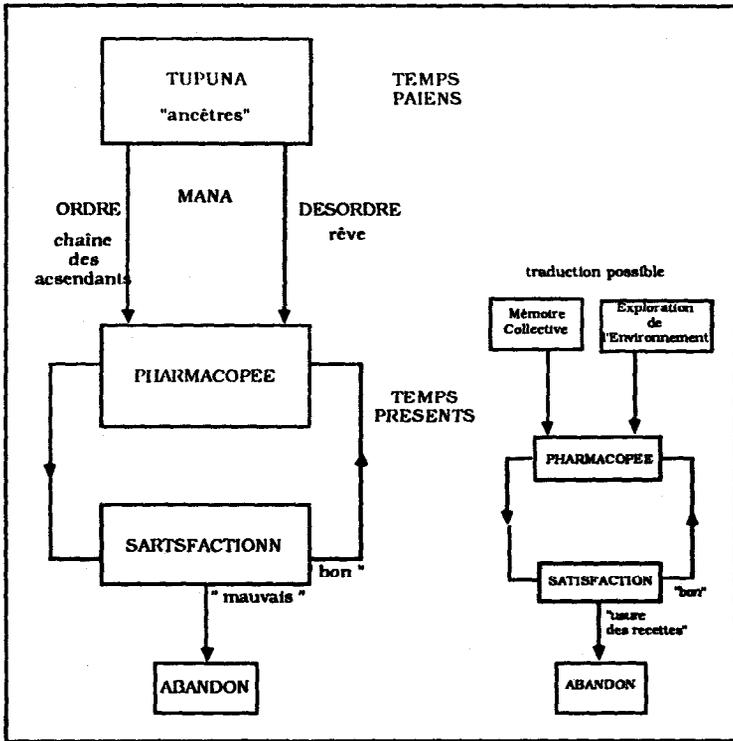


Figure 1 La production des recettes de la pharmacopée tahitienne traditionnelle

Le point de départ de la réflexion qui aboutit au modèle présenté est l'observation de la fréquence relative des ingrédients dans les différentes recettes, en fonction du rang de ces ingrédients. Pour ces calculs, les ingrédients sont ordonnés par rapport à la fréquence relative, lorsque deux ingrédients ont la même fréquence, le rang qui leur est donné est arbitraire. Les deux cahiers de recettes repérés par les noms VRO et PIR aboutissent à des distributions (si toutefois on veut bien assimiler le rang à une variable aléatoire) tout à fait semblables, d'allure hyperbolique (première page des figures).

Elles évoquent les lois de ZIPF-MANDELBROT, connues en géographie (loi rang-taille pour les villes, dimensions des étendues d'eau ...), en économie (loi des revenus de PARETO), en écologie numérique (répartition des individus en fonction des espèces dans un biotope), en linguistique (loi de ZIPF pour le lexique : le produit rang \times fréquence est une constante pour chacun des mots d'un corpus de textes donné) et enfin en psychologie.

La loi de ZIPP sur le produit rang x fréquence génère un graphe qui est un segment de droite en coordonnées logarithmiques. Elle n'est vraie qu'en première approximation et a été précisée par MANDELBROT. Le calcul d'une régression à partir d'une loi de la forme

$$Y = \frac{A}{(X + B)^C} \text{ donne une approximation satisfaisante.}$$

On peut aussi observer une autre régularité qui n'est pas sans rapport avec la précédente. On recherche le nombre de fois où chaque ingrédient (ou chaque espèce de plante) est cité dans un des recueils de recettes. On détermine ensuite combien d'ingrédients différents (ou combien d'espèces de plantes) correspondent à un nombre de citations donné. On obtient une répartition relativement régulière, d'allure hyperbolique. On peut l'interpréter en disant que la pharmacopée tahitienne fait usage de plantes médicinales (ou ingrédients) qui ont un large spectre d'emploi et qui sont peu nombreuses. A l'opposé elle fait usage de plantes médicinales (ou ingrédients) très spécifiques qui, elles, sont nombreuses. Les deux recueils de recettes produisent des répartitions du même type (deuxième page des figures).

Ces différentes affirmations pourraient passer pour mathématiquement triviales. On conçoit aisément par exemple que les plantes médicinales spécifiques soient plus nombreuses que celles qui ont un plus large emploi, et que les fréquences relatives décroissent en fonction du rang puisque c'est ainsi qu'on les a rangées. Mais la précision et la régularité de la décroissance demandent une explication qui est l'objet de ce qui suit.

V. L'HYPOTHESE PROPOSÉE

Comme dans les analyses faites par MANDELBROT pour expliquer la loi de ZIPP en lexicologie (et LYDALL pour la loi des revenus en économie), on partira d'une structure hiérarchique. Cette structure hiérarchique est celle du modèle cognitif qui est proposé ici (notons que dans la suite du texte, pour plus de facilités, on parlera de plantes plutôt que d'ingrédients, car les plantes médicinales sont les ingrédients essentiels des recettes et le vocabulaire disponible pour parler des plantes est moins vague que celui des ingrédients en général).

V.1 LE MODELE COGNITIF

On suppose que les noms des espèces de plantes sont plus ou moins disponibles dans la mémoire des individus qui inventent les recettes. Certaines espèces sont plus éminentes que d'autres quelles qu'en soient les raisons, que leur propriétés médicinales soient plus connues ou plus remarquables, ou qu'elles soient plus familières parce que ce sont des plantes poussant au voisinage des habitations ou des mauvaises herbes des cultures.

On suppose aussi que l'association d'idée fait surgir d'autres noms d'espèces médicinales quand une première plante médicinale est évoquée. Les raisons de cette association peuvent être diverses, par exemple les recettes déjà connues peuvent fournir des modèles d'association, mais l'association peut aussi être symbolique, ou provenir d'autres rapprochements comme la proximité des lieux où poussent ces plantes. Elle peut enfin résulter de raisons plus techniques comme la complémentarité des propriétés médicinales.

V.2 LA SYNTAXE DES RECETTES

Les deux suppositions qui viennent d'être énoncées ne sont pas contraires à des constatations qui peuvent être faites ordinairement. Elles impliquent aussi que les recettes ne sont pas une simple accumulation de plantes, mais possèdent une structure cachée formalisable par :

une opération d'addition +

une relation de dépendance hiérarchique ()

par exemple : a (b + c) + d (e (f))

V.3 LE MODELE HIÉRARCHIQUE THÉORIQUE

Le modèle cognitif établit une hiérarchie. Pour la suite du calcul on supposera que le modèle cognitif range les plantes suivant une hiérarchie régulière : chaque plante domine un même nombre de plantes qui lui sont immédiatement inférieures soit N ce nombre. Au niveau 0 il existe donc 1 plante ; au niveau 1, N plantes ; au niveau 2, N^2 plantes ; au niveau k , N^k plantes.

On considèrera aussi que la citation d'une espèce médicinale donnée a pour conséquence de faire apparaître chacune des plantes associées avec une probabilité p . Si la probabilité de citation d'une plante est F_0 la probabilité de citation des plantes de niveau k est : $F = F_0 \times p^k$

Les plantes sont classées par rang suivant leur probabilité de citation. Comme il a été déjà mentionné, lorsque plusieurs plantes ont la même probabilité, on leur affecte un rang arbitraire. Dans ces conditions on peut reprendre l'argument de MANDELBROT sur la fréquence des mots. Au niveau k le rang r des plantes varie entre

$$1 + N + N^2 + N^3 + \dots + N^{k-1} \text{ exclus}$$

$$\text{et } 1 + N + N^2 + N^3 + \dots + N^{k-1} + N^k \text{ inclus.}$$

soit $(N^{k+1} - 1)/(N - 1) < r \leq (N^{k+1} - 1)/(N - 1)$

Pour obtenir une approximation de r , on prend la moyenne des deux extrémités de l'intervalle. Le détail du calcul est mentionné en note. La valeur trouvée pour la fréquence relative F en fonction du rang r est :

$$F = \frac{A}{(r + B)^C}$$

A , B et C sont des constantes, A et C sont positifs, B aussi dans le modèle régulier théorique où N est un entier supérieur à 1.

$$C = \frac{\text{Log } p}{\text{Log } N} \quad B = \frac{1}{N-1}$$

VI CONSÉQUENCES DES CALCULS

Le modèle cognitif retenu explique que les recettes de la pharmacopée suivent en première approximation la loi de Zipf :

fréquence relative \times rang = constante

et avec une précision plus satisfaisante la loi de Mandelbrot :

$$F = \frac{A}{(r + B)^C}$$

Le coefficient C qui est l'exposant du dénominateur permet de caractériser la "richesse" des recettes. Dans le recueil VRO il vaut 0,978 et dans le recueil PIR, 0,690. La décroissance plus rapide de la fréquence relative dans VRO indique que les mêmes plantes ont tendance à revenir plus souvent dans les recettes que dans PIR. Les recettes du recueil PIR sont donc plus riches que les recettes du recueil VRO.

Les coefficients C déterminés pour les deux exemples sont inférieurs à 1, donc les séries correspondance, qui sont les sommes de termes de la forme $\frac{1}{(r + B)^C}$ sont divergentes. Le modèle ne doit donc contenir qu'un

nombre fini d'espèces de plantes ou d'ingrédients pour que le probabilité totale ou la somme des fréquences relatives puisse être finie et égale à 1. Ceci suggère que la liste des ingrédients est une liste fermée, qui comprend un nombre déterminé d'éléments (au contraire, les calculs faits sur le lexique montrent que celui-ci se comporte comme s'il comprenait un nombre de mots théoriquement illimité, certains étant très peu employés).

Le modèle retenu permet aussi d'expliquer la décroissance du nombre v d'espèces médicinales en fonction du nombre u de citations dans les recettes. Au niveau k de la hiérarchie des plantes (ou rappelons le : plus généralement des ingrédients), le nombre de plantes est

$v = N^k$ et l'espérance du nombre de citations d'une de ces plantes est

$u = p^k \cdot F_0 \cdot U$, U étant le nombre total de citations, soit:

$$u = p^k U_0.$$

D'où $\text{Log } v = k \text{ Log } N$ et $\text{Log } u = \text{Log } U_0 + \frac{\text{Log } p}{\text{Log } N} \text{Log } v$.

Or on a posé $\frac{\text{Log } N}{\text{Log } p} = \frac{-1}{C}$ (voir note). Donc

$$\text{Log } v = \frac{1}{C} \text{Log } U_0 - \frac{1}{C} \text{Log } u \text{ et } v = e^{\frac{1}{C} \text{Log } U_0} \cdot e^{-\frac{1}{C} \text{Log } u}$$

finalement :

$$v = U_0^{\frac{1}{C}} \cdot u^{-\frac{1}{C}} \quad \text{avec } C = \frac{-\text{Log } p}{\text{Log } N}$$

La répartition des espèces de plantes (ou des divers ingrédients) en fonction de leur nombre de citation dans les recettes peut donc être approchée par une régression qui est une fonction puissance :

$$Y = A' \cdot X^{B'}$$

Ceci rend compte du fait que la pharmacopée comporte des plantes médicinales à usage très large qui sont en nombre très réduit et des plantes médicinales à usage très spécifique qui sont au contraire en grand nombre. Par contre les exposants B' de cette régression s'écartent notablement des valeurs $\frac{1}{C}$ prévues par le calcul.

VII. VÉRIFICATIONS POSSIBLES

Une analyse factorielle des correspondances a été faite croisant entre elles les 40 plantes et ingrédients les plus communs du recueil VRO. Elle montre, comme on pouvait s'y attendre, des associations entre certaines espèces médicinales. Pour l'instant, elle n'a pu être étendue à l'ensemble des plantes, ni complétée par des analyses hiérarchiques.

Il est vraisemblable aussi que le modèle présenté n'est pas lié à une culture particulière, mais reflète un fonctionnement sans doute optimisé des structures mentales, commun à divers peuples, qui serait une version de plus de la "loi du moindre effort" de ZIPF. Ainsi ce modèle pourrait être généralisé, et étendu aux recettes d'autres pharmacopées, traditionnelles ou non, et aussi à des recettes qui n'ont rien de médicinal. Des vérifications intéressantes pourront être faites à ce propos. C'est aussi un problème de psychologie cognitive qui pourrait être abordé de toute autre manière.

VIII. N O T E : DÉTAIL DU CALCUL :

$$r = \frac{1}{2 \cdot (N-1)} \cdot (N^{k+1} + N^k - 2)$$

$$\text{or } p^k = \frac{F}{F_0}, \text{ soit } k = \frac{\text{Log} \left(\frac{F}{F_0} \right)}{\text{Log } p}, \text{ d'où}$$

$$N^k = N \text{ Log} (F/F_0) / \text{Log } p = \frac{F \text{ Log} N}{F_0 \text{ Log } p}$$

$$\text{posant } \frac{\text{Log} N}{\text{Log } p} = \frac{-1}{C}, \text{ C est positif}$$

$$N^k = \left(\frac{F}{F_0} \right)^{-\frac{1}{C}} = F^{-\frac{1}{C}} F_0^{\frac{1}{C}} \text{ d'où}$$

$$r = \frac{1}{2 \cdot (N-1)} \cdot \left(F^{-\frac{1}{C}} F_0^{\frac{1}{C}} (N+1) - 2 \right)$$

$$r = \frac{-1}{(N-1)} + F^{-\frac{1}{C}} \cdot F_0^{\frac{1}{C}} \frac{N+1}{2(N-1)}$$

$$\text{posant } \frac{F_0 \frac{1}{C} (N+1)}{2(N-1)} = A \frac{1}{C} \quad \text{et} \quad \frac{1}{N-1} = B$$

$$r = -B + F \frac{1}{C} A \frac{1}{C} \quad \text{et enfin}$$

$$F = \frac{A}{(r+B)C}$$

Signalons que lorsque le coefficient C est supérieur à 1, son inverse est interprétable comme la dimension d'un ensemble fractal Cantorien, ce qui n'est pas le cas ici. Mandelbrot a montré qu'il donne alors une image géométrique de la hiérarchie.

IX BIBLIOGRAPHIE

ACKERKNECHT, E.H. 1958, article du Bulletin of the history of medicine, reproduit p. 343-353, in A Reader in Comparative Religion : an Anthropological Approach. Ed. par W. Lessa and E. Vogt. New York : Row Peterson.

AUGE M. & HERZLICH C. 1986, Le sens du mal, Paris E.A.C.

CLUNE Francis J. 1976, Witchcraft, the Shaman, and Active Pharmacopeia, in World Anthropology, Medical Anthropology The Hague : Mouton.

DOS SANTOS José 1986, Les médecines parallèles ne se rejoignent pas, Autrement, n° 85, Dec. 86.

LEGENDTRE & LEGENDRE année ?, Ecologie numérique, Paris : Masson.

LEMAITRE Yves 1988, Plantes médicinales, recettes et société à Tahiti, Communication au II° Congrès International des Médecines Traditionnelles, Lima.

MANDELBROT Benoît 1967, Sur l'épistémologie du hasard dans les sciences sociales, in Logique et connaissance scientifique, Paris : Encyclopédie de la Pléiade.

MANDELBROT Benoît 1968, Les constantes chiffrées du discours, in Le langage, Paris : Encyclopédie de la Pléiade.

MANDELBROT Benoît 1984, Les objets fractals, Paris : Flammarion.

REY année ? Chapitre II. in Lextique, vocabulaires et linguistique quantitative. La lexicologie, Paris : Klincksieck.

YOUNG Allan 1976, Some Implications of Medical Beliefs and Practices for Social Anthropology. American Anthropologist : 78.

L'ABORD TOPOLOGIQUE POUR LA RECHERCHE EN ETHNOLOGIE

Bertrand GERARD

L'ethnologue a à traiter d'observations faites sur le terrain. Nombre d'études ethnologiques se sont déroulées dans des sociétés dites "orales" - où la lecture de différents systèmes de signes précède ou se passe de l'écriture : suivre une piste, interpréter un jet de coquillages ou des événements météorologiques, c'est effectuer une lecture de signes, érigés en systèmes, selon un certain code -.

Nous recueillons des témoignages, des récits, des généalogies ainsi que d'autres éléments de la vie politique, sociale, affective, rituelle et d'autres champs d'observation, bref de tout ce qui fait que des hommes vivent en rapport les uns avec les autres dans un contexte naturel et culturel donné que nous avons le plus grand mal à restituer dans sa totalité. Ces notes de terrain constituent un matériel textuel. Nous travaillons par, avec, de l'écrit sur des énoncés et des observations dont il est rendu compte dans des langues naturelles.

Ce travail, effectué par de l'écrit, comprend généralement trois phases :

- La première est celle de la traduction. Assez souvent, les communautés humaines sur lesquelles nous portons notre attention, parlent une ou plusieurs langues qui n'entretiennent pas avec la nôtre des rapports d'intelligibilité. Nous nous trouvons, de ce fait, dans la nécessité de traduire, *de passer d'une langue naturelle à une autre.*

- La seconde est celle de la transcription : ce qui nous est dit, dans une langue qui n'est pas nécessairement la nôtre, nous avons à en garder une

trace, un témoignage écrit ; nous avons à le transcrire, à *passer de l'oral à l'écrit*, à rendre compte d'observations non verbales par de l'écrit.

- La troisième phase est la translittération (au sens que lui prête Jean Allouche¹. L'ensemble de nos transcriptions constitue la matière de nos analyses ; analyser, c'est passer du produit de l'observation, du recueil de l'information, à une problématique visant à l'établissement d'une interprétation qui rende compte, au plus près, de l'ensemble des faits observés : la translittération correspond au *passage d'un langage à un autre* (celui de l'observation à celui de l'analyse).

Cette translittération, dans les sciences dites dures, telles la physique ou la biologie, nécessite de faire appel à un langage formalisé, doté d'une véritable autonomie quant aux "objets" auxquels il est appliqué, soit un langage de pure dénotation : les Mathématiques. Le propre, l'intérêt des mathématiques est qu'elles ne signifient rien mais imposent la rigueur de leurs syntaxe à quiconque prétend en faire l'emploi pour analyser des matériaux issus de l'observation. De fait, les mathématiques n'entretiennent de contacts avec la réalité que par le biais des sciences qui les utilisent.

La théorie des groupes, la théorie des catastrophes et d'autres champs des mathématiques ont été sollicités par différents chercheurs afin d'organiser et de traiter des matériaux dont le traitement ne peut être que qualitatif en ce qu'ils relèvent de la langue naturelle ; de cette langue naturelle dont chacun sait que l'emploi n'est pas strictement limité à la communication d'informations mais établit entre celui qui parle et celui qui entend, ou écoute, un ensemble de rapports d'ordre non verbal.

Parler, c'est d'abord s'adresser à quelqu'un, ce qui n'exclut pas, mais ne nécessite pas non plus, qu'on ait toujours quelque chose à lui dire. Cette question centrale de l'adresse sous-tend nombre de questions que nous sommes tenus de nous poser concernant l'énonciation. Nous savons par ailleurs que les signes de la langue n'entretiennent pas de rapports biunivoques avec la réalité qu'ils désignent. Parler c'est, entre autres choses, jouer à plein de la métaphore et de la métonymie ; c'est aussi pouvoir établir des rapports entre des signes de la langue qui ne sont pas du même ordre que ceux qu'entretiennent entre eux les objets réels : la structure du langage n'est pas celle du réel. Les représentations du réel supposent l'application d'un système discontinu de signes (ceux de la langue) à quelque chose de continu, le réel.

De fait, travaillant sur une culture donnée, nous sommes tenus de réaliser notre recueil d'informations en fonction d'un certain type de découpage qui nous est imposé par le langage qui élabore et structure la réalité telle

¹ Allouche J. Lettre pour lettre. Transcrire, traduire, translittérer. Paris, (Eres, "littora"), 1986.

de Boy pour les Moose du Burkina Faso¹ et l'hypersphère pour les Aborigènes d'Australie. Sur chacune de ces figures centrales, déduites d'une première phase d'analyse, nous pouvons pointer des singularités et analyser des relations sociales, mais en nous soumettant aux exigences imposées par la syntaxe des relations mathématiques qu'impose la structure topologique de cette figure.

La question n'est pas d'épuiser le réel, qui se trouverait réduit à une formule ou à un schéma, mais de questionner nos matériaux en nous appuyant sur un langage dont la logique doit le moins possible à la structure des langues naturelles. Faire appel à un langage construit, axiomatisé, et qui nous impose ses contraintes internes, peut nous aider à organiser notre réflexion sur des productions langagières qui signifient trop.

En effet, au delà de la mise en évidence d'une structure qui nous permettrait d'articuler, de nouer entre eux, les différents champs du langage qui caractériseraient une société (celui de la parenté, de la mythologie etc.), nous avons à nous préoccuper de la pertinence de ce type d'approche utilisé dans une perspective "comparatiste". Nous disposons d'un outil théorique qui nous offre très vraisemblablement des possibilités d'interrogations plus riches que celles auxquelles nous nous tenons actuellement : pourquoi, par exemple, le tore et l'hypercube, espaces non moebiens, s'imposent-ils pour rendre compte de deux sociétés océaniques (Les Trobriands et l'Australie aborigène) alors que des espaces moebiens, le cross-cap et la surface de Boy, sont convoqués pour l'analyse de sociétés africaines (Les Moose et les Bamiléké) ? Que signifie le fait que le centre soit situé à l'intérieur ou à l'extérieur de la figure (l'hypercube, le tore) ; que signifie l'existence d'un, de plusieurs pôles ou leur absence sur une figure donnée (le cross-cap, l'hypercube, le tore) ? De quoi nous parle le fait que certaines figures soient orientables et d'autres pas ? Autant de questions dont nous savons qu'elles sont pertinentes, mais auxquelles nous ne devons pas répondre avec trop de précipitation. Il s'agit d'une recherche, associant des chercheurs travaillant dans des zones culturellement bien différenciées, qui ne peut encore produire, dans cette phase d'émergence, l'ensemble de ses résultats.

L'apport actuel pour la recherche que nous fournit ce recours à la topologie des surfaces peut être brièvement résumé de la manière suivante :

- en tant qu'illustration ou schéma, la figure vaut par ses propriétés graphiques ;
- en tant qu'outil d'analyse la figure vaut par ses propriétés formelles ;

¹ Gerard.B. 1986. "Entre Pouvoir et Terre." E.R, n°101-102 : 121-134.; La souveraineté chez les Moose et les Kurumba : abord topologique. Paris, 1986, mimeo.

qu'elle peut être conçue dans notre univers culturel . Par exemple, établir une coupure entre ce qui relève du religieux et du politique n'est pas en tout lieu pertinent ; dans un autre ordre de représentations, rien ne confirme que nous effectuons dans le réel des distinctions universellement pertinentes pour rendre compte de notre environnement. Les observations que nous pouvons faire tendent à montrer, au contraire, qu'il peut exister des rapports étroits entre les systèmes matrimoniaux, les nomenclatures de la parenté, la mythologie, les modes de représentation ou d'appropriation de l'environnement et tout autre aspect de la vie des hommes que nous étudions. Comment en rendre compte ?

Existe-il un système d'écriture qui nous permettrait d'effectuer cette mise en rapport des différents champs du langage en nous imposant des contraintes syntaxiques suffisamment exigeantes pour nous garantir, autant qu'il se peut, de toute dérive qui nous serait imposée par notre propre rapport au monde. Certains d'entre nous en sont venus à considérer que la topologie des surfaces pouvait nous fournir cet outil d'analyse dont nous éprouvons la nécessité. Nous avons choisi de faire appel à ce champ des mathématiques car il nous est apparu pertinent comme instrument d'analyse des représentations symboliques.

La topologie est une branche des mathématiques qui paraît proche de la géométrie. Toutes deux, en effet, ont pour objet l'étude de figures ou configurations spatiales, telles le cercle, la sphère ou l'hypercube dont il sera question par la suite.

La topologie des surfaces s'intéresse tout spécifiquement aux propriétés invariantes de ces figures lorsqu'elles sont soumises à une suite de transformations continues (homéomorphismes), tout particulièrement à des distorsions qui n'impliquent ni déchirements ni coupure de la surface considérée. Ainsi, alors que le cube et la sphère sont en géométrie des figures ayant des propriétés différentes, elles sont homéomorphes d'un point de vue topologique : pour passer du cube à la sphère, nous sommes en effet autorisés à "arrondir les angles" du premier. Ceci signifie également qu'une sphère "topologique" est une surface simplement connexe dont tous les points ne sont pas nécessairement équidistants d'un point central situé à l'intérieur de la surface. La topologie des surfaces privilégie la relation au détriment du nombre, la continuité au détriment de la discontinuité.

En tant que mathématique du continu, elle nous a permis de faire appel à une figure centrale pour analyser une société donnée : le tore pour les Trobriandais , le cross-cap pour les Bamiléké du Cameroun¹, la surface

¹ . Pradelles de Latour. C-H. "La parenté trobriandaise reconsidérée" in Littoral, 1984, n° 11/12 : 115-136. ; Le champ du langage dans une chefferie Bamiléké. Thèse d'Etat, Paris, 1986.

- en tant que mathésis , ce qui suppose que les deux conditions précédentes soient remplies , la figure correspond à un système d'écriture.

Ce système d'écriture résulte du rabattement des propriétés d'un langage logico-mathématique sur un langage spéculatif. Il a pour effet de ramener un corpus de données à sa seule inscription sur une structure. Ce que la structure confère en retour au corpus de matériaux est une écriture isomorphe à la structure orale qui a produit les énoncés utilisés. En ce sens, le recours à la topologie correspond à une écriture de l'oralité ; ce qui la distingue d'une "Begriffsschrift", d'une écriture du concept qui, de Frege à Russell, visait à rendre compte des conditions formelles de production d'un énoncé.

Le travail de Barbara Glowczewski fournit un exemple tout à fait pertinent et explicite de ce type de démarche, tel que nous nous efforçons d'en délimiter les domaines d'application.

PERCEPTION DE L'ESPACE ET PARENTÉ CHEZ LES ABORIGENES D'AUSTRALIE

Barbara GLOWCZEWSKI

En guise d'exemple d'utilisation de la topologie en ethnologie, il est proposé ici une introduction à l'analyse des sociétés aborigènes d'Australie à travers leur perception de l'espace et du temps¹. Rappelons qu'avant l'arrivée des Européens, en 1788, les Aborigènes étaient des chasseurs-collecteurs ne pratiquant ni l'agriculture ni l'élevage ; se déplaçant au gré des saisons sur des centaines de kilomètres sans établir de villages, ils se répartissaient toutefois la propriété de la terre selon une géographie symbolique précise qui parsemait de toponymes l'ensemble du continent. Certaines tribus du centre et de l'ouest ont maintenu ce mode de vie jusqu'aux années 60. Et aujourd'hui encore, à l'heure où le gouvernement australien restitue une partie des terres traditionnelles à certains groupes tribaux, les sites topographiques qui nous paraissent "naturels" sont "culturels" pour leurs gardiens.

¹ - B. Glowczewski a présenté une version anglaise de cet article en Australie lors du colloque "Fifth International Conference on Hunting and Gathering Societies" (Darwin, 29 août-2 sept. 1988) ; une version plus longue et plus détaillée sera publiée prochainement dans un recueil collectif en anglais sur "Cosmologie et parenté", édité par K. Maddock et A. Barnard, Sydney, Mankind.

I ITINÉRAIRES MYTHIQUES ET FRONTIÈRES MOUVANTES

La distribution de la terre n'est pas perçue par les Aborigènes en termes de frontières occidentales car la terre n'est pas conçue comme un tout divisé en parties contiguës. Au lieu de cela, des lieux dits -- points d'eau, collines et divers sites sacrés -- définissent des aires dispersées, éventuellement connectées par des itinéraires invisibles. Ces derniers relient parfois le monde souterrain aux étoiles. En d'autres termes, l'espace est conçu à la fois de manière discontinue (dispersion des sites et séparation entre terre et ciel) et de manière continue (connexion par les itinéraires et relation paradoxale entre sous-sol et cosmos).

Les itinéraires qui s'entrecroisent et les portions de terre identifiées entourant les sites forment une sorte de toile d'araignée, un réseau complexe, qui définit en creux des zones de *no man's land*. De telles portions de *no man's land* ne sont pas fixes car le réseau de sites et d'itinéraires n'est pas donné une fois pour toutes. La signification symbolique de certains sites et itinéraires et leur appartenance par des groupes ou des individus sont transmis de génération en génération selon des règles spécifiques et des pratiques rituelles.

Mais, traditionnellement, des connexions symboliques nouvelles pouvaient être effectuées, créant de nouveaux itinéraires et nommant de nouveaux endroits dans les zones de *no man's land*. D'un autre côté, certains lieux ou segments d'itinéraires, par l'effet des tabous funéraires et du déplacement des populations, pouvaient perdre leur sens mythologique et leur nom ; disparaissant de la mémoire des gens, ils devenaient des zones de *no man's land* à leur tour.

Pour les Aborigènes du centre et de l'ouest de l'Australie, un tel processus d'oubli n'est pas irréversible car ils disent que la connaissance de ces endroits et itinéraires est gardée dans ce qu'ils appellent le *Dreaming*, l'espace-temps du Rêve (Stanner 1958). Et lorsqu'il est nécessaire, ces choses oubliées peuvent être à nouveau retrouvées au moyen de révélations faites justement en rêve. De tels songes, qui suscitent parfois des innovations rituelles sous forme de chants, de danses et de peintures à faire sur le corps, les objets ou le sol, ne sont pas perçus comme des inventions mais comme ayant existé depuis toujours dans l'espace-temps du Rêve (Glowczewski 1989a).

II. MÉMOIRE ET INNOVATION

La nomination et l'attribution des terres au cours des générations participent d'un processus dynamique inhérent à une production sociale fondée sur une mythologie vivante. Les rituels et les voyages des gens sont dits recréer les voyages de leurs ancêtres mythiques qui ont nommé les sites et ont donné leurs propres noms (les totems) aux divers itinéraires sacrés. En conséquence, la terre était traditionnellement une sorte de patchwork mouvant constitué d'aires superposées toujours en train, soit de s'étendre, soit de se resserrer. D'anciens itinéraires pouvaient être étendues ou segmentés entre différents groupes de propriétaires.

Aujourd'hui, les Aborigènes ont hérité de la distribution des terres ancestrales laissées par leurs pères. Et c'est toujours au nom des attaches mythiques et spirituelles les liant à des lieux données qu'ils revendiquent ces terres et en obtiennent éventuellement la restitution. Celle-ci est des plus complexes. En effet, l'entrecroisement des chemins mythiques peut produire des sortes de noeuds en certains endroits et multiplier ainsi le nombre de groupes ou d'individus qui, au nom de leurs itinéraires respectifs, partagent des droits sur la même région.

La principale caractéristique visuelle de cette spatialisation dynamique est qu'il ne s'agit pas d'un système concentrique mais d'un réseau qui n'a ni centre, ni limites. Plus précisément, c'est un espace dans lequel tout point choisi devient le centre des autres points et délimite sa propre frontière spatiale qui se superpose aux frontières des surfaces délimitées par d'autres points. La superposition des surfaces délimitées par tout point est illimitée, tout juste comme dans le paradoxe de Zenon on peut toujours définir un nouveau point entre deux autres points.

A un autre niveau, la superposition spatiale exprime une profondeur dans le temps : certains itinéraires sont dits "sous" les autres, ce qui signifie plus anciens que ceux qui les recouvrent. Cela veut dire que les ancêtres mythiques associés à ces différents itinéraires sont passés au même endroit, mais en des temps différents. Cela n'empêche pas que dans un autre endroit, l'ordre de superposition et donc d'ancienneté des itinéraires soient inversés. Aussi est-il impossible de chronologiser les itinéraires ou de hiérarchiser les ancêtres totémiques qui leur sont associés. Ils ne peuvent être ordonnés les uns par rapport aux autres que localement, cet ordre changeant dès qu'on se déplace. Autrement dit, la représentation aborigène de l'espace est à quatre dimensions : elle inclut le temps. A un niveau, les choses sont temporellement ordonnées, à un autre, elles sont condensées et perçues comme simultanées dans un même espace-temps : le Rêve.

Cet énoncé aborigène sur les relations spatiales est valide pour les relations sociales : chaque groupe, ou même chaque individu, est le centre d'un réseau particulier de gens, et les divers réseaux individuels se superposent les uns aux autres. La production de réseaux humains est infinie et changeante avec le temps. Mais elle est "matérialisée" et temporairement fixée dans l'espace par les endroits, itinéraires et totems qui respectivement caractérisent les ancêtres mythiques servant de référence à chaque groupe.

III STRUCTURES, PARADOXES ET MÉTAPHORES

L'analogie entre un espace discontinu et multi-centré et une organisation sociale sans polarité (chefferie, état, etc.) questionne l'idée d'une structure statique telle qu'elle a été postulée par l'approche classique de la parenté et du totémisme. Parenté et totémisme, et tout autre aspect des sociétés aborigènes, doivent être appréhendés dans un mouvement général de représentation de l'espace et du temps.

Partant de mes matériaux sur les Warlpiri, une société du désert central, j'ai cherché à exprimer en termes d'une métalogue le fait que l'articulation de la cosmologie est dans une relation de miroir et de feedback avec l'organisation sociale. Mon postulat était que ni la parenté, ni le totémisme ne sont des structures élémentaires mais que ces deux champs sont seulement des réflexions d'une contrainte structurale exprimée par le réseau spatial. A un autre niveau j'ai voulu montrer que cette première hypothèse trouverait sa validité si des systèmes de parenté différents et des cosmologies différentes, relatifs à d'autres sociétés australiennes, pouvaient être articulés en référence à la même métalogue. L'idée étant que, par delà leurs différences, la plupart des sociétés australiennes obéiraient à la même contrainte structurale (Glowczewski 1988).

En travaillant dans une perspective topologique avec Bertrand Gerard et Charles-Henry Pradelles de Latour, il s'est avéré qu'une figure topologique -- l'hypersphère -- permet l'inscription de ces divers systèmes. Tout comme la perception aborigène de l'espace n'a pas de centre univoque, sur l'hypersphère (sphère à quatre dimensions qui a une sphère pour équateur) il est impossible d'identifier un point nodal qui organiserait l'ensemble de cette structure dont l'interne et l'externe entretiennent une relation de continuité.

L'hypersphère permet donc de formaliser une propriété aussi ambiguë que le fait que les notions de dedans et de dehors, ou de dessous et de dessus ne sont pas simplement opposées et exclusives, ou même en relation dialectique, mais qu'elles peuvent être pensées comme simultanément continues et discontinues.

L'interaction particulière des concepts aborigènes relatifs au dessous et au dessus a été évoquée par de nombreux australianistes (Keen 1978, Merlan 1980, Morphy 1977, Munn 1973, Myers 1986, Taylor 1987, Turner 1985). Pour résumer, on peut dire que le dessous signifie, selon les contextes, le latent, le secret, le passé, le synchronique, le réversible, le continu, le masculin, par opposition au dessus qui serait le superficiel, le manifeste, le public, le présent, le diachronique, l'irréversible, le discontinu et le féminin. Mais ces oppositions qui s'expriment dans la vie rituelle ne peuvent être comprises comme deux niveaux contraires ou complémentaires au sens Durkheimien, Lévi-Straussien voire marxiste. En fait, le dessous et le dessus sont dans une interaction qui nourrit un procès de transformation et crée d'autres niveaux par un déplacement continu. C'est précisément dans cette étrange "boîte noire" que résiderait la relation d'identification entre les Aborigènes, leur terre et ce qu'ils appellent leur Loi : le Rêve.

