



Environnement et Développement durable



Contribution de la Recherche Française
dans les Pays en Développement

**Environnement et
développement durable
Contribution de la
Recherche Française
dans les pays en
développement**

Directeur de la publication :

Rémy Pochat, Département Recherche pour le Développement, Direction Générale de la Recherche et de la Technologie, Ministère de la Recherche et de l'Espace.

Coordination éditoriale :

Jean-François Turenne, directeur de recherche à l'ORSTOM, Michel de la Serve, MRE.
Avec le soutien de l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM).

Comité de lecture :

R. Barbault (ENS), B. Dessus (CNRS), O. Dolfus (Université de Paris VII), M. de la Serve (MRE), A. Pavé (CNRS), R. Pochat (MRE), J.F. Turenne (ORSTOM).

Secrétariat de rédaction :

Service de l'Information et de la Communication du Ministère de la Recherche et de l'Espace.

Photo de couverture CNRS

Catherine Miller et Jean-Pierre Rivière

Conception graphique, photocomposition :

Tribord Amure 42 57 01 66.

Impression : AGL Imprimerie Maringues (63).

Sommaire

I. Populations et paysages

- Gestion patrimoniale des terres, des ressources naturelles et des terroirs : la prise en compte des logiques communautaires
Etienne Le Roy 5
- Population et développement en Afrique, au Sud du Sahara
Francis Gendreau 6
- Dynamique des systèmes agraires
P.M. Bosc, J. Faye, P. Milleville. 8
- La dégradation des milieux en zones arides
A. Comet, E. Le Floch'h 10
- Productivité primaire comparée des écosystèmes pâturés au Nord et au Sud du Sahara
Ch. Floret, H.N. Le Houérou, R. Pontanier 12
- Les oasis, espace intensivement cultivés dans un environnement marqué par l'aridité. Travaux de recherche pour le maintien et le développement de l'agriculture d'oasis
V. Dolle, M. Ferry, G. Toutain 14
- Epidémiologie et manipulation des eaux de surface
J. Brengues, J.P. Hervé, J.M. Hougard, J. Mouchet 16
- Les pâturages sahéliers et leur gestion
A. Gaston, J. César 18
- Forêt et alimentation
C.M. Hladik, A. Froment, A. Hladik 20
- L'interface savane-forêt
Jean-Claude Menaut 22
- La mangrove
Cl. Marius 23

II. Variabilité climatique

- Crises climatiques et phénomènes migratoires
E. Bemus, A. Bourgeot 26
- Un Sahel désert ou un Sahara vert
N. Petit-Maire 27
- La prévision climatique
J.F. Royer, J.P. Céron 31
- Variabilité historique et récente
B. Fontaine, S. Janicot 33

III. Des ressources

- Diversité biologique
P. Charles-Dominique, J.L. Guillaumet 36
- La conservation des ressources génétiques végétales du domaine tropical
A. Charrier 37
- La gestion de la fertilité des terres tropicales : l'intensification agricole
Christian Pieri 40
- Etats de surface et gestion de l'eau
Christian Valentin 41
- Les eaux souterraines
J.J. Collin 43
- La lutte contre les trypanosomoses animales pour une production durable
G. Tacher, D. Cuisance, J.L. Frézil 45



Les impératifs du développement, les changements climatiques, les évolutions socio-économiques, la préservation des ressources naturelles sont autant de défis à relever, autant d'innovations sociales et technologiques à mettre en oeuvre.



es enjeux planétaires mobilisent la recherche scientifique.

Elle dispose d'un atout précieux pour y faire face : l'espace de dialogue qu'elle a su créer à l'échelle internationale.

Cet ouvrage réunit des exemples de recherches menées, en partenariat, par des équipes françaises et des équipes de pays du Sud, dans le cadre de programmes de coopération. Ils montrent que la prise en compte de l'environnement est une condition essentielle d'un développement durable.

L'évolution des systèmes techniques vers plus de sobriété est parfois nécessaire pour cela.

Au-delà des réponses auxquelles la recherche scientifique peut contribuer, des choix éthiques resteront à faire, au Nord comme au Sud, en faveur de modes de vie qui préservent un progrès régulier vers une vie meilleure.

**Hubert Curien
Ministre de la Recherche
et de l'Espace**

• La macrofaune du sol <i>Patrick Lavelle</i>	48
• Les ressources aquatiques vivantes et leurs usages <i>Jean René Durand, Jacques Weber</i>	49
• L'écosystème corallien : évolution et modélisation <i>Francis Rougerie</i>	50

IV. Innovations, technologies et méthodes

• Modélisation, bases de données et bases de connaissances pour l'environnement <i>Alain Pavé</i>	54
• Télédétection spatiale <i>François Blasco</i>	57
• La fixation biologique de l'azote <i>J.J. Drevon, B. Dreyfus, M. Gueye, R. Serraj</i>	59
• Modélisation de la croissance forestière <i>J.C. Bergonzini, F. Houllier</i>	61
• Gestion sylvicole et qualité du bois <i>B. Thibaut, D. Guitard, M. Fournier</i>	63
• Energies renouvelables et développement <i>Bernard Chabot</i>	65
• Transport urbain, développement et environnement : la nécessaire recherche des formes de transport adaptées <i>Xavier Godard</i>	66