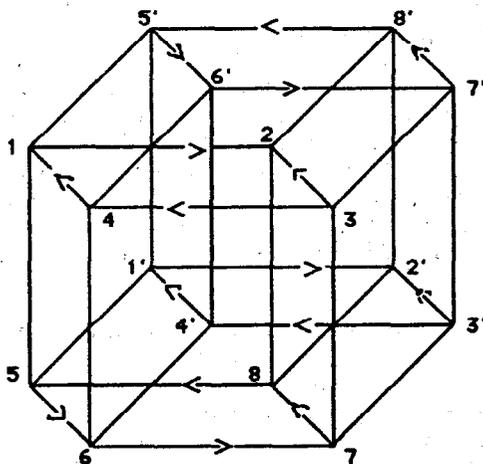
Traduit comme Loi aborigène, l'espace-temps du Rêve n'est pas un simple ensemble de règles et un référent à la tradition et aux coutumes, mais il renvoie aussi aux ordres tant culturel que naturel comme mouvement. La Loi du Rêve est un processus dynamique d'interprétation, une marche à suivre pour certaines innovations, une transcendance que personne ne représente en tant que tel mais qui néanmoins habite les actions de chacun. A ce titre, l'hypersphère n'est qu'une métaphore visuelle pour ce langage qui semble faire loi.

IV. HYPERSPHERE ET HYPERCUBE

Depuis les travaux mathématiques de White (1963) et Courrège (1965), on a coutume d'identifier le système de parenté classificatoire à huit sous-sections -- commun à certaines tribus australiennes -- à un groupe diédrique qu'illustre le cube (Laughren 1981). Une telle représentation, très pratique pour mémoriser ce système, donne l'illusion qu'il s'agit d'un système d'échange restreint, c'est-à-dire d'un échange réciproque de soeurs entre deux frères (Meggitt 1962). Or, si tel est le cas au niveau des termes de parenté classificatoire, le mode d'alliance des Warlpiri est en fait celui d'un échange généralisé qui suppose une chaîne d'échange entre plus de deux partenaires.

Il est possible de représenter un modèle minimal de cette chaîne d'échange à condition de dédoubler les huit sous-sections. On obtient ainsi une figure à seize sommets (correspondant aux 8 sous-sections dédoublées) qui se présente comme deux cubes interconnectés. Les arêtes fléchées de la figure indiquent les relations utérines (mères-enfants et oncles maternels -neveux), alors que les autres arêtes, verticales ou en biais, représentent les relations agnatiques (pères-enfants et tantes paternelles-nièces).

La figure sur laquelle s'inscrivent ces relations est identifiée en topologie à un hypercube, soit un cube à quatre dimensions, dont les propriétés sont équivalentes à celles de l'hypersphère mentionnée précédemment.



1 et 1' : Japanangka / Napanangka
 2 et 2' : Jakamarra / Nakamarra
 3 et 3' : Jungarrayi / Nungarrayi
 4 et 4' : Jampijinpa / Nampijinpa

5 et 5' : Japangardi / Napangardi
 6 et 6' : Jangala / Nangala
 7 et 7' : Japaljarri / Napaljarri
 8 et 8' : Jupurrula / Napurrula

Quatre cycles utérins :

1 2 3 4
 1' 2' 3' 4'
 5 6 7 8
 5' 6' 7' 8'

Huit cycles agnatiques :

1-5 1'-5'
 3-7 3'-7'
 2-8 2'-8'
 4-6 4'-6'

Mariages:

hommes = femmes
 1=8
 2=7
 3=6
 4=5

hommes = femmes
 8=1'
 7=2'
 6=3'
 5=4'

hommes = femmes
 1'=8'
 2'=7'
 3'=6'
 4'=5'

homme=femmes
 8'=1
 7=2
 6=3
 5=4

L'hypercube n'est pas juste une combinaison de deux cubes, car leur connexion produit en fait huit cubes perçus sous des angles différents de projection. On remarquera dans le jeu d'optique que chaque face de cette figure est à la fois le dessous d'un cube et le dessus d'un autre. Autrement dit, il n'y a pas de faces interne ou externe qui soient définissables pour l'ensemble de la figure. Il n'y a pas non plus de polarité nodale car tous les sommets sont égocentrés et ont chacun potentiellement exactement le même registre de relations avec les autres sommets.

Ce que j'avance à partir de là c'est que si l'articulation des huit sous-sections matérialise une telle figure topologique, ce n'est pas parce que la pa-

renté donne la structure mais parce qu'un tel modèle indigène de classification parentale est l'une des applications possibles d'une logique plus complexe, une métalogue exprimée par l'hypersphère (que l'on ne peut pas reproduire en trois ou deux dimensions comme c'est le cas pour l'hypercube).

Nous avons montré qu'une des propriétés de l'hypersphère -- l'interpénétration du dessous et du dessus -- peut également être observée dans l'ordre cosmologique warlpiri et dans des tabous caractéristiques des Aborigènes australiens : l'évitement langagier et spatial de la belle-mère et des morts (Glowczewski & Pradelles de Latour 1987).

J'ai exploré ces résultats en essayant d'inscrire sur l'hypercube d'autres systèmes de parenté australiens ainsi qu'une logique minimale sous-tendant les formes de tabous et de relations rituelles et mythiques présentes en Australie. Le résultat fut de démontrer ainsi un homéomorphisme entre l'organisation sociale et la cosmologie qui permet des transformations multiples -- observables non seulement dans la variété des sociétés australiennes mais aussi dans la mobilité propre à chaque société (Glowczewski 1988)¹. Toutefois, si ces transformations sont virtuellement infinies, elles restent sujettes à une logique qui ne permet pas des transformations plus radicales, en l'occurrence l'émergence d'une polarité, qu'il s'agisse d'un système religieux ou politique hiérarchisé.

V. CONCLUSION

En résumé, l'hypercube, à l'instar d'autres figures topologiques utilisées en anthropologie (Gérard 1986, Pradelles de Latour 1984 & 1986), plutôt que d'offrir un modèle de synthèse, donne une sorte de "syntaxe" des relations symboliques qui seraient structurellement possibles dans les multiples combinaisons des pratiques des Aborigènes d'Australie. L'approche topologique pourrait ouvrir une voie nouvelle pour l'analyse de l'interaction entre ce qu'ils appellent respectivement leur Loi, régie par l'espace-temps du Rêve, et celle des Blancs, à la fois le système étatique et le christianisme. En effet, aussi bien l'Etat que le dogme chrétien sont des incarnations de la notion du Un, et renvoient à des propriétés topologiques non compatibles avec celles de l'hypercube.

¹. Les travaux de Peter Lucich (cf. article dans SEMINFOR 1988) semblent aller dans un sens similaire ; en fait, certains des groupes mathématiques qu'il a dégagés pour la parenté australienne coïncideraient avec les différents hypercubes que j'ai construits pour les systèmes warlpiri, murinbata et murngin/yolngu (Glowczewski 1988 & 1989b).

VI BIBLIOGRAPHIE

- COURREGE, P., 1965. " Un Modèle mathématique des structures élémentaires de parenté ", *L'Homme* 5(3-4) : 248-290.
- GERARD, B. 1986. " Entre pouvoir et terre ", *Etudes Rurales* 101-102 : 121-134.
- GLOWCZEWSKI, B., 1988. *La Loi du Rêve - Approche topologique de l'organisation sociale et des cosmologies des Aborigènes australiens*. Université de Paris I, Panthéon - Sorbonne. Thèse d'Etat ès-lettres et sciences humaines. 1989a. *Les Rêveurs du désert*. Paris : Plon (sous presse, mai 1989). 1989b. " Des Peintures aux structures (Australie) ", *L'Homme* (sous presse, mai 1989).
- GLOWCZEWSKI, B. & C.-H. PRADELLES DE LATOUR, "La Diagonale de la belle-mère", *L'Homme* 104 : 27-53.
- KEEN, I, 1978. *One ceremony, one song - An economy of religious knowledge among the Yolngu of North-East Arnhem Land*. Canberra, Australian National University. PhD.
- LAUGHREN, M., 1982. "Warlpiri Kinship Structure", in J. Heath, F. Merlan & A. Rumsey, eds., *The Languages of Kinship in Aboriginal Australia*. Sydney : Oceania Linguistic Monograph 24.
- MEGGITT, M., 1962. *Desert People*. Londres : Angus & Robertson.
- MERLAN, F., 1980. " Mangarrayi Semi Moiety Totemism ", *Oceania* 51 : 81-97.
- MORPHY, H., 1980. " What Circles Look Like ", *Canberra Anthropology* 3(1) : 17-36.
- MUNN, N. 1973. *Walbiri Iconography*. Ithaca : Cornell University Press.
- MYERS, F. 1986. *Pintupi Country, Pintupi Self - Sentiment, Place, and Politics among Western Desert Aborigines*. Washington : Smithsonian Institution Press.
- PRADELLES DE LATOUR, C.-H., 1984. " La Parenté trobriandaise reconsidérée ", *Littoral* 11-12 : 115-136. 1986. *Le Champ du langage dans une chefferie bamiléké*. Paris, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. Thèse d'Etat ès- lettres et sciences humaines.
- STANNER, W.E., 1958. " The Dreaming ", in W.A. Lessa & E.Z. VOGT, eds., *Reader in Comparative Religion - an Anthropological Approach*. Evanston, Illinois : Row, Peterson & Company.
- TAYLOR, L. 1987. *The Same but Different - Social Reproduction and innovation in the Art of the Kunwinjku of Western Arnhem Land*. Canberra, Australian National University. PhD.
- TURNER, D.H., 1985. *Life before Genesis - A Conclusion, An Understanding of the significance of Australian Aboriginal Culture*. New York : Peter Lang.
- WHITE, H.C., 1963. *An Anatomy of Kinship*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, Inc.

WHY ARE CLOSED SIGN SYSTEMS ISOMORPHIC TO MATHEMATICAL GROUPS?

Peter LUCICH

I thank Dr Bertrand Gerard for the opportunity to contribute this paper. Parts of the argument have been taken from Lucich(1987) which provides analyses and evidence in greater elaboration

ABSTRACT

Two Australian Aboriginal kinship systems are used as examples of closed sign systems which are isomorphic to one set of abstract groups. The isomorphism allows the pursuit and utilisation of other formal properties such as homomorphism, and the correspondences point to common sets of structures which stand for combined cognitive operations or transitions. The latter in turn are required by practices which merge under particular social preconditions, and according to interests that bear homogeneity, reciprocity, alignment and systematisation.

Socially constructed sign systems with properties of closure are found in certain forms of kinship reckoning, in mosaic designs, in cycles of time and number, and in equally tempered musical scales. Their underlying codes or metalanguages are isomorphic to the group-theoretic structures of mathematics. The recovery of multi-generator free groups paves the way for applying the findings of neurobiology as indicated by Churchland (1986: 220), and the insights of cognitive psychology as suggested in different ways by Cassirer (1944), Piaget (1971), de Mey (1982), and Leyton (1986: 125).

The first part of this paper is a demonstration of isomorphism, while the second part points to the bridging assumptions and the societal contexts within which the isomorphisms become relevant. The form of social organization most germane to the demonstration is in the field of elementary kinship, notably that of the Aboriginal Australians. The relevance to kinship cognition is in the distributions of terms and genealogical kintypes onto the models frequently proposed by ethnographers, models characterised by periodicity and symmetry. Such models are also constructed by mathematicians in a tradition that includes Weil (1949/70), White (1963), Courrège (1965), Boyd (1969), Cargal (1978), de Meur and Jorion (1981), and Tjon Sie Fat (1981).

When specific sibling and spouse equation rules formally define equivalences in a genealogical tree they also entail homogeneous structures which match the axioms of group theory. Those axioms and structures identify patterns, permutations and the limits to the possible. In particular, the mathematical properties of defining relations, isomorphism, conjugacy and homomorphism are paralleled respectively in the spouse equations, deep structures, skew rules and sociocentric classes of the ethnographers' kinship models.

A first step in model construction is to start from the concept of a free group generated by X and Y. The realisation for Australian kinship requires that X and Y each stand for a distinct type of reckoning or tracing action. Generator X stands for the action of tracing the relation or transition to ZHsib (sister's husband's sibling)¹, and generator Y stands for the action of tracing the relation or transition to BC (brother's child). The actions are regarded as reversible, and the class of ego and siblings is

¹ The convention here is that B = Brother, D = Daughter, F = Father, H = Husband, M = Mother, S = Son, W = Wife, Z = Sister, and sib = sibling.

This is the presentation of a group in terms of a free group, since any group is isomorphic to a factorgroup of a free group (Scott 1964: 187). According to the convention used by Baumslag and Chandler (1968: 253), H_8 is isomorphic to $\langle X, Y, X^2, [X, Y]^2, Y^{-4}, (XY)^4 \rangle$.

taken as the identity element. The Cayley diagram for this group is shown in Figure 1 which is adapted from d'Adhemar (1976:136). The double lines signify generator X and the single lines signify generator Y. Words consisting of any product or sequence of various powers of X and Y will then define particular classes of kin (including their equivalent siblings). The next step is to define a particular cluster of cousins as equal to spouse. Different spouse equations produce different structures of homogeneous redundancy. If the defining relations happen to be

$$X^2 = (X^{-1}Y^{-2}XY^2)^2 = I, \quad Y^4 = (XY)^4$$

then there are four specific third cousins in the same class as BWSib (Lucich 1987: 146-8, 195). The redefinition of Figure 1 according to these relations² produces the group H_8 as a factor group of Figure 1. This is shown in Figure 2 as a central column surrounded by helical paths. Its vertices are labelled according to another factor group known as $32\Gamma_7a_1$.

This is produced when Y^4 is relabelled as the identity element, and the multiplication table for that group is in Thomas and Wood (1980).³

Generator X and Y can also permute so that the same structure may have two realisations. Realisation One has

$$X = X^{-1} = ZHsib, \quad Y = BC,$$

while Realisation Two has

$$X = X^{-1} = BC, \quad Y = ZHsib.$$

Realisation One has BWSib equivalent to FM(MBC)BDC and three other third cousins, while Realisation Two has BWSib equivalent to FMBSC (a second cousin) and FM(MBC)BDC plus others (Lucich 1987: 195).

The helical structure can be opened out as shown in Figure 3, which as Realisation Two allows the allocation of kin terms from the Worora tribe

² The homomorphisms relevant to elementary kinship also include those between infinite groups and their factor groups, as illustrated in the relationships between 230 (infinite) space groups and the 32 (finite) crystallographic point groups (Coxeter and Moser 1957: 35).

³ The factor group $32G_7a_1$ is produced by adjoining the relation $Y^4 = I$.

The notation is from Hall and Senior (1964). This group has a factor group of structure C_2 which is the homomorphic image produced when its subgroup $16G_2a_1$ is redefined as the kernel (Lucich 1987: 107).

of the Kimberley area of Western Australia (Lucich 1987: 330). The allocations are such that the inter-term relations correspond to appropriate inter-vertex relations on the model. For greater contrast, generator Y is shown as a dotted line.

Realisation One can serve as the scaffold for the kin terms of the Aluridja of South Australia (Elkin 1939: 210-32; 1940: 307, 344; Lucich 1987: 265-89). In other words the Worora and Aluridja systems can both be displayed as transforms of each other on the same group structure of H^* . The distribution of terms on vertices is not exactly 1:1, and is subject to other specific rules.

The factor group $32\Gamma_7a_1$ is also a factor group of the P_{44} wallpaper group where generator X stands for a half-turn, and generator Y stands for a quarter-turn. A visual realisation is shown in Figure 4 together with a P_2 subgroup realised as white arrows. There are only 17 possible wallpaper designs in the strict sense and some of their Cayley diagrams correspond to particular spouse equation structures. In this example the diagram for P_4 can be used to display $32\Gamma_7a_1$ and the two kinship realisations as shown in Figures 5 and 6. The H_8 or helical version in Figure 2 remains a more accurate model of spouse equivalence, since the planar format of P_4 separates particular cousins which are combined as spouses in the H^8 model.

Further, the P_2 subgroup of P_4 is the kernel of the C-homomorphic image corresponding to generation levels in Realisation One and patrimoieties in Realisation Two. There is an asymmetry here in that

$$\frac{P_4}{P_2} = C_2, \text{ but } P_2 \times C_2 \neq P_4.$$

⁴ The defining relations for p_4 are given by Coxeter and Moser (1957:46) as

$$X^2 = Y^4 = (YX)^4 = (XY)^4 = I$$

Factorgroup $32C_7a_1$ is produced by adjoining the relations $(YXY)^2 (XY^2)^2 = I$.

The relevant C_2 factor group is produced by redefining the index 2 subgroup p_2 as the kernel.

This suggests that sociocentric classes are more easily derived from kinship structures than the reverse relation. The planar realisation in P_4 is isomorphic to these kinship systems, provided that certain simplifying conditions are met, and the structural entailments allow the above speculations on the derivations of the two-class systems. In this view the elementary kinship structures are usefully seen as multiple superimposed homomorphic images. Developmental transformations can also be modelled through those factor groups which correspond to possible precursors. Finally, for each system the meaning of any element is ultimately definable by the combining of generators. Vertex 5 (for example) is XYX which is *umari* in Aluridja and *ibata* in Worora. Translation then depends on appropriate substitutions for X and Y. The isomorphisms are summarised in Table 1.

Table 1 Four realisations of P_4 and its P_2 subgroup

Cayley Diagram Figures 5,66	Wallpaper Figure 4	Aluridja Figure 5	Worora Figure 6
Double line Generator X	Half turn	Marriage (ZHsib, BWsib)	Pastrifiliation (BC, Fsid)
Dotted line Generator Y	Quarter turn	Patrification (BC ^c)	Marriage (ZHsib)
Continuous line Generator $XY = Z$	Displaced quarter turn	Matrifiliation (ZHsib)(BC) or ZC	Cross-generation affinal cycle (Fsid)(ZHsib) or FZH
Vertex	Equivalence class of -congruence motions -paths from reference	Equivalence class of -classificatory siblings -paths from ego	Equivalence class of
Vertex (XYX)		<i>umari</i> (ZDHsib)	<i>ibata</i> (FZC)
P_2 subgroup	WHITE MOTIFS	OWN GENERATION LEVEL	OWN PATRIMOETY
1 1x 8 8x 11 11x 14 14x 3 3x 16 16x 9 9x 6 6x (C ₂ coset)			

The kinship entries in the table are an interchange or permutation of marriage and patrification, and the fact that the Aluridja and Worora groups of operations can be precisely aligned or mapped onto each other illustrates one particular isomorphism.

It is also possible to select other generators such as XY or Z (which stands for matrifiliation in the Aluridja model).

The distribution of black and white in Figure 4 involves the same formal resource that allocates generation levels and patrimoieties to the kinship models for Aluridja and Worora respectively, as shown in the capitalised entries in Table I. In other words, the relation of homomorphism creates the reduced homomorphic image of structure C_2 which is variously realised as a regular two-colour contrast or the endogamous moiety system or the patrimoiety system.

Any axiomatic treatment must be broadened to include not only elementary kinship and wallpaper design but also other cultural systems of permutations, especially the equally tempered musical scale. Here the free group is C_∞ and the factor group is C_{12} which relations also correspond to the twelve hours on a clockface (Budden 1972: 429-31, 436-8).

Table II from Lucich (1987: 438) summarises some of the isomorphisms.

Table 2 Structure of codes for different domains and purposes

DOMAIN	MEANS		END
	Group	Homomorphic Image	Purpose
Elementary kinship	$C_\infty \times D_1, pl$	$C_4 \times C_2, D_2, D_1$	Balanced reciprocity, Align different systems, Reduction
	cm cm-col	$161_2 C_1, D_4$	
	$P_4 P_4 g H_8$	$321_7 a_1$	
Visual symetries	$C_\infty \times D_1, pl$ cm $P_4 P_4 g$		Express the code Enhance the code via colours
	$C_\infty D_\infty$	$C_n D_n$	
Equal temperament	C_∞	C_{12}	Align different keys and instruments
Kula	D_∞		Equalised reciprocity
Permutation systems		$(D_6 D_4 D_2 D_2 \times D_1, A_5)$	Systematisation

The table shows that the same purposes and structures can recur across entirely separate domains and cultures, and the first three entries display a common pattern of reduction to simple structures by using the homomorphisms of infinite groups.

The examples depend on homogeneous structures of equivalence classes, and the diverse manifestations are here reduced to their structures of combined operations. One necessary assumption is that the agents universally and at some level are able to make computations isomorphic to relational products of the separate operations (Lehman 1985: 24-7, 40-1). It is further necessary that they can accomplish the appropriate homomorphic reductions.

The heading END/Purpose takes the argument from the formal to the explanatory. Isomorphisms emerge when agents' purposes imply reciprocity, alignment or systematisation, when the domains require regular, successive, reversible and coordinated transitions, and when the mind is capable of formal operational thought. The latter point refers to Piaget's assumptions about combinatorial thought, human cognitive capacities and their realisation in socially shared schemata. However, it is not mind alone which is the cause here, otherwise the manifestations would be everywhere.

Table III (Lucich 1987: 445) shows the distribution of those domains which become the vehicle for intended homogeneous structures of cognitive operations.

Table 3 Distribution of combinatorial sign systems by domain and societal type

Domain	Hunter-gatherer	Communal	Theocratic	Civilizational
Elementary kinship	+++	+	-	
Visual symmetries	+	++	+++	
Equal temperament				+++
Permutation systems	++	+	+	+

The societal typology should be regarded as a very broad classification based on technology and scale, and the table entries are only approximate measures of emphasis. The point of the table is that it is the varying social context (and not just the mind) which calls forth the appropriate purposes.

An explanatory synthesis therefore entails the complementary claims of mind and social exigency. Under certain preconditions, practices with symmetries of combined operations are created to achieve particular purposes. Their associated sign systems are restricted in the combinations of their elements, with practical limits expressible finally in terms of logical consistency.

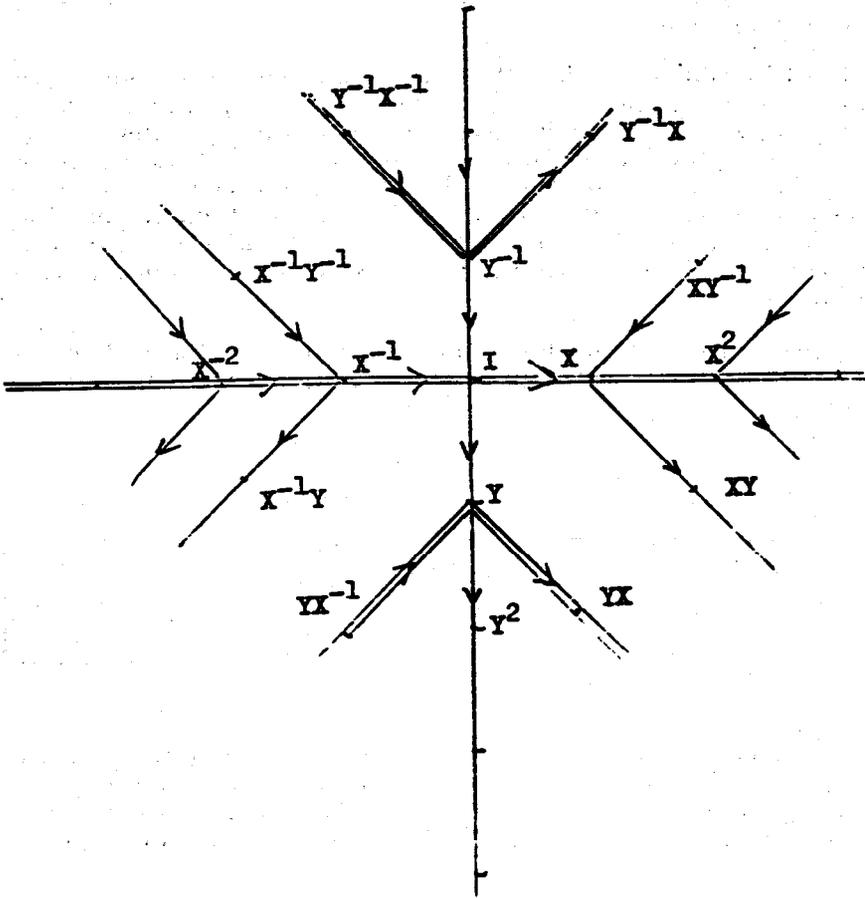


Figure 1 Free group G generate by $\{x, y\}$

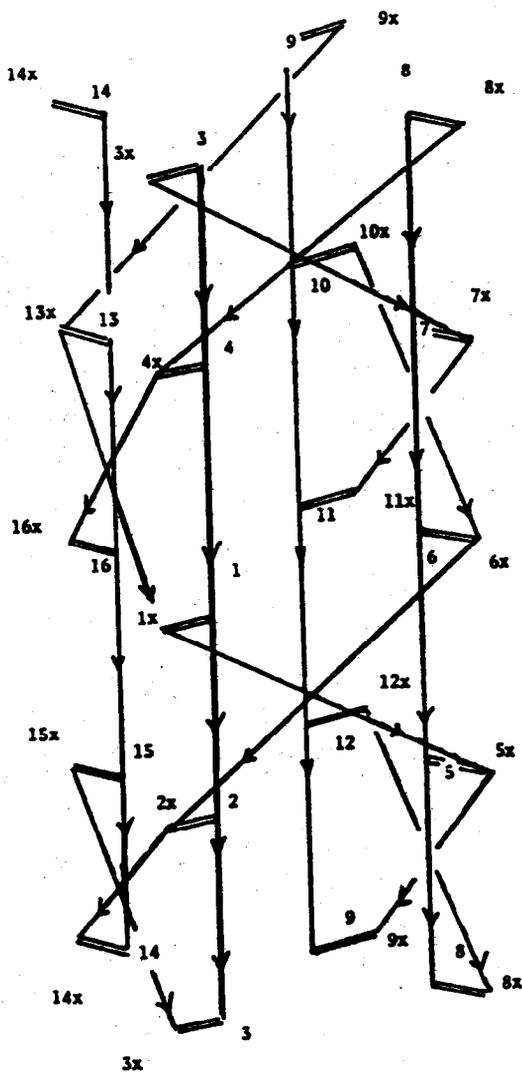


Figure 2 Cayley diagram of H_8 with vertex labels from its $321-7a_1$ factor group

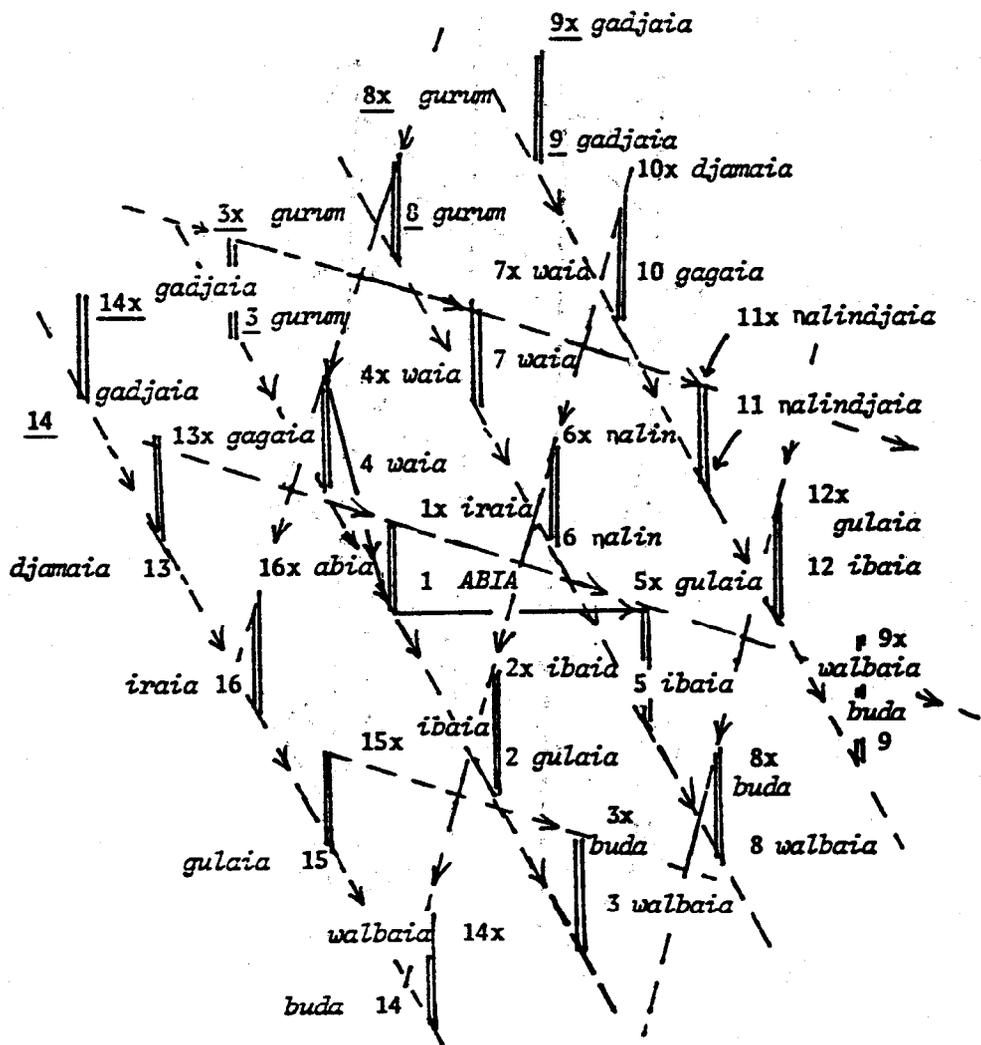


Figure 3 Realisation three of H_8 with Worora kin categories and with numbers the 3217a₁ factor group

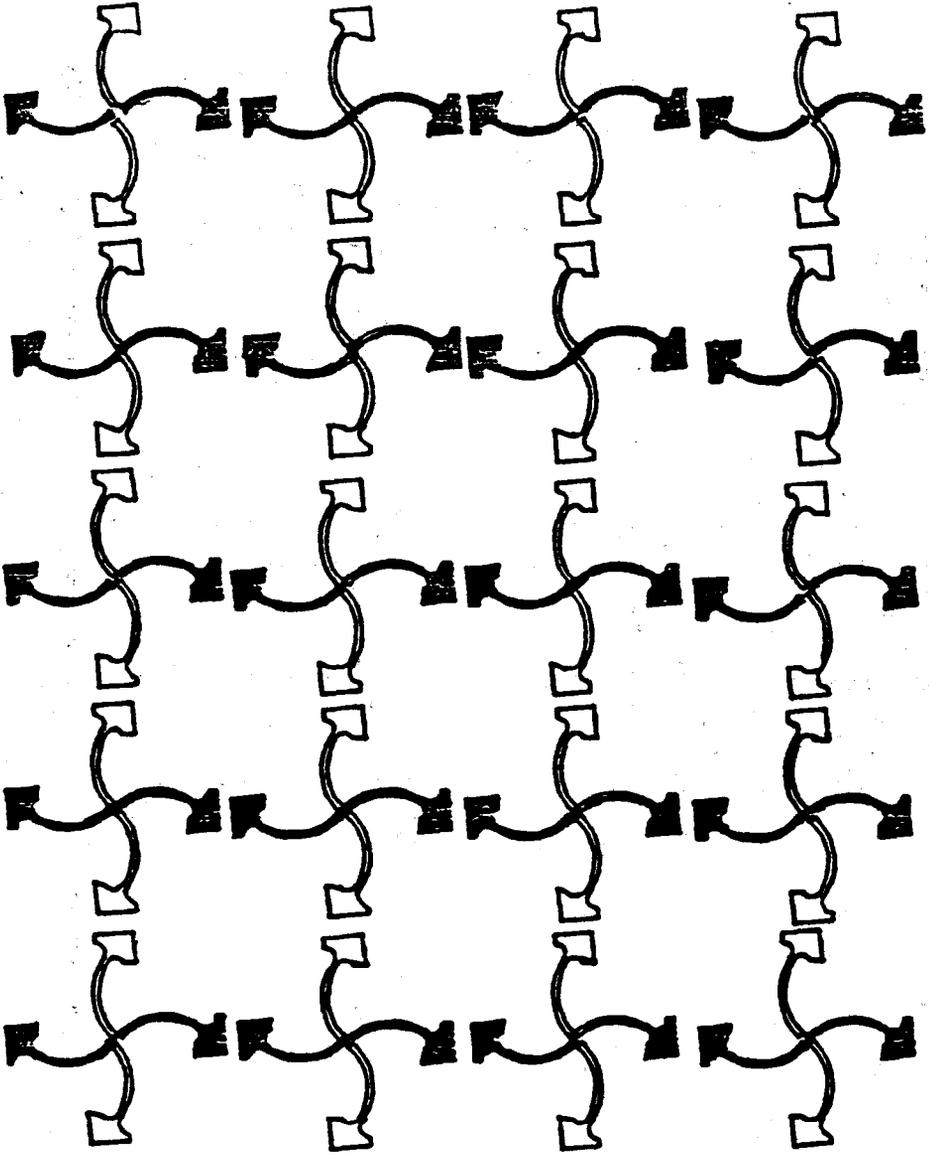


Figure 4 The P_2 subgroup of P_4 realised as the kernel of the latter's two-colour contrast

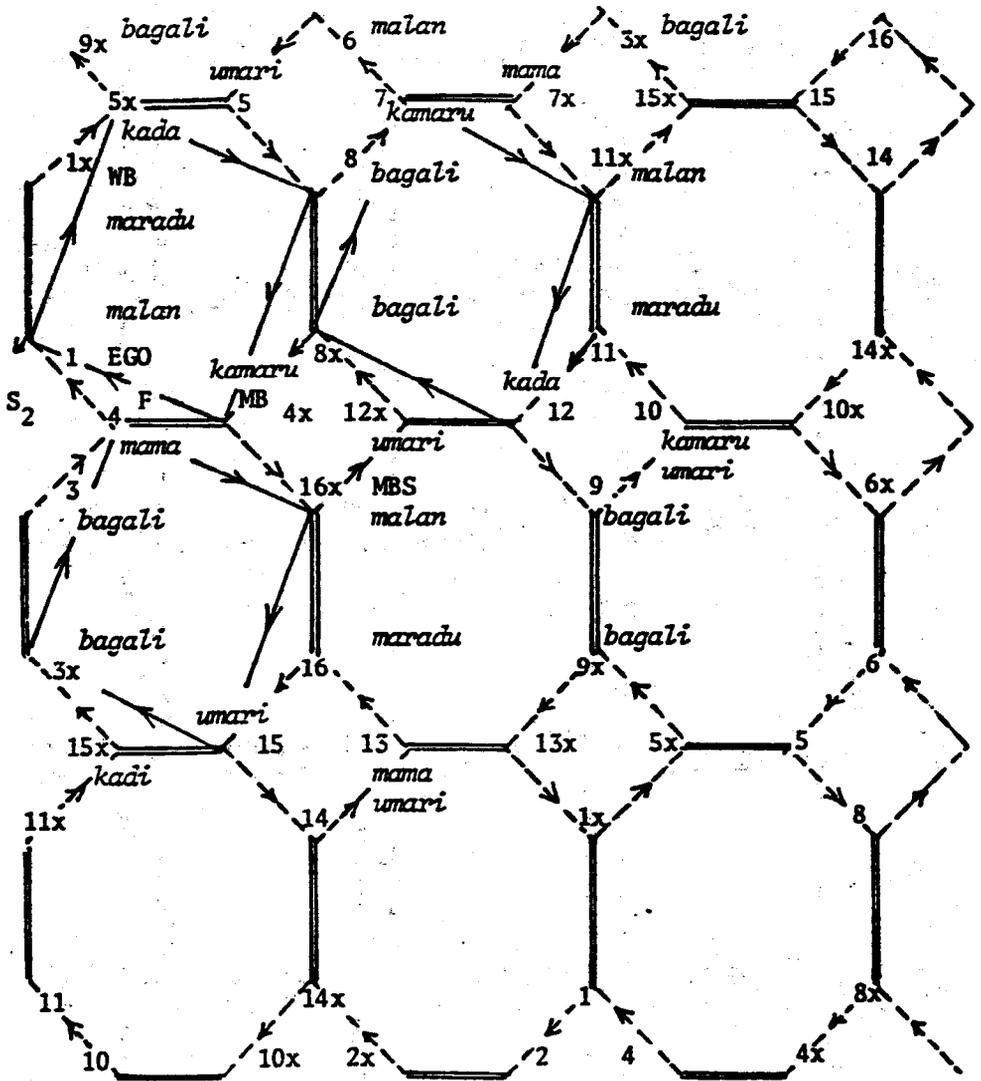


Figure 5 Realisation T One of P_4 with vertices labelled according to 3217a₁ and Aluridja kinship

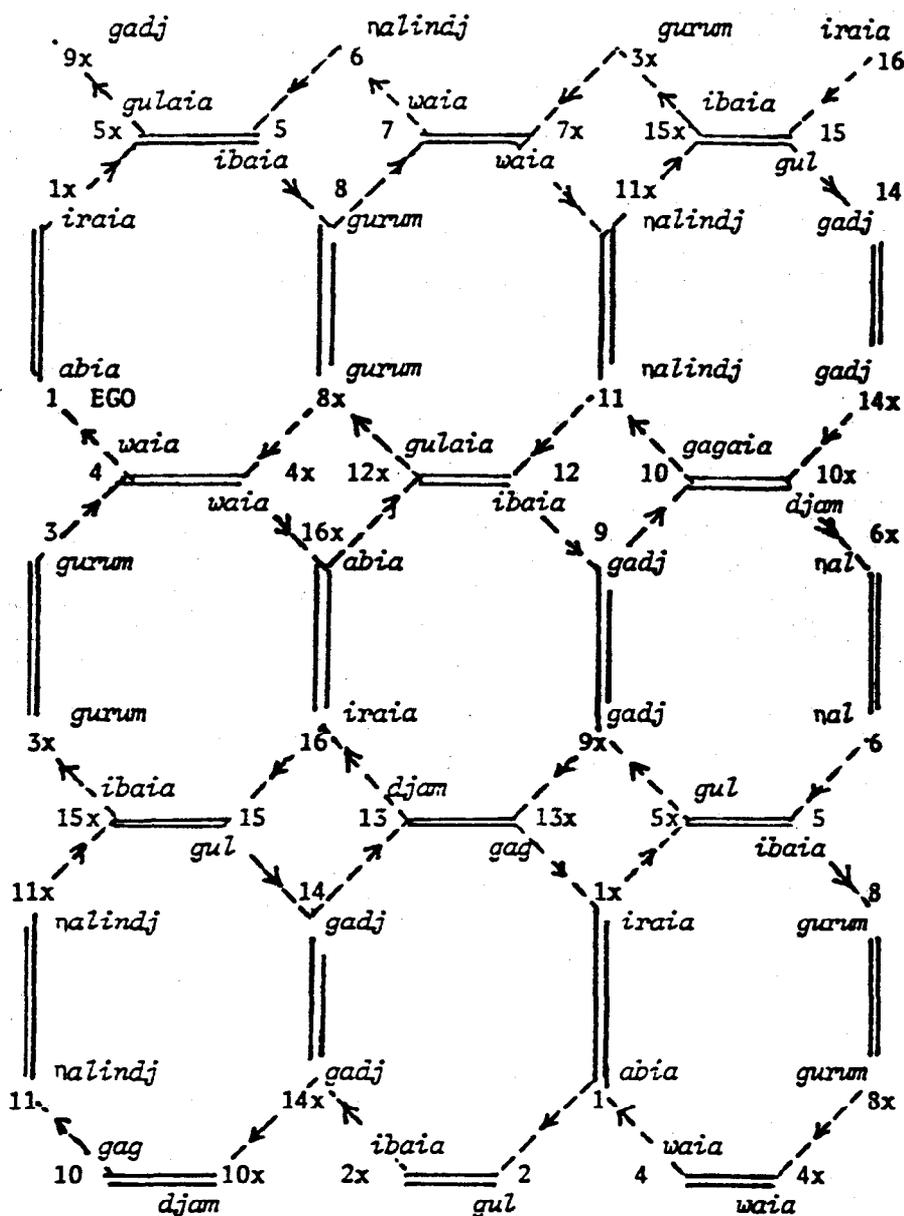


Figure 6 Realisation Two of P_4 with vertices labelled according to 3217a₁ and Worora kinship

REFERENCES

- BAUMSLAG, B. and CHANDLER, B. 1968. *Schaum's outline of Theory and Problems of Group Theory*. McGraw-Hill, New York.
- BOYD, J.P. 1969. The Algebra of Group Kinship. *Journal of Mathematical Psychology*.6: 139-67.
- BUDDEN, F.J. 1972. *The Fascination of Groups*. Cambridge University Press, Cambridge.
- CARGAL, J.M. 1978. An Analysis of the Marriage Structure of the Murngin Tribe of Australia. *Behavioral Science*. 23: 157-68.
- CASSIRER, E. 1944. The Concept of Group and the Theory of Perception. *Philosophy and Phenomenological Research*.5: 1-35.
- CHURCHLAND, P.M. 1986. Cognition and Conceptual Change. *Journal for the Theory of Social Behaviour*. 16(2): 217-221.
- COURREGE, P. 1965. Un modèle mathématique des structures élémentaires de parenté. *L'Homme*. 5(3-4): 248-90.
- COXETER, H.S.M. and MOSER, W.O.J. 1957. *Generators and Relations for Discrete Groups*. Springer-Verlag, Berlin.
- d'ADHEMAR, C. 1976. Monoids and Groups. Pp. 127-46 in *Centre de Mathématique Sociale, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Combinatorics, Graphs and Algebra*. Mouton, The Hague and Paris.
- De MEUR, G. and JORION, P. 1981. A Possible Genealogy of Australian Marriage Systems: Morphisms in 'Matrimonial Class' Systems. *Mathematical Social Sciences*.2:9-21.
- DeMEY, M. 1982. *The Cognitive Paradigm*. D. Reidel, Dordrecht.
- ELKIN, A.P. 1939. Kinship in South Australia. *Oceania*. 10(2): 196-234.
- ELKIN, A.P. 1940. Kinship in South Australia. *Oceania*. 10(3): 295-439.
- HALL Jr, M. and SENIOR, J.K. 1964. *The Groups of Order $2n$ ($n \leq 6$)*. Macmillan, New York.
- LEHMAN, F.K. (U Chit Hlaing) *985. Cognition and Computation: On Being Sufficiently Abstract. Pp. *9-48 in J.W.D. Dougherty (ed.), *Directions in Cognitive Anthropology*. University of Illinois, Urbana and Chicago.
- LEYTON, M. 1986. A Theory of Information Structure, 1. General Principles. *Journal of Mathematical Psychology*. 30:103-60.
- LORRAIN, F. 1975. *Réseaux Sociaux et Classifications Sociales: Essai sur l'algèbre et la géométrie des structures sociales*. Hermann, Paris. -
- LUCICH, P. 1987. *Genealogical Symmetry: Rational Foundations of Australian Kinship*. Light Stone Publications, Armidale, N.S.W.
- PIAGET, J. 1971. *Structuralism*. Routledge and Kegan Paul, London.

SCOTT, W.R. 1964. Group Theory. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

THOMAS, A.D. and WOOD, G.V. *980. Group Tables. Shiva Publishing, Kent.

TJON SIE FAT, F. 1981. More Complex Formulae of Generalized Exchange. *Current Anthropology*. 22:377-90, 393-99.

WEIL, A. 1949/70. On the algebraic study of certain types of marriage laws (Murngin system). Pp. 221-7 in C. Lévi-Strauss, *The Elementary Structures of Kinship*. Translated by J.H. Bell, J.R. von Sturmer and R. Needham. Tavistock, London.

WHITE, H.C. 1963. *An Anatomy of Kinship: Mathematical Models for Structures of Cumulated Roles*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.

The first part of the report discusses the general situation of the country and the progress of the work. It is followed by a detailed account of the various projects and the results achieved. The report concludes with a summary of the work done and the plans for the future.

The second part of the report deals with the financial aspects of the work. It provides a detailed account of the income and expenditure of the organization and a comparison with the budget. It also discusses the various sources of income and the methods of expenditure.

The third part of the report contains a list of the various projects and the results achieved. It provides a detailed account of the work done on each project and the progress made. It also discusses the various difficulties encountered and the methods of overcoming them.

MODELISATION ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Bernard VICTORRI

I INTRODUCTION

D'un certain point de vue, l'Intelligence Artificielle prise dans son ensemble, en tant que discipline, peut être considérée comme une vaste entreprise de modélisation, l'une des plus ambitieuses qui soient : puisqu'il s'agit de modéliser sinon l'intégralité de la "pensée" humaine, du moins un certain nombre de ses fonctions cognitives. L'I.A. n'est évidemment pas la seule discipline à s'être donné cet objet d'études. La psychologie, la psychanalyse, les neurosciences, la philosophie, et bien d'autres, sont aussi centrées sur ce même sujet, dans des perspectives évidemment très différentes les unes des autres. Ce qui fait l'originalité de l'I.A., c'est d'être la seule dont la production soit, par essence même, de la modélisation, puisque par définition, elle implique la conception de systèmes artificiels (programmes informatiques, en fait) qui soient intelligents, et le seul sens que l'on puisse donner à ce terme qui ne soit ni trop creux ni trop trompeur, c'est bien qui ressemblent (par leurs performances ? par leurs mécanismes internes ?) au système cognitif humain, ou au moins à l'une de ses composantes. On ne peut pas prétendre aujourd'hui que l'I.A. ait atteint ses objectifs; cependant les chercheurs en I.A., bien qu'ils ne puissent exhiber de véritables modèles de l'intelligence humaine, ont le sentiment d'avoir accompli, au travers des diverses crises de la jeune histoire de leur discipline, un certain nombre de progrès décisifs. Ce sont de ces crises et de ces progrès que nous allons essayer ici de tirer des leçons qui, nous l'espérons, seront utiles pour toute entreprise de modélisation.

Il ne s'agit pas ici de faire une synthèse de l'I.A. : la discipline est trop jeune, et l'état actuel des recherches trop diversifié, pour qu'un tel travail, qui serait de toutes façons au-delà de mes compétences, soit possible et fructueux. Nous allons plutôt essayer de dégager quelques tendances, qui me semblent symptomatiques de l'évolution de l'I.A. en tant qu'entreprise de modélisation. Pour cela, rappelons que l'on peut grossièrement classer les activités de modélisation en deux catégories :

- d'un côté, les modèles qui cherchent à simuler le comportement d'un système; sous sa forme la plus caricaturale, c'est la problématique dite "de la boîte noire" : un système est caractérisé par des entrées et des sorties, et sans se préoccuper de ce qui se passe réellement à l'intérieur du système, on cherche à construire un modèle qui se comporte de la même manière, c'est-à-dire qui fasse correspondre les mêmes sorties aux mêmes entrées.

- de l'autre côté, les modèles qui cherchent à simuler les mécanismes du système à étudier. Le but est alors de reproduire le plus fidèlement possible les processus qui se produisent effectivement dans le système et de vérifier si l'on peut ainsi en retrouver les fonctionnalités.

Ces deux grandes catégories de modèles (entre lesquelles il n'est d'ailleurs pas facile de tracer une frontière nette, de nombreux modèles possédant des caractéristiques de chacune d'elles) se retrouvent en I.A. où elles constituent deux grandes tendances actuelles, que l'on appelle respectivement l'approche symbolique et l'approche connexionniste.

Nous allons donc d'abord regarder comment chacune de ces approches est née et la façon dont elle a évolué. Ensuite nous nous interrogerons sur le bien-fondé de cette classification et nous nous efforcerons de montrer que dans le cadre d'une problématique de modélisation, leurs véritables caractères distinctifs ne se situent pas dans les présupposés idéologiques qui ont présidé à leur développement mais plutôt dans le cadre mathématique dans lequel elles se placent, et par là-même dans le type de processus cognitifs qu'elles sont à même de modéliser.

II. L'APPROCHE SYMBOLIQUE

Comme nous l'avons dit, cette approche [1,2], qui a été pendant longtemps la seule à produire des résultats concrets, et qui reste prépondérante aujourd'hui, s'est donné comme but de simuler des comportements "intelligents", sans chercher a priori une quelconque ressemblance entre les techniques qu'elle utilise et les mécanismes à l'oeuvre dans le cerveau. L'objectif de l'I.A. est souvent d'ailleurs exprimé en ces termes [3]: on aura construit un système véritablement intelligent quand un individu, communiquant avec lui à distance, sera incapable de discriminer s'il a affaire à une machine ou à un humain.

Un des premiers programmes de traitement du langage "naturel", le programme ELIZA, est très symptomatique de cette vision des choses. Très célèbre à son époque (dans les années 60), il était censé simuler les réponses d'un psychiatre dans une entrevue. En fait ce programme, très simple, ne faisait que renvoyer sous forme de questions ce que venait de dire son interlocuteur (exemple : "Il fait beau généralement Pourquoi dites-vous qu'il fait beau ?) ou d'orienter la conversation quand il avait reconnu un des mots-clés qu'il avait en mémoire (Parlez-moi plus de votre mère). Evidemment ce type de programme ne peut faire illusion que l'instant de quelques répliques et n'a jamais été considéré comme "intelligent". Son principal mérite a été de mettre en évidence l'ampleur des difficultés à résoudre pour dépasser ce premier stade.

Un exemple de réel succès de l'approche "boîte noire" a été le développement de programmes d'échecs. Ces programmes [4], fondés sur des techniques simples (recherche dans l'arborescence des coups possibles d'un chemin qui maximise une certaine fonction d'évaluation, mémorisation de bibliothèques d'ouverture et d'algorithmes de fin de partie), arrivent à des performances plus qu'honorables, alors même que leur principe général de fonctionnement n'a rien avoir avec le raisonnement des joueurs humains, qui fait plus appel à des stratégies de jeu qu'à des recherches systématiques de tous les coups possibles.

Mais ce type de succès a été rare et limité à des domaines bien précis. Dans la plupart des cas, on s'est rendu compte que le seul moyen de progresser était d'analyser mieux quels étaient les éléments qui permettaient aux humains de réaliser les performances que l'on voulait imiter. Ainsi s'est imposée très vite l'idée qu'un programme d'I.A. devait disposer d'une base de connaissances, si possible incrémentable par apprentissage, dans laquelle il puisse puiser les éléments nécessaires au traitement des données. Le travail s'est donc orienté vers les techniques de représentation de connaissances, et les méthodes de déduction logique à appliquer à ces connaissances. Ainsi l'on s'est éloigné quelque peu de la philosophie de la "boîte noire". Le meilleur exemple en est la réalisation des systèmes experts [5,6], dans lesquels on cherche à modéliser la façon dont raisonne un expert humain en représentant sous formes de règles les connaissances que l'expert dit utiliser au cours de son travail pour obtenir les résultats que l'on veut simuler.

Cette évolution continue dans le même sens : de plus en plus, les chercheurs tentent de se rapprocher des processus "naturels" du raisonnement humain en prenant en compte les aspects du raisonnement qui échappent à la logique hypothético-déductive [7]: ainsi cherche-t-on à définir des "logiques floues", des logiques "non-monotones", des raisonnements sur des connaissances "par défaut", des raisonnements "à profondeur variable",... Ces différentes techniques sont autant de moyens de traquer les mécanismes à l'oeuvre dans le système cognitif humain, qui lui permettent d'être performant dans des conditions où la logique classique est inopérante : connaissances incomplètes, relatives dans le

temps et dans l'espace, présentant souvent un certain degré d'incohérence, toujours susceptibles d'être remises en question.

Bref, bien que ce ne soit pas le but explicite de sa recherche, on voit que l'approche symbolique est amenée, pour des raisons d'efficacité, à se pencher de plus en plus sur la manière dont fonctionne le système qu'elle veut modéliser.

III L'APPROCHE CONNEXIONNISTE

L'approche connexionniste, que l'on appelle aussi à juste titre neuro-mimétique, date en fait des débuts du développement de l'I.A. Cependant, malgré un démarrage prometteur, elle a connu une longue période de désintérêt, les chercheurs ayant acquis à l'époque, sans doute un peu vite, la conviction que cette voie était stérile. Ce n'est qu'au cours de ces dernières années que ce courant est revenu en force, sous l'impulsion de chercheurs en quête d'une alternative à l'approche symbolique.

L'idée au départ était de s'inspirer de la façon dont fonctionne le système nerveux en construisant des réseaux neuronaux, c'est-à-dire des réseaux dans lesquels chaque unité (neurone) est caractérisé par un degré d'activation et chaque lien entre unités par un poids positif ou négatif (synapse excitatrice ou inhibitrice). Si chaque unité représente une caractéristique du monde extérieur, un système d'apprentissage modifiant les poids permet alors au système d'apprendre à reconnaître des configurations significatives de l'environnement. Les premiers algorithmes d'apprentissage et les premières architectures de réseaux étaient très simples, mais ont permis quelques réalisations assez spectaculaires, dont la plus célèbre est certainement le perceptron, un système capable de faire de la reconnaissance de formes [8]. Les performances du perceptron étaient tout de même assez limitées et des résultats mathématiques [9] ont montré que ce type de système ne pouvait pas faire mieux, d'où le désintérêt des chercheurs. En fait ces limites n'étaient valables que pour les algorithmes simples utilisés à l'époque et on a pu démontrer ces dernières années [10] que des architectures de réseaux plus complexes, accompagnées d'algorithmes d'apprentissage adéquats permettaient de dépasser largement les performances du perceptron.

Les méthodes connexionnistes s'avèrent efficaces dans les domaines où les décisions que doit prendre le système dépendent d'un ensemble de facteurs (que l'on appelle des "micro-caractéristiques") à la manière d'une fonction de plusieurs variables presque partout continue : de petites modifications d'un facteur ne changent pas en général le résultat alors qu'une accumulation de modifications portant sur différents facteurs peut l'affecter considérablement. C'est le cas bien entendu en reconnaissance de formes, mais aussi dans bien d'autres types de "raisonnement naturel". Par exemple en linguistique, nous avons utilisé

de tels réseaux [11] pour traiter le problème des expressions polysémiques, dont le sens exact dépend de la valeur d'un grand nombre d'"indices" présents dans le contexte.

Il est sans doute encore trop tôt pour prédire la place exacte qu'occupera le connexionnisme en I.A. dans les prochaines années. Mais le point qui nous semble important pour notre propos, c'est que les progrès actuels ne sont pas dus à une meilleure simulation du fonctionnement neuronal. Au contraire les chercheurs ont abandonné très vite l'idée de simuler véritablement le système nerveux (les progrès de la neurophysiologie, qui ont montré toute la complexité des neurones auraient d'ailleurs sans doute suffi à les en décourager). Au contraire, il est apparu évident que ce qui faisait le succès de la démarche, c'était le choix de certains algorithmes, non pas parce qu'ils auraient une quelconque ressemblance avec la réalité neurophysiologique, mais parce qu'ils permettaient de manipuler avec facilité les "connaissances" que l'on voulait fournir au système.

Ainsi l'objectif initial a été, là aussi, en quelque sorte détourné et la nécessité d'améliorer les performances des réseaux conduit sans cesse le connexionnisme à s'éloigner du niveau neuronal dont il était parti.

IV. MODÉLISATION ET MATHÉMATISATION

L'évolution des différentes approches de l'I.A. montre donc que malgré des points de départ radicalement différents, les entreprises de modélisation obéissent à une loi commune qui tend à les unifier du point de vue de leur statut scientifique : c'est que toute modélisation est au fond une mathématisation du réel et en tant que telle, elle doit se soumettre aux impératifs qui régissent l'utilisation de toute théorie mathématique dans n'importe quel domaine scientifique. D'une part, on ne peut parler de mathématisation du réel que si l'on peut établir une certaine correspondance entre les processus réels et les objets mathématiques que l'on définit. Mais d'autre part, ces objets mathématiques sont de nature radicalement différente des entités réelles et les opérations mathématiques qui les manipulent n'ont pas, en général, de correspondant "naturel" immédiat. Le point géométrique ou le champ électrique ont une définition et des propriétés intrinsèques, et les équations de Maxwell n'admettent pas de description en dehors du langage mathématique.

Ceci ne signifie pas qu'il n'y ait pas des différences importantes entre les deux approches : mais elle sont à rechercher dans le type de mathématiques qui sont utilisées, et non pas dans la démarche épistémologique. De fait l'approche symbolique s'appuie sur la logique et la théorie des graphes, c'est-à-dire sur des mathématiques essentiellement discrètes, alors que les réseaux connexionnistes s'inscrivent dans le cadre de la géométrie différentielle et de la théorie des systèmes dynamiques, c'est-à-dire sur les mathématiques du continu. Ce dernier point demande

peut-être à être explicité : on peut montrer [12] qu'en se plaçant dans l'espace constitué par les activités des unités de sortie, le processus de stabilisation d'un réseau peut être décrit comme une dynamique créée par les valeurs des unités d'entrée sur cet espace et l'on peut, dans ce cadre, caractériser le réseau par les différentes formes de dynamiques qui lui sont associées.

Le problème qui se pose est donc de savoir si l'on a avantage à représenter les processus cognitifs dans le cadre du discret ou du continu. Mais une fois posé ainsi, la réponse semble évidente : certains processus se prêtent parfaitement à une représentation discrète et le passage par le continu est un détour inutile et inefficace, alors que d'autres réclament intrinsèquement du continu et ne sauraient en permettre l'économie.

Comment reconnaître ces deux classes de processus? J'émettrais volontier l'hypothèse que le critère décisif se situe au niveau du rapport local/global : tout processus pour lequel l'information locale ne prend sa signification qu'au niveau global nécessiterait le continu. On comprend alors que dans un même domaine puissent coexister des modèles connexionnistes et symboliques. Par exemple, en reconnaissance de forme, si l'on prend comme information locale des caractéristiques qui ont déjà une signification de forme (angles et sommets de polygones, par exemple) des techniques symboliques sont pleinement efficaces alors que si l'on prend l'information "brute", un réseau connexionniste est plus performant. Cette hypothèse demanderait bien entendu à être approfondie. Mais il me semble que c'est en poussant dans cette direction que l'on pourrait utilement discriminer les différentes méthodes de l'I.A.

V. CONCLUSION

La réflexion présentée ici ne saurait prétendre faire le tour de la problématique de la modélisation : L'adage dites-moi quelles mathématiques vous utilisez, je vous dirai quel type de modèle vous construisez est bien sûr quelque peu simpliste et unilatéral. Mais il a l'avantage de mettre l'accent sur la spécificité de la modélisation dans l'activité scientifique plus générale de construction de théories. Il est clair pour tout le monde qu'il existe des théories qui ne sont pas des mathématisations d'un domaine (la psychanalyse par exemple). Mais ce qui est peut-être moins clair, c'est que le choix de fabriquer un modèle dans le domaine que l'on étudie implique automatiquement le choix de construire une théorie mathématique de ce domaine : c'est donc un choix épistémologique important.

Ce point de vue permet de clarifier bien des malentendus sur le bien fondé de tel ou tel modèle. C'est ainsi qu'en ce qui concerne l'I.A., on peut, à mon avis, renvoyer dos à dos les protagonistes du débat "philosophique" qui s'est développé ces derniers temps outre atlantique

entre tenants de l'approche symbolique et défenseurs du connexionnisme. En effet, si l'on admet que d'un point de vue épistémologique les deux approches relèvent d'une même démarche scientifique, à savoir la production de théories mathématiques de processus cognitifs, on ne saurait valider ou invalider l'une des approches sur la base d'arguments philosophiques. Seule la pertinence des mathématiques utilisées et l'efficacité des modèles construits doit entrer en ligne de compte.

VI BIBLIOGRAPHIE

- [1] NILSON N.J. : Principles of Artificial Intelligence , Springer-Verlag, 1980.
- [2] WINSTON P.H. : L'Intelligence Artificielle , Interéditions, 1987.
- [3] FEIGENBAUM et FELDMAN : Computers and Thought, McGraw-Hill, 1963.
- [4] NEWBORN M. : Computer Chess , Academic Press, 1974.
- [5] SHORTLIFFE E. : Computer-based medical consultations : MYCIN , American Elsevier, 1976.
- [6] DAVIS et LENAT : Knowledge-based systems in Artificial Intelligence, McGraw-Hill, 1982.
- [7] PRC-GRECO : Actes des journées nationales de Toulouse, Teknea, 1988.
- [8] ROSENBLATT F. : Principles of neurodynamics, Spartan, 1962.
- [9] MINSKY et PAPERT : Perceptrons, MIT Press, 1969.
- [10] RUMELHART et McLELLAND : Parallel Distributed Processing, MIT Press, 1986.
- [11] FUCHS et VICTORRI : Une approche topologique de l'ambiguïté, Actes du colloque de l'ARC de Toulouse, 1988.
- [12] VICTORRI B. : Polysémie et théorie des catastrophes, en préparation.

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

... ..

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

...the ... of ...
 ...the ... of ...
 ...the ... of ...

ELABORATION D'UNE CARTE THEMATIQUE A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES: UN ESSAI DE MODELISATION

Catherine MERING

I INTRODUCTION

Les images de télédétection fournissent au thématicien un document exhaustif sur la région qu'il étudie. Aussi servent-elles fréquemment de support privilégié à l'analyse des paysages et à l'élaboration de cartes thématiques. Le recours à des techniques numériques d'analyse a permis une automatisation partielle de la production de cartes à partir des images. Mais l'intervention humaine demeure centrale lors de l'analyse des images et de leur interprétation. En effet c'est le spécialiste qui pilote l'ensemble du processus en fonction de son expérience de l'analyse des images satellitaires et de ses connaissances thématiques. On constate pourtant que l'influence de cette expertise sur le produit cartographique final n'est pas explicitée de manière formelle. Il en résulte une non reproductibilité relative de la méthode cartographique elle-même et des interrogations quant à son degré de généralité.

C'est pourquoi, nous nous sommes fixés pour objectif de développer des systèmes informatiques destinés à simuler la démarche du thématicien élaborant une carte en laboratoire, utilisant des techniques de l'analyse quantitative d'image. La réalisation d'un tel objectif devrait avoir des retombées positives tant du point de vue ergonomique (allègement des tâches) que du point de vue technique (transmission d'un savoir-faire) et

scientifique (explicitation de la démarche, confrontation possible et vérification).

Pour parvenir à la conception de tels systèmes, nous avons eu recours aux techniques de l'intelligence artificielle, en particulier à celles des systèmes experts. Nous décrivons plus particulièrement ici des schémas d'interprétation d'images satellitaires et le formalisme que nous avons adopté pour les transposer en systèmes experts. Nous illustrerons enfin les principes exposés par des exemples empruntés à CIME, un système déjà existant [MERING 88] et à un prototype, CIME2, en cours d'élaboration.

IL QUELQUES DEMARCHES D'INTERPRETATION DES IMAGES SATELLITAIRES

La télédétection constitue une source d'information privilégiée pour réaliser une carte thématique.

Le thématicien doit interpréter l'image satellitaire, c'est à dire associer des concepts abstraits aux entités iconiques¹ qui composent l'image concrète. Le support que constitue l'image numérique lui permet de traduire pratiquement le résultat de son interprétation par la réalisation d'une première carte². Pour atteindre cet objectif, il choisit une démarche adaptée à la thématique étudiée (par exemple les formes de la végétation) et à la taxinomie qu'il veut mettre en oeuvre (essences, densités de couvert, rapports sol/végétation, etc.). Sa démarche dépend également de la réalité terrain dont il dispose. D'autre part, à travers son expérience de l'interprétation des images satellitaires, il a acquis un savoir concernant les caractéristiques radiométriques des entités qu'il cherche à reconnaître (la réponse radiométrique de l'eau libre a des valeurs basses dans les bandes proche infra-rouge et infra rouge), leurs caractéristiques texturales (les zones de forêt ont une texture moins homogène que les zones de cultures), leur forme (les routes et les rivières se présentent comme des linéaments fins) ou enfin leurs relations spatiales avec d'autres entités (les zones de déboisement sont adjacentes aux zones de

1- On désigne ainsi les entités qui constituent l'image. Il peut s'agir d'entités élémentaires comme le pixel, d'entités connexes comme les régions, ou d'entités composées de plusieurs entités connexes, comme les objets.

2- En effet quel que soit le but que poursuit le thématicien en analysant une image numérique, il matérialise dans bien des cas le résultat de ces investigations sous la forme graphique d'une carte, ou pseudo-carte qui répond plus à ce stade, à la définition d'image étiquetée de l'informaticien qu'à celle de carte thématique du cartographe.

forêt). Ce savoir, tout en étant partiel¹, peut guider sa démarche interprétative.

Enfin, pour réaliser une partition de l'image en entités thématiquement significatives, il doit choisir les traitements adaptés à son but et aux caractéristiques de l'image à analyser.

Le but n'est pas ici de réaliser un inventaire de toutes les démarches d'interprétation adoptées par les thématiciens mais plutôt de dégager les caractéristiques communes d'un savoir faire dans ce domaine. Nous avons donc tenté de dégager les traits essentiels de ce savoir faire en décrivant trois démarches types:

II.1 DÉMARCHE A: PARTITION DE L'ESPACE ET TAXINOMIE CONTRÔLÉE PAR LA RÉALITÉ TERRAIN

Le thématicien souhaite réaliser une partition de l'espace en fonction d'une taxinomie préalable (par exemple la liste des formes végétales présentes dans sa zone d'étude). Il utilise alors directement l'image satellite comme support à l'expression cartographique de cette taxinomie². Pour ce faire, il tentera de matérialiser une partition de l'espace en taxons en réalisant une partition de l'image en entités iconiques associées à ces taxons.

En raison de la non stabilité spatio-temporelle de la réponse radiométrique des unités de paysage, éléments de sa taxinomie, il lui est impossible de fonder sa démarche sur une relation univoque entre valeurs radiométriques des éléments de base (les pixels) et taxons.

Il prélève donc parmi ses relevés de terrain³ des zones-test, éléments représentatifs de la taxinomie. En repérant et en délimitant ces zones-test sur l'image, il établit une première correspondance entre éléments iconiques et taxons. Il dispose désormais des représentants prototypiques des taxons au sein de l'image. Il reste alors à classer tous les pixels de

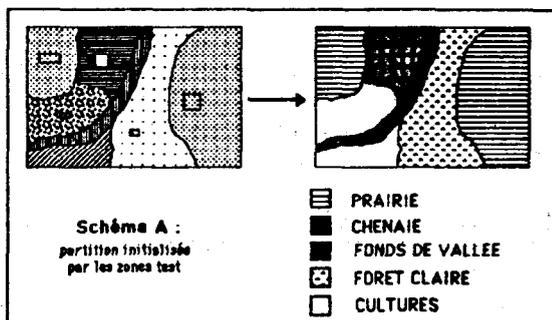
1. On appellera savoir partiel ou connaissance partielle, un savoir qui, tout en permettant d'établir un ensemble d'informations relatives à un concept, ne suffit pas à caractériser totalement ce concept dans la mesure où certains éléments nécessaires à sa caractérisation totale et univoque sont manquants.

2. Si tant est que les éléments de la taxinomie puissent être caractérisés par les informations contenues dans l'image et que l'on peut atteindre directement (niveau de gris) ou indirectement (texture, géométrie).

3. Description in situ des objets au sol, éléments de sa taxinomie

l'image en les comparant à ces représentants prototypiques¹, comme nous avons tenté de l'illustrer par le Tableau 1. La taxinomie choisie a priori commande ici l'ensemble de l'analyse et de l'interprétation. Les connaissances thématiques sont invoquées lors de la définition d'une taxinomie et les connaissances du terrain lors de la définition des zones-test.

Tableau 1 : La démarche A d'interprétation suppose la partition de l'image par apprentissage à l'aide des zones-test représentant les classes recherchées



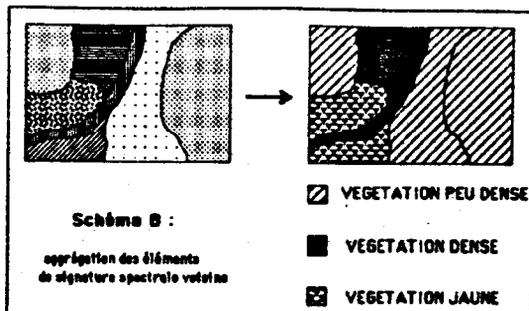
II.2 DÉMARCHE B: STRUCTURATION DE L'IMAGE PAR REGROUPEMENT AUTOMATIQUE DES PIXELS

Compte tenu de la nature de l'information satellitaire qui fournit autant d'images que de bandes spectrales pour une seule scène, on est en mesure de réaliser des groupements de pixels en classes spectralement et texturalement homogènes. Aucune taxinomie a priori ni aucune réalité terrain ne sont invoquées avant l'analyse. L'interprétation s'effectuera à partir d'une image structurée en entités de signature spectrale voisine et/ou de texture voisine suivant les descripteurs choisis au départ. Le thématicien invoque ses connaissances relatives à la réponse spectrale, la texture des entités à cartographier, leur répartition spatiale pour interpréter l'image. Il utilise également ses relevés de terrain et en particulier ses mesures radiométriques in situ pour étayer son interprétation.

Au sein de cette démarche, les connaissances thématiques sont invoquées au cours de l'interprétation. Le choix des descripteurs utilisés dans l'interprétation n'est plus lié à la détermination de zones-test en amont, mais aux connaissances du thématicien concernant les propriétés spectrales et spatiales des entités à reconnaître. Comme le montre Tableau 2, la première carte produite est en général assimilable à une carte des propriétés spectrales des éléments du paysage.

¹. Le même raisonnement peut s'appliquer à des entités iconiques de niveau plus élevé que le pixel.