• L'habitat bioclimatique <i>E. Durand, J. Gandemer</i>	67
• Le traitement anaérobie des eaux résiduaires au Mexique <i>J.P. Guyot, J.L. Garcia, O. Monroy, A. Noyola</i>	69
• La modernisation de la gestion des entreprises en Afrique : une forme d'innovation <i>Alain Henry</i>	70

V. Annexes

• Les bases de données	72
• Rio, un réseau international de la Recherche dans les pays en développement <i>Monique Michaux, Pascal Renaud</i>	73
• Les structures relais dans le monde	74
• Adresses des principaux organismes de recherche français	76

Population et paysages

L'explosion démographique est le facteur majeur des bouleversements dont l'Afrique subsaharienne est le théâtre, un phénomène qui devrait porter sa population de 500 millions à 1 milliard 200 millions dans 30 ans.

A ce dynamisme démographique sans précédent historique répond spontanément une mobilité spatiale échappant à toute appréciation statistique : migrations du travail dispersant les originaires du Haut Sénégal, de New-York à Lubumbashi, migrations définitives transformant en défricheurs des dernières forêts équatoriales et en planteurs de cacao les Mossi des franges sahéliennes du Yatenga...

D'

où une redistribution du peuplement qui a contribué à multiplier par trois depuis 1960 la population de la Côte-d'Ivoire alors que celle de ses voisins septentrionaux doublait. Autre expression essentielle de cette mobilité : l'urbanisation. Depuis les années soixante, la place des citadins dans les Etats riverains de l'Atlantique est passée de 15 à 20 % à quelque 50%.

Globalement, cette redistribution des hommes est synonyme de flux migratoires dominants de l'intérieur continental vers les périphéries côtières, et des savanes sahélo-soudaniennes vers la forêt équatoriale.

L'environnement enregistre ces phénomènes avec une soudaineté d'autant plus brutale que le milieu naturel est plus vulnérable, c'est à dire l'insécurité climatique plus grave. D'où des tropiques secs fragilisés par le double impact d'imprévisibles accidents pluviométriques - inscrits dans la définition même des climats sahéliens - et d'excédents démographiques générateurs d'une désertification directement imputable à l'homme. D'où des tropiques pluvieux dont les forêts sont balayées par des fronts de défrichement où se déploient techniques expéditives, projets spéculatifs et stratégies foncières.

Mais les pionniers sont aussi agents d'émancipation sociale et de modernité. Canaliser leur dynamisme au service d'une sédentarisation de leurs emprises spatiales, d'une maîtrise sociale de la nature, est la seule réponse possible à la multiplication des hommes et à leurs aspirations au progrès, en dépit des rêveries écologistes contraires. Que l'environnement soit ainsi le produit de la société met en pleine lumière la responsabilité des initiatives humaines dans sa gestion. Dans l'Afrique de cette fin de siècle, la pratique de cette responsabilité est désormais conditionnée par une notion nouvelle : la sécurité foncière ; aucun investissement à long terme, aucun aménagement rationnelle de l'espace n'est concevable sans responsabilisation des acteurs, c'est à dire sans que la pérennité de leurs droits leur soit assurée.

A l'inertie des milieux naturels, l'action humaine substitue l'instable équilibre d'environnements issus de la combinaison des techniques et des encadrements : c'est dire qu'aucun alibi climatique n'exonère nos sociétés de leur responsabilité primordiale dans la gestion d'un monde dont les ressources sont loin inépuisables

Paul Péllissier

Professeur émérite de l'Université Paris X

Gestion patrimoniale des terres, des ressources naturelles et des territoires : la prise en compte des logiques communautaires

Un développement fondé sur des valeurs endogènes et, souvent, communautaires, peut devenir durable et reproductible.

Etienne Le Roy

Professeur à l'Université de Paris I
Directeur du lab. d'anthropologie juridique de Paris - Président de l'APREFA

À la fin des années soixante, aux USA, la gestion des ressources utilisées en commun a été abordée en des termes volontairement dramatiques. Hardin, dans un article de Science sur la "tragedy of commons" y développe une thèse que l'on peut résumer comme suit : "Tout le monde a intérêt à exploiter et à surexploiter ce qui n'appartient à personne, c'est-à-dire les biens communs. Hardin en tirait la conclusion que "seule l'appropriation privée individuelle de ces ressources assurait la meilleure gestion car seuls des propriétaires peuvent protéger leurs revenus".

**Fondée sur les précédents anglais du par-

tage des communaux au XVII^e siècle comme sur les premiers signes d'une crise de l'environnement déjà perceptible aux Etats-Unis, la thèse de Hardin a eu un écho très profond. Elle n'a pris de l'importance dans les travaux français ou francophones qu'à une date plus récente.

Le retard et les réticences de la recherche française ne sont pas simplement liés à la classique méconnaissance des travaux de part et d'autre de l'océan Atlantique. Perçue alors comme extraordinairement simplificatrice, la thèse de Hardin a été ignorée aussi longtemps que le néo-libéralisme n'est pas devenu une doctrine dominante.