Tableau 2 : La démarche B d'interprétation repose une structuration de l'image effectuée par regroupement automatique d'entités iconiques similaires

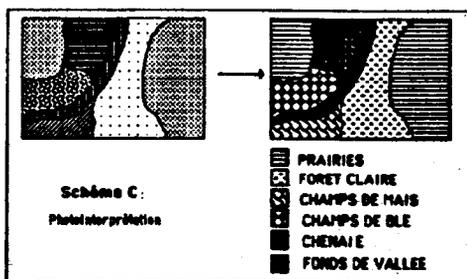


II.3 DÉMARCHE C : LA PHOTOINTERPRÉTATION ANALYTIQUE

La délimitation sur l'image des entités géographiques repose à la fois sur l'analyse de leur apparence¹ autrement dit de leurs caractéristiques iconiques intrinsèques telles que leur radiométrie, leur texture, leur forme, et également de leur structuration, c'est à dire de leur organisation spatiale. L'interprétation suppose la connaissance approfondie de la zone à cartographier sous-tendue par une connaissance des lois qui régissent l'organisation du paysage analysé [FLOUZAT 82]. Analyse et interprétation sont ainsi intriquées dans un va et vient constant entre connaissance du terrain, connaissance approfondie du thème et perception des entités géographiques sur l'image. Il s'agit d'une démarche complexe mais dont l'objectif peut parfois se limiter à la description de certains éléments du paysage (cours d'eau, réseaux routiers, parcellaires, zones forestières, ...).

Comme on peut le voir sur le Tableau 3 la carte produite comporte une légende détaillée, résultat d'une connaissance approfondie du contenu de la scène.

Tableau 3 : La démarche C d'interprétation repose sur la reconnaissance des entités géographiques d'après leur apparence sur l'image



¹ Les photointerprètes parlent de délimitation de zones d'égale apparence (cf. Gondard P., Des cartes discours pour une méthode, Editions de l'ORSTOM, Paris, 1988.)

Dans la pratique, le thématicien peut associer ces trois démarches pour conduire une interprétation. Un modèle général devra donc rendre compte non seulement de chacune de ces démarches mais de leur association possible. Aussi est-il nécessaire d'en préciser les éléments afin de définir un mode de représentation des connaissances permettant de simuler le raisonnement du thématicien.

III. PROCEDURES NUMERIQUES ET INTERPRETATION DES IMAGES

Comme nous l'avons vu, au sein de chacune des démarches évoquées plus haut, le thématicien utilise à la fois son expérience de l'interprétation des images et ses connaissances thématiques. Pour effectuer les tâches d'analyse, nous supposons qu'il utilise des procédures numériques d'analyse d'image et de classification automatique. Ces procédures correspondent à des méthodes issues de théories différentes qui n'utilisent pas la même représentation de l'information traitée. Après avoir évoqué rapidement ces méthodes, nous proposeront un mode de représentation unique des procédures et des unités. Sans faire un panorama complet de ces procédures nous mentionnons ici les deux catégories les plus fréquemment utilisées en télédétection.

III.1 LES CLASSIFICATIONS AUTOMATIQUES

Ces procédures sont utilisées afin de regrouper en un nombre réduit de classes homogènes l'ensemble des pixels formant la scène. Elles correspondent en réalité à la transposition d'algorithmes très généraux qui classent des individus décrits par des variables quantitatives ou qualitatives en utilisant une formulation mathématique des notions de distance ou de similarité [BENZECRI 73].

Ces algorithmes procèdent soit par séparation de l'ensemble des individus en sous-ensembles en construisant éventuellement une hiérarchie descendante de classes et sous-classes, soit par aggrégation des éléments en sous-ensembles, cette aggrégation pouvant correspondre à une hiérarchie ascendante. Séparations et aggrégations sont basées sur des calculs numériques effectués à partir des variables¹.

Enfin, il faut distinguer les méthodes dirigées et non dirigées. Dans le premier cas, l'utilisateur intervient dès le début du processus d'élaboration des classes par la définition de classes a priori. Ces mé-

1. On trouvera une description complète de ces méthodes numériques dans plusieurs ouvrages dont celui de J.P. Benzécri consacré à la taxinomie. [BENZECRI 1973]

thodes sont utilisées notamment dans une démarche interprétative de type A (cf § 2.1). Dans le second, l'utilisateur n'intervient qu'une fois la classification effectuée pour interpréter le contenu des classes, sans faire appel à d'autres hypothèses. Cette catégorie de méthodes est utilisée dans la première phase d'une démarche de type B (cf § II.2).

On voit qu'ici la représentation des unités manipulées (individus décrits par des variables) ne permet pas de formaliser directement l'organisation spatiale des données. Nous aurons donc intérêt, tout en conservant les algorithmes de classification automatique pour le traitement, à choisir un mode de représentation des données qui rende compte de cette organisation et qui permette notamment de formaliser les relations spatiales entre différentes entités (inclusion, voisinage, adjacence, etc.) .

III.2 PROCÉDURES NUMÉRIQUES D'ANALYSE DE L'IMAGE

Il s'agit des procédures qui permettent de détecter puis d'analyser les ensembles organisés au sein d'une image. Elles manipulent explicitement les éléments qui composent l'image.

L'image dans sa représentation élémentaire est définie comme une distribution spatiale d'intensité lumineuse¹. On distingue d'une part les primitives de l'image, qui sont des parcelles d'image constituée d'un ensemble de points, la primitive élémentaire étant le pixel, et d'autre part les entités qui proviennent de regroupement des primitives en fragments d'image connexes (région élémentaire, contour) puis de regroupements ou d'associations de ces dernières destinées à former une entité non forcément connexe et correspondant à un niveau d'abstraction supérieur (objet) .

Les procédures de segmentation proprement dites permettent de structurer l'image en régions par aggrégation de primitives d'intensités voisines, ou encore par extraction de contours. [ROSENFELD 82].

Les procédures d'analyse proprement dites permettent d'éliminer le bruit par filtrage des niveaux de gris [PRATT 78], d'analyser la texture des entités [HARALICK 78], leur forme individuelle et leur organisation relative dans l'espace [SERRA 82].

Ces outils sont d'une aide précieuse pour extraire des entités ayant une forme donnée et sont donc utilisés à des fins de reconnaissance de forme, au sein de démarches d'interprétation de type C (cf § II.3) [MERING 87a].

¹. On évitera ici le terme de couleur, celle-ci n'étant pas définie de façon univoque à partir des données d'origine.

D'autre part ces procédures utilisent une représentation des données adaptée à la structure de l'image dont nous nous sommes inspirés lorsqu'il s'est agi de définir un mode de représentation des connaissances au sein d'un système d'interprétation des images.

III.3 SYSTEME EXPERT ET PROCEDURES NUMERIQUES

Pour simuler le raisonnement du thématicien qui interprète les images de télédétection, nous nous sommes fixés pour objectif de concevoir des programmes informatiques utilisant les techniques des systèmes experts¹. D'autre part, nous venons de voir plus haut que le thématicien inclut dans sa démarche l'utilisation de procédures numériques. C'est pourquoi nous avons envisagé des systèmes experts dont l'une des tâches consiste à piloter des procédures numériques. Un système de ce type doit sélectionner les méthodes à activer ainsi que le type des unités traitées en entrée et en sortie de la méthode. Il doit par conséquent contrôler l'adéquation entre la méthode qu'il appelle et le type d'unités à traiter. Il doit enfin interpréter les résultats de la méthode, les vérifier et les propager.

Chaque méthode devra donc être représentée explicitement au sein du système sous la forme suivante:

nom_de_la_méthode (entités_entrée,entités_sortie,paramètres, contraintes_sortie, contrôle)
(1)

Par exemple, la méthode m_1 de segmentation sur les variables radiométriques des pixels peut être représentée comme suit:

m1(pixels,pixels,variables_radiométriques,segments,ns)

où

-segments représente l'ensemble des bornes inférieures et supérieures sur les variables déterminées par la méthode m_1

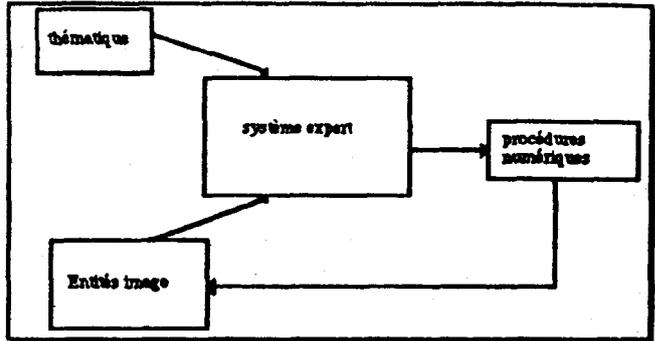
-ns représente le nombre total de segments produits, ce paramètre servant à contrôler globalement a posteriori la méthode m_1

Le système devra donc effectuer la synthèse des données symboliques représentant la connaissance du thématicien (thème, terrain, objectif)

¹- Un système expert est un programme informatique destiné à raisonner en suivant une démarche comparable à celle d'un spécialiste, dans un domaine précis et bien définis. Ce programme est composé d'une base de connaissances contenant à la fois les données relatives à un problème particulier et le raisonnement du spécialiste, et d'un mécanisme d'exploitation des connaissances indépendant du domaine, le moteur d'inférence.

et des données numériques (données satellitaires et résultats des procédures) comme l'indique Tableau 4.

Tableau 4 : Supervision du numérique par le symbolique



Il devra ensuite mettre à jour les liens hiérarchiques entre primitives et entités au cours du processus d'analyse et d'interprétation. Nous avons donc adopté une première représentation des entités iconiques en désignant chacune des entités par son nom, le type auquel elle appartient et les valeurs de ses attributs.

Ainsi, le Tableau 5 contient la description du pixel P_i et de la région E_n qui contient le pixel P_i .

<p>P_i <i>type</i> : primitive <i>attributs</i> :</p> <p style="padding-left: 40px;"><i>forme</i>: pixel <i>radiométrie</i>: r_1, r_2, r_3, r_4</p>
<p>E_n <i>type</i> : région <i>attributs</i> :</p> <p style="padding-left: 40px;"><i>texture</i> : hétérogène <i>moyenne</i> : 50 <i>variance</i> : 20 <i>surface</i>: 100 <i>père_de</i>: P_i</p>

Tableau 5 : représentation des entités iconiques

IV. LES CONNAISSANCES ET LEUR REPRESENTATION

Ces dernières années, ont été proposés de nombreux systèmes d'analyse et d'interprétation d'images [LEVINE,1984]. L'objectif de tels systèmes étant la plupart du temps de simuler artificiellement le processus de la vision humaine, ils ont été appelés systèmes de vision. La plupart des systèmes de vision reposent sur l'acceptation commune de l'existence de deux niveaux de connaissance séparés: les connaissances perceptuelles d'une part permettant une segmentation de l'image et les connaissances sémantiques, d'autre part, permettant son interprétation. Cette approche a permis d'ores et déjà de créer des systèmes qui détectent des ensembles organisés sur une image. Il faut noter que ce sont souvent les caractéristiques intrinsèques de l'image à analyser qui constituent la contrainte principale pour mener à bien cette tâche de détection¹. Quant à l'interprétation, elle est d'autant mieux simulée que la liste des concepts permettant cette interprétation est limitée et qu'il existe un modèle attaché à chacun de ces concepts contenant ses caractéristiques iconiques². Pour notre part, nous ne prétendons pas simuler la vision du thématicien. Tout d'abord, il nous semble hors de notre portée de modéliser la perception d'une image aussi complexe que l'image de télédétection indépendamment d'une ébauche d'interprétation. Nous posons donc que l'ensemble du processus (analyse et interprétation de l'image) repose sur une connaissance a priori du contenu de la scène, même si la caractérisation iconique des objets composant cette scène est en général par-

1. La tâche de détection est d'autant plus aisée que l'image possède de bonnes caractéristiques intrinsèques, correspondant par exemple aux configurations suivantes:

- elle est composée d'entités connexes de texture homogène nettement distinctes d'un fond, dont la texture est également homogène
- elle est composée d'entités de taille nettement supérieure à celle du pixel, chacune pouvant se distinguer des entités adjacentes par ses valeurs de gris.
- elle comprend éléments linéaires nettement distincts (plus clairs ou plus sombres que leur voisinage) continus et fermés, assimilables à des contours.

2. Si l'on cherche par exemple à interpréter une scène d'extérieur, on définit un modèle du monde défini par cinq types d'objets: la route, le ciel, les champs, les maisons, les voitures. On définit également des modèles iconiques de chacun de ces objets et de leur interrelation. On supposera par exemple qu'une maison est composée de plusieurs parties: le bâtiment, le toit, les fenêtres, la porte. Chaque partie est également modélisée: le bâtiment est un grand rectangle, les fenêtres sont des petits rectangles à l'intérieur du bâtiment ainsi que la porte qui est un rectangle adjacent au côté inférieur du bâtiment, le toit est un trapèze au dessus du bâtiment, etc... on supposera également qu'au dessus du toit de la maison, il y a forcément le ciel, pour lequel on dispose également d'un modèle. On posera que la voiture est sur la route (contrainte d'imbrication) et non pas dans les champs (la présence d'une voiture dans un champs constitue dans ce cas une violation des contraintes)

tielle et ne peut pas donc pas permettre de construire des modèles d'objets guidant l'ensemble de la recherche comme c'est le cas dans de nombreux systèmes de vision [MATSUYAMA 85]. Pour simuler les démarches d'interprétation (cf § II à l'aide des techniques de Systèmes Experts, nous avons donc considéré que plusieurs types d'éléments devaient être décrits:

- les concepts géographiques permettant d'interpréter la scène et qui sont définis à travers la description d'une taxonomie des entités géographiques composant a priori cette scène.

- les traitements d'image, qui permettent de modifier dynamiquement l'image de façon à créer des entités iconiques pouvant être interprétées avec le moins d'ambiguïté possible à l'aide des concepts décrits en amont.

- les entités iconiques, qui sont analysées à l'état courant, et que le système doit interpréter de la façon la moins ambiguë possible à l'aide des concepts géographiques décrits en amont.

- les raisonnements permettant de choisir les traitements adéquats en fonction des buts énoncés et du contexte courant, et permettant également d'en évaluer les résultats.

- les raisonnements permettant d'interpréter thématiquement les entités iconiques à l'état courant.

- les raisonnements permettant d'évaluer les chances de succès ou d'échec à l'état courant et de décider de la poursuite ou de l'arrêt de la recherche des solutions.

En suivant les principes méthodologiques des systèmes experts, nous avons regroupé ces différents éléments en deux ensembles: connaissances descriptives d'une part (énoncé de faits) et connaissances procédurales d'autre part (déduction de faits).

IV.1 LES CONNAISSANCES DESCRIPTIVES

Elles regroupent, sous forme d'assertions, un ensemble d'informations décrivant les caractéristiques propres aux entités et aux concepts examinés. Elles constituent la base de faits.

Il s'agit des connaissances sur les entités iconiques (primitives, régions, objets), sur les entités géographiques qu'elles représentent (types de couvert...), sur le contexte et les contraintes de leur interprétation (localisation de la zone d'étude, conditions de prise de vue, relief).

On distingue plusieurs types de connaissances descriptives:

Les connaissances prototypiques permettent de caractériser un concept par l'ensemble de ses propriétés, attributs, contraintes, qui définissent ses formes possibles de réalisation.

Ici, il peut s'agir des formes iconiques de réalisation des concepts géographiques, comme dans l'exemple suivant où le concept est désigné comme une classe dont le contenu correspond ici à l'entité "forêt claire":

classe :	<i>forêt claire</i>		
entités associées :	<i>régions</i>	<i>grande</i>	<i>valeur > 400</i>
	<i>taille</i>	<i>hétérogène</i>	<i>variance > 50</i>
	<i>texture</i>	<i>basse</i>	<i>valeur moyenne < 20</i>
	<i>bande rouge</i>		

Les connaissances inductives permettent de passer du particulier au général. Elles s'appliquent aux concepts à reconnaître et peuvent être introduites par l'attribut *sorte_de*.

classe	<i>chênaie</i>
sorte_de	<i>forêt</i>

Les connaissances structurelles permettent de passer des parties au tout dans l'organisation structurelle des entités, par composition ou décomposition. Elles s'appliquent à la fois aux classes et aux entités iconiques et permettent d'établir indirectement un lien logique entre les deux. Elles peuvent être introduites par les attributs *père_de* et *filis_de*, ou *composé_de* et *composant_de* comme dans l'exemple suivant:

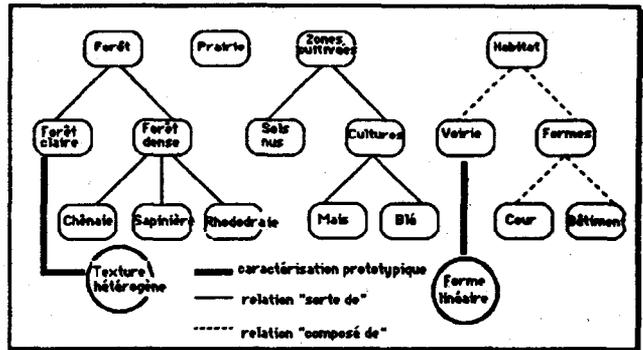
classe	<i>habitat</i>
composé_de	<i>maisons</i>
composé_de	<i>voierie</i>
composé_de	<i>jardins</i>

Les connaissances associatives permettent d'établir une relation spatiale entre deux entités iconiques ou deux classes :

classe	<i>routes forestières</i>
en relation avec	<i>forêt</i>
type relation	<i>imbrication</i>

On a représenté sur le Tableau 6 un exemple regroupant des connaissances descriptives associées la scène :

Tableau 6 : Connaissances descriptives associées à une scène



Pour ne pas alourdir la syntaxe, d'une part, et pour conserver le plus grand degré de généralité possible dans l'expression des connaissances, nous avons tenté de représenter l'ensemble des connaissances descriptives à l'aide d'un formalisme unique bien qu'elles soient attachées à deux types d'entités différentes, les entités iconiques d'une part et les entités géographiques d'autre part.

Ce formalisme permet de décrire des objets quelconques à l'aide d'un triplet:

objet, attribut, valeur

Pour décrire des objets de nature différente, nous avons été contraints d'introduire systématiquement la notion de type d'objet. En ce qui concerne par exemple, les entités iconiques, on différencie les entités de type région et de type pixel. Chaque objet sera donc représenté par un quadruplet:

type, objet, attribut, valeur (II)

Il reste toutefois à exprimer le processus d'interprétation c'est à dire de mise en relation entre entités iconiques et entités géographiques. Cette mise en relation se traduira par des modes de représentation différentes suivant que l'on privilégie les connaissances a priori sur les entités géographiques à reconnaître en choisissant une représentation centrée autour des entités géographiques vis à vis desquelles les entités iconiques joueraient alors le rôle d'instances, ou si l'on privilégie l'analyse de l'image pour construire par étape une interprétation a posteriori des entités iconiques en choisissant une représentation centrée autour de ces dernières.

Une représentation centrée autour des entités géographiques peut paraître préférable dans le cas où le raisonnement du thématicien est basé

sur une connaissance complète de l'expression iconique des entités géographiques à reconnaître. (cf démarche C, § II.3). Elle est généralement adoptée lorsqu'il s'agit de détecter une catégorie spécifique d'entités dont on postule l'existence à l'intérieur de la scène et à propos desquelles on détient une connaissance prototypique complète. [MERING 87b]. Une telle représentation peut alors passer par la définition d'entités modèles conçues comme des méta-entités [GARBY 86], ou comme des prototypes [GRANGER 85] qui regroupent les différentes connaissances relatives à une catégorie d'entité géographique.

Pour notre part, compte tenu des restrictions que nous avons faites au début de ce paragraphe concernant la production de modèles iconiques dans le cas des images de télédétection, nous avons choisi de simuler un raisonnement permettant de piloter le processus d'analyse de l'image et d'interpréter a posteriori des entités iconiques et nous avons donc opté pour une représentation centrée autour des entités iconiques. Les classes désignant les concepts associés aux entités géographiques sont représentées sous la forme d'un attribut attaché à ces entités. En reprenant l'exemple décrit dans le Tableau 5, à l'aide du formalisme défini en (II) nous obtenons la représentation suivante:

type :	<i>région</i>
objet :	E_n
attributs :	
	<i>texture : hétérogène</i>
	<i>moyenne : 50</i>
	<i>variance : 20</i>
	<i>surface : 100</i>
	<i>père_de : P_i</i>
	<i>classes : forêt claire, prairie</i>

Tableau 7: exemple d'interprétation d'une entité iconique

Pour pouvoir représenter les connaissances descriptives concernant les entités géographiques telles qu'elles sont définies au début de ce paragraphe, il suffit d'utiliser la représentation définie en (II) en précisant que classes est un objet de type attribut. Il peut ainsi être traité comme un objet quelconque, élément de la base de faits.

IV.2 LES CONNAISSANCES PROCÉDURALES

Elles permettent la modification dynamique de la base de faits par l'adjonction de faits nouveaux, soit par l'établissement de relations entre des faits avérés, soit par l'établissement de relations entre faits avérés et faits à établir. Elles s'expriment sous la forme très générale de règles:

Si Conditions Alors Conclusions

Il peut s'agir de règles d'inférence qui permettent le parcours de l'arbre des classes à l'aide de l'attribut *sorte_de*, selon l'axe de généralisation/spécialisation, comme dans l'exemple suivant :

Si	<i>type_entité</i>	= <i>région</i> ,
	<i>texture</i>	= <i>hétérogène</i>
	<i>classe</i>	= <i>sorte_de_(forêt)</i>
Alors	<i>classe</i>	= <i>forêt_claire</i>

L'obtention de faits nouveaux est liée à l'activation de processus de détection, de partitionnement ou de fusion des entités. Ces opérations sont activées par des règles de la forme:

Si Conditions Alors Action

L'action peut recouvrir un processus plus ou moins complexe, décomposable lui-même sous forme de règles ou bien l'activation d'une méthode, comme dans l'exemple suivant où l'on affecte aux pixels de l'image la valeur des classes obtenues par apprentissage à partir des zones-test., en reprenant le formalisme défini en (I).

Si	<i>support_courant</i> = <i>Image</i> ,
	<i>contrôle_courant</i> = <i>oui</i> ,
	<i>contrainte_courante</i> = <i>segments</i> ,
Alors	<i>affecte_classe</i> (<i>pixels,regions,segments(zones-test.),.</i>)

V. STRATEGIE, CONTROLE ET CHOIX

V.1 LES STRATÉGIES

Dans un Système Expert devant résoudre un problème d'analyse (description des entités) ou d'interprétation (détermination du concept spécifique applicable aux entités), on dira qu'une stratégie de résolution correspond à une ligne de raisonnement permettant de guider la recherche des solutions au problème posé.

Une stratégie possible consiste par exemple à élaborer à partir des primitives, des objets susceptibles d'être interprétés en terme d'entités géographiques en procédant par abstractions successives des concepts et regroupements successifs des entités iconiques. Guidé par les données, le processus d'interprétation s'effectue selon un mode dit ascendant [NAGAO 80]. C'est cette stratégie qui est mise en oeuvre dans la première phase de la démarche B d'interprétation (cf § II.2) où sont délimitées des entités radiométriquement homogènes.

Une autre stratégie consiste à partir des concepts abstraits associés au but poursuivi (i.e. les classes recherchées) pour décomposer l'image en entités que l'on associera à des sous buts, selon un mode dit descendant. Elle est appliquée dans la démarche A d'interprétation où l'on partitionne l'image à l'aide d'un processus d'apprentissage, en entités associées à des classes thématiques prédéfinies. Elle est également appliquée dans la première phase du schéma C dans le cas où l'on définit un ensemble particulier d'objets à détecter.

Pour réaliser l'analyse et l'interprétation des images, tâches complexes, il conviendrait d'envisager des stratégies alternant mode descendant et mode ascendant [MATSUYAMA 86].

Ces stratégies sont transcrites sous forme procédurale par un ensemble de règles ou de métarègles (règles contrôlant l'action des règles) déterminant des plans d'action. Un plan correspond par exemple au mode de sélection des entités à analyser et de séquençement des actions à entreprendre à partir de ces entités, ou bien au mode de sélection des actions à entreprendre et de séquençement des entités auxquelles appliquer l'action. Ces règles peuvent prendre la forme générique suivante:

Si	<i>l'affectation des primitive_image est terminée,</i>
Alors	<i>analyser les régions à texture homogène</i>

Si

l'étiquetage de l'entité courante est ambigu,

Alors

activer la méthode m_2

Le développement de systèmes experts d'interprétation d'images de télé-détection est indissociable de la mise au point de stratégies optimales de résolution pour une même famille de problèmes. Il s'agit alors d'explicitier une métaconnaissance recouvrant non seulement un savoir thématique ou un savoir en traitement d'image mais une connaissance relative à l'efficacité du raisonnement dans le domaine traité. Ce type de connaissance permet d'orienter le raisonnement en donnant la priorité aux lignes de raisonnement qui ont les meilleures chances de succès et en écartant celles qui contiennent les plus grands risques d'échec, compte tenu à la fois des caractéristiques intrinsèques de l'image à analyser, des concepts permettant leur interprétation, et du contexte courant. Une telle explicitation passe par une amélioration du modèle cognitif, qui doit dépasser la simple paraphrase d'une démarche particulière d'interprétation afin de déterminer des stratégies possibles applicables aux problèmes d'interprétation des images de télé-détection, et pouvant être aisément transcrites au sein d'un Système Expert.

V.2 CHOIX ET CONTROLE

Le thématicien doit pouvoir expérimenter plusieurs procédures concurrentes fournissant des éléments d'analyse (descripteurs d'entités iconiques) ou d'interprétation (mise en relation entre entités iconiques et concepts géographiques). Il doit donc pouvoir contrôler les résultats de chacune d'entre elles en fonction d'un critère de validité qu'il définit a priori et choisir les meilleurs résultats parmi les résultats valides en fonction d'un critère de choix, qu'il a également prédéfini¹. De façon plus générale il doit évaluer l'état courant du processus et prédire les cas d'échec et de réussite afin de décider de l'abandon ou de la poursuite du processus ou encore la reprise vers un état antérieur.

Le système doit donc disposer de critères formels d'évaluation associées aux buts aux sous-buts. Ces critères participent au mécanisme du système et font généralement partie des prémisses des règles de contrôle qui permettent d'évaluer un but comme dans l'exemple suivant:

1. Les procédures numériques incluent parfois un critère interne de rejet ou d'acceptation, comme c'est le cas par exemple pour les méthodes probabilistes mais l'expert utilisant plusieurs méthodes doit définir un critère externe aux méthodes.

Si $somme_des_pixels_bien_classées > seuil_admis$
Alors $carte = valide.$

VI L'EXEMPLE DE CIME, UN SYSTEME DE CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION

CIME est un système de cartographie par télédétection de la végétation en zone montagneuse [MERING 88]. Mis au point d'après les principes exposés plus haut, il a été expérimenté à partir des données Landsat MSS sur une région de l'Himalaya du Népal central¹.

Dans sa version actuelle, le système n'utilise pas de connaissances prototypiques liées à l'expression iconique des entités géographiques car, dans l'exemple étudié, une connaissance de ce type, appliquée aux taxons de la végétation sur l'image MSS est trop partielle, trop ambiguë et trop imprécise pour être explicitée et représentée en tant que telle. CIME est pour l'essentiel basé sur une démarche de type A : une taxinomie en sept classes de végétation² est définie au départ par le spécialiste, ainsi que des zones_test qui en sont les représentants prototypiques. Sont ad-jointes aux données radiométriques d'autres données numériques relatives aux pixels de l'image : la texture, l'altitude, la pente, l'ensoleillement.

CIME a été conçu suivant le principe des systèmes de production: Le raisonnement est traduit par des règles de production et les connaissances descriptives sont rassemblées dans une base de faits.

¹. Nous ne revenons pas ici sur la description détaillée de ses objectifs, de ses fondements ni de son architecture que l'on trouvera dans [MERING 88].

². Les cultures, les sols nus, les prairies, la forêt claire, la sapinière, la chenaie, la rhododraie.

VI.1 LA BASE DE FAITS

Elle regroupe aussi bien les connaissances sur les entités iconiques manipulées, c'est à dire les pixels des parcelles-tests, que des connaissances sur les concepts thématiques généraux. Par exemple les deux assertions suivantes:

le pixel numéro 12 est associé à la classe chênaie.

la scène considérée est située en région montagneuse

sont traitées formellement de façon identique comme des éléments de la base.

Chaque pixel est représenté isolément au sein du système comme un objet décrit par un ensemble d'attributs, chacun de ces attributs ayant une ou plusieurs valeurs, ces valeurs étant soit numériques soit symboliques. Ainsi par exemple un pixel quelconque P_i sera décrit de la façon suivante:

P_i	nom du pixel
$r1, r2, r3, r4$:	les 4 mesures radiométriques (4 canaux de Landsat MSS)
t :	la texture locale (calculé à partir de MSS6)
a :	l'altitude
p :	la pente
e :	la quantité d'ensoleillement à l'heure du passage du satellite
c :	la classe représentée par la zone test à laquelle il appartient.
$cl_après$	la liste des classes qui sont associées à P_i à l'état courant

Les connaissances descriptives non associées aux pixels, sont représentées au sein de la base, comme des objets de type général.. Dans cette version, le système ne reconnaît que les objets de type pixel ou de type général..

VI.2 LA BASE DE REGLES

Les règles sont données en vrac, qu'il s'agisse des règles concernant la connaissance thématique, l'activation des procédures ou le contrôle.

A titre d'illustration, on donne la règle suivante, liée la connaissance sur l'étagement de la végétation:

Si	<i>seuil_altitude = oui,</i> <i>altitude < 20</i>
Alors	<i>classe_après <> prairie,</i> <i>classe_après <> chène,</i> <i>classe_après <> sapin,</i> <i>classe_après <> rhodo,</i> <i>datation_obj(2)/</i>

où le symbole <> signifie "différent de" dans la syntaxe du langage d'expression des règles

Cette règle pose qu'au dessous d'une altitude cotée 20, on ne trouve ni prairie, ni forêt de chênes, de sapins ou de rhododendrons.

L'attribut *classe_après* correspond au nom des classes associées à l'objet pixel à un instant donné.

La règle suivante permet d'activer la procédure numérique de discrimination non paramétrique ("dnp" dans le système):

Si	<i>masque_ombre = oui,</i> <i>type_classification = dnp</i>
Alors	<i>dnp_radiométrie,</i> <i>état = segradiométrie,</i> <i>étape = 1,</i> <i>compter_segments = oui/</i>

Cette règle permet, si la classification choisie est "dnp" et dans le cas où l'on traite les pixels appartenant à un secteur de l'image associé à un versant à l'ombre, d'activer cette procédure à partir des variables radiomé-

triques. Elle permet également de numéroter l'étape et de dénombrer les segments obtenus.

VI.3 STRATÉGIE ET FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement de CIME est basé sur la stratégie de type A (cf §II.1), qui part de données structurées pour interpréter les entités iconiques selon un processus descendant. On utilise un principe itératif d'analyse, la partition de l'image par seuillage des variables, opérant à un niveau unique de représentation de l'image, les pixels, mais selon la prise en compte d'attributs ou de groupements d'attributs différents (les variables radiométriques, l'altitude, la pente, la texture). Ce processus a pour but d'affiner progressivement l'interprétation des entités iconiques. A travers les règles, le spécialiste préside au choix d'attributs numériques devant être seuillés. Le système réalise la partition finale en construisant les différentes séquences possibles, et en comparant leurs résultats respectifs afin de choisir la meilleure séquence.

Pour réaliser chaque séquence il invoque soit une procédure numérique de discrimination appliquée aux attributs¹ soit des connaissances thématiques portant sur les relations entre contraintes topographiques et répartition des formes de la végétation (étagement de la végétation, commandements maximaux pour une catégorie végétale donnée).

Plus précisément, le système est construit sur un cycle en trois temps:

- 1) Choix de la meilleure procédure à activer en fonction du contexte et des résultats des procédures précédentes.
- 2) Propagation des résultats de la procédure activée.
- 3) Calcul des coefficients d'incertitude, prévision d'échec et évaluation de la condition terminale

¹. La discrimination non paramétrique [CELEUX80].

Ce cycle peut être décrit de la façon suivante:

Si	<i>la condition terminale est vérifiée</i>
Alors fin	
Sinon	
Si	<i>le coefficient d'incertitude a augmenté</i>
Alors	<i>retour arrière</i>
Sinon	<i>recommencer un nouveau cycle.</i>

Quant à l'arrêt, il peut être dû à la satisfaction des différents critères de contrôle ou à un échec irréductible. Il y a en particulier échec lorsqu'intervient une contradiction entre la valeur des classes affectées par le système à l'un quelconque des pixels de contrôle¹ et sa classe d'origine. Dans ce dernier cas on fera appel au spécialiste pour qu'il reconsidère les zones-test..

VI.4 COEFFICIENTS ET REGLES DE CONTROLE

Dans CIME, les coefficients servant au contrôle des traitements et au choix des chaînes sont au nombre de deux : le coefficient d'incertitude Ci et le coefficient de vraisemblance Cv.

Le coefficient d'incertitude Ci est calculé à partir des pixels de contrôle, à chaque étape, après propagation des contraintes sur l'ensemble de ces pixels. Il est construit pour évaluer le degré d'incertitude du classement des pixels à cette étape. Il sert à contrôler l'évolution du classement au sein d'une chaîne et à orienter vers une poursuite de la chaîne ou un abandon et un retour arrière (cf § VI.3). Une fonction du système permet de le calculer à l'aide de la formule suivante :

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m \sum_{k \in K(i)} a_j^k$$

¹- Les pixels de contrôle sont issus des zones-test fournies en entrée. Ils ne sont pas utilisés comme données d'entrée des procédures numériques mais comme éléments de la base de faits permettant de contrôler les résultats des procédures, et plus généralement la cohérence du raisonnement mené à l'étape.

où :

- ∂_j^k est le symbole de Kronecker (=1 si $j=k$; =0 si $j \neq k$)
- $K(i)$ la suite ordonnée des numéros des classes affectées a posteriori au pixel i ;
- m le nombre total de classes a priori;
- N le nombre de pixels analysés;

Le coefficient de vraisemblance C_v est calculé à partir des pixels de contrôle à la fin de chaque chaîne. Il est construit pour évaluer la vraisemblance du classement résultant de cette chaîne. Il permet de comparer deux chaînes, la meilleure chaîne étant celle dont le coefficient de vraisemblance est le plus élevé. Il est égal à la somme des pixels de contrôle exactement classés à l'issue d'une chaîne. Une fonction du système permet de le calculer à l'aide de la formule suivante :

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{k \in K(i) \\ l=1, m, l \neq j}} \partial_j^{n(i) \cdot (1-d_1^k)}$$

où :

- ∂_l^k est le symbole de Kronecker (=1 si $l=k$; =0 si $l \neq k$)
- $K(i)$ la suite ordonnée des numéros des classes affectées a posteriori au pixel i ;
- $n(i)$ le numéro de la classe a priori du pixel i ;
- m le nombre total de classes a priori;
- N le nombre de pixels analysés;

On a appelé règles de contrôle les règles de CIME qui mettent en place la stratégie décrite plus haut (cf § VI.3). Elles permettent d'activer les traitements, de contrôler les résultats puis d'entériner des choix. Elles sont indépendantes de la thématique et du milieu et peuvent donc être utilisées pour d'autres applications de la cartographie par télédétection.