Les collines de Sambama (hautes terres malgaches), autrefois gérées en pâturages collectifs, ont fait l'objet de plantations familiales d'eucalyptus robusta, exploitées en taillis, puis d'une appropriation qui combine règles traditionnelles et modernes et fait de son régime foncier un prototype de solution communautaire à généraliser en Afrique continentale.

Cliché E. Le Roy, LAJP-CIRAD-FOFIPA, mars 1991

*La citation et le commentaire sont tirés de L'appropriation de la terre en Afrique noire, Paris, Karthala, déc. 1991, p. 359.

Durant les années soixante-dix, en France et dans les pays francophones, la gestion des ressources communes est abordée de deux manières, l'une classique, l'autre anthropologique et marginale par rapport aux recherches précédentes.

Classiquement en France, au moins depuis le "colbertisme" au XVII^e siècle, c'est à l'Etat que revient la mission de se substituer aux interventions des particuliers lorsqu'ils sont défaillants et que l'intérêt général l'exige.

C'est donc une gestion publique qui est envisagée. Dans les pays francophones en développement, singulièrement en Afrique noire, cette conception se traduit par des politiques et par un droit du développement qui transcrivent de façon souvent mimétique les précédents français.

Les réformes foncières, agraires, domaniales ou forestières ont été presque unanimement des échecs cinglants qui ont conduit à repenser la question de l'efficacité de ces politiques et de la conception "publique" présidant à la gestion des choses communes.

Pourtant ce n'est pas à l'alternative d'une gestion privée, donc à la thèse de Hardin, que conduisent les travaux contemporains. Après 1968, des travaux anthropologiques avaient été initiés sur le fonctionnement des "communautés", en France et en Amérique latine. On y valorisait la description de l'insertion de ces sociétés dans leur environnement. Les chercheurs rencontraient également, sur le terrain, leurs collègues anglophones travaillant sur l'usage de la terre (land use) et des ressources naturelles dans une perspective d'écologie culturelle.

Mais, pour aller plus loin et comprendre les modalités de gestion des ressources, sur des domaines surtout africains, il fallait selon la terminologie anglaise, passer du "land use" au "land tenure".

En examinant la manière de tenir ou de détenir la terre ou l'arbre et la gestion des terroirs, la recherche africaine a d'abord identifié l'impossibilité d'enfermer les modes locaux et contemporains dans la stérile opposition entre les formes publique et privée de gestion. Ces classifications sont propres aux sociétés modernes et individualistes occidentales alors que les processus sociaux et juridiques africains restent marqués par le communautarisme.

Une telle problématique, constituée à la fin des années soixante-dix, a été valorisée par



En Afrique occidentale, le paillage des sols et les cordons pierreux contribuent à la lutte anti-érosive et à une gestion communautaire des terroirs selon une approche participative expérimentée par la coopération française.
Cliché E. Le Roy en zone CMDT, Mali, janvier 1991

une initiative du Ministère Français de la Coopération, en 1978, permettant de faire émerger un nouveau réseau de chercheurs sur la question foncière.

Les résultats les plus récents des travaux de ce groupe, publiés sous la forme d'un manuel à l'usage des praticiens, permettent de tirer les conclusions suivantes sur les nouvelles formes de gestion patrimoniale : si

on doit savoir gré à Hardin d'avoir posé une bonne question en 1968, il n'est plus possible, en 1992, de l'enfermer dans une alternative non seulement stérile dans beaucoup de cas mais, en outre, inopérante dans de nombreuses situations rencontrées par les pays du Sud. Seul en effet un développement fondé sur des valeurs endogènes et, souvent, communautaires peut devenir "durable et reproductible".

- (1) BROMLEY D et CERNEA M. The management of Common Property Natural Resources - some conceptual and Operational Fallacies, World bank discussion paper, n° 57, 1989, 66p
- (2) CHAUVEAU J-P. "La pêche artisanale et les ressources naturelles renouvelables". L'appropriation de la terre, Paris, Karthala, 1991, p. 109-115.
- (3) FALQUE M. Nouvelle économie des ressources et gestion patrimoniale, Paris, Ministère de l'Agriculture, bureau de l'évaluation et de la prospective, 1988, 49 p.
- (4) G. HARDIN "The tragedy of the commons". Science, n°162, 1968, pp 1243-1248.
- (5) LE BRIS E, LE ROY E, MATHIEU P. (eds) L'appropriation de la terre en Afrique noire, manuel d'analyse, de décision et de gestion foncières publié à l'initiative de l'association pour la Promotion des Recherches et Etudes Foncières en Afrique (APREFA), Paris, Karthala, 1991, 359p
- (6) LE ROY "Une doctrine foncière pour l'Afrique noire de l'an 2000". L'avenir des Tiers Mondes, Paris, PUF, 1991
- (7) A. MARTY "Crise rurale en milieu nord sahélien et recherche coopérative, thèse de doctorat d'Etat en sociologie du développement, Université de Tours, 1985
- (8) P. MATHIEU "Tragédies ou bienfaits des ressources communes ?" L'appropriation de la terre", Paris, Karthala, 1991, pp. 336-338.
- (9) WADE R. "The management of common property resources . finding a cooperative solution" The World Bank Research, vol. 2, N° 2, 1987

Population et développement en Afrique au sud du Sahara

La croissance démographique en Afrique sub-saharienne, à la lumière de son contexte économique, social et culturel.

Francis Gendreau

Directeur de recherche à l'ORSTOM
Directeur du CEPED

L'évolution démographique est un élément

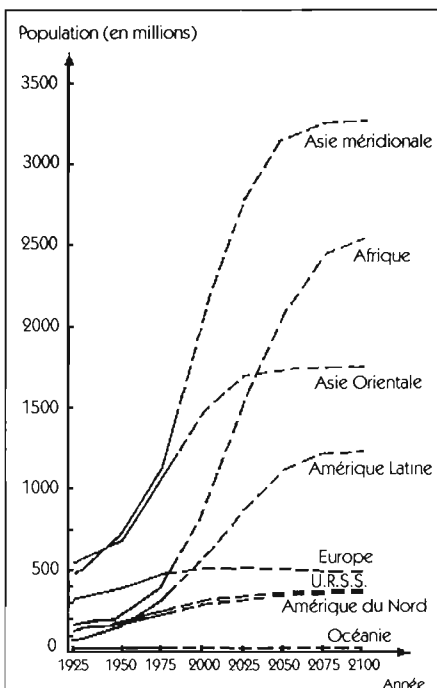
important de la réflexion sur le développement durable du Tiers-Monde.

Les démographes français participent à la recherche menée dans ce domaine, notamment en Afrique au sud du Sahara.

Au-delà de l'accumulation des données

quantitatives de base et de la description des phénomènes, la recherche concerne l'étude des déterminants et l'élaboration de schémas explicatifs. Les problématiques intègrent les phénomènes démographiques dans leur contexte économique, social et culturel pour essayer de démêler l'écheveau des relations complexes entre population, développement et environnement.

Les caractéristiques de la démographie de l'Afrique au sud du Sahara induisent des



Source : Nations Unies

Evolution de la population par grande région, dans l'hypothèse d'une stabilisation de la population mondiale à un peu plus de 10 milliards vers la fin du siècle prochain.

orientations particulières pour la recherche : croissance démographique rapide ; fécondité élevée ne semblant guère s'orienter à la baisse ; mortalité qui a certes diminué, mais qui reste encore forte ; mouvements migratoires intenses, notamment urbanisation rapide ; jeunesse de la population.

Trois grands axes de recherche

Le premier s'intéresse aux raisons du maintien de la forte fécondité, alors que partout ailleurs dans le Tiers-Monde, celle-ci a diminué.

Les résultats de la recherche montrent l'importance de certains facteurs : forte nuptialité, mortalité infantile élevée, structures sociales favorisant l'accueil de l'enfant, participation précoce de celui-ci à l'activité économique, garantie qu'il constitue pour la vieillesse des parents.

Les recherches actuelles visent à préciser et quantifier ces résultats et à comprendre les mécanismes selon lesquels agissent les variables socio-culturelles : structures familiales, éducation, statut de la femme.

Si la fécondité amorce prochainement une baisse (certains pays semblent être déjà dans cette situation), il faut disposer d'ob-

servations fines et produire des analyses permettant d'aider les gouvernements dans la mise en oeuvre éventuelle de politiques de maîtrise de la fécondité.

Un second domaine important d'investigations est celui de la mortalité, étendu à la morbidité et aux politiques de santé. C'est ainsi que les enquêtes ont mis en évidence le niveau élevé de la mortalité des jeunes enfants jusque vers deux ou trois ans. Cette situation est due aux défaillances du système de santé, mais aussi à de nombreux facteurs non directement médicaux comme les conditions de vie et d'hygiène ou le niveau d'éducation des populations.

D'où la nécessité d'intégrer la lutte contre la mortalité dans une politique cohérente de développement prenant en compte en particulier l'éducation de femmes : information sanitaire de base, conseils nutritionnels simples, bonne compréhension des rôles de l'hygiène et du régime alimentaire. Comme pour la fécondité, les recherches mettent aujourd'hui l'accent sur les facteurs culturels et sociaux (la prise de décision au sein du ménage en matière de santé, les itinéraires thérapeutiques...).

Enfin, de nombreux travaux sont relatifs aux migrations et à l'urbanisation. Les recherches récentes se sont particulièrement intéressées à des questions comme les stratégies migratoires (exode rural, migrations de retour ...), ou l'insertion urbaine des migrants (réseaux de solidarité, liens conservés avec le village d'origine...).

Ces études sont importantes pour l'aménagement du territoire, le développement rural et la gestion urbaine. Elles mettent en relation les dynamiques démographiques avec les conditions de la production agricole (systèmes agraires, régimes fonciers, dégradation des sols, techniques de production), avec l'économie urbaine (création d'emplois, chômage et sous-emploi, secteur informel, construction de logements, approvisionnement des villes) et, de façon plus générale, avec la crise économique qui frappe tous les pays de la région. Les questions évoquées précédemment sont d'autant plus importantes que la population de l'Afrique au sud du Sahara pourrait dépasser 1,2 milliard d'habitants en 2025 et connaître encore à cette époque un taux d'accroissement élevé.