Par exemple, la règle suivante décrit la vraisemblance du résultat en fonction de l'objectif et du critère retenu:

Si	<i>critère</i>	= <i>pixels_bien_classés</i> ,
	<i>carte_prête</i>	= <i>oui</i> ,
	<i>somme_des_pixels_bien_classés</i>	>= <i>seuil_admis</i>
Alors	<i>vraisemblance</i> = <i>oui</i> /	

La règle suivante permet d'orienter l'utilisateur qui a opéré certains choix vers le choix de l'algorithme de discrimination non paramétrique:

Si	<i>prototype</i>	= <i>oui</i> ,
	<i>type_prototype</i>	= <i>zone_entrainement</i> ,
	<i>classification</i>	= <i>oui</i> ,
	<i>segmentation</i>	= <i>oui</i>
Alors	<i>type_classification</i> = <i>dnp</i> /.	

Enfin cette dernière règle permet de contrôler la diminution du coefficient d'incertitude au cours d'une séquence avant de passer à l'étape suivante:

Si	<i>étape</i> = 2
	<i>revoir_zone</i> = <i>non</i> ,
	<i>incertitude(1)</i> > <i>incertitude(2)</i> ,
Alors	<i>étape</i> = 3/.

VII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette première version d'un système expert a permis de réaliser quelques uns des objectifs que nous nous étions fixés. En effet CIME permet de reproduire l'ensemble de la démarche d'interprétation à partir d'une prise de vue satellitaire sur un même type de région et à partir d'une même taxonomie. Dans ce cas, le système constitue donc une sorte de mode d'emploi pour dresser une carte thématique. La formalisation des choix et des contrôles sous forme de règles en langage clair, permet à l'utilisateur de juger de l'ensemble de la démarche et plus seulement des traitements numériques. Quant à l'expert il peut aisément mettre au point une dé-

marche en en modifiant certains aspects en raison de la forme modulaire et compréhensible de la représentation des connaissances.

L'intérêt de la mise au point de tels systèmes réside enfin dans leur capacité à expliciter les raisonnements utilisés.

Comme on l'a vu, le système actuellement implémenté reproduit une démarche simple et déterministe d'interprétation. En appliquant les principes de représentation des connaissances décrits dans cet article on peut cependant espérer reproduire des démarches plus complexes et plus proche du raisonnement du spécialiste. Pour celà, il sera également nécessaire d'élaborer des stratégies d'analyse et d'interprétation susceptibles d'être utilisées dans un plus grand nombre de cas.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

BENZECRI 73 J.P.Benzécéri: Analyse des données, Tome 1, Dunod, Paris, 1973, pp61-288

CELEUX 82G.Celoux,Y.Lechevallier: Méthodes de segmentation non paramétriques. Revue de statistique appliquée, vol. XXX, n°4, 1982, pp39-53.

FAUGERAS 84O.D.Faugeras : Vision par ordinateur et robotique: état de l'art, Proc. of the 1st Image Symposium, CESTA, 1984, pp121-134

FLOUZAT 82G.Flouzat Modélisation de la compréhension visuelle des images de télédétection: essai de simulation numérique de la photointerprétation analytique. Actes Colloque de la Comm.VII de la SIPT, 13-17 Septembre 1982, Toulouse. 7-23.

GRANGER 85C.Granger : Reconnaissance d'objets par mise en correspondance en vision par ordinateur. Thèse d'état, Nice, 1985

GARBAY 86 C.Garbay: Images stratégies perceptives et stratégies cognitives d'analyse. Thèse d'état, INPG, Grenoble, 1986.

HARALICK 78R.M Haralick :Statistical and structural approaches to texture. Dept of computer science. University of Kansas. Proceedings IEEE, 67, 1978. pp786-804.

HATON 87 J.P.Haton: Techniques d'intelligence artificielle pour l'analyse et l'interprétation des signaux. Actes du 11^{ème}Colloque du GRETSI, 1987

JOLY 85 F.Joly : La cartographie. P.U.F., Paris, 1985

LEVINE 81 M.D.Levine and S.I.Shaheen: A modular computer vision system for picture segmentation and interpretation.IEE trans. on PAMI, 3(5), 1981, pp 540-556 .

NAZIF 84 A.M.Nazif and M.D.Levine : Low level image segmentation. An expert system. IEE trans. on PAMI, 6(5), 1984, pp 555-557 .

NAGAO 80 M.Nagao and T.Matsuyama : A structural analysis of complex aerial photographs. Plenum, New York, 1980.

MATSUYAMA 85 T. Matsuyama and V. Hwang : SIGMA : A framework for image understanding. Integration of bottom-up and top-down analysis. Proc. of 9th IJCAI, 1985, pp 909-915.

MERING 87a J.C.Mering, Y.Poncet, C.Jacqueminet, M.Rakoto -Ravalontsalama: Quantitative description of denudation forms in the Western African Sahel. Advanced Space Research, 7(3), Pergamon Press, London, 1987, pp31-39

MERING 87b C.Mering, C.Jacqueminet : An approach of quantitative description of sand-hills shapes in the West African Sahel from Remote Sensing Imagery. Acta Streeologica, Ljubljana, 1987, pp 951-956

MERING 88 C.Mering, D.Blamont, J.G.Ganascia, F.Monjanel : CIME, une application des systèmes experts à la télédétection. Actes des 8^{èmes} journées intern.sur Les systèmes experts et leurs applications, Vol 3, Avignon, 1988, pp427,448

PRATT 78 W.Pratt : Digital image processing. Wiley, New York, 1978.

ROSENFELD 82A.Rosenfeld and A.C.Kak : Digital Picture Processing, Academic Press, London, 1982

SERRA 82 J.Serra: Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 1982.

STANFIELD 86S.A.Stanfield : ANGY : a rule-based expert system for automatic segmentation of coronary vessels from digital subtracted angiograms. IEE trans. on PAMI, 8(2), 1986, pp 188-199 .

Theme :
**PLACE DE LA MODELISATION
DANS LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE**

Coordinateur :
BERNARD VICTORRI

RHETORIQUE DE LA MODELISATION

Christian MULLON

Lorsque j'ai appuyé l'idée émise par un certain nombre de collègues de consacrer l'édition 1988 du séminaire informatique de l'ORSTOM au thème de la modélisation, je ne faisais que souligner l'urgence d'un débat multidisciplinaire sur une technique parfois difficile à maîtriser; j'avais également en tête une question qui m'était propre : que peut-on faire en tant que mathématicien au sein d'un institut de recherche consacré au développement?

Ensuite, une fois que cette suggestion a été acceptée, au fur et à mesure des discussions préliminaires, est apparue, au sein du comité d'organisation du séminaire, la crainte d'avoir été trop ambitieux et de l'incapacité de trouver une cohérence entre la multiplicité des approches de la modélisation. Le concept de modèle n'est-il pas trop vague, n'a-t-il pas trop d'acceptions différentes pour supporter un dialogue constructif entre chercheurs de disciplines diverses ?

La difficulté dans les discussions provenait de ce que, pour certains, toute formalisation est une modélisation et que, pour d'autres, l'activité scientifique relève, par nature, de la formalisation et l'on doit donner un sens plus étroit à la notion de modélisation.

C'est de cette difficulté qu'est issu le projet de consacrer une conférence au thème de la rhétorique de la modélisation, c'est à dire à l'étude des modèles comme une des formes particulières du discours scientifique, à son mode de signification, à ses figures, à son efficacité, et cela tout en sachant bien la perplexité qu'éveille toute démarche rhétorique et qui est celle du camarade de chambrée de Jean PAULHAN, qui découvrait son lit

fait en portefeuille, qui s'écriait : "Tas de putains ! C'est quand je boulotte pour vous que vous me faites des tours de cochon. Je vais vous..." et qui apprenait qu'il venait de faire tenir en peu de mots une apostrophe, une antithèse, une métonymie, une exclamation, deux métaphores, une ellipse et une réticence ¹.

I ABDUCTION

Il y a un endroit particulier où le problème de la modélisation se pose naturellement de façon rhétorique : c'est celui des revues scientifiques : quiconque a participé d'une façon ou d'une autre, à un comité de rédaction et a dû décider de la publication d'un modèle sait combien cela éveille de discussions et que l'on en arrive toujours à des questions du type: qu'est-ce que signifie le modèle? qu'est-ce qu'il prouve? et que ces questions restent presque toujours sans réponse.

Il n'est peut être pas inutile de rappeler qu'il existe une rhétorique du discours scientifique, ancrée dans la tradition philosophique, sous-jacente lors de ces discussions et selon laquelle un texte scientifique scientifique ne devrait comporter que :

- des relevés de faits
- des raisonnements inductifs, permettant d'aller des faits aux principes
- des raisonnements déductifs, permettant d'aller des principes aux faits

Or, de toute évidence, si une modélisation ne relève d'aucune de ces figures, elle a affaire, elle aussi avec les relations entre les principes et les faits, entre le particulier et le général. Je vous propose de remarquer que la sémiotique, qui se veut science des signes, indique une façon d'aborder de front le problème des passages entre le particulier et le général et que son fondateur, le logicien américain Charles Sanders PEIRCE, a identifié, à côté des processus de déduction et d'induction, un processus de création de signes par abduction² dont la définition semble en première approche correspondre à la modélisation :

¹Jean PAULHAN, page 307

²"Une abduction est une méthode pour former une prédiction générale sans assurance positive qu'elle réussira dans un cas particulier, sa justification étant qu'elle est le seul espoir de régler rationnellement notre conduite future, et que l'induction fondée sur notre expérience passée nous encourage fort à espérer qu'à l'avenir elle réussira " Charles Sanders PEIRCE, page 188.

*"Donc l'abduction représente le dessin, la tentative hasardée, d'un système de règles de signification à la lumière desquelles un signe acquerra son propre signifié"*¹.

Ainsi une abduction est un processus qui part du général, de la règle, qui l'exemplifie, en extrait des cas, les étudie et revient à la règle pour en étudier la signification. Pour les sémioticiens, la création d'un signe est beaucoup plus courante par abduction que par induction ou déduction².

Je vous propose ici de développer l'hypothèse selon laquelle tout modèle est une abduction, c'est-à-dire de repérer, au sein de tout modèle, un processus de signification qui se décompose ainsi :

- au départ, il y a un corpus théorique, un ensemble de règles, de généralités, avec un mode particulier de représentation de la réalité et des principes propres; ce corpus théorique comporte des obscurités; il n'est pas maîtrisé; son application n'est pas toujours possible aux situations étudiées;
- on rajoute à ce corpus théorique un certain nombre d'hypothèses supplémentaires, des restrictions qui permettent de l'appliquer aux situations étudiées;
- ce que l'on fait effectivement avant de se concentrer à nouveau sur le corpus théorique initial.

L'assimilation entre abduction et modélisation est explicite en logique mathématique où, par définition, un modèle est la construction explicite d'un objet défini par un ensemble d'axiomes; on parlera ainsi de modèle de la théorie des groupes, de modèle de la théorie des ensembles et l'intérêt de l'utilisation des modèle vient de ce qu'ils permettent de montrer que :

- une théorie est cohérente : il suffit qu'il en existe un modèle
- un axiome est indépendant des autres : il suffit qu'il existe un modèle de la théorie construite avec lui et les autres axiomes, et qu'il un modèle de la théorie construite avec sa négation et les autres axiomes.

La construction d'un modèle consiste ainsi à forcer le fonctionnement d'un corpus théorique pour en faire mieux apparaître les principes efficaces. Une modélisation ne porte donc que sur ce corpus théorique

¹Umberto ECO, page 51

²Umberto ECO, page 50

initial; elle s'appuie sur des cas, des faits concrets, elle n'apporte aucune "vérité" sur eux. Pour qu'une modélisation s'applique à la réalité des phénomènes étudiés, il est indispensable poursuivre l'opération par des déductions ou des inductions; lorsque tout le processus est achevé, on ne parle plus de modèle, mais de loi.

Un exemple de processus complet est celui, évoqué au cours de ces journées, de la loi de Darcy : son auteur a émis une hypothèse sur une représentation mathématique possible de l'infiltration de l'eau dans le sol; ensuite, par induction, un grand nombre de vérifications expérimentales concordantes ont permis d'en faire une loi; enfin, par déduction, la loi de Darcy, qui aborde le phénomène au niveau macroscopique, a été démontrée comme découlant naturellement de lois connues au niveau moléculaire

Le devenir naturel d'un modèle est d'être validé et ainsi de devenir une loi. Un modèle est toujours en suspens de ce devenir. Comment, dans ces conditions, peut-on justifier la publication d'un modèle, c'est-à-dire d'une loi possible que l'on n'a pas vérifiée? la réponse est immédiate si l'on admet notre hypothèse : un modèle n'est publié que parce que son objet est de mettre en évidence le fonctionnement d'un corpus théorique. Diverses situations peuvent aboutir à ce qu'un modèle soit publié, en tant que tel, c'est-à-dire alors qu'il n'est pas validé :

- la validation est extrêmement complexe; le modèle indique un dispositif expérimental permettant de le valider; on doit attendre le temps de sa réalisation; c'est le cas le plus courant dans les disciplines qui produisent leurs résultats sous forme de lois; ainsi en physique, l'histoire du "modèle électro-faible" des interactions des particules élémentaires est un des multiples exemples typiques de cette situation; il s'est écoulé plus de dix ans entre la publication de ce modèle par Salam, Weinberg, Glashow, entre 1968 et 1970, et sa validation par Carlo Rubbia en 1983; le prix Nobel a été accordé à Salam, Weinberg et Glashow en 1979; ce qui indique la considération qu'il y a dans certaines disciplines pour l'activité modélisatrice;
- les méthodes de validation envisagées sont extrêmement délicates à mettre en oeuvre, non pas par la nécessité d'un dispositif expérimental complexe, mais parce que le modèle se "recalant" sur la réalité en de nombreux points de sa construction, le contrôle statistique de la situation demande des calculs théoriques considérables, le plus souvent hors de portée de l'auteur du modèle; celui-ci ne fait qu'en indiquer la nécessité sans les aborder; bien évidemment, on ne peut pas tenir indéfiniment ce genre d'argument.
- le modèle est construit au sein d'une discipline scientifique où il n'est pas usuel de présenter un résultat sous forme de loi; c'est la cas de nombreuses disciplines naturalistes ou de sciences humaines; si

au sein d'une discipline, il n'y a pas de loi, il n'y a également pas de critères propres pour la validation d'un modèle; l'existence d'une loi garantit en effet un mode propre d'adéquation entre un champ d'étude et une formalisation; dans ces conditions, publier un modèle, c'est désigner un candidat pour la forme possible d'une loi; c'est publier un scénario en sachant que de toute façon on ne trouvera pas les moyens de le tourner; c'est peut-être avouer un sentiment d'envie vis-à-vis des sciences "dures"; le problème de la modélisation est posé, au sein des disciplines en question, très présentes au sein de l'ORSTOM, de façon tout-à-fait contradictoire : l'approche systématique (méthode de recueil d'observations) étant opposée à l'approche modélisatrice (méthode de construction de concepts); nous n'entrerons pas dans les détails de cette controverse.

Les modèles sont des formalisations interprétées, les lois sont des formalisations validées. Il est intéressant de noter qu'il existe au sein du discours scientifique des formalisations validées et qui n'ont pas d'interprétation : c'est la cas de la plupart des lois de la mécanique quantique reconnues comme étant des non-sens.

Jusqu'à présent, seule a été envisagée la question de la signification des modèles; or on pose souvent celle de leur utilité; est-ce que l'assimilation entre modèle et abduction permet d'y répondre ?

Prenons le cas de la météorologie. Théoriquement, les phénomènes météorologiques sont connus : ils sont régis par un système d'équations aux dérivées partielles issu de la thermodynamique classique : pour résoudre ce système d'équations, qui a un nombre infini de variables (une en chaque point de l'espace et du temps) et qui est donc incalculable, on en construit un modèle, en l'occurrence un système fini d'équations "aux différences finies", que l'on résout. Construit-on ces modèles dans un but opérationnel, pour soutenir une prise de décision, ce qui est la thèse de la plupart des auteurs de ce type de modèles, ou dans un but explicatif, pour éclairer un ensemble théorique? Remarquons

- qu'à côté des modèles issus de la thermodynamique, il existe des modèles construits à partir d'hypothèses immédiates :

-il fera demain le même temps qu'aujourd'hui

-il fera le 23 octobre, une température égale à la moyenne des températures relevées ce même jour depuis 20 ans.

-le temps de demain sera fonction de l'altitude du vol des hirondelles de ce soir

-le temps de demain est complètement aléatoire.

- que dans le domaine météorologique le critère de validation est simple : il suffit de mesurer l'adéquation entre le temps prédit et le temps calculé.
- que si un modèle météorologique était complètement validé, quel que soit son type, il deviendrait une loi, et donc un sujet d'étude en soi; ce n'est pas encore le cas : comme on le sait d'expérience, tous les modèles météorologiques, théoriques et intuitifs, gardent aujourd'hui une marge d'imprécision non négligeable.

Dans ces conditions, on devrait s'attendre à trouver dans la littérature météorologique des comparaisons chiffrées de la qualité de prédiction de tous ces modèles, qui permettent de rejeter définitivement les modèles farfelus. Or de telles comparaisons, aboutissant à des rejets définitifs, sont rares (le phénomène n'est pas propre à la météorologie). Cette rareté est, à terme, réellement problématique si l'on fait des modèles dans un but opérationnel. Elle peut conduire à une remise en cause de l'ensemble de l'activité modélisatrice.

Discipline par discipline, la question de l'utilité des modèles sera posée immanquablement; et selon les cas, on saura tirer des conséquences de conclusions aussi diverses que :

- puisqu'on ne sait pas prouver de façon définitive que que les conclusions chiffrées des modèles théoriques sont utiles pour appuyer une prise de décision, c'est que dans le fond ils sont inutiles.
- si l'on ne prouve pas l'utilité des modèles dans un but opérationnel et si les modèles ne visent pas à expliquer le fonctionnement d'un corpus théorique, c'est que la construction d'un modèle n'est qu'un exercice d'école mettant en évidence une compétence disciplinaire; les modèles ne sont alors guère différents de slogans publicitaires.
- les modèles sont utiles pour une meilleure maîtrise d'un corpus théorique; ce qui est notre position, et en tout état de cause, le point de vue le plus favorable pour les modélisateurs.

II FIGURES

Nous avons considéré les modèles comme un processus de signification; que ce soit une abduction nous indique seulement que les signes produits par une modélisation n'ont pas de valeurs de vérité. Si l'on veut aller plus loin et étudier comment une modélisation produit de la signification et quel type de signification elle produit, il est nécessaire, comme dans toute rhétorique de déterminer quelles sont les figures de la modélisation et une à une d'étudier leur fonctionnement.

En première approximation, on peut considérer que les modèles scientifiques font face à trois types de situations :

- les situations non quantifiées
- les situations incomplètement quantifiées
- les situations complètement quantifiées trop complexes

Cette typologie supporte naturellement la typologie des figures de la modélisation.

II.1 LES SITUATIONS NON QUANTIFIÉES

Construire des modèles dans une situation non quantifiée suppose une approche morphologique ou combinatoire des phénomènes.

Un exemple typique de l'approche morphologique est celui de la théorie des catastrophes : selon celle-ci, pour être observable un phénomène doit d'une part être structurellement stable et d'autre part avoir pour substrat un espace de petite dimension; or on peut effectuer une classification des phénomènes vérifiant ces deux conditions : les formes archétypales ainsi définies sont appelées catastrophes élémentaires; elles constituent un ensemble structuré; confronté à un phénomène complexe, le spécialiste est invité à identifier les éléments correspondant à ces formes archétypales et à en construire une grammaire propre. En première approche, l'objectif est purement descriptif. Dans un second temps, la théorie des catastrophes permet de reconstruire la dynamique sous-jacente au phénomène, une hiérarchisation de ses niveaux d'organisation et donc un nouveau système de causalité. Cette approche morphologique s'oppose à une approche qualifiée de réductionniste qui s'intéresse immédiatement à la mise en évidence de relations de causalité.

Les modèles morphologiques ne se justifient que par l'évidence d'une analogie entre une situation et une forme. Rien n'empêche à priori d'en envisager la validation, c'est-à-dire d'en mesurer l'efficacité. L'exemple de la théorie des catastrophes est à ce sujet mitigé : bien peu des cas traités ont fait l'objet d'une intégration, par induction ou déduction, au sein d'une théorie confirmée. Est-ce dû à un caractère propre des modèles morphologiques ou à la position épistémologique réfutant d'emblée toute approche réductionniste?

Les figures rhétoriques employées lors de la mise en place des modèles morphologiques sont l'**analogie** et la **métaphore**¹. Indiquons qu'il s'agit là de ce que les rhétoriciens appellent des figures d'imagination. Ce point est intéressant parce qu'il permet de souligner la liberté du modélisateur pour construire les modèles morphologiques, et ainsi de considérer la position de René THOM contre l'approche réductionniste comme un manifeste libertaire.

L'ensemble du formalisme de la chimie, la plupart des modèles ethnologiques (modèles de parenté) relèvent d'une approche combinatoire; mais dans ce cas, on s'intéresse moins aux formes elles-mêmes qu'à la combinatoire qu'elles permettent de constituer. L'exemple de la théorie des quarks indique qu'une approche combinatoire peut être utilisée avec profit dans des domaines aussi formalisés que la physique nucléaire.

Les figures principales des modèles combinatoires sont le **dénombrement** et la **symétrisation**. Si le dénombrement, décompte exhaustif de situations élémentaires, est une figure contraignante, la symétrisation, mise en évidence de combinaisons systématiques de situations élémentaires, est une figure d'imagination.

II.2 LES SITUATIONS INCOMPLETEMENT QUANTIFIÉES

Dans ces situations, le problème à résoudre présente des **degrés de liberté**; sa complexité apparente vient de ce que l'ensemble des concepts qui décrivent la situation est plus vaste que l'ensemble des lois reconnues pour la régir; il y a plus de variables que d'équations. Or lorsqu'un problème présente des degrés de liberté, il a un grand nombre de solutions. Tout le travail du modélisateur consiste donc ici à réduire artificiellement le nombre de degrés de liberté et à obtenir un problème voisin (le modèle) qui ne présentera qu'une solution, à la calculer, et à l'interpréter. Il faut savoir ici que de façon arithmétique le modélisateur dispose d'une quasi totale latitude de choix pour la création de nouvelles contraintes.

Les principales figures sont ici celles de la **simulation** et celles de l'**estimation**. La figure de la **symétrisation** est également souvent utilisée pour réduire le nombre de degrés de liberté d'un problème.

Dans les simulations, le nombre de degrés de liberté est réduit en fixant arbitrairement des valeurs pour certaines variables. Ces valeurs peuvent être données à priori par le modélisateur ou bien générées de façon aléatoire.

¹ "Dans un certain sens, je crois que la théorie des catastrophes pourrait être entendue comme une première systématisation assez générale de l'analogie" René THOM, page 135.

Lors d'une estimation, on détermine une valeur pour une variable ou une relation entre plusieurs variables à partir d'un corpus de données expérimentales. Un modèle comportant une estimation ne porte pas sur le réel, comme le veut notre hypothèse d'abduction : il s'appuie sur le réel dans un premier temps et dans un second explicite son propre fonctionnement. Nous ne développerons pas ici les arguments techniques qui permettent de critiquer la réalisation d'estimations et les hypothèses statistiques extrêmement fortes (indépendance des observations, linéarité de l'effet des fluctuations, etc.) qui sont tout à la fois théoriquement nécessaires et très souvent irréalistes.

L'opération de réduction des degrés de liberté n'est envisagée que lorsque le modélisateur attend beaucoup du fonctionnement du modèle : il fait le pari que le fonctionnement du modèle sera suffisamment explicite et que la clarté qui en résultera compensera l'arbitraire des choix qu'il a effectués.

Naturellement, la signification des modèles utilisant les figures de l'estimation et de la simulation porte est celle de ces choix, et porte par exemple, de façon triviale, sur la distinction entre ce qui est endogène et ce qui est exogène, ou de façon plus complexe, sur des hypothèses statistiques sous-jacentes comme la linéarité des effets des fluctuations d'une quantité autour de sa moyenne.

II.3 LES SITUATIONS COMPLETEMENT QUANTIFIÉES TROP COMPLEXES

Dans ces situations, les lois sont connues, décrivent complètement le phénomène, mais elles impliquent des calculs considérables, inaccessibles. Les modèles consistent alors en la constitution de situations approchées, mais aux calculs résolubles. On rencontre de telles situations très couramment dans les théories physiques¹. Les modèles mis en place pour la résolution d'équations aux dérivées partielles représentent un exemple immédiat de traitements appliqués à cette situation.

Trois figures de base sont employées et combinées lors de la mise en place de modèles dans une situation qui demande des calculs trop complexes :

¹ "Établir un modèle revient à chercher le meilleur compromis entre deux exigences contradictoires :

• obtenir des équations numériques suffisamment simples pour pouvoir être résolues

• ne perdre en cours de route aucune des propriétés essentielles de la physique du phénomène que l'on veut étudier" Michel LE BELLAC, page 28

- **l'assimilation à un continuum**, par exemple, dans les modèles de population avec la définition d'une densité de population, fonction (au sens mathématique) définie en tout point de l'espace, pour la représentation d'une population constituée d'individus localisés en un point de l'espace; ou encore, lors de la constitution d'une carte pédologique à l'aide d'analyses ponctuelles de sols.
- **la discrétisation**, passage d'une représentation en continu à une présentation finie, en discontinu; par exemple, lors de la résolution d'une équation aux dérivées partielles par la méthode des différences finies.
- **le changement d'échelle** qui est la figure obligée lorsque la situation est décrite à plusieurs niveaux que l'on veut intégrer; les cas les plus courants étant la recherche d'articulation entre un niveau macroscopique et un niveau microscopique, entre un niveau biologique et un niveau chimique, entre un niveau micro-économique et un niveau macro-économique, etc.... On peut considérer le changement d'échelle comme la figure générique pour la réduction de la complexité d'un problème : ce que l'on peut en dire s'applique également aux figures de la discrétisation et de l'assimilation à un continuum.

La mécanique du changement d'échelle est complexe et réserve souvent des surprises; il est ainsi bien connu mathématiquement que des choix naturels effectués par le modélisateur à l'occasion d'un changement d'échelle peuvent générer des effets très structurés et pourtant totalement arbitraires: la diminution de la complexité d'un problème par changement d'échelle n'est jamais gratuite, elle induit souvent de nouveaux degrés de liberté qui étaient pourtant absents dans la théorie initiale, l'élimination de ces degrés de liberté parasites suppose une nouvelle modélisation.

La signification des modèles utilisant les changements d'échelle est ainsi celle de cette mécanique entre diminution de la complexité d'un problème et création de degrés de liberté.

En physique des changements de phase, le problème est posé explicitement en ces termes : l'on assimile température et complexité, l'on s'intéresse aux points critiques, on les caractérise par une température à laquelle le nombre de degrés de liberté du problème croît de façon incontrôlable.

Il est assez rare qu'il soit tenu compte de cette mécanique dans la mise en place de modèles dans les autres disciplines que la physique. Le changement d'échelle est pourtant une des figures les plus couramment employées en écologie ou en économie sans que la question de l'arbitraire des choix de niveau n'ait réellement été envisagée.

III EN CONCLUSION

En résumé des paragraphes précédents : Nous avons essayé de considérer les modèles scientifiques d'un point de vue rhétorique, c'est-à-dire en nous intéressant à leur mode de signification; nous avons développé l'assimilation entre modèle et abduction et ainsi considéré que le mode de signification des modèles consistait à éclairer le fonctionnement d'un corpus théorique; nous nous sommes ensuite intéressés aux figures de la modélisation, en avons établi une première liste et remarqué en dernière analyse qu'il s'agissait de figures de liberté et que, du coup, la construction d'un modèle porte sur les degrés de liberté que laissent le corpus théorique et sur l'usage qu'en fait le modélisateur. Nous sommes donc passés d'une question logique à une question éthique; ce qui semble être une des lois du genre. Il est naturel que certains mettent l'accent sur la question du style en modélisation¹. La modélisation n'est-elle pas une façon, pour le chercheur, de "styliser une liberté" comme le dit Michel FOUCAULT² de la diététique.

Mis à part cette remarque, sur quoi une approche rhétorique de la modélisation peut elle déboucher ?

En premier lieu, cela permet la critique de quelques illusions actuelles, de quelques raisonnements bien rapides. Considérons par exemple, un article récent d'Edgar MORIN *"Une tradition de pensée bien enracinée dans notre culture et qui forme les esprits dès l'école élémentaire, nous enseigne à connaître le monde par "idées claires et distinctes"; elle nous enjoint de réduire le complexe au simple, c'est à dire de séparer ce qui est lié, d'unifier ce qui est multiple, d'éliminer tout ce qui apporte désordre et contradictions dans notre entendement. Or le problème crucial de notre temps est celui de la nécessité d'une pensée apte à relever le défi de la complexité du réel, c'est à dire capable de saisir les liaisons, interactions, et implications mutuelles, les phénomènes qui sont à la fois solidaires et conflictuels.... De fait les sciences avancées, comme les sciences de la terre, l'écologie, la cosmologie sont des sciences qui brisent avec le dogme réductionniste d'explication par l'élémentaire : elles considèrent des systèmes complexes où les parties et le tout s'entre produisent et s'entre organisent...des principes de d'intelligibilité se sont déjà formés, aptes à concevoir l'autonomie, la subjectivité, voire la liberté, ce qui était impossible selon les paradigmes de la science classique"*³. Ce qui donne l'illusion de la possibilité d'une approche globale d'un problème

¹Gilles Gaston GRANGER, Philippe COUTY.

²Michel FOUCAULT

³Edgar MORIN

dans toute sa complexité, c'est, dans les diverses "sciences avancées" (cette référence aux "sciences avancées" est, quand même, un bel exemple d'intimidation scientifique) l'existence de modèles (et non pas de lois) formalisant une situation à plusieurs niveaux et indiquant entre ces niveaux une relation causale n'allant pas forcément du niveau le plus fin vers le niveau le plus grossier. Est-ce que cela permet d'annoncer l'avènement d'une science nouvelle, opposée à la science classique? Non, si l'on considère qu'une approche réductionniste ne combine pas des objets simples mais des objets éventuellement complexes décrits simplement? Et de ce point de vue, aucune figure spéciale n'apparaît dans les modèles construits dans les disciplines évoquées par Edgar MORIN, qui permettrait une approche immédiate de la complexité. Toutes les approches actuelles de la complexité restent 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..

Peut-on aller plus loin et émettre des recommandations en matière de construction de modèles? ce qui est naturellement l'étape ultime de toute rhétorique. Si l'on admet que la modélisation est une façon de mettre en jeu la liberté du chercheur, émettre des recommandations en la matière reviendrait à vouloir réglementer l'usage de la liberté dans la science. Cela, depuis que Paul FEYERABEND s'est occupé d'épistémologie, nous est interdit catégoriquement¹; tout est bon, même la modélisation; Paul FEYERABEND indique qu'une des voies pour la mise en œuvre de l'anarchisme épistémologique repose effectivement sur la création de nouveaux modèles; le fonctionnement des modèles, qui pointent sur les lacunes d'un corpus théorique, est typique des progrès de la science². L'épistémologie constructiviste a approfondi cette position en envisageant l'activité scientifique comme fonctionnant selon les principes du Darwinisme des idées³; ce qui n'est pas sans conséquence en matière de modélisation : le travail de modélisation par son arbitraire correspond à la recherche systématique des mutations génétiques indispensables pour la

¹ "Toutes les méthodologies ont leurs limites, et la seule «règle» qui survit, c'est : «Tout est bon»" (Paul FEYERABEND, page 333)

² "Car ce qui apparaît comme «manque de netteté», «chaos» ou «opportunisme», quand on le compare à de telles lois (note : les prétendues lois de la raison,) a eu une fonction des plus importantes dans le développement des théories mêmes que nous considérons aujourd'hui comme des parties essentielles de notre connaissance de la nature" (Paul FEYERABEND, page 196)

³ "A cet égard précis, le principe fondamental de l'épistémologie constructiviste radicale coïncide avec celui de l'évolution tout comme l'environnement exerce des contraintes sur les organismes vivants et éliminent toutes les variantes qui d'une façon ou d'une autre transgressent les limites à l'intérieur desquelles elles sont possibles ou viables, de la même manière, le monde empirique, celui de la vie quotidienne comme celui du laboratoire constitue le terrain d'expérimentation pour nos idées." Ernst von GLASERFELD, page 24.

survie d'une espèce, en l'occurrence l'espèce des idées dites scientifiques. Signalons que le constructivisme radical se veut être un idéalisme absolu, à la suite du philosophe italien, contemporain de KANT, Gian Battista VICO selon lequel on ne connaît que ce qu'on fait de la même façon que Dieu connaît seul le Monde parce qu'il l'a créé. Si l'on pousse le raisonnement jusqu'au bout, il n'y a pas de lois, juste de modèles qui, dans un jeu concurrentiel, émergent, résistent un temps à la critique d'autres modèles, sont rejetés....

Pour conclure, je rappellerai qu'il a été remarqué que la construction d'une rhétorique s'apparentait à la construction d'un château de cartes : on effectue un assemblage complexe, et on ne sait si la raison de ce travail réside dans la beauté de l'objet construit ou dans la contemplation de sa destruction : *"La rhétorique offre un trait encore du sacré: c'est l'ambiguïté. Aristote réfute dans le Gryllus l'art d'écrire qu'il fonde à grand frais dans sa Poétique. Isocrate ou Lysias, leurs traités de rhétorique à peine achevés, nient qu'un traité de rhétorique soit possible..."*¹

IV. BIBLIOGRAPHIE

COUTY (Philippe), Similitudes, simulacres et absence, dans ce volume

ECO (Umberto), Sémiotique et Philosophie du langage, PUF, 1988

FEYERABEND (Paul), Contre la méthode, Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance, Seuil, 1970

FOUCAULT (Michel), L'usage des plaisirs, Gallimard, 1982

von GLASERFELD (Ernst), Introduction à un constructivisme radical, dans L'invention de la réalité, ouvrage collectif sous la direction de Paul Watzlawicz, Seuil, 1988,

GRANGER (Gilles Gaston), Essai d'une philosophie du style, Odile Jacob, 1988

LE BELLAC (Michel), Des phénomènes critiques au champs de jauge, InterEditions, 1988

MORIN (Edgar), Le Monde, jeudi 22 septembre 88

PAULHAN (Jean), Traité des figures, Le nouveau commerce, 1977

PEIRCE (Charles Sanders), Ecrits sur le signe, Seuil, 1978

THOM (René), Paraboles et catastrophes, Flammarion, 1983.

¹Jean PAULHAN, page 272

SIMILITUDES, SIMULACRES ET ABSENCE

Philippe COUTY

Les rêveurs heureux, ce sont les pessimistes. Ils modèlent le monde à leur image, et parviennent ainsi à se sentir toujours chez eux.

F. Pessoa, Le livre de l'intranquillité, p.185

I RESUME

Que fait-on vraiment quand on fabrique ou quand on croit fabriquer des modèles en sciences sociales ? A partir d'exemples récents, il semble possible de montrer que ces prétendus modèles sont en grande majorité des théories, des images, des résumés. La science économique est grande utilisatrice de modèles, mais ceux qu'elle forge ont, pour reprendre une distinction proposée par G. G. Granger, une orientation plus technique que scientifique. On y reproduit la transformation de données en résultats sans expliquer le processus qui provoque ces résultats. Si les sciences sociales, dans leur état actuel, ne produisent pas encore de modèles scientifiques, que peuvent-elles et que doivent-elles faire ? Leur voie propre pourrait bien être celle du récit, matériau et moyen de l'histoire, dont sortent toutes nos disciplines. Le récit emploie des procédés littéraires. Le progrès, en sciences sociales, consisterait-il pour l'instant à bien écrire ?