Le CEPED

Créé début 1988 pour renforcer, animer et coordonner l'action de la France sur les questions de population dans le Tiers-Monde, le Centre Français sur la Population et le Développement (CEPED) a été constitué sous la forme d'un groupement d'intérêt scientifique entre cinq organismes :

EHESS (Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales) - INED (Institut National d'Etudes Démographiques) - INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) - ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) - Université Pierre et Marie CURIE (PARIS VI)

Ses activités sont multiples (recherches, formation, accueil de chercheurs étrangers, documentation, coopération technique) dans le domaine de la population et de ses interrelations avec le développement.

Il réalise des programmes en coopération avec de nombreuses institutions du Sud, parmi lesquelles on peut citer, en Afrique : le CERPOD (Centre d'Etudes et de Recherche sur la Population pour le Développement, Bamako) - l'IFORD (Institut de Formation et de Recherche Démographiques, Yaoundé) - l'Unité de Recherche Démographique de l'Université du Bénin (Lomé)

Pour tous renseignements : CEPED 15, rue de l'Ecole de Médecine 75270 Paris cedex 06 - tel : 46 33 99 41

- (1) BARBIERI M. 1991, "Les déterminants de la mortalité des enfants dans le tiers-monde", Les dossiers du CEPED, n°18, Paris, 40 p.
- (2) CANTRELLE P., LOCOH T. 1990, "Facteurs culturels et sociaux de la santé en Afrique de l'Ouest", Les dossiers du CEPED, n°10, Paris, 36 p.
- (3) CHESNAIS J.C. 1986, "La transition démographique", Travaux et documents de l'INED, n°113, Paris, 580 p.
- (4) GENDREAU F., CANTRELLE P. 1989, "Prospective des déséquilibres mondiaux : démographie et santé", Les dossiers du CEPED, n°7, Paris, 33 p.
- (5) GENDREAU F. 1991, "La démographie du développement", in "Recherches récentes en langue française sur le développement", Les cahiers du GEMDEV, n°18, Paris, pp85-104
- (6) GENDREAU F., MEILLASSOUX C., SCHLEMMER B., VERLET M. eds, 1991, "Les spectres de Malthus", EDI ORSTOM - CEPED, Paris, 442 p.
- (7) HAUT CONSEIL DE LA POPULATION ET DE LA FAMILLE 1991, "La coopération française avec le tiers-monde en matière de population", La documentation française, Paris, 46 p.
- (8) LOCOH T. 1988, "La fécondité en Afrique noire : un progrès rapide des connaissances, mais un avenir encore difficile à discerner", Les dossiers du CEPED, n°3, 24 p.
- (9) ORSTOM 1988, "Les changements ou les transitions démographiques dans le monde contemporain en développement", Paris, 469 p.
- (10) POLITIQUE AFRICAINE 1991, "Politiques de population", n°44, Karthala, Paris, 155 p.
- (11) QUESNEL A., VIMARD P. 1991, "Migrations, changements sociaux et développement", ORSTOM, Paris, 388 p.
- (12) VERON J. 1989, "Eléments du débat population développement", Les dossiers du CEPED, n°9, Paris, 50 p.

Dynamique des systèmes agraires

Les sociétés rurales changent, les rapports qu'elles entretiennent avec leur milieu aussi. On ne peut s'en tenir à la vision instantanée d'une réalité, encore moins considérer celle-ci comme la survivance d'un passé peu perturbé. La compréhension d'une situation agraire a un moment donné suppose nécessairement celle de son histoire, au moins récente, ainsi que l'identification des phénomènes qui ont participé aux transformations constatées.

Pierre-Marie Bosc

Agro-économiste au CIRAD-SAR

Jacques Faye Sociologue au CIRAD-SAR

Pierre Milleville Agronome à l'ORSTOM

Les facteurs du changement des sociétés rurales relèvent de multiples catégories, et s'expriment dans des "pas de temps" variés. Ils sont rarement indépendants les uns des autres. L'évolution d'un système agraire ne peut donc être comprise que comme résultant de l'interférence de phénomènes très divers et de relations dynamiques entre une société et son environnement (biophysique, économique, social, institutionnel). De nombreux travaux de recherche ont été entrepris dans ce sens et dans des contextes extrêmement variés. Par delà les spécificités des démarches adoptées, ils ont en commun de chercher à éclairer les dynamiques en cours afin de mieux cerner les voies d'évolution future possibles et de tenir compte des stratégies des acteurs du monde rural dans les efforts déployés en matière de développement agricole.

Au cours des trois dernières décennies, de nombreuses recherches à caractère monographique ont été réalisées en Afrique sur des situations rurales caractéristiques.

Leurs acquis constituent aujourd'hui de précieuses références pour appréhender les phénomènes d'évolution des systèmes agraires. C'est dans cet objectif que de nouvelles recherches ont été entreprises depuis 1986, à l'initiative de l'ORSTOM, sur d'anciens terrains en Côte-d'Ivoire, en République Centrafricaine et au Sénégal.

L'interdisciplinarité, notamment entre sciences de la nature et sciences sociales, conduit à une approche intégrée des milieux, des activités agricoles et des sociétés rurales. Une attention particulière est accordée aux déterminants externes des changements, à la fois climatiques, politiques, économiques dont les conséquences sont analysées, concrètement, au niveau local.