II REPERES POUR UNE INTRODUCTION

"Il faut, dit Bachelard, que l'épistémologie rende compte de la synthèse plus ou moins mobile de la raison et de l'expérience, quand bien même cette synthèse se présenterait philosophiquement comme un problème désespéré" (BACHELARD 1987 : 20).

Désespéré ou non, le problème est résolu ou esquivé tous les jours par les praticiens de la recherche lorsqu'ils construisent des modèles. Prenant assise à la fois sur le donné sensible et sur l'imagination, planant à haute altitude mais sachant aussi se traîner à ras de terre, les modèles ne semblent-ils pas posséder un double contenu, empirique et formel ? Leur vocation est donc de servir d'intermédiaires entre le rationnel et l'empirique, entre l'inventé et le constaté, un peu comme un interprète pratiquant deux langues. Mais pourquoi faut-il un intermédiaire ? Pour construire entre les choses et l'intelligence le rapport d'adéquation où les scolastiques voyaient le critère de la vérité, pour faire en sorte qu'il en soit dans la chose comme le sait et le dit l'intelligence¹. Cette adéquation exige qu'un artifice serve de pont entre les éléments à réunir. Il nous faut une représentation - un modèle - du sensible, conforme aux caractéristiques du donné phénoménal mais aussi aux intentions et aux capacités de saisie, de manipulation, de calcul, propres à l'esprit humain.

Idéalement, on peut penser que cette représentation devrait se situer à mi-chemin entre l'expérience et la raison, mais il est évidemment possible qu'elle penche d'un côté ou de l'autre. La tradition philosophique n'a pas manqué d'illustrer ces deux éventualités.

Pour ce qui est des représentations proches du réel, souvenons-nous du passage où Lucrèce explique qu'il existe pour toutes choses "*ce que nous appelons leurs simulacres*² sortes de membranes légères détachées de la surface des corps". Si ces simulacres ne venaient heurter l'observateur, il ne pourrait rien voir³. Par cette fable, Lucrèce attribue la prééminence et l'initiative au donné sensible. Les représentations sont presque aussi matérielles que les choses représentées.

1. "*Cum enim veritas intellectus sit adaequatio intellectus et rei ... Illud quod intellectus intelligendo dicit et cognoscit oportet esse rei aequalum, ut scilicet ita sit in re sicut intellectus dicit*" Somme contre les Gentils Livre I, chap. 59.//

2. "*Quae rerum simulacra vocamus*", De la Nature, Livre 4, 34.

3. "*Neque posse sine his res ulla videri*", op. cit. Livre 4, 239

Au contraire, lorsque Platon fait discourir, dans *Le Politique*, un de ses personnages sur le pilote et le médecin, il prend le parti non pas d'observer ces spécialistes en personne, mais de considérer leurs images (*εἰκονας*) réunies dans un *σχημα* - mot que les traducteurs rendent par "scène" ou par "similitude"¹ :

L'étranger : Revenons donc aux images qui s'imposent chaque fois que nous voulons peindre des chefs faits pour la royauté.

Socrate le jeune : Quelles images ?

L'étranger : Celles de l'excellent pilote et du médecin "qui vaut beaucoup d'autres hommes". Façonnons une similitude où nous les ferons figurer et observons-les.

Chez Platon, la représentation est avant tout l'oeuvre de l'intelligence ou de l'imagination, et elle n'entretient avec les objets représentés que des rapports distendus. Nous nous éloignons du donné sensible pour nous rapprocher de la raison.

On a déjà compris que je propose de reconnaître deux grands types de modèles. Les uns intellectuels et aériens, évoluant "par delà les réalités dans une atmosphère légère de pensée formelle" (BACHELARD 1987 : 58). Les autres, les simulacres, proches de l'empirie et y adhérant étroitement. La distinction vaut ce qu'elle vaut, mais elle permettra de mettre un peu d'ordre dans la promenade que nous allons faire au pays des modèles. Elle permettra aussi d'abrégier cette promenade, qui sans cela, même restreinte au seul territoire des sciences sociales, risquerait d'être trop longue pour une seule communication.

Après avoir effectué notre reconnaissance, nous nous risquerons à en tirer quelques réflexions. Si nous en venons à constater par exemple que dans nos disciplines, les modèles se rangent un peu trop uniformément dans l'une ou dans l'autre des catégories esquissées plus haut, cela signifiera qu'au lieu de se situer au point médian qui correspond à leur vocation, ils penchent fâcheusement vers la raison ou vers l'expérience.

"Les sciences," écrit G. G. Granger, visent à construire des modèles abstraits des phénomènes. Elles les représentent dans des espaces de plus en plus éloignés du vécu, comme des structures abstraites sur les éléments desquels il est possible de calculer". (GRANGER 1988a : 12-13)

1. "Scène" est employé par A. Diès dans la traduction publiée par la Société d'Éditions "Les Belles Lettres" (Ass. Guillaume Budé). "Similitude" est utilisé par E. Chambry dans la traduction citée ci-après (Garnier Flammarion, 1969, pp. 232-233).

L'expression "*de plus en plus éloignés du vécu*" ne veut pas dire que les bons modèles se situent nécessairement dans la catégorie aérienne et platonicienne dont j'ai parlé, mais que, fondant à la plus haute température possible un alliage d'empirique et de formel combinés à doses égales, ces bons modèles atteignent le degré d'abstraction qui leur permet d'expliquer, c'est-à-dire de "*déplier le complexe*" (BACHELARD 1987 : 10). Ce résultat est-il atteint de nos jours ? Il semble bien que non :

Ni la psychologie ni les sciences sociales ne sont déjà parvenues à définir des catégories qui assurent, de façon même provisoirement satisfaisante, l'objectivation du vécu humain (GRANGER 1988b : 219).

Tout porte à croire que nous ne ferons rien d'autre que vérifier cette proposition, mais il faudra du même coup reconnaître qu'elle fait naître certaines interrogations sur les voies et les moyens du progrès de nos disciplines.

III "FAÇONNONS UNE SIMILITUDE" : MODELES THÉORIQUES, IMAGES, MÉTAPHORES.

Les exemples, parfois explicitement qualifiés de "*modèles*", que nous allons examiner ici, "*portent de toutes parts la marque théorique*" (BACHELARD 1987 : 16). Comme ces législateurs qui croient tout régler par un texte, le chercheur impose ou croit imposer "*la clarté de son esprit à la masse confuse des apparences sensibles*" (RUEFF 1948 : 11). Il dédaigne dans une certaine mesure de confronter ses constructions avec les faits, pourtant si dociles quand on sait comment les prendre...

Tournons-nous d'abord vers les anthropologues. Dans cette profession, les chercheurs de terrain sont souvent mis en demeure de "*problématiser*", de "*formaliser*". Cette exigence a fait surgir bien des hypothèses si plausibles qu'elles ne pouvaient manquer d'être vérifiées, bien des "*modèles*" si transparents qu'on pouvait lire au travers l'unique et fluette étude de cas d'où ils étaient sortis. Quelques esprits originaux cependant, par une sorte de coup de force intuitif, ont su faire adopter une construction capable d'alimenter les débats d'une génération toute entière. Ainsi en a-t-il été de l'Essai d'interprétation du phénomène économique dans les sociétés traditionnelles d'auto- subsistance, publié

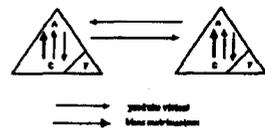
par Claude Meillassoux en 1960¹. Dix-sept ans plus tard, l'auteur présente ce travail comme un "modèle synthétique logique et cohérent", visant à :

"extraire les conséquences logiques, au niveau de la circulation des biens, d'un rapport de production initiale simplement constaté mais non analysé" (MEILLASSOUX 1977 : 19-20).

Il est précisé que le modèle reste "à un niveau plus formel et déductif qu'explicatif". Il n'empêche qu'une des pièces essentielles du modèle, la fameuse "relation aînés-cadets", est passée dans le langage courant des africanistes, y compris des praticiens qui administrent, suivent, évaluent les opérations de développement rural. Succès dû sans doute au fait que la formulation adoptée est à la fois simple et générale, et qu'on oublie les limites assez étroites que l'auteur fixait à l'application du modèle².

Avant tout qualitatif, ce modèle propose des catégories où ranger les agents, et une typologie des relations entretenues par ces différentes catégories. Observées à travers cette grille, ou cette théorie, certaines situations, ou différences de situations, peuvent devenir plus intelligibles. Il faut pourtant reconnaître que les modèles théoriques de ce genre sont avant tout des "images de référence"³ permettant de repérer et de désigner une classe de phénomènes, mais pas d'expliquer ces phénomènes. Images, métaphores, nous allons en trouver une foule dans une certaine tradition de la science économique.

1. Dans les Cahiers d'Etudes Africaines, 1960, 4, pp. 38-67, mais repris en 1977 dans Terrains et théories, Paris, Anthropos. Malgré la richesse du modèle, on peut n'en retenir ici que le schéma donné par Meillassoux lui-même. Les cellules familiales sont représentées par des pyramides au sommet desquelles se situent les aînés (A) exerçant une autorité sur le groupe. En bas, se situent les cadets (C), qui travaillent pour les aînés et leur remettent le produit de leur activité. Les femmes occupent une position médiate (F). La circulation de biens matrimoniaux se situe exclusivement au niveau des aînés, les cadets en sont exclus ; par contre, les femmes sont incluses dans le circuit.



2. Le modèle vaut pour la communauté agricole d'auto-subsistance. Il faut donc en exclure les sociétés qui exploitent la terre comme objet de travail (chasseurs-collecteurs) et les sociétés agricoles produisant pour l'échange - ces dernières étant bien entendu les plus nombreuses, sinon les seules aujourd'hui.

3. C'est à de telles images que Cl. Raynaud assimile les "modèles interprétatifs", les "paradigmes" qui servent à décrypter "de façon analogique", - entendez : à reconnaître et à nommer - des situations nouvelles. (RAYNAUD 1987a : 4).

A qui douterait qu'il y ait quelque chose de commun entre la poésie de Shelley et la théorie marginaliste, je demande de méditer cette affirmation de D. Mc Closkey:

To say that markets can be represented by supply and demand curves is no less a metaphor than to say that the west wind is "the breath of autumn's being (Mc CLOSKEY 1983: 502).

Nous savions déjà que la théorie économique n'est qu'un "apparatus of the mind, a technique of thinking which helps its possessor to draw correct conclusions"¹, mais il nous avait échappé que cette même théorie économique était peuplée de métaphores, c'est-à-dire d'images. C'est pourtant, ô coïncidence, le terme choisi par Joan Robinson pour définir ce qu'elle entend par modèle :

The model consists in a highly simplified mental picture, exhibiting the behaviour of people in a social and physical environment, which eliminates what is inessential to the problem in hand, so as to focus attention on what is essential. (ROBINSON 1961 : XVI)

L'image mentale dont parle Joan Robinson est matérialisée soit par des diagrammes, soit par des expressions algébriques. Les diagrammes sont des constructions simples, exprimant par exemple la covariation supposée de deux grandeurs fictives : prix et quantités, produit et investissement, produit total et surface cultivée, produit et investissement par actif ... La réflexion se concentre sur les courbes ainsi établies, sur la pente de ces courbes, sur la forme ou la surface des aires qu'elles dessinent. Rien d'expérimental dans ces élaborations logiques. On se fonde sur des intuitions concernant la manière dont les choses pourraient ou devraient se passer dans un monde simple et transparent.

Take for instance the law of demand. The economist is persuaded that he will buy less oil when its price doubles better than he or anyone else is persuaded of the age of the universe ... The economic fact he has mostly from looking into himself and seeing it sitting there ... it is not because the law of demand has predicted well or has passed some statistical test that it is believed - although such further tests are not to be scorned. The "scientific" character of the test is irrelevant. (Mc CLOSKEY 1983 : 511-512).

¹. Cette formulation est due à Keynes. On la trouve citée dans l'introduction de 1957 à la Série des Cambridge Economic Handbooks, BAUER et YAMEY 1963 : VII).

Prenons les modèles dits de "Dutch disease", qui ont connu une certaine fortune ces dernières années¹. Ils explorent les effets sur l'économie d'un pays donné d'un boom dans le secteur des industries extractives : minéraux en Australie, gaz naturel aux Pays-Bas, pétrole en Grande Bretagne, en Norvège, au Nigéria ... L'expansion rapide du secteur exportateur de matières premières affecte le reste de l'économie par le jeu d'un double mécanisme :

- Ce secteur emploie du travail et du capital qui, s'ils ne sont pas entièrement fournis par l'étranger, doivent être retirés d'autres secteurs;

- L'expansion dans ce secteur crée des revenus additionnels et modifie la structure de la dépense, affectant ainsi l'offre et la demande de biens et de services, produits localement ou importés.

L'expansion de la production de matières premières modifie donc non seulement les prix relatifs des biens et des services, mais aussi ceux des facteurs de production, ainsi que le taux de change.

Pour formaliser ces hypothèses, Ademola Oyejide (1986b) utilise un modèle d'économie ouverte, de petites dimensions, produisant trois types de biens : importables, exportables, et hors marché. Les prix mondiaux des biens importables et exportables sont des données exogènes, alors que les prix des biens domestiques sont déterminés par la demande intérieure et par l'offre de facteurs. L'un des secteurs de biens commercialisés est assimilé au secteur des matières premières, l'autre représentant les produits traditionnels alimentaires et agricoles, ainsi que les produits manufacturés concurrencés par les importations. Chacun des deux mécanismes identifiés plus haut - mobilité des facteurs et modification de la dépense - peut être analysé séparément grâce à diverses versions du modèle. Nous verrons plus loin comment cette démarche purement logique peut se prolonger par une vérification empirique, et quels en sont les résultats².

Les expressions algébriques revêtent deux formes principales³. Il y a d'abord des équations de définition, strictement comptables, dans les deux membres desquelles une même grandeur est écrite de deux façons différentes. Ces expressions fournissent la charpente du modèle, elles

1. CORDEN et NEARY 1982, prolongement des analyses antérieures du cas australien. Plus récemment, voir ADEMOLA OYEJIDE 1986a et 1986b (particulièrement le chapitre 6).

2. Je dis bien : peut se prolonger. L'article de Corden et Neary se limite à un exercice de logique pure, illustré par cinq diagrammes et complété par un appendice algébrique. Aucun chiffre n'est présenté, encore moins discuté.

3. SUDRIE 1988 : 39 sq.

permettent d'en vérifier à tout moment la cohérence, et notamment l'utilisation du total des ressources par l'ensemble des emplois. Ainsi le PIB (produit intérieur brut) est-il égal à la somme des valeurs ajoutées, mais aussi à la somme des revenus primaires. Il est encore égal à la somme de la consommation, de l'investissement et des exportations, diminuée des importations, le tout en valeur :

$$Y = C + I + X - M.$$

Mais on a aussi des équations de comportement, symbolisant la variation - supposée linéaire - d'un phénomène économique ou financier en fonction d'autres variables, qualifiées d'explicatives. Ainsi les importations d'un pays sont-elles fonction de la demande interne, du rapport entre prix étrangers et prix nationaux, et du taux d'utilisation de la capacité de production nationale : $M = f(DI, P, U)$ ¹

Si l'on raccorde ces équations à l'empirie - qu'il s'agisse d'équations comptables ou d'équations de comportement - on construit alors des modèles économétriques. On "remplit" de chiffres le cadre comptable, on estime les coefficients de la fonction, comme nous le verrons plus loin. Mais on peut aussi demeurer dans le cadre formel et le développer (work out, dit Joan Robinson), absolument comme si ce "développement" pouvait permettre de découvrir des résultats imprévus. Il est peu douteux qu'impressionnés sans doute par l'exemple d'Urbain Leverrier traquant Neptune par la seule puissance du calcul, certains logiciens de l'économie aient cru à la vertu heuristique de leurs déductions. Le côté ludique ou esthétique de leur activité n'est d'ailleurs pas à sous-estimer. Joan Robinson reconnaît ouvertement (1961 : XVI) que ces "*methods of thought ... are found to be useful as well as amusing*" et l'on éprouve à la vérité un plaisir d'acrobate à "découvrir" que le multiplicateur (variation du revenu en fonction de l'investissement), exprimé en fonction des propensions marginales à consommer et à épargner, peut s'écrire sous la forme :

$$K = \frac{1}{\frac{dE}{dR}} \quad 2$$

1. HUSSON 1987 : 70.

2. Le multiplicateur K indique la variation du revenu dR en fonction de celle de l'investissement dI. Donc : $K = \frac{dR}{dI}$ ou $K dI = dR$ Mais K peut s'exprimer en fonction de la propension marginale à consommer par rapport au revenu, $c = \frac{dC}{dR}$, ou de la propension marginale à épargner $e = \frac{dE}{dR}$. On a bien entendu $R = C + E$, donc $\frac{dR}{dR} = 1 = \frac{dC}{dR} + \frac{dE}{dR}$ ou $1 = c + e$; par ailleurs, en équilibre, $I = E$ (l'épargne égale

Il faut sans doute voir dans ces manipulations un procédé rhétorique de persuasion. Montrons-le par deux exemples.

Si je suis persuadé moi-même, par expérience personnelle, par tempérament, par habitude idéologique ou politique, que le libre-échange est préférable au protectionnisme, et si je m'appelle David Ricardo, je construirai un "modèle" arithmétique "montrant" que, même si le Portugal peut produire du vin et du drap à un coût en travail moindre que l'Angleterre, chacun de ces pays a néanmoins intérêt à se spécialiser dans la production pour laquelle il dispose d'un avantage comparatif, à savoir le vin pour le Portugal et le drap pour l'Angleterre. A la condition toutefois que le rapport d'échange international (vin portugais contre drap anglais) s'établisse au niveau qui résulte de la concurrence parfaite... Manifestement, le principe "démontré" par Ricardo n'est pas élaboré par induction amplifiante à partir de l'étude statistique d'un échantillon de pays. Il est simplement illustré par une image arithmétique où l'on trouve un Portugal et une Angleterre bâties de toutes pièces. C'est tellement vrai que les auteurs de manuels, pour persuader plus sûrement les étudiants, ne se privent pas de remplacer l'Angleterre et le Portugal par l'avocat et sa secrétaire, ou par le médecin et son jardinier¹, eux aussi complètement imaginaires. Tout compte fait, si nous nous intéressons aux pays réels où travaillaient des Portugais et des Britanniques il y a deux siècles, nous en apprendrons moins chez Ricardo que dans la lettre où Chamfort compare le Portugal à une "ferme", dans laquelle les Anglais récoltent, "en lui faisant la loi, ses vins, ses moissons, ses denrées"². Entre la pseudo-démonstration de Ricardo, et l'image par laquelle Chamfort résume une situation coloniale, il ne fait pas de doute que la seconde est plus "vraie" que l'autre.

Si je veux montrer qu'en Afrique sahélienne ou sahélo-soudanienne, la nature des choses impose trois objets principaux aux recherches d'économie rurale, à savoir les problèmes de rendement, les systèmes de production, les rapports de production, j'en convaincrai peut être mes auditeurs en prenant pour point de départ le rapport entre production céréalière et population, jugé décisif. Je montrerai alors que ce rapport peut s'écrire :

l'investissement), donc $e = \frac{dE}{dR}$, mais aussi $e = \frac{dI}{dR}$, et si $e = \frac{dI}{dR}$, alors $\frac{1}{e} = \frac{dR}{dI} = K = \frac{1}{1-c}$ Et donc $K = \frac{1}{1 - \frac{dC}{dR}}$, ou

$$K = \frac{1}{\frac{dE}{dR}}$$

1. BOULDING 1955 : 26-27, BYE 1959 : 112, etc...

2. Lettre à Monsieur de Vaudreuil du 13 Décembre 1788, CHAMFORT 1968 : 394.

$$\frac{\text{Production céréalière}}{\text{Population}} = \frac{\text{Production céréalière}}{\text{Surface cultivée}} \times \frac{\text{Surface cultivée}}{\text{Nombre d'actifs}} \times \frac{\text{Nombre d'actifs}}{\text{Population}}$$

et je ferai voir que chacun des trois rapports inclus dans la partie droite de l'expression correspond bien, encore que sous forme simplifiée, à chacun des trois objets imaginés au départ : le rendement par unité de surface, la combinaison terre/travail symbolisant l'état du système de production dans une agriculture dépourvue d'accès aux consommations intermédiaires ou au capital d'exploitation, et enfin la mobilisation de la force de travail, point focal des rapports de production. Une fois mes auditeurs ainsi préparés, je passerai, très pédagogiquement, à l'étude de taillée de ces trois grandes questions¹.

Qu'il s'agisse ici d'abord de rhétorique, c'est ce que révèle, entre autres, le recours fréquent à la technique éprouvée du raccourci biffant quelques transformations intermédiaires dans la suite des manipulations algébriques. On trouve un bon exemple de ce procédé dans un livre récent sur le devenir de l'agriculture française². Il y a dans ce livre un passage-clé, où l'auteur examine la probabilité d'une augmentation, dans ce secteur, de la valeur ajoutée rapportée au temps de travail³. Un rai-

1- COUTY 1988.

2- DE RAVIGNAN 1988.

3- Soient V la valeur ajoutée en agriculture, P la production, C les consommations intermédiaires, T le temps de travail et S la surface cultivée. On a évidemment $V = P - C$ et $\frac{V}{T}$ (valeur ajoutée rapportée au temps de travail) est la grandeur que l'agriculteur cherche à maximiser. Or, comme $\frac{V}{T} = \frac{P}{T} - \frac{C}{T}$, on a $\frac{V}{T} = \frac{P}{T} (1 - \frac{C}{P})$. C'est là qu'une ellipse oblige le lecteur à prendre un crayon pour s'assurer que $\frac{P}{T} \times 1 = \frac{P}{T}$, ce qui n'est pas difficile, et que $\frac{P}{T} (1 - \frac{C}{P}) = \frac{P}{T} - \frac{C}{T}$, ce qui ne sautait pas tout à fait aux yeux. Ensuite il faut se hâter de rattraper l'auteur, qui poursuit son chemin. $\frac{C}{P}$, c'est l'inverse de la productivité des consommations intermédiaires - l'inverse de $\frac{P}{C}$. Or, nous dit-on, puisque la productivité des consommations intermédiaires tend à baisser (c'est là qu'il devrait y avoir discussion ...), le rapport inverse, $\frac{C}{P}$, tend à augmenter. Donc $1 - \frac{C}{P}$ tend à diminuer, et comme (voir plus haut) $\frac{V}{T} = \frac{P}{T} (1 - \frac{C}{P})$, $\frac{V}{T}$ ne peut croître que si $\frac{P}{T}$ croît. Le peut-il ? On a $\frac{P}{T} = \frac{P}{C} \times \frac{C}{S} \times \frac{S}{T}$, et de ces trois sous-rapports, $\frac{P}{C}$ a peu de chances d'augmenter, $\frac{C}{S}$ tend à se stabiliser et seul $\frac{S}{T}$ a effectivement été augmenté jusqu'ici pour accroître le revenu par travailleur (de 1979 à 1985, la superficie moyenne par exploitation serait passée de 23 ha à 27 ha). Mais si la surface cultivée croît, le résultat par ha stagne, sauf si l'on apporte davantage de capital, ce qui devient hasardeux. Donc les rendements risquent de baisser, et avec eux l'ensemble de la production.

sonnement algébrique montre que ce rapport, $\frac{V}{T}$, ne peut croître que si la production rapportée au temps de travail, $\frac{P}{T}$, augmente aussi. La chose est peu probable, comme on nous l'explique en décomposant $\frac{P}{T}$ en trois rapports élémentaires. Or la première étape du raisonnement repose sur l'idée que la productivité des consommations intermédiaires en agriculture tend à baisser, et le lecteur risque de ne pas s'interroger suffisamment sur cette proposition essentielle. En effet, étourdi par une judicieuse ellipse dans le raisonnement, il est très affairé à reconstituer le chaînon manquant - non sans peine s'il n'est pas très mathématicien. Ainsi placé en situation d'infériorité, il acquiesce sans barguigner à la conclusion que l'auteur voulait atteindre : les rendements ne peuvent que baisser à l'avenir, et avec eux la production tout entière. Quand on relit cette page à tête reposée, son outrecuidance apparaît choquante, et fait un regrettable contraste avec les doutes que marquent les grands économistes lorsque la tradition académique les oblige à présenter dans leurs manuels certains modèles théoriques d'une élégance particulièrement spacieuse¹.

Plutôt que la démonstration ou le renforcement de propositions hasardeuses, les modèles logiques ont parfois pour objet de faire voir l'impossibilité ou l'inanité de certaines hypothèses ou de certaines explications. L'emploi de l'arme logique ne va pas alors sans ironie. Il y a même de la *Schadenfreude* dans la remarque cinglante de Paul Fabra sur Marx et les robinsonnades :

Marx se moquait des robinsonnades, peut être était-ce parce que la vraie histoire de Robinson était le démenti à la fois le plus simple et le plus irréfutable de son explication du capitalisme ...

¹- Ainsi BOULDING 1955 : 426, à propos de l'accélérateur : "In point of fact there is not much empirical evidence even for the existence of an accelerator, much less for its stability. Hence models which assume constancy in the accelerator must be used with the greatest caution, and they are not likely to be descriptive of actual economic cycles. The best that models of this kind can do is to show how cycles might be generated. Whether cycles are in fact generated in the way indicated cannot of course be deduced from the theoretical models themselves !" Sur ce sujet douloureux, voir le dossier publié dans *Le Monde* du 17 Mars 1987 ("Une science ?"), et notamment l'interview donnée par H. A. Simon à la revue *Challenge* ("The failure of armchair economics") : "Je n'attends pas vraiment des économistes qu'ils débarrassent leurs textes des éléments théoriques non valides, en tout cas ce n'est pas pour demain. Mais je ne connais aucune autre science, qui se donne pour objet de traiter des phénomènes du monde réel, où des affirmations sont régulièrement émises en contradiction patente avec la réalité". Pour un regard d'anthropologue sur cette question, lire BARE 1987.

Et plus loin :

C'est en vertu de son caractère logique que la comptabilité en partie double constitue une meilleure introduction à l'étude de l'économie politique que la dialectique hégelienne. (FABRA 1979 : 447 et 449).

Qualifié ou non de "modèles", les schémas dont nous venons de recenser quelques exemples ont pour trait commun d'être tout bonnement des théories. Ou, si l'on préfère, des hypothèses. Ou des images ... Ce sont aussi, parfois, des constructions arbitraires, analogues à celles que railait le prophète Osée, "*idoles de leur invention*"¹, privées de tout lien avec la réalité. Symétriquement, il existe une classe de modèles plus proches du donné sensible, dont nous allons parler maintenant.

IV. SIMULACRES

IV.1 LES RÉSUMÉS

Le cas le moins équivoque est sans doute celui des modèles historiques, et d'abord de ces résumés autoritaires par lesquels certains auteurs commencent ou concluent leurs récits. Ainsi, le "*procès entre vingt-quatre millions d'hommes et sept cent mille privilégiés*" que Chamfort voyait poindre en 1788² devient-il en 1837, sous la plume frénétique de Thomas Carlyle :

the open violent Rebellion, and Victory, of disimprisoned Anarchy against corrupt worn-out Authority; how Anarchy breaks prison; bursts up from the infinite Deep, and rages uncontrollable ... till the frenzy burning itself out and what elements of New Order it held developing themselves, the Uncontrollable be got, if not reimprisoned, yet harnessed, and its mad forces made to work towards their object as sane regulated ones. (CARLYLE 1955, vol. I, p. 170).

On apprécie ces magistraux coups d'archet qui présentent le condensé portatif et savoureux d'une succession de faits contradictoires. Ces propositions mûrissent parfois au point d'accéder à un certain niveau de formalisation. On voit alors naître les grands schémas statiques ou dy-

¹ - Osée, XIII, 2, dans la traduction de la Bible de Jérusalem. Comme il arrive fréquemment, la King James de 1611 et la traduction de Luther sont plus parlantes : "Idols according to their own understanding", "Bilder, wie sie sich's erdenken"...

² - CHAMFORT 1968 : 391.

namiques que certains présentateurs n'hésitent pas à qualifier explicitement de "modèles". Je mentionnerai pour mémoire :

- la succession des cinq types de rapports de production - communauté primitive, esclavagisme, féodalisme, capitalisme et socialisme - vulgarisée par le marxisme-léninisme, "*science des lois de développement de la société*" (NIKITINE s. d. : 7) ;

- la "*courbe du phénomène humain*" tracée par Teilhard de Chardin: "*Prévie, Vie et pensée, ces trois évènements dessinant dans le passé et commandant pour l'avenir (la survie) une seule et même trajectoire*". (TEILHARD 1955 : 29).

- le mécanisme victimaire de résolution des conflits nés du désir mimétique (GIRARD 1978 et 1982) ;

- la mise en ordre des mouvements historiques selon les trois plans du temps géographique, du temps social et du temps individuel (BRAUDEL) ;

- la "*théorie de la vraie civilisation*" selon Baudelaire, dans "*Mon coeur mis à nu*" : "*Elle n'est pas dans le gaz, ni dans la vapeur, ni dans les tables tournantes, elle est dans la diminution des traces du péché originel*" (BAUDELAIRE 1972 : 97).

Dans ces visions monumentales, à partir desquelles d'autres époques eussent probablement édifié des mythes¹, on peut voir des modèles, non pas inventés mais surgis de la fréquentation assidue d'une matière historique ou anthropologique fortement maîtrisée. Nous examinerons ici un modèle historique de structure et un autre, dynamique, de fonctionnement, avant de présenter des exemples tirés des recherches de l'ORSTOM et de l'INRA.

Dans sa réponse au discours prononcé par G. Dumézil le jour de sa réception à l'Académie Française, Claude Lévi-Strauss rappelle :

"ce motif récurrent qui sous-tend toute la philosophie sociale et la pensée religieuse ... l'idéologie des trois fonctions selon laquelle non seulement la société, mais le monde pris dans sa totalité ou réduit à tel ou tel de ses mécanismes particuliers, ne peuvent vivre, durer ou se reproduire que par la collaboration harmonieuse de trois fonctions hiérarchisées : la puissance souveraine qui se manifeste sous deux aspects, l'un magique et l'autre juridique ; ensuite la force physique, principalement

1. "*La classe des mythes est une classe de modèles très particuliers ... parce que l'objet de ces modèles est la société humaine, dans sa genèse, dans son évolution, dans les comportements des différentes strates qui la constituent*" (BRUTER 1982 : 29).

celle du guerrier ; enfin la fécondité des humains, des animaux et des champs ... " (Le Monde, 15 Juin 1979).

Ce schéma est qualifié un peu plus loin de "modèle têtue", puis de "grille" permettant de "superposer et de déchiffrer" des récits que l'on ne s'était pas avisé de rapprocher. Le même terme de "modèle", à propos du même schéma, est employé une dizaine d'années plus tard par G. Duby lorsqu'il entre lui-même à l'Académie.

Les travaux de G. Dumézil m'ont guidé au tournant d'une recherche hasardeuse ... Ce fut en m'appliquant à discerner les traces d'un modèle, de cette forme qu'une suite de livres admirables montrait solidement implantée au coeur de l'idéologie des peuples indo-européens, ce fut en m'évertuant à dater aussi précisément qu'il est possible, à situer dans le mouvement d'ensemble d'une culture les résurgences successives du système des trois fonctions que je parvins à délimiter avec moins d'incertitude la part qui revient à l'imaginaire dans l'évolution des sociétés humaines (Le Monde, 31 Janvier et 1er Février 1988).

Il importe peu, au fond, que ce modèle, cette grille, ce système des trois fonctions dise ou non ce qu'il en est, en fait, dans la réalité. L'histoire se trouve désormais éclaircie, remaniée, transformée par ce type de lecture, et cela de manière irréversible. La puissance de l'interprétation remodèle un ensemble confus de phénomènes dont nous ne possédons, de toute façon, que des vestiges très fragmentaires.

Peut-on en dire autant des modèles dynamiques ? Pour en juger, et m'éloignant des vastes survols, je prendrai l'exemple d'un schéma établi pour une période relativement courte, un siècle environ. Je le tire du livre de K. Polanyi que l'on a mis si longtemps à traduire, *La Grande Transformation*¹. Pour Polanyi, la civilisation du XIX^{ème} siècle a reposé, entre autres, sur l'institution du marché automatique, qui a engendré ou facilité une croissance économique sans précédent. Mais cette institution est une utopie, surtout lorsqu'on prétend lui soumettre l'offre et la demande de travail humain. Le marché automatique ne peut fonctionner sans annihiler "la substance humaine et naturelle de la société ; il aboutirait à la destruction physique de l'humanité, et à la transformation de l'environnement en désert" (POLANYI 1967 : 3). La société a donc pris des mesures pour se défendre, elle a freiné le fonctionnement automatique des marchés, mais ce faisant elle a désorganisé l'industrie et engendré d'autres périls. Nous avons là, me semble-t-il, un modèle historique propre à éclairer une succession de faits obéissant peut être à un principe plus général encore, celui de la compensation, dans lequel

¹- Le livre a été écrit aux Etats-Unis pendant la deuxième Guerre Mondiale et publié en 1944. La première édition de poche (Beacon Press, Boston) date de 1957. Il a fallu attendre 1983 pour voir apparaître une traduction française!

l'ingénieur Pierre-Hyacinthe Azaïs, vers 1840, voyait un ressort fondamental de l'histoire humaine¹. Ajoutons que le modèle de Polanyi est peut être moins suspect que d'autres d'avoir imposé aux faits une structure sortie tout armée du cerveau humain. La preuve en est que l'on compte dans ce schéma quatre institutions jugées décisives pour la période étudiée : deux sont politiques (l'équilibre des pouvoirs et l'Etat libéral), deux sont économiques (l'étalon-or et le marché automatique). Quatre éléments dans un schéma, c'est inhabituel, en général on en trouve trois².

Pour serrer de plus près ce que sont véritablement les modèles historiques, il n'est pas inutile d'examiner des constructions plus modestes, très proches de séquences locales. Nous en trouvons, me semble-t-il, de deux types. Certaines, volontairement simplifiées, ne semblent accéder à la généralité que grâce à l'emploi - un peu forcé - du fréquentatif. D'autres, plus complexes, font entrevoir la notion de résumé d'intrigue, dont nous sommes partis et à laquelle nous allons inévitablement revenir.

Les schémas fréquentatifs pullulent en sociologie. Il suffira de mentionner le schéma des stratégies générationnelles de Balmori, Voss et Wortman (1984), censé représenter la naissance et le développement des groupes dominants s'appuyant sur des réseaux familiaux en Amérique Latine. Ce schéma "*classique*" vaut d'être cité puisqu'il a été utilisé récemment par un économiste française travaillant dans un projet auquel collaborait l'ORSTOM. Il s'agit de la thèse de A. Beaumont sur la caféiculture dans la région centrale de l'Etat de Veracruz, au Mexique³. On pourra juger que le recours au schéma, bien qu'utile, n'ajoute pas d'éléments indispensables à un remarquable travail de recherche historique, qui se suffit à lui-même en tant que récit.

1. COUTY 1987a.

2. Il n'y a pas que les trois fonctions de Dumézil, ou les trois temps de Braudel. Dans des domaines plus spécialisés, on trouve les trois éléments du système productif agricole selon R. Badouin, les trois paliers (technique, social et symbolique) de la réalité sociale selon Cl. Raynaud (RAYNAUT 1987b), etc.... L'esprit humain aurait-il une structure ternaire, comme la valse?

3. Voici un résumé de ce schéma, d'après BEAUMOND 1988: 76-78:

- La première génération, composée en général d'immigrés, débute dans le commerce et finit par acheter des terres ou par occuper des postes peu élevés de fonctionnaires ; - la seconde génération diversifie ses activités économiques et élargit le réseau familial. Elle accède à des postes publics et à des charges politiques importantes; - le processus de développement se complète et s'institutionnalise par la création d'associations, mais le réseau familial voit sa croissance se ralentir et sa structure s'affaiblir ; - l'organisation familiale entre en conflit avec le pouvoir d'Etat qui s'accroît et se centralise. Il a été rendu compte de la thèse d'A. Beaumont dans le Bulletin Bibliographique de l'INSEE-Coopération, n°16, 1988.

Dans la catégorie des modèles plus complexes, on trouve d'intéressants exemples relatifs à la Côte d'Ivoire. C'est une perspective volontairement spécialisée¹ d'économiste agricole qui inspire ce que J. Ph. Colin appelle un "*modèle dominant d'économie de plantation villageoise en Côte d'Ivoire forestière*" (COLIN 1987, tome I, p. 10). Ce modèle est caractérisé par la prédominance des cultures caféière et cacaoyère, par une intégration spatiale temporaire et une articulation technique des cultures vivrières et pérennes, par une relation dynamique entre le foncier et la main-d'oeuvre, et enfin par un système de production extensif. L'évolution est liée à une certaine raréfaction des terres disponibles, rapidement consommées par le système extensif de production, ainsi qu'à une raréfaction de la main-d'oeuvre salariée, que les planteurs peuvent de moins en moins rémunérer par l'attribution de dotations foncières. L'exode rural des jeunes scolarisés renforce le manque de main-d'oeuvre. L'introduction de nouvelles cultures dans la zone étudiée (Basse Côte d'Ivoire) introduit dans le schéma un principe de diversification et de renouvellement.

Prenant en compte, sur la longue période, les facteurs ethnique et politique, J. P. Chauveau et J.P. Dozon ont montré comment cette dynamique agricole et spatiale ne se sépare pas d'une histoire de la vie publique et politique en Côte d'Ivoire. Trois acteurs ou sujets principaux entrent alors en scène. Ils prennent position les uns par rapport aux autres, ils affirment peu à peu une identité "*ethnique*" nullement donnée dès le départ. Il s'agit des groupes baoulé, bété et agni. Les gens du nord se trouvent relégués dans "*une position plus ou moins extérieure à cet univers ivoirien dont l'histoire s'est faite autour de la zone forestière*" (CHAUVEAU et DOZON 1987 : 282). Les Agni au contraire occupent dans le scénario une place de premier plan. Ils inaugurent dans le Sud-Est un système de relations entre autochtones et allochtones qui se généralisera par la suite à l'ensemble de la zone forestière. Ce système est fondé sur l'irréversible dépossession foncière des planteurs. Il fait naître un climat de défense de l'autochtonie et un certain repli sur soi de l'univers agni. Les gens de l'Ouest, Bété surtout, méprisés et brimés par l'Etat colonial, se tournent plus tardivement vers l'économie de plantation, mais le résultat est le même qu'en pays agni : développement d'une idéologie d'autochtonie. Les Baoulé, enfin, se forgent à la fois une situation d'autochtones (le pays baoulé, avec ses activités diversifiées) et d'allochtones essaimant dans toute la zone forestière, milieu urbain compris. L'Etat ivoirien se construit et se consolide sur ce double phénomène de l'expansion de l'économie de plantation et des migrations inter-rurales (baoulé notamment) qui l'accompagnent. Le processus, accepté et assumé par Houphouët, n'est "*ni miracle ni mirage*".

¹. Perspective spécialisée, mais dans la suite d'analyses plus amples, telle que celle proposée dès 1977 par Chauveau et Richard, ainsi que par les mêmes auteurs en 1983 (voir bibliographie).

simplement un "réel entrevu dans les années 40 ... qui n'a cessé de prendre corps et de structurer la société ivoirienne" (CHAUVEAU et DOZON 1987 : 286).

De l'analyse agro-économique localisée à l'interprétation de l'histoire sociale et politique, c'est ainsi tout un emboîtement de "modèles", schémas, scénarios, qui vient éclairer et ordonner une succession d'événements qu'on s'habitue à désigner par un patronyme commode : le miracle ivoirien. Il n'est pas difficile de trouver dans la recherche française des exemples comparables. Des économistes de l'INRA ont ainsi parlé récemment du "modèle breton" et du "modèle jurassien" pour identifier et analyser les formes prises concrètement et localement par un modèle d'intensification devenu peu à peu dominant en France depuis 1950 (DAUCE et PERRIER-CORNET 1986 : 7 et 70-71). Il n'y a pas, dans cet emploi du terme "modèle" de connotation d'exemplarité comme dans les expressions "modèle suédois" ou "modèle japonais". Il s'agit simplement de constater que la tendance à l'uniformisation née d'un mode de développement intensif et industriel n'exclut pas des adaptations locales liées à une histoire régionale. Dans le Morbihan, on observe un mouvement social soutenu par des agriculteurs, issus de la JAC (les groupements de vulgarisation agricole). Ce mouvement est lié à la diffusion d'un modèle productiviste, avec intervention déterminante de firmes agro-alimentaires, coopératives ou privées. Dans le Doubs et le Jura, le développement de l'agriculture a reposé sur la modernisation d'exploitations de plus en plus laitières. Les gains de productivité ont résulté de la mise en oeuvre d'un système fourrager et d'un type de sélection animale assez spécifiques à la région. De plus, la modernisation des exploitations d'élevage s'est faite dans le cadre de systèmes artisanaux de transformation laitière.

Ce n'est pas déprécier tous ces modèles, bien au contraire, que de tenter de les prendre pour ce qu'ils sont vraiment. A des degrés divers, tous sont dispensateurs d'intelligibilité, sans prétendre toutefois proposer une explication générale et abstraite de faits qui restent frappés d'une singularité historique définitive. Il y a explication, certes, au moins en ce sens que ce qui était "inconnu, vague ou obscur" (LALANDE 1976 : 325) est décrit de manière précise et concise, mais les schémas ne cherchent pas à montrer que l'objet de connaissance déployé sous nos yeux est impliqué par des vérités ou des principes précédemment admis, démontrés, ou évidents - auquel cas ce que l'on explique dépendrait "nécessairement de jugements nécessaires".

Cette dernière démarche dessine pourtant la voie par laquelle l'explication que schématise un modèle scientifique entreprend d'accéder à la généralité. Quelque chose de ce genre, à la vérité, semble se produire lorsque le "modèle" de l'économie de plantation ivoirienne est présenté comme valable pour plusieurs décennies et pour un espace de vastes dimensions. Il ne faut toutefois pas s'y méprendre. Pour que le

modèle puisse être considéré comme révélateur d'une structure intime et nécessaire de l'économie agricole sous ces latitudes, il faudrait que ses traits essentiels rendissent compte de faits observés ailleurs qu'en Côte d'Ivoire. Cette amplification a parfois été tentée, mais sans donner de résultats bien convaincants. L'étude de l'économie de plantation villageoise au Cameroun, par exemple, a vite mis en lumière la quasi-absence de migrations de main-d'oeuvre comparables à celles de la Côte d'Ivoire (LEPLAIDEUR et RUF 1980). Il ne faut pas voir là un échec de la promotion du modèle, mais une confirmation de sa nature historique singulière.

Un autre mode d'accès à la généralité consiste, dans le cas du schéma de Chauveau et Dozon, à passer par la critique, tout à fait fondée, de la notion courante d'ethnie. Les auteurs montrent avec force qu'elle ne correspond pas à une entité substantielle, mais qu'elle résulte au contraire d'une cristallisation lente et hasardeuse à laquelle prennent part les populations concernées, l'administration coloniale, l'Etat ivoirien moderne, les intellectuels et les chercheurs ...

Cette "déconstruction" d'un concept "historique" ou "classificateur", c'est-à-dire de l'une de ces "représentations composites qui donnent l'illusion de l'intellection mais qui ne sont en réalité que des espèces d'images génériques" (VEYNE 1979 : 91), pour bienvenue qu'elle soit, ressortit au travail normal de critique sémantique dont chacun reconnaît la nécessité, surtout en sciences sociales. Du même coup, elle souligne que les événements rapportés exigent d'être interprétés d'une façon originale et particulière.

Enfin les travaux de Daucé et Perrier-Cornet, d'autant plus convaincants qu'ils s'appuient sur une abondante documentation chiffrée, procèdent pour ainsi dire en sens inverse de la généralisation. Ils ont pour objet de montrer, et montrent en effet, comment un schéma général d'évolution se diversifie et se module à l'intérieur de l'espace national. Leur démonstration retire l'être au schéma abusivement général de modernisation de l'agriculture française, qui n'apparaît plus que comme l'indigente résultante de vigoureux dynamismes locaux.

Que sont alors tous les modèles que nous venons d'examiner, sinon, pour reprendre l'expression si juste de Paul Veyne, des "résumés d'intrigue" ? C'est-à-dire l'abrégé nécessairement original et particulier de l'itinéraire tracé par l'historien à travers le très objectif champ événementiel (VEYNE 1979 : 38). L'itinéraire en question peut se prolonger sur une période plus ou moins longue, il peut s'élargir à la dimension d'un champ plus ou moins étendu ("*Si vous voyez assez grand, votre guerre sera même un fait social total*"), il n'en reste pas moins que le résumé n'explique rien, et ne peut rien expliquer. L'illusion naîtra parfois du fait qu'en appauvrissant suffisamment le résumé (exemple : BALMORI, VOSS et WORTMAN), on pourra le plaquer sur plusieurs intrigues comparables,

mais cette opération ne changera rien à la relation logique entre intrigue et résumé.

Il faut s'y résigner : les modèles ou schémas historiques, et parmi eux les modèles ou schémas sociologiques, ne sont que le résumé plus ou moins brillant, plus ou moins stimulant, d'une suite d'événements. Les résumés ont leur utilité, sans doute même ne peut-on s'en passer, mais enfin on ne peut en tirer que ce qu'on y a mis.

Dans quelques cas seulement, assez rares, il semble qu'à partir de la collection d'événements ou de situations rassemblées par le chercheur puisse être reconnue une structure inévitable, s'imposant toujours et partout à des sujets qui ne soupçonnent même pas son existence. Ainsi certains linguistes croient-ils exhumer la langue dissimulée sous les comportements linguistiques, ainsi les ethnologues découvrent-ils les structures élémentaires de la parenté¹, ainsi quelques économistes traquent-ils une économie fondamentale à la fois masquée et exhibée par les faits quotidiens de production, de distribution et de consommation. Plus concrètement, des géographes décèlent dans un parcellaire, cette fois sans grand doute possible, des arrangements qui se répètent de terroir en terroir :

D'où vient qu'une multitude de centres de décision indépendants les uns des autres créent une forme - l'emboîtement du noyau et de la périphérie-décelable à l'échelle du terroir ? Nous y voyons deux raisons :

- l'une est que les exploitants suivent tous le même modèle, et répartissent champs permanents et champs temporaires principalement en fonction de la distance par rapport à l'habitat ;

- l'autre est que cet habitat est resté à Kumtaabo relativement groupé.

La cohérence formelle de l'espace économique nous apparaît donc comme la conséquence d'un des aspects de la cohérence de l'espace social (IMBS 1987 : 155).

C'est probablement ce genre de recherches qui autorise à entrevoir - mais à quelle échéance ? - une convergence possible entre la modélisation pratiquée dans les sciences expérimentales et celle à laquelle nos disciplines ambitionnent de parvenir. Un doute subsiste pourtant sur la probabilité de cette convergence.

D'une part en effet les quelques cas apparemment réussis de modélisation en sciences sociales ont porté, me semble-t-il, sur des situations

¹. Cf. les problèmes de topique (algèbre des relations et liens de parenté) présentés par Granger (1988b : 261 sq.) à partir d'un article de Ph. Courège.

extrêmement simples (ou peut être extrêmement simplifiées) - par exemple les systèmes de parenté de groupes isolés et restreints.

D'autre part les espoirs qu'avait fait naître le progrès des techniques de traitement de données, dans le cas de situations plus complexes, ont été largement déçus¹. En l'état actuel des choses, on ne saurait être trop prudent, et sans doute la tâche la plus urgente est-elle de chercher à comprendre ce que l'on fait réellement lorsqu'on croit "modéliser". Quittons donc les modèles historiques pour jeter un regard sur des figurations qui s'apparentent à des maquettes.

IV.2 LES MAQUETTES

Nous arrivons peut être ici au coeur de notre sujet, si l'on veut bien se rappeler que le sens le moins équivoque du mot "modèle" est celui de représentation matérielle, sous des formes réduites, d'un objet tel que navire, véhicule, corps humain, édifice, portion d'espace, etc....². On fabrique ainsi des modèles de bateaux et de monuments, des bustes de généraux, des écorchés pour carabins et dessinateurs, des sphères armillaires et des cartes routières, etc.... Un pas de plus dans la convention, et nous trouvons les diverses formes de comptabilité privée ou nationale, les diagrammes de parenté et d'autres choses encore.

Ces diverses représentations sont des maquettes en trois dimensions de l'objet représenté, ou même des maquettes mentales dépourvues de toute dimension autre que celles de la feuille de papier sur laquelle on écrit ou on dessine. Je me bornerai ici à présenter quelques observations sur deux types de maquettes très utilisées dans nos disciplines : la carte et la comptabilité.

Pour ce qui est des cartes, qu'il suffise de rappeler, avec R. Brunet, que si les philosophes de l'École de Millet devaient "*se représenter un monde qu'ils ne connaissent pas*", nous avons pour notre part à représenter les structures d'un monde sur lequel nous sommes très informés (BRUNET 1987-88 : 100). En ce sens, la carte a pour avantage de forcer à trier, à éliminer :

1- On ne relit pas sans quelque gêne, par exemple, les lignes optimistes écrites par C. Furtado en 1970 dans l'avant-propos de son remarquable manuel intitulé "Théorie du Développement Economique" (Paris, PUF), p. 5.

2- "Un modèle d'un objet donné est encore un objet ... mais on suppose en général que le domaine (spatial) du modèle est plus petit que le domaine de l'objet originel, et que le nombre de propriétés dont le modèle tient compte est plus faible que le nombre de propriétés de l'objet initial. Nous dirons que le modèle d'un objet est une projection de cet objet sur un espace écran" (BRUTER 1982 :92).

Nous avons besoin, pour comprendre et pour progresser, de ces représentations synthétiques, modélisées, qui essaient de supprimer tout le "bruit de la carte et d'en représenter ce que nous croyons être les structures profondes ...

Derrière chaque carte, il y a des structures, comme derrière chaque visage, il y a la structure des os de la face, quelque chose dessous qui est à découvrir, pas à inventer.

L'image employée est éclairante, mais ne fait pas oublier que chaque carte figure une portion bien spécifique d'espace, et ne peut donc révéler que des structures elles aussi singulières, qui sont très loin d'avoir la généralité des formations osseuses. Ce qui est vrai, c'est qu'on peut avancer de plus en plus sur la voie qui mène à l'essentiel et au significatif. On peut simplifier et simplifier encore une carte ou une superposition de cartes pour montrer ... ce que l'on veut faire voir. Le document reproduit ci-après constitue un exemple, choisi en raison de sa banalité même, de ce genre de démarche. Il montre aussi qu'en soi, la représentation ne fait qu'isoler et proposer, sans expliquer. On peut donc la ranger dans la catégorie des modèles techniques, qui reproduisent plus ou moins fidèlement un résultat sans entrer, comme essayent de le faire les modèles scientifiques, dans les processus qui produisent ces résultats. Nous reviendrons plus loin sur cette distinction importante, formulée par G. G. Granger (1988b : 271-72).

Comme les cartes, les comptabilités sont des modèles techniques orientés avant tout vers la solution de problèmes pratiques. La comptabilité privée enregistre des mouvements de valeurs afin d'en garder trace, de les classer, de les contrôler - notamment par l'artifice de l'écriture en partie double. A partir de cette comptabilité permanente de gestion, on peut effectuer des inventaires intermittents qui donnent une image de la firme à un moment donné.

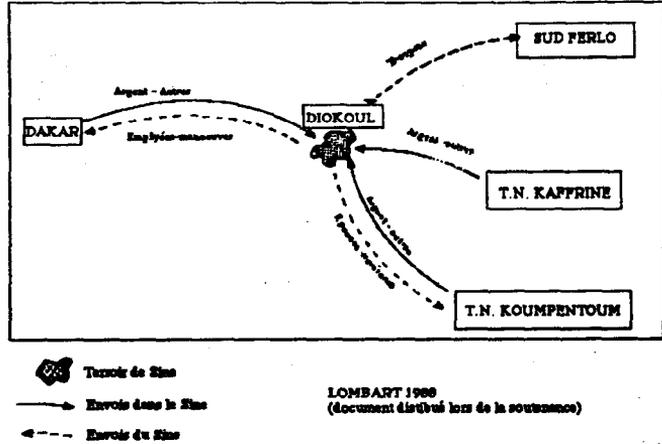
ECHANGES ENTRE ZONES DE PEUPEMENT SERER
AU SENEGAL

Figure 1

- Par ailleurs, dans un système de production de masse, à faibles marges bénéficiaires, une connaissance précise des prix de revient est indispensable à la gestion. Aussi voit-on surgir de la comptabilité générale une comptabilité analytique d'exploitation, qui permet de comparer des coûts et des résultats. Toutes ces représentations sont, en un sens, des modèles de l'entreprise, de sa déformation dans le temps, de ses relations avec l'extérieur. Nécessairement, de tels modèles reposent sur un ensemble de conventions, de catégories, de techniques de présentation.

Il en va de même, en gros, des comptabilités dites nationales, qui s'inspirent de la comptabilité privée mais qui utilisent des matériaux de nature différente. Ce que décrit la comptabilité nationale, c'est l'économie tout entière, à savoir cet "ensemble d'unités qui effectuent des actes économiques et que l'on classe dans des catégories appropriées aux analyses que l'on veut effectuer" (INSEE 1987 : 18). Si l'on décrit, c'est pour prévoir, et la prévision n'aura d'intérêt que si la description est exhaustive, quantifiée et globale¹. Ce troisième adjectif signifie qu'on cherche à mettre en évidence des interdépendances économiques, en termes de comportements ou de transactions (termes comptables) (OLIVE 1979 : 16). Autrement dit, la comptabilité nationale

¹- Exhaustivité : comme la carte, la comptabilité nationale ne souffre pas de blancs. Lorsqu'elle rencontre des vides, elle les comble en calculant des soldes, en construisant un poste "erreurs et omissions", etc....

est l'outil par excellence de l'analyse macro-économique, orientée vers les effets de composition qui n'apparaissent qu'au niveau global. D'une telle analyse, on peut déjà dire que ses objectifs sont déterminés plus par les besoins des utilisateurs, par l'état des appareils et des techniques d'observation, par les conventions adoptées, que par le souci de faire progresser une connaissance véritablement scientifique. On sait de plus qu'en Afrique, le peu de pertinence des catégories employées et la qualité déplorable des données statistiques font de la comptabilité nationale le "mythe" dénoncé par M. Anson-Meyer (1983). Tout récemment encore, G. Duruflé souligne "*la quasi-inexistence d'outils statistiques et économiques qui permettent de saisir les dynamismes internes de pans entiers des économies de l'Afrique sub-saharienne : production vivrière, petite production marchande (secteur informel) ...*" (DURUFLE 1988 : 69).

Modèle composé de sous-modèles - les comptes, le tableau économique d'ensemble, le tableau entrées-sorties - la comptabilité nationale se construit avec des grandeurs économiques, en réalité des faits comptables. Ces faits résument a posteriori des mouvements effectués au cours d'une période par des éléments qui se sont déplacés d'un agent vers un autre ou qui, restant entre les mains d'un même agent, ont subi une mutation. L'emploi du mot "flux" pour désigner ces grandeurs est justement critiqué par H. Culman (1965 : 18) puisque la comptabilité nationale enregistre seulement le niveau (donnée statique) atteint par les dites grandeurs en fin de période. Retenons cette remarque, elle est d'importance.

Les "*modèles descriptifs de l'économie considérée dans son ensemble*"¹ auxquels Malinvaud assimilait les comptabilités nationales font voir les dimensions respectives des grandeurs saisies, et les liaisons qu'elles paraissent entretenir. C'est-à-dire, comme disait F. Perroux, les proportions et les relations caractéristiques de l'économie étudiée. Deux fonctions de la comptabilité nationale auxquelles correspondent dans le travail d'analyse les deux types de représentation dont nous avons parlé plus haut : équations de définition (ou équations comptables) d'une part, équations de comportement d'autre part. Ici nous ne manipulons plus des expressions simplement pensées, nous construisons des équivalences chiffrées résumant un long travail de collecte, de critique et de sommation. Dans les équations de comportement, par exemple, l'économètre essaye d'évaluer "*le poids de chacun des paramètres dans l'équation et de tester la qualité de la relation obtenue*" (SUDRIE 1988 : 40). Alliant de la sorte, comme l'enseignait H. Guilton, la statistique, les

1. "*On a dénommé comptabilité nationale cette branche de la discipline économique qui a pour objet l'établissement de modèles descriptifs de l'économie considérée dans son ensemble*" (MALINVAUD 1964 : 8).

mathématiques et la théorie économique, ces constructions sont probablement les seules à pouvoir prétendre être appelées modèles (GUITTON 1957-58 : 616).

Les modèles purement théoriques, n'incorporant pas encore de chiffres, ne sont que des théories ou des images. La simple collection de chiffres n'est pas non plus un modèle, elle doit pour cela faire l'objet d'opérations (donc recourir à la mathématique) qui n'ont de sens que par rapport à une théorie.

Examinons sur quelques exemples précis comment s'effectue cette confrontation entre théorie et expérience.

L'application à un cas historique du modèle Dutch disease a été faite par Ademola Oyejide lorsqu'il a montré comment le boom pétrolier des années 1970 a transformé la structure de l'économie nigériane. Les faits sont résumés par le tableau suivant, qui montre les taux de croissance des divers secteurs - agriculture, pétrole, mines, industrie, services - pendant la période de 1970 à 1982 :

Sector	Share of Output		Share of Employment		Share of Exports	
	1970	1982	1970	1982	1970	1982
			(percent)			
Agriculture	48.78	22.10	75.00	59.00	71.90	2.40
Oil and mining		10.22	24.87	0.20	0.40	15.40 97.50
Manufacturing		7.15	5.64	15.00	17.70	12.70 0.10
Services	33.85	47.30	9.80	22.90	-----	-----
Sources :	Computations are based on data from Nigeria, Federal Office of Statistics, <i>National Accounts of Nigeria</i> (Lagos: FOS, Nigeria, 1978); and Nigeria, Federal Office of Statistics, <i>Economic and Social Statistics Bulletin</i> (Special Series), January 1984					

Changes in sectoral contributions to output, employment, and exports, 1970 and 1982

Comme le "prédit" le modèle, le boom pétrolier a influé négativement sur la production de biens commercialisés autres que le pétrole. La contribution de l'agriculture à l'ensemble de la production passe de 49 % en 1970 à 22 % en 1982. Comme prévu, les services progressent notablement, passant de 34 à 47 % pendant la même période. Les gains relatifs de l'emploi, comme prévu également, sont significatifs dans les secteurs du pétrole et des services, alors que la part de l'agriculture dans l'emploi total baisse de 75 à 59 %. Nous examinerons dans la quatrième partie de cette communication le sens général que l'on peut trouver à ces confirmations du modèle.

Toujours dans le dessein d'analyser une économie nationale, on peut procéder à des comparaisons entre deux pays, par exemple la France et

le Mexique (HUSSON 1987). En ce qui concerne les importations, l'expression théorique présentée plus haut se diversifie alors en deux équations de comportement : la première (c'est une version du modèle DMS) modélise les importations françaises de biens d'équipement, alors que la seconde (qui fait partie du modèle MINIMEX) concerne les importations mexicaines. La comparaison des coefficients - approche paramétrique - montre que les importations mexicaines sont plus sensibles aux prix relatifs que les importations françaises. Etendue aux autres équations du modèle, cette procédure met en relief quelques caractéristiques essentielles de l'économie mexicaine.¹

La comparaison peut porter sur plus de deux pays. Ainsi la réaction des producteurs de riz aux variations de prix a été étudiée dans six pays africains par P. Phelinas (1986). L'auteur doit cependant introduire dans les équations une "variable de trend" censée résumer l'effet sur la production de facteurs autres que le prix : progrès technique, état de l'infrastructure, etc.... Les résultats de la recherche sont donc relativement décevants. Parmi les relations testées entre les variations du prix réel au producteur et celles de la production et des quantités commercialisées, très peu se sont révélées statistiquement significatives (PHELINAS 1986 : 190). Il y a lieu toutefois de mentionner cette étude puisqu'après l'avoir effectuée dans le cadre du CERDI de Clermont-Ferrand², l'auteur a été recrutée à l'ORSTOM où jusqu'alors ce genre de travaux, à ma connaissance, était peu ou pas pratiqué .

Au terme de ce tour d'horizon trop rapide, il est possible de rassembler quelques bref propos d'étape, qui n'ont évidemment rien de définitif. Une grande partie des constructions appelées modèles par les chercheurs de Sciences Sociales semble bien se ranger, sans qu'on force trop les choses, soit dans la catégorie des similitudes platoniciennes, soit dans celle des simulacres lucrétiens. Très marqués par l'esprit qui les conçoit, très éloignés par conséquent du donné sensible, les modèles théoriques (similitudes) ne sont pas de véritables modèles. Ce sont des théories plus ou moins rigoureuses, à ranger parfois dans la simple imagerie mentale. Les maquettes (simulacres) sont calquées sur la réalité, elles la copient de très près. Elles ont une utilité pratique indéniable, mais ne paraissent pas aller très loin dans la voie de l'explication. Cer-

1- Voici ces caractéristiques : - commerce extérieur dépendant ; - répartition des revenus peu favorable à l'investissement et sujette à de fortes distorsions ; - faible croissance de la productivité ;

- présence d'une forte inflation d'inertie ; - disparition de fait du chômage comme grandeur économique, alors que dans le cas français, celui-ci rétroagit sur le salaire réel et, par l'intermédiaire des allocations de chômage, sur le déficit du secteur public. (HUSSON 1987 : 71).

2- Centre d'Etudes et de Recherches sur le Développement International, dirigé par le Pr. P. Guillaumont.

taines de ces maquettes, cependant, sont présentées par les économistes qui les construisent comme le nec plus ultra de la science, alors pourtant que leur véritable statut semble plutôt être descriptif et technique. Il y a là un problème que nous allons tenter d'éclairer, sinon de résoudre, dans la dernière partie de cette communication.

V. LE SENS D'UNE ABSENCE

La modélisation, par définition, détourne notre regard des choses elles-mêmes pour le diriger vers des artefacts. La recherche risque alors de se déployer dans un univers à peu près dépourvu de lien avec le donné sensible, pour produire un corpus logique de plus en plus subtil, mais aussi de plus en plus gratuit. Si l'on est de bonne foi, on ne manquera pas de reconnaître une surprenante ressemblance entre ce genre de recherche scientifique et la création poétique. Bien des économistes logiciens ou mathématiciens pourraient dire, comme le poète autrichien Trakl : *"Mon oeil plein d'élan rêve de nouveau ses images plus belles que toute réalité. Je suis en ma seule compagnie, je suis mon propre monde, un monde parfaitement beau..."* (BASIL 1985 : 90). Contempler un modèle, c'est s'installer dans une enivrante situation d'extériorité par rapport à la réalité "étudiée". Et cette extériorité scelle une absence.

On fera remarquer que l'absence du réel dans nos réflexions fait pour ainsi dire partie de notre condition existentielle, et en particulier de notre emprisonnement dans le temps. Là-dessus, poètes et savants sont unanimes:

Nous n'avons connaissance de la réalité qui se présente à nos yeux qu'un instant après, dans l'instant seulement où la réalité a déjà changé, passé, s'est faite absence. Le champ d'expérience du langage ... se situe dans le passé. (UNGARETTI 1969 : 204).

Il en va de même - a fortiori - pour l'écriture, où Claude Hagège voit une *"conduite d'exil, hors de l'échange vivant des paroles proférées"* (HAGEGE 1987 : 94).

Encore faut-il ajouter que construire un modèle, ce n'est pas obliger la réalité à s'effacer - s'absenter - de manière uniforme. Il y a absence redoublée des morceaux de réalité que le modélisateur se dispense de faire figurer dans la représentation qu'il édifie, dont il se débarrasse pour ainsi dire par une schématisation qui est aussi un "évidement"¹. Prenons ce mot dans un sens métaphorique puisque l'appauvrissement du modèle par rapport à la réalité représentée peut consister, juste-

¹. GRANGER, cours donné au Collège de France (1988).

ment, en ceci qu'un modèle de navire, par exemple, demeure souvent plein comme une bûche et ne restitue pas les vides invisibles grâce auxquels pourtant le vrai bateau flotte. Mais quoi, dit la Varende, "n'attendez pas des patiences crispées et des poulies qui tournent, je n'ai cherché que le grand caractère du bateau, et si je puis dire, son art" (La Varende s. d. : 3). Aveu ou défi, cette remarque en dit long sur le projet du modélisateur. Ne nous y trompons pas : les choix que nous faisons lorsque nous mettons en modèle la relation aînés-cadets ou l'économie mauricienne sont tout aussi arbitraires, tout aussi catégoriquement déterminés par les possibilités techniques, les tours de main, le vocabulaire, que ceux de La Varende sculptant pour son plaisir et le nôtre une "flûte à l'arrière bulbeux" qu'il baptise "Le Voltigeur Hollandais". Le résultat d'ensemble est jugé avec l'insolence souhaitable par un autre grand écrivain : Roger Nimier :

On ne juge qu'un personnage de papier, et le sort de ce personnage dépend de l'arrangement de certains mots. La timidité d'un conditionnel peut le sauver, quand un impératif le tue (NIMIER 1973 : 80).

Tout modèle équivaut à une suite d'énoncés, où les effets de style, pourtant essentiels, très bizarrement, ne sont jamais identifiés ni maîtrisés.

Deux attitudes alors sont possibles. On peut décréter que ces vicissitudes de transcription ne font que correspondre - de manière un peu alarmante, il est vrai - à la nécessité où nous sommes d'être aveugles pour mieux voir :

Il me semble très frappant que les grands génies poétiques (comme Ossian, Homère) soient toujours figurés aveugles. Peu m'importe naturellement qu'ils l'aient été, mais seulement qu'on les ait imaginés aveugles, en signifiant par là, semble-t-il, que ce qu'ils voyaient, quand ils chantaient, ils ne le voyaient pas physiquement, cela se révélait à eux par une intuition intérieure. Quelle étrangeté qu'un des meilleurs et même le meilleur de ceux qui ont écrit sur les abeilles (Fr. Hubert, 1750-1831) ait été aveugle dès sa première jeunesse ; il semble presque, ici où l'on devrait pourtant croire que l'observation extérieure est capitale, qu'il avait trouvé son point d'Archimède et que de là, par une activité purement spirituelle, il remontait alors de détail en détail, en les reconstruisant en analogie avec la nature (KIERKEGAARD 1963, I: 15).

Ces vues paradoxales aident à pénétrer dans la compréhension difficile de ce que poursuit et permet l'activité de représentation. Non seulement dans le cas des modèles, mais dans celui, bien plus général, du recours aux signes linguistiques qui, à la différence des symboles, représentent les objets désignés non par un lien qu'on pourrait "justifier ou établir en raison", mais par pure convention :

Les langues n'assurent la possession discursive du monde que parce que de leur substance elles évacuent le monde (HAGEGE 1987 : 132 et 167).

Toutefois la confiance dans le pouvoir d'abstraire a des limites. Dans le célèbre traité d'Histoire des Doctrines Economiques qu'il a signé avec Ch. Rist, Charles Gide faisait sur le premier des modèles économiques, à savoir le Tableau du Docteur Quesnay, des réserves railleuses qui peuvent nous instruire encore aujourd'hui :

Les Physiocrates se figurent y voir la réalité même ... Comme beaucoup d'économistes mathématiciens d'aujourd'hui (écrit en 1926) ils ne s'aperçoivent pas qu'ils ne retrouvent en fin de compte au bout de leur calcul que ce qu'ils y avaient mis eux-mêmes. Il est bien évident que ce tableau ne prouve rien quant au point essentiel de leur système, à savoir qu'il y aurait une classe productrice et une classe stérile (GIDE et RIST 1926 : 23-24).

Apologie kierkegaardienne de la cécité féconde, critique des économistes puérilement enfermés dans leurs constructions, telles sont les réactions extrêmes qu'on peut éprouver devant les prouesses et les prétentions des modélisateurs. L'éviction du réel ne présente aucun danger quant le modèle est un résumé d'intrigue ou de situation qu'une intuition d'historien ou de sociologue nous propose après une longue fréquentation des archives ou des informateurs. Il y a péril, en revanche, lorsque le modèle est obtenu par division du travail entre des spécialistes très compétents qui manipulent à grands frais des équations compliquées, et des techniciens parfois peu qualifiés et en tout cas mal payés qui recueillent sans enthousiasme des données douteuses. L'absence du réel devrait être le prix payé pour que le modèle capte un peu de cette "logique interne cachée selon laquelle se transforme le monde" (BRUTER 1982 : 128), mais en va-t-il toujours de la sorte ?

Mettons à part, une fois de plus, le cas de ce qu'on appelle "modèle" en anthropologie. De certaines remarques de Cl. Meillassoux¹, ou encore d'un texte de Cl. Raynaud², je retiens qu'il est toujours opportun de rappeler l'intérêt que présente la mise en évidence de mécanismes à partir d'un petit nombre d'observations très approfondies. Qu'on propose

1- Faites au cours des réunions du Conseil Scientifique du Département H de l'ORSTOM, entre 1983 et 1986.

2- "Le faible nombre de familles interrogées peut aussi prêter à critique, l'échantillon ainsi constitué ne pouvant guère être considéré comme représentatif. Mais notre objectif n'était pas d'élaborer des moyennes généralisables à l'ensemble de la population du village; il visait à mettre en évidence, par l'analyse de cas concrets, les mécanismes par lesquels le problème alimentaire se trouve résolu, au niveau des groupes familiaux et à celui des individus. A cet égard, les phénomènes enregistrés sont si nets et se retrouvent de manière si constante d'un exemple à l'autre que leur caractère significatif ne semble pas pouvoir être mis en doute". (RAYNAUT 1978 : 571).

d'appeler "modélisation" cette démarche spécifique, différente de l'extrapolation statistique mais tout aussi légitime, pourquoi pas, si l'on reconnaît - comme je l'ai suggéré plus haut - qu'entre ce genre de modélisation obtenu par induction immédiate (COUTY 1984) et l'édification d'une hypothèse ou d'une théorie, la distance est parfois bien réduite.