Par ailleurs, la durée qui sépare les premiers travaux du retour sur les mêmes lieux (15 à 30 ans) permet de juger de l'impact des faits de population : accroissement démographique et densification de l'espace rural, migrations.

Un exemple d'évolution des systèmes agraires : les systèmes agraires Sereer au Sénégal (Recherche conduite en collaboration avec des chercheurs de l'ORSTOM, de l'ISRA, du CIRAD, du CNRS et de l'Université de Dakar)

Dans le Sine, au cœur du bassin arachidier, les Sereer avaient forgé des systèmes agraires élaborés permettant à une population dense de se maintenir sur ses terroirs.

Progressivement, la saturation de l'espace va s'amplifier, sous les effets conjugués de la croissance démographique, de l'expansion de l'arachide et de la généralisation de la culture attelée.

Au cours des deux dernières décennies, d'autres phénomènes ont aggravé cet état de crise : sécheresse, diminution des prix de l'arachide, suppression des crédits aux paysans... La population et les superficies cultivées ont continué à croître, l'espace agricole est à présent totalement saturé, les jachères ont disparu, le parc arboré est profondément dégradé et l'élevage de plus en plus dissocia de l'agriculture.

Dans les "terres neuves" du Sénégal oriental où avait été engagé en 1972 un projet de mise en valeur agricole qui s'appuyait sur l'installation de migrants sereers originaux du Sine, les tendances perceptibles dès le début de l'opération se sont confirmées : adoption des systèmes de culture extensifs en rupture avec les modèles techniques proposés, recherche d'une assise foncière importante dans un souci de sécurité, emprise de la culture arachidière... L'élevage s'y est spectaculairement développé et un système agro-pastoral se met en place.

Les exploitations agricoles sont affectées d'une forte variabilité dans leur fonctionnement et les recherches récentes mettent en évidence des différenciations économiques très marquées entre producteurs.

Les évolutions constatées dans les diverses zones d'implantation sereer, urbaines et rurales, sont, dans une large mesure, interdé-

pendantes. D'intenses relations économiques (échange de main d'œuvre et de biens) mais aussi matrimoniales... perdurent, malgré la distance et le temps.

L'analyse souligne le rôle des groupes de solidarité et autorise à parler de stratégies migratoires, de diversification des sources de revenus..., bref de minimisation du risque par le recours à la pluriactivité.

La société n'y perd pas pour autant son identité. Un tel constat implique un renouvellement des recherches qui, pour rendre compte du comportement des acteurs et des stratégies paysannes, doivent déborder du cadre strict du terroir villageois et des activités agricoles proprement dites.

Milieux sahéliens et dynamique des sociétés rurales

Le CIRAD a animé une réflexion collective sur le développement agricole des régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, coordonnée par une équipe du CIRAD-SAR.

Cette réflexion collective a mobilisé une soixantaine de chercheurs et professionnels du CIRAD (Systèmes agro-alimentaires et ruraux), mais également d'autres organismes : sociétés de développement (Office du Niger et ODEM au Mali), agences de coopération (ACDI, Canada), organisations non gouvernementales (CBCI, Canada ; AFVP et ORDR, France), Instituts de recherche (ISRA, Sénégal, INRA et ORSTOM, France), Universités (EHESS et Université Paris XI, France) ainsi que des experts internationaux.

Elle se présente comme un essai de réflexion pluridisciplinaire sur une problématique de développement de région semi-aride, le Sahel d'Afrique de l'Ouest. Outre ce caractère pluridisciplinaire, le choix a été fait d'associer dans cette entreprise des chercheurs et des professionnels du développement impliqués dans des actions de terrain. Au-delà de la diversité des situations physiques et socio-économiques, peuvent émerger des régularités, des constantes qui marquent, inégalement selon les cas, mais profondément, les milieux sahéliens et leur confèrent certaines spécificités en matière de dynamique des sociétés rurales.

Les notions de déséquilibre et de risque caractérisent les situations de précarité de la majorité des producteurs agricoles sahéliens.

- Déséquilibres globaux : production agricole disponible et besoins alimentaires, potentiels de production et artificialisation limitée des milieux, production rurale et de-



Maitrise de la culture attelée bovine sur les terres neuves au Senegal.

mande urbaine déconnectées...

• Contexte de risque où s'articulent de manière perverse les risques climatiques et techniques avec les risques économiques au sens large : risque monétaire, risque financier, risque alimentaire...

Dans ce cadre de fortes contraintes, les producteurs, loin de subir passivement, démontrent au contraire de grandes capacités d'innovation qui s'expriment fréquemment dans le cadre de stratégies défensives mais qui peuvent également s'extérioriser à travers des stratégies offensives dès lors que les conditions économiques deviennent plus favorables (approvisionnement en intrants, crédits et sécurisation des débouchés...).

Dans le domaine de la production agricole, les réponses des producteurs aux différents défis traduisent de remarquables aptitudes vis à vis des processus de changement technique, que ceux-ci soient impulsés de l'extérieur ou, au contraire, correspondent à des évolutions techniques propres.

En matière de relation avec l'environnement, entendu au sens de milieu physique, les comportements des producteurs sont dominés par les impératifs de réponse aux aléas climatiques à court terme et ce souci de limiter les effets des risques climatiques obère les capacités de construction d'un milieu plus artificialisé. Ce souci technique du court terme se trouve renforcé par les urgences économiques qui limitent singulièrement les disponibilités monétaires et en travail qui pourraient être affectées à l'amélioration des conditions de culture dans un cadre économique plus favorable.

Face à la sévérité des défis, les réponses des producteurs se situent bien souvent hors du cadre agricole dans la réalisation d'autres activités génératrices de revenus et même

hors du niveau local par l'émigration.

L'espace agro-écologique sahélien ne se confond donc pas avec l'espace économique des sahéliens qui tissent et développent des relations étroites avec les villes, les régions soudanaises et forestières...

Les réponses de la recherche, des politiques agricoles et du développement doivent obligatoirement se situer dans le cadre plus large des économies paysannes d'Afrique de l'Ouest.

Le terroir agro-sylvo-pastoral de Banh dans le Nord-Yatenga (Burkina-Faso)

L'Institut National des Etudes et Recherche Agronomique mène depuis 1988, en collaboration avec le CIRAD-SAR, un diagnostic approfondi des systèmes de production d'une zone agro-pastorale et de ses problèmes en termes de développement pour appuyer le projet vivrier Nord-Yatenga. Cette zone représentative de la zone sahélo-soudanienne comprise entre 400 et 500 mm de pluie, a une faible densité de population (10 hab/km²) et est majoritairement peuplée d'agriculteurs Rimaïbé et d'éleveurs Peuls à côté d'agriculteurs Dogon, Mossi et Foulés.

A la suite des sécheresses qui ont culminé en 1984, les Peuls qui pratiquaient un élevage bovin laitier extensif avec troc de lait contre céréales et parage contre céréales ont perdu l'essentiel de leurs bovins. Ils se sont convertis à la culture des céréales et à l'élevage des petits ruminants destiné à combler leur déficit céréalier, à satisfaire leurs besoins monétaires et à reconstituer leur capital bovin.

Les agriculteurs Rimaïbé qui cultivaient en continu du mil, grâce au parage des troupeaux peuls en saison sèche, ont étendu leurs surfaces en céréales mais cultivées en extensif sans parage. Ils ont aussi développé l'élevage des petits ruminants avec les mêmes objectifs que les Peuls. Les activités para-agricoles et artisanales ont été déve-

loppées, par les femmes surtout.

Un constat

- une monétarisation croissante de l'économie,
- l'affaiblissement des rapports de dépendance traditionnels avec surtout une perte du contrôle de la gestion de l'espace par les Peuls,
- la décapitalisation au sein des exploitations avec la perte du capital bovin.

Des atouts

- des ressources végétales très variées et peu dégradées dans des milieux écologiques très différents et complémentaires.
- des ressources faunistiques peu explorées ;
- des ressources en eau importantes, réparties dans l'ensemble du terroir grâce au bas-fonds principal ;
- un équilibre entre agriculture et élevage qui permet au moins théoriquement de gérer la fertilité ;
- une population motivée et qui possède ses stratégies.

Des problèmes

- problèmes d'ordre technique liés aux nouvelles formes d'agriculture et d'élevage et d'organisation économique des producteurs ;
- problèmes d'ordre financier : capital de départ pour la reconstitution du troupeau et la relance des activités agricoles et artisanales (crédits) ;
- problèmes liés à la gestion de l'espace et de ses ressources : le terroir agro-sylvopastoral de Banh possède des ressources d'une qualité exceptionnelle pour une zone sahélienne. Toute démarche de développement du terroir reposera sur leur valorisation judicieuse.

Suite à la dégradation du système de mise en valeur, ces ressources amorcent actuellement un processus de dégradation :

- défrichement à des fins agricoles dans les meilleures zones forestières,
- coupe abusive d'arbres à des fins fourragères,
- abandon de la fumure des parcelles cultivées, apparition d'un système de culture itinérante.

Un nouveau système de gestion des ressources est possible

- Au niveau de la parcelle et de l'exploitation : gestion de la fertilité des cultures par une meilleure utilisation de la fumure organique disponible ;
- meilleure gestion des fourrages naturels et des résidus au niveau de l'exploitation.

Au niveau de l'espace global du terroir : le problème posé est surtout celui de l'affectation des zones à des activités afin de protéger et de valoriser les ressources végétales importantes.

La conservation de la zone forestière, ressource fourragère essentielle et espace de sécurité en cas de sécheresse pour l'élevage, est essentielle pour le maintien d'une activité d'élevage importante qui permettra la gestion de la fertilité dans les systèmes de culture.

La dégradation des milieux en zones arides

Les zones arides et semi-arides occupent le tiers des terres émergées et sont peuplées par quinze pour cent de la population mondiale. La végétation y est essentiellement constituée de steppes et de savanes ; les populations végétales et animales qui y vivent présentent une grande diversité d'adaptations. Ces zones sont caractérisées par la rareté et la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations, par l'intensité de l'évaporation et en conséquence par une forte instabilité des ressources. Pour pallier cette contrainte, les populations ont développé des stratégies variées d'exploitation du milieu.

A. Cornet

ORSTOM 213 rue Lafayette, 75480 Paris cedex

E. Le Floc'h

C.E.F.E./CNRS BP 5051, 34033 Montpellier cedex

C'est dans les zones arides et semi-arides que les perturbations engendrées par les sécheresses au niveau des écosystèmes et des systèmes de production agricole prennent les proportions les plus alarmantes. Dans ces mêmes zones une croissance démographique forte se poursuit depuis plusieurs décennies ; c'est ainsi par exemple que la population des neuf Etats du Sahel (pays du CILSS, Comité inter Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel), qui était de 40 millions d'habitants en 1987, dépassera 70 millions en 2005. Les besoins des populations découlant de cet accroissement démographique rendent inadéquates les formes actuelles d'utilisation du milieu par l'homme et conduisent à une surexploitation des ressources et à l'altération souvent définitive des potentiels de production.

Cependant, les systèmes écologiques réagissent différemment selon, d'une part, leur sensibilité aux facteurs de la dégradation et, d'autre part, l'utilisation qui en est faite par l'homme. Il existe bien une situation de crise écologique des zones arides et semi-arides, elle n'est ni générale ni homogène.

Accroissement des caractères d'aridité

L'évolution régressive des systèmes écologiques des zones arides se traduit à l'échelon local par un accroissement des caractères d'aridité, une baisse de la productivité du milieu, l'accroissement du caractère aléatoire des ressources et l'augmentation du risque pour les populations. De par ses inci-

dences sur la circulation climatique générale, la dégradation des zones arides joue un rôle important dans les changements globaux, notamment par les modifications de l'albédo et la mise en circulation de poussières et d'aérosols qu'elle entraîne.

Par ailleurs, vu leur sensibilité, les systèmes écologiques, les systèmes de production agricole et les populations des zones arides et semi-arides, seront, selon toute vraisemblance, parmi les premiers et les plus gravement affectés par les conséquences d'éventuels changements climatiques.

Les déséquilibres engendrés en zones arides par les sécheresses répétées et généralisées ainsi que par la surexploitation des milieux aboutissent à la dégradation des systèmes écologiques et des structures sociales et constituent autant d'obstacles au développement. Ils s'opposent à la mise en oeuvre de stratégies à long terme relatives à la gestion de l'environnement.

Le développement durable, qui requiert que soient associés le respect de l'intégrité d'un environnement et l'amélioration du niveau de vie des populations, rend nécessaire, d'une part d'augmenter la production par une utilisation optimale des espèces et des écosystèmes et, d'autre part de permettre le maintien des processus écologiques essentiels ainsi que la préservation de la diversité génétique.

Connaissance des écosystèmes des zones arides et semi-arides

La recherche scientifique, et la recherche française en particulier, s'est intéressée depuis très longtemps à la connaissance des écosystèmes des zones arides et semi-arides. Les conséquences des sécheresses répétées et généralisées ont, depuis les années 1970,

entraîné une mobilisation accrue de la communauté scientifique pour l'étude des processus de dégradation, le suivi et la lutte contre la désertification. L'émergence d'une problématique globale de l'environnement associant conservation et développement durable a renouvelé les concepts qui sous-tendent ces recherches et conduit à une approche intégrée nécessitant la coordination des programmes et l'association des organismes de recherche.

Les recherches entreprises s'inscrivent dans une démarche générale d'étude de la réponse des écosystèmes aux perturbations. Il est possible de définir une série de thèmes de recherches, les études étant pour chacun d'entre eux plus ou moins avancées :

- **Evaluation de l'étendue et de l'intensité de la dégradation ainsi que de ses effets.** Le premier terme de cette proposition a déjà fait l'objet de très nombreux travaux (3) (8) et bénéficie de l'apport des techniques les plus modernes de la télédétection, en particulier satellitaire (13) (12). L'évaluation des risques encourus requiert que soient élaborés des critères fiables de mesure. Cette démarche n'a encore que trop rarement été suivie (11).

- **Recherche des causes.** Le discours sur les causes est très largement ouvert depuis plusieurs décennies et voit s'affronter les tenants du "tout est cause climatique" et du "tout est cause anthropique". Il s'avère le plus souvent vérifié que dans un contexte climatique difficile, la surexploitation des milieux, ayant des niveaux marginaux de production, accélère de manière évidente leur dégradation, et surtout la rend pour une bonne part irréversible. De manière assez évidente, l'extension des défrichements (céréaliculture) est partout le facteur le plus important de détérioration des milieux (10). Le surpâturage et l'éradication des ligneux sont les autres facteurs majeurs par l'étendue des surfaces concernées.

L'urbanisation et la salinisation, phénomènes de relativement faible étendue, ont cependant des répercussions économiques parfois considérables, les zones étant le plus souvent de forte productivité agricole. Ce sont ces facteurs que la recherche met d'abord en évidence. Les causes réelles sont de fait autant sociologiques (statut juridique des terres, réduction des possibilités de nomadisation) et économiques (taxe sur le cheptel) qu'écologiques.

- **Etude des processus et des mécanismes.** Ce champ de recherche est encore largement ouvert et son importance n'est pour le moment que suggérée. Sous l'effet des sécheresses et de la surexploitation des ressources végétales, la flore et la végétation sont modifiées (7)(5)(9), ce qui se traduit en particulier