Le cas des modèles économétriques est différent. En ce domaine, le test crucial serait celui qui nous assurerait que le modèle est vrai parce qu'il permet de prévoir et de modifier le cours des choses. Test praticable dans les sciences expérimentales, mais non pas en sciences sociales - ou alors de façon si grossière que la démonstration ne démontre rien. La théorie quantitative de la monnaie est "vraie" en ce sens qu'il est arrivé de très nombreuses fois qu'une émission exagérée de monnaie fasse flamber les prix, c'est-à-dire annule la valeur de la monnaie. Piètre vérification d'une évidence accessible depuis toujours au sens commun ! En fait, tout semble se passer comme si la modélisation économique ne permettait la plupart du temps que de retrouver des "lois" d'une banalité déconcertante, et même de n'en retrouver qu'une seule, à quoi se réduit peut être toute l'économie politique. Derrière les modèles du Dutch disease, par exemple, on ne distingue rien d'autre qu'une idée fort simple : la demande accrue d'un facteur de production en fait monter le prix, ou inversement le prix accru d'un facteur de production attire une offre supplémentaire de ce facteur. Rien d'autre, en somme, que l'intuition élémentaire sur laquelle se fonde la théorie de l'offre et de la demande, cette théorie que tout économiste, à en croire Mc Closkey, vérifie constamment par simple introspection ... Mais que penserait-on d'une physique qui se fonderait tout entière - de la mécanique à la physique atomique, en passant par l'optique et tout le reste - sur la théorie de la pesanteur et la formule $h = \frac{1}{2} gt^2$? Au bout du compte, l'énergie qu'on a dépensée pour appliquer au cas nigérian les schémas du Dutch disease aurait aussi bien pu servir à rédiger un chapitre d'histoire économique, sans l'ornement du modèle.

On rétorque qu'en faisant fonctionner les modèles économétriques, on simule le fonctionnement du monde réel, ce qui permettrait d'en mieux comprendre certains aspects. Autrement dit, en injectant dans un modèle différentes séries de données, on imite les séquences historiques véritables, dont on peut ainsi analyser de plus près l'enchaînement. A la vérité, ce genre d'exercice permet, incontestablement, de rayer de la carte du possible quelques zones interdites en raison des incohérences ou des incompatibilités que révèle un certain état du modèle. Il ne semble pas, cependant, que ce résultat ajoute beaucoup aux connaissances dont il a bien fallu disposer pour se donner une première représentation de la réalité. Les déformations infligées à cette représentation sont instructives, certes, mais ne font que résulter mécaniquement d'une structure acceptée au départ. C'est bien ce qu'explique un praticien :

(Il existe) une différence fondamentale entre modélisation et explication: le même jeu d'équations indifféremment appliqué à deux réalités économiques (la française et la mexicaine) permet de repérer, d'identifier certaines différences, mais en aucun cas de les expliquer et de les comprendre (HUSSON 1987 : 72).

Pour expliquer, il faut superposer au modèle un schéma théorique, mais on peut, à partir des mêmes données, parvenir à des explications variées en diversifiant les modèles par le moyen d'apports théoriques différents :

Les techniques économétriques, aussi sophistiquées soient-elles, permettent seulement de mesurer le degré de co-variation entre deux variables. La transformation de la corrélation statistique en schéma explicatif (de type cause-conséquence) est faite nécessairement en référence à un corpus théorique. Deux modèles, censés refléter le devenir de la même économie, pourront donc produire des projections radicalement différentes s'ils s'appuient sur des schémas théoriques divergents (SUDRIE 1988 : 40)¹.

Bref, en simulant, on ne "comprend" rien d'autre que le fonctionnement du modèle ; ou plutôt on ne le comprend pas, on le voit. Et ce qu'on voit ne peut avoir que des rapports très problématiques avec une réalité dont le modèle proclame emphatiquement l'absence. Ou - ce qui revient au même - dont il propose une représentation encombrée de boîtes noires, figurées ou pire encore : elles aussi absentes.

Pendant que, tels les Physiocrates de Charles Gide, nous observons le comportement d'un modèle "avec une joie d'enfants", les choses suivent leur cours, incognito. Un cours secoué par la violence et l'invention :

Les événements ne sont pas situés dans l'ensemble des reflets peints dans le pauvre petit miroir que porte devant elle l'intelligence et qu'elle appelle l'avenir, ils sont en dehors et surgissent aussi brusquement que quelqu'un qui vient constater un flagrant délit (PROUST 1954, III : 443).

Mais cette remarque, qui doit être inlassablement répétée, ne fait que marquer les étroites limites de la pseudo-explication procurée par le maniement d'un modèle. Une critique plus fondamentale de cette explication exige qu'on réfléchisse à la nature des grandeurs qui forment la

¹ - Sudrie donne l'exemple suivant : dans le modèle METRIC, la hausse de la masse salariale provoque une augmentation de la demande qui induit une élévation de la production et une croissance de l'investissement ; dans le modèle DMS (Dynamique multi-sectoriel), la même hausse de salaires conduit à une baisse des profits, à un ralentissement de l'investissement et à une chute de la production. Les tests économétriques sur les deux modèles sont satisfaisants et procurent un "rendu" équivalent sur la période d'estimation...

substance même du modèle, et entre lesquelles on croit repérer des relations.

Dès les années 70, Serge-Christophe Kolm aimait à rappeler que la macro-économie part des statistiques, alors que la micro-économie part de l'homme. Il en déduisait que, considérant des agrégats relatifs à des agents très variés, la macro-économie ne peut avoir qu'un "*statut scientifique bien douteux*"¹ à côté de la micro-économie qui explique le monde économique à partir des comportements des personnes, de leurs préférences, de leurs connaissances, de leurs droits, de leurs informations. Rappelons-nous la remarque de Culman citée plus haut. Les statistiques n'enregistrent, ex post, que l'ombre portée de mouvements effectués par certains éléments. Et c'est dans les pratiques² d'où résultent ces mouvements que peut être cherché le germe d'une explication, non dans la quantité globale, opaque et muette, qui reflète les pratiques en les confondant toutes ensemble. C'est ce que souligne fermement Ph. Hugon :

La représentation statique et statistique des équilibres comptables n'est pas à même de prendre en compte les diverses dynamiques des systèmes productifs ou sociaux (HUGON 1988 : 16).

Autrement dit encore, les grandeurs obtenues par objectivation ex post n'entretiennent et ne peuvent entretenir entre elles que des fantômes de relations. Ces grandeurs ne sont que le corrélat de pratiques, et s'il y a une relation quelque part, c'est bien évidemment entre les pratiques qu'il faut la chercher. Ou plutôt entre les groupes et les individus auteurs des pratiques. C'est la pratique qui explique l'objet, le faire qui explique ce qui est fait (VEYNE 1979 : 213-19). Et Wicksell s'exprime approximativement (ce qui n'est pas dans son habitude) quand il écrit que la science économique s'intéresse à "*des quantités substantielles* (*substantiella kvantiteter*), *des grandeurs mesurables*" dont elle cherche à "*éclairer les relations*" (WICKSELL 1937 : XXIX). Les quantités économiques sont mesurables, certes, mais si celles que traite la micro-économie peuvent être considérées comme "*substantielles*" dans la mesure où elles traduisent le comportement d'agents bien identifiés, cela est beaucoup moins vrai des agrégats macro-économiques qui, reflétant des comportements mélangés, ne peuvent exprimer des relations significatives.

1. Le Monde, 3 Septembre 1974.

2. Alfred Marshall ne dit pas autre chose : "*The problems which are grouped as economic ... relate specially to man's conduct under the influence of motives that are measurable by a money price*" (MARSHALL 1956 : 22).

Revenons à la distinction faite par G. G. Granger, et à laquelle il a été fait allusion plus haut, entre modèles scientifiques et simples artifices techniques : "La première position du problème, qui est celui de toute science en général, consiste à rechercher une structuration de l'opérateur qui, d'une part satisfasse à la condition générale de transformation des données dans les résultats observés, d'autre part soit conforme à toutes les observations qui peuvent éventuellement être faites sur son fonctionnement interne. L'ambition brute de la science serait donc de reproduire par un modèle abstrait non seulement un résultat global, mais encore le processus qui l'atteint ... La seconde position est plus modeste. Elle consiste à se contenter d'un modèle qui satisfierait aux exigences globales de transformation des données en résultats, sans qu'on s'astreigne en rien à percer le mystère de la "boîte noire". A première vue, il s'agit là d'une orientation purement technique, par opposition à l'orientation scientifique : il faut imiter la performance, mais nullement les moyens naturels d'y parvenir" (GRANGER 1988b : 271).

De cette distinction, on peut déduire que les modèles de la comptabilité nationale ou les modèles économétriques ont un caractère technique et non scientifique. Encore faut-il, comme prend soin de le faire G. Granger, noter que la construction de simples artifices techniques n'est pas sans permettre d'avancer progressivement vers des explications de type scientifique :

Il semble que l'imagination créatrice de modèles abstraits, libérée du souci de suivre pas à pas le détail des opérations de la nature, puisse ainsi donner libre cours à ses pouvoirs. Elle ne propose alors, il est vrai, que des artifices. Mais y a-t-il si loin de cette invention de machines à l'établissement de modèles vraiment explicatifs des phénomènes observés ? (GRANGER 1988b : 271-72).

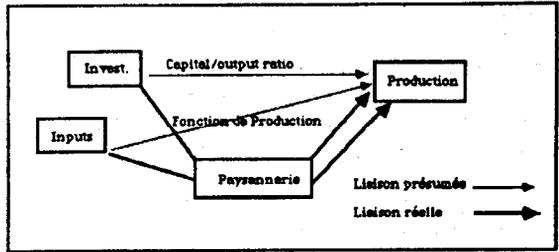
En fait, poursuit Granger,

L'orientation scientifique se distingue de l'orientation technique simplement en ceci qu'elle ne se contente pas de reproduire convenablement la transformation des entrées en sorties, mais qu'elle veut repousser de plus en plus avant dans l'organisation du modèle l'apparition de ces "boîtes noires... Dans le domaine des faits humains, les catégories scientifiques les plus générales et les plus fécondes sont apparemment plus difficiles à dégager que dans celui des autres phénomènes, et la longue marche qui peut être y conduit exige cette division de la difficulté en étages correspondant chacun à un progrès quelquefois dérisoire. Progressivement cependant, la grossière machine se complique, les boîtes noires sont refoulées de plus en plus loin au coeur de la structure qui se construit. Ainsi pouvons-nous dire que la position directe du problème d'explication par un modèle véritable ne prend bien souvent tout son sens que comme limite d'une suite de positions incomplètes et bornées, consistant à imaginer des machines auxquelles il est seulement

demandé de reproduire non les processus, mais les effets (GRANGER 1988b : 272-73).

La comptabilité nationale, et les modèles économétriques qui s'en nourrissent, reproduisent d'une certaine manière des transformations de données en résultats, ou des passages d'une situation 1 à une situation 2, mais en procédant à la façon d'une boîte noire, c'est-à-dire en mettant entre parenthèses le processus de transformation ou de passage. Tout se passe en fait comme si les modèles étaient peuplés de boîtes noires ou même comme s'ils coïncidaient, dans la totalité de leur extension, avec une seule boîte noire dont l'existence est si massive qu'elle n'est parfois même pas reconnue. Ainsi le modèle d'une filière-plante, en économie agricole, relie-t-il à la manière technique d'une fonction de production certains inputs caractéristiques - semences sélectionnées, par exemple - à une production ou à un accroissement de production. La boîte noire, généralement non figurée, serait celle qui, entre les inputs vulgarisés par la société de développement ou d'intervention d'une part, le produit attendu par les responsables du projet d'autre part, devrait signaler l'existence d'une paysannerie chargée de mettre en oeuvre le processus prévu. A l'évidence, ce qui se passe dans cette boîte noire est décisif, et le premier pas vers une scientificité accrue consisterait à reconnaître que la boîte noire existe et qu'elle occupe une position-clé. Ensuite on pourrait chercher à entr'ouvrir la boîte, à réduire ou à fragmenter son emprise dans le modèle ... Opérations éminemment délicates, ardues, scabreuses, dont les conditions de possibilité et les étapes ne sont pas toujours bien identifiées. La tendance actuelle est plutôt de "faire tourner" en l'état un modèle dont on sait bien pourtant qu'aucune simulation ne tirera beaucoup de lumière. Ce qui fait défaut, ce dont on a le plus besoin, à savoir l'invention de catégories conceptuelles neuves et la représentation (au sens littéral qu'affectionne Hagège) des faits pourvoyeuses d'un supplément de sens, tout cela est ressenti comme beaucoup moins nécessaire. Pourquoi ? Sans doute parce qu'on se laisse facilement impressionner par le bluff technologique, ou parce qu'on est trop respectueux des traditions académiques. De plus l'imagination requiert, pour s'épanouir, beaucoup de temps et une totale liberté, - biens rares que les chercheurs hésitent à réclamer ouvertement et que les dispensateurs de crédits craignent d'accorder.

Figure 2 Modèle d'une filière-planté



VI - CONCLUSION

Les pages précédentes n'auront pas été inutiles si elles ont fait naître ou si elles ont renforcé chez le lecteur un doute salutaire sur la nature des "modèles" construits et utilisés par nos disciplines. J'ai suggéré qu'en économie notamment le discours sur les modèles ne concorde pas avec la pratique d'une science peuplée de constructions métaphoriques sans lien avec les faits, scandée par des exposés de logique pure à vocation ornementale ou terroriste, encombrée de résumés d'intrigue abusivement revêtus de hardes mathématiques, tout cela pour aboutir à des modèles techniques dont le fonctionnement n'explique pas grand'chose. D'un côté donc, une revendication méthodologique à forte coloration positive, rationaliste, scientifique ; de l'autre une collection hétéroclite de procédés et de postures que nous devons à l'évidence aborder "comme un anthropologue aborde les contorsions mentales des guérisseurs d'une association de tribus nouvellement découvertes. Et nous devons être préparés à découvrir que ces contorsions sont totalement illogiques (du point de vue de la logique formelle) et ne peuvent être que totalement illogiques pour fonctionner comme elles le font " (FEYERABEND 1979 : 284).

Si le terme de "modèle" n'est pas employé à bon droit en sciences sociales, alors il faut tout faire pour corriger l'usage. On évitera ainsi d'entretenir et de propager des illusions sur le travail des historiens, des anthropologues, des géographes, des sociologues, des économistes ... On voit bien la fonction de ces illusions. Les sciences expérimentales pratiquant non sans succès la modélisation, on peut espérer faire accéder les sciences sociales au statut envié des sciences expérimentales en prétendant que les unes comme les autres emploient des procédures fondamentalement identiques. La question se complique du fait qu'une au moins des sciences sociales - la science économique - produit en effet des modèles, mais des modèles qui pour l'instant semblent de nature plus technique que scientifique. Dissiper ces ambiguïtés, c'est affirmer qu'une différence essentielle continue de séparer les sciences sociales -

dans leur état actuel - et les sciences expérimentales. Une fois retrouvée et redite cette monumentale banalité, il reste bien entendu à rappeler que la différence en question ne saurait donner lieu à jugement accordant aux sciences sociales une valeur (scientifique ?) moindre qu'aux sciences expérimentales. C'est pourtant parce que ce jugement de valeur est porté, ou parce qu'il persiste dans les mentalités, qu'on tolère ou qu'on pratique le brouillage analysé dans cette communication. Les "modèles" des sciences sociales ne sont pas des modèles - en tout cas pas des modèles scientifiques - mais en affirmant le contraire, on croit faire passer la sociologie ou l'économie à l'étage habité par la physique. Le plus regrettable, c'est qu'en dépensant de l'énergie à faire valoir ces fausses prétentions, on occulte la vraie nature des sciences sociales et on se dispense de progresser dans la voie qui leur est propre.

Si cette voie est autre que celle des sciences expérimentales, c'est parce que nos disciplines sortent toutes de l'histoire, dont elles ne sont à proprement parler que des provinces ou des prolongements. Cela signifie qu'assorti de secours techniques divers, le récit demeure le substrat et le moyen majeur des sciences sociales. Toutes les tentatives faites pour se distancier du récit - simplification, résumé, "évidement" - ne doivent pas faire oublier que notre contact avec le réel s'effectue par son entremise. Mis à part les cas assez rares où description et narration semblent permettre de dévoiler des structures simples, tout se passe comme si les pseudo-formalisations édifiées à partir du récit ne s'écartaient de lui qu'en l'abrégeant ou qu'en affinant, sur un plan purement technique, le maniement divertissant d'outils somme toute accessoires. Si l'on entre dans ces vues, il devient clair qu'au lieu de s'évertuer à imiter les physiciens - d'une époque déjà dépassée, paraît-il¹ - les spécialistes de sciences sociales gagneraient à perfectionner les procédés techniques qui permettent de construire un récit fidèle et maîtrisé dans le moindre de ses effets. On pense parfois que la chose va de soi, mais cette opinion montre assez combien l'on méconnaît les difficultés de la tâche, la richesse des moyens disponibles, les embûches à éviter, les différences possibles dans le résultat. Prendre cette mesure, c'est aussi prendre une orientation dont la fécondité est attestée par des travaux récents. On méditera sur ce point, entre autres, les justifications données par J. Bonnemaison au cheminement qui l'a conduit² à une approche qu'à la suite d'E. Morin, il qualifie d'"essayiste" :

L'école essayiste cherche à saisir les groupes humains dans leur liberté plutôt que dans leurs déterminations ; ce faisant, elle considère des su-

1- Mc CLOSKEY 1983, et particulièrement le paragraphe intitulé "Other sciences do not follow modernist methods" (pp. 491- 493).

2- *A très grands traits, je crois en effet avoir commencé ma recherche sur le terrain dans un esprit de démarche scientifique et l'avoir achevée dans un esprit d'essayiste*" (BONNEMAISON 1986 : 8).

jets sociaux qui ont leur sphère d'autonomie, leur propre projet et une marge plus ou moins importante de libre choix. Les phénomènes de représentation, les questions de sens et de valeurs, la dimension spirituelle et les attitudes de croyance, bref tout ce qui relève d'une certaine vision du monde, loin d'être écartés parce que non-objectifs ou non-scientifiques, reviennent au contraire au premier plan (BONNEMAISON 1986 : 7).

De même, un travail récent de D. Delaunay sur le Ceara brésilien montre bien tout ce qu'on peut attendre, en matière d'analyse du développement, d'un récit fondé sur une connaissance approfondie des sources historiques, sur une rigoureuse analyse des données démographiques (les plus importantes ...), sur une conception enfin opératoire de la notion de mode de production¹, sur des catégorisations établies à partir des rapports sociaux réels². Le résultat tient en quelques lignes, plus éclairantes que bien des modèles:

Sur quelle base s'effectue le développement de l'économie d'exportation (au Ceara) ? L'histoire nous apprend qu'il est avant tout parasite : l'élevage extorqua les moyens de production convoités (la terre et les bras, mais aussi le ventre des femmes) aux indigènes, plus tard les cultures de rente mobilisent ceux de l'économie domestique. Autrement dit, la croissance économique est moins l'aboutissement d'une accumulation productive du capital que d'un transfert de facteurs et de biens au préjudice du secteur autonome familial. Globalement, l'économie monétaire cearense croît au rythme de son principal facteur productif: le travail, dont la reproduction est entièrement à la charge de la famille. Si, après chaque conquête, cette croissance du secteur d'exportation est plus vigoureuse que celle de la population, c'est en puisant aux réserves accumulées par l'économie domestique. La vigueur du développement étant à la mesure de l'ampleur et surtout de la violence, du recrutement (DELAUNAY 1988 : 130).

Que cette reconnaissance du primat de l'histoire, cette réhabilitation du récit, cette orientation "essayiste", soient aussi, dans une certaine mesure, une redécouverte de la parenté qui unit littérature et "sciences" sociales, voilà qui n'est pas pour surprendre. Nous n'examinerons pas ici cette question capitale. Il suffira de rappeler que si l'on peut trouver aujourd'hui dans l'histoire la source commune de nos disciplines, un très

1. Economie domestique croissant au rythme de la population qu'elle est en mesure d'entretenir, économie d'exportation pastorale ou agricole répondant à une demande extérieure (coton, café, canne à sucre,...).

2. Fazendeiros, Indiens, Caboclos, paysans.

grand historien du XIX^{ème} siècle, Hyppolite Taine, osait donner pour modèle à ses collègues un romancier :

Stendhal¹. Ainsi la boucle se referme, et nous pouvons conclure. Le défi qui se pose aux chercheurs en sciences sociales, ce n'est pas - ou si peu - de fabriquer des modèles. C'est d'abord de bien écrire. Le reste leur sera donné par surcroît.

Nogent-sur-Marne, Juillet 1988

1. "Il y a un système particulier d'impressions et d'opérations intérieures qui fait l'artiste, le croyant, le musicien, le peintre, le nomade, l'homme en société ... Pour expliquer chacun d'eux, il faudrait écrire un chapitre d'analyse intime et c'est à peine si aujourd'hui ce travail est ébauché. Un seul homme, Stendhal, par une tournure d'esprit et d'éducation singulière, l'a entrepris, et encore aujourd'hui la plupart des lecteurs trouvent ses livres paradoxaux et obscurs ; son talent et ses idées étaient prématurés ; on n'a pas compris ses admirables divinations, ses mots profonds jetés en passant, la justesse étonnante de ses notations et de sa logique ; on n'a pas vu que sous des apparences de causeur et d'homme du monde, il expliquait les plus compliqués des mécanismes internes, qu'il mettait le doigt sur les grands ressorts, qu'il importait dans l'histoire du cœur les procédés scientifiques, l'art de chiffrer, de décomposer et de déduire, que le premier il marquait les causes fondamentales, j'entends les nationalités, les climats, et les tempéraments ; bref qu'il traitait des sentiments comme on doit en traiter, c'est-à-dire en naturaliste et en physicien, en faisant des classifications et en pesant des forces". (TAINE 1863, I, p. XLIV) Taine était ainsi d'accord, d'avance, avec le jugement formulé par Nietzsche en 1882 dans *Le Gai Savoir*: "Stendhal, qui peut-être de tous les Français de ce siècle, a eu les yeux et les oreilles les plus riches de pensée ..." (NIETZSCHE 1974 : 169)

VII. BIBLIOGRAPHIE

ADEMOLA OYEJIDE (T.) - 1986a - Sector proportions and Growth in the Development of the Nigerian Economy. Communication au VIII^{ème} Congrès de l'Association Economique Internationale de New Delhi (1-5 déc. 1986). Thème 2 : Sector Proportions and Economic Development, Country Case Studies, pp. 57-95. (Ce texte a été analysé dans le Bulletin Bibliographique de l'INSEE-Coopération, n°13, avril 1987).

ADEMOLA OYEJIDE (T.) - 1986b - The effects of trade and exchange rate policies on agriculture in Nigeria, IFPRI Research Report n°55, Washington, 61 p.

ANSON-MEYER (M.) - 1983 - Le mythe de la comptabilité nationale en Afrique, Revue d'Economie Politique, n°1, pp. 86-111.

BACHELARD (G.) - 1987 - Le nouvel esprit scientifique, Paris, PUF, 183 p

BADOUIN (R.) - 1985 - Le développement agricole en Afrique tropicale, Paris, Cujas, 320 p

BALMORI (D), VOSS (S.F.), WORTMAN (M) - 1984 - Notable Family Networks in Latin America, Chicago, University of Chicago Press, 230 p

BARE (J.F.) - 1987 - Pour une anthropologie du développement économique, Etudes rurales; n° 105-106, p 267-298

BASIL (O.) - 1985 - Trakt, Reinbek b. Hamburg, Rohwolt, 181 p

BAUDELAIRE (Ch.) - 1972 - Mon cœur mis à nu, Paris, Le Livre de poche, 273 p

BAUER (P.T.) et YAMEY (B.S.) - 1963 - The Economics of Under-developed Countries, Cambridge University Press, 271 p

BEAUMOND (A.) - 1988 - Elite et changement social : l'histoire du groupe de Xalapa et la caféiculture mexicaine 1880-1987, Thèse de docteur ingénieur en économie et sociologie rurales, ENSA de Montpellier, 348 p + annexes 125 p

BONNEMAISON (J.) - 1986 - L'arbre et la pirogue, Paris, Orstom, Collection Travaux et documents, n° 201, 540 p

BOULDING (K.E.) - 1955 - Economic Analysis (3d ed), Harpers & Brothers, New York, 905 p

BRUNET (R.) - 1987-88 - Apprendre à lire dans les cartes, Préfaces, n° 5, pp 98-103

BRUTER (Cl.) - 1982 - Les architectures du feu, Paris, Flammarion, 234 p

BYE (M.) - 1959 - Relations économiques internationales, Paris, Dalloz, 536 p

CARLYLE (Th.) - 1955 - The French Revolution, Londres, Dent, Everyman's lib, 2 volumes, 351 et 399 p

CHAMFORT (S.) - 1968 - Maximes, pensées, caractères et anecdotes, Paris, Garnier-Flammarion, 439 p

CHAUVEAU (J.P.) et DOZON (J.P.) - 1987 - Au cœur des ethnies ivoiriennes, l'Etat, in l'Etat contemporain en Afrique, Paris, l'Harmattan, 418 p, p 221-296

CHAUVEAU (J.P.) et RICHARD (J.) - 1977 - Une périphérie recentrée : à propos d'un système local d'économie et de plantation en Côte d'Ivoire, Cahiers d'Etudes Africaines, n° 68, XVII-4, pp 485-523

CHAUVEAU (J.P.) et RICHARD (J.) - 1983 - Bodiba en Côte d'Ivoire. Du Terroir à l'Etat : petite production paysanne et salariat agricole dans un village gban, Paris, Orstom, Atlas des St. agraires au sud du Sahara., n° 19, 119 p

COLIN (J.P.) - 1987 - La mutation d'une économie de plantation. Contribution à l'analyse de la dynamique des systèmes productifs agricoles en Basse Côte d'Ivoire, Thèse de 3° cycle, Université de Montpellier I, Faculté de droit et de sciences économiques, 533 p (en 2 volumes)

CORDEN (W.M.) et NEARY (J.P.) - 1982 - Booming sector and de-industrialization in a small open economy, The economic journal, 92, pp 825-848

COUTY (Ph.) - 1984 - La vérité doit être construite . Cahiers de l'ORSTOM série Sc. Hum., Vol. xx, N°1, pp. 5-15

COUTY (Ph.) - 1987 - Développement autonome et compensation Etudes Rurales n° 105-106, pp. 299-313

COUTY (Ph.) - 1987b - Figures et Pratiques du Développement : l'artilleur et le tisserand, in Terrains et Perspectives, Paris, ORSTOM, 453 p., pp. 373-85 .

COUTY (Ph.) - 1988 - Voir et comprendre le changement dans les sociétés paysannes africaines . Un point de vue d'économiste, I.U.E.D., Genève, Atelier sur la recherche-développement, 11-15 avril 1988, 26 p; multigr.

CULMAN (H.) - 1965 - Les Comptabilités Nationales . Paris, PUF, Que Sais-Je ? 128 p.

DAUCE (P.) et PERRIER-CORNET (P.) - 1986 - Région et Développement de l'Agriculture, INRA, Cahiers d' Economie et Sociologie rurales, N°2, 139 p.

DELAUNAY (D.) -1988 - La fragilité séculaire d'une paysannerie nordestine. Le Ceara (Brésil). Paris, ORSTOM, Coll. Etudes & Thèses, 193 p..

Un article sur le même sujet (Indien, caboclo et paysan; Formation du paysannat dans un état nordestin du Brésil, le Ceara) est paru dans les Cahiers de l'ORSTOM, série SC. Hum., Vol. XX, N°1, 1984, pp. 43-68 .

DURUFLE (G.) - 1988 - L'ILTA, une occasion manquée . Afrique Contemporaine N° 146 pp. 61-69 .

FABRA (P.) -1979 - L'anticapitalisme . Essai de Réhabilitation de l'Economie Politique, Paris, Flammarion, Coll. Champs, 505 p.

FEYERABEND (P.) - 1970 - Contre la méthode . Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance . Paris, Seuil 350 p.

FURTADO (C.) - Théorie du Développement Economique, Paris, PUF, 246 p.

- GIDE (Ch.) et RIST (Ch.) - 1926 - Histoire des Doctrines Economiques depuis les Physiocrates jusqu'à nos jours . Paris, S.A. du Recueil Sirey, 814 p.
- GIRARD (R) - 1978 - Des choses cachées depuis le commencement du monde . Paris, Grasset, 631 p.
- GIRARD (R.) - 1982 - Le Bouc Emissaire, Paris, Grasset, 314 p.
- GRANGER (G. G.) - 1988a - Pour la connaissance philosophique, Paris, Odile Jacob, 283 p.
- GRANGER (G. G.) - 1988b - Essai d'une philosophie du style, Paris, Odile Jacob 309 p.
- GUIITON (H.) - 1957-58 - Cours de statistique et de méthodes d'observation, Paris, Les Cours de Droit, Licence 3ème année, 700 P. multigr.
- HUSSON (M.) - 1987 - Réflexions autour d'un modèle de l'économie mexicaine, STATECO (INSEE-Coopération) N° 49, pp. 69-83.
- HAGEGE (Cl - 1986 - L'homme de paroles . Contribution linguistique aux Sciences Humaines, Paris, Fayard, Folio-Essais, 406 p.
- HUGON (Ph.) - 1988 - Mythes et limites des perspectives économiques sur l'Afrique, Afrique Contemporaine N° 146, pp. 12-20.
- IMBS (F.) - 1987 - Kumtaabo ; Une collectivité rurale mossi et son rapport à l'espace (Burkina Faso) . Paris, ORSTOM, Atlas des Struc . Agraires au Sud du Sahara N° 21, 233 p.
- INSEE - 1987 - Système élargi de comptabilité nationale, Coll. de L'INSEE N° C 140 - 41, 426 p.
- KIERKEGAARD (S.) - 1963 - Journal 1834-1846, Paris, Gallimard, 466 p.
- LALANDE (A.) - 1976 - Vocabulaire technique et critique de la philosophie, Paris, PUF, 1323 p.
- LEPLAIDEUR (A.) et RUF (F.) - 1980 - Quelques éléments sur l'évolution historique des économies de plantation en zone forestière africaine. Comm. au Colloque de la SFER Paris, 22-23 Octobre 1980, 12 p. multigr. (Résumé paru dans Economie Rurale n° 142, 1981)
- LOMBARD (J.) - 1988 - Problèmes alimentaires et stratégies de survie dans le Sahel sénégalais. Les paysans serer. Thèse de 3ème cycle, Univ. de Paris-X/Nanterre, UER de Géographie, 404 p. multigr.
- LUCRECE - 1954 - De la nature (trad. H. Clouard), Paris, Classiques Garnier, 449 p.
- MALINVAUD (E.) - 1964 - Initiation à la comptabilité nationale, Paris, Imprimerie nationale et PUF, 237 p.
- MARSHALL (A.) - 1956 - Principles of Economics, Londres, McMillan, 731 p.
- McCLOSKEY (D.) - 1983 - The Rhetoric of Economics, Journal of Economic Literature, Vol XXI, Juin, pp. 481-517.
- MEILLASSOUX (Cl.) - 1977 - Terrains et Théories, Paris, Anthropos, 344 p. Cet ouvrage contient une réédition de l'article paru dans les Cahiers d'Etudes Africaines, 1960 - 4, pp.

38-67 : Essai d'interprétation du phénomène économique dans les sociétés traditionnelles d'auto-subsistance.

NIETZSCHE (F.) - 1974 - *Le gai savoir*, Paris, UGE, 10/18, 440p.

NIKITINE (P.) - s. d. - *Principes d'Economie Politique*, Moscou, Ed. en langues étrangères, 461 p.

NIMIER (R.) - 1973 - *Les épées*, Paris, Gallimard, Coll. Folio, 158 p.

OLIVE (G.) - 1979 - *Antimanuel de macroéconomie*, Les Cahiers Français n° 189, 72 p. + 8 notices.

PHELINAS (P.) - 186 - *Politique des prix du riz, incitation à la production et effet sur la répartition des revenus dans six pays africains*. Thèse de 3ème cycle, Univ. de Clermont-I, Fac. des Sc. Eco. & Soc., 383 p. multigr.

PLATON - 1969 - *Sophiste, Politique, Philèbe, Timée, Critias* (trad. E. Chambry) Paris, Garnier-Flammarion, 511 p.

POLANYI (K.) - 1967 - *The great transformation. The political and economic origins of our time*. Beacon Press, Boston, 315 p. (trad. française : Gallimard, Paris, 1983, 420 p.)

PROUST (M.) - 1954 - *A la recherche du temps perdu*, Paris, Gallimard, la Pléiade, 3 vols, 1002, 1224 et 1324 p.

de RAVIGNAN (F.) - 1988 - *L'intendance ne suivra pas. Essai sur l'avenir de l'agriculture française*. Paris, la Découverte, 165 p.

RAYNAUT (Cl.) - 1978 - *Aspects socio-économiques de la préparation de la nourriture dans un village hausa (Niger)*. Cahiers d'Etudes Africaines 68, XVII, 4 pp. 569-597.

RAYNAUT (Cl.) - 1987a - *Réflexions et propositions concernant un programme de recherche sur les problèmes de l'énergie au Kenya*, GRID-Bordeaux, 26 p. multigr.

RAYNAUT (Cl.) - 1987b - *La crise sahélo-soudanaïenne. Un paradigme possible pour l'analyse des relations milieu-sociétés-techniques*. Tables Ronde sur les enjeux de la tropicalité. Paris, CNRS, 17 p. multigr.

RICARDO (D.) - 1965 - *The Principles of Political Economy and Taxation*, Londres, Dent. Everyman's Library, 300 p.

ROBINSON (J.) - 1961 - *Exercises in Economic Analysis*, Londres, Macmillan & Co 242 p.

RUEFF (J.) - 1948 - *L'ordre Social*, Paris, Librairie de Médicis, 658 p.

SUDRIE (O.) - 1988 - *L'apport des modèles prévisionnels dans l'étude des perspectives économiques de l'Afrique à l'horizon 2000*. Afrique contemporaine n° 146, pp. 38-49.

TAINÉ (H.) - 1863 - *Histoire de la littérature anglaise*, Paris, Hachette, 4 vols., 527, 706, 677 et 494 p.

TEILHARD de CHARDIN (P.) - 1955 - *Le Phénomène Humain*, Paris, Seuil, 348 p.

THOMAS D'AQUIN - 1881 - De veritate catholicae fidei contra gentiles. Paris, Bloud et Barral, 654 p.

UNGARETTI (G.) - 1969 - Innocence et Mémoire, Paris, Gallimard, 374 p.

La VARENDE (J. de) - s. d. - Les Cent Bateaux de la Varende, Caen, Imprimerie des papeteries de Normandie, 79 p.

VEYNE (P.) - 1979 - Comment on écrit l'histoire, suivi de Foucault révolutionne l'histoire. Paris, Seuil, Coll. Points-Histoire, 242 p.

WICKSELL (K.) - 1937 - Föreläsningar i Nationalekonomi, Lund, Gleerups Förlag 2 vols. 257 et 256 p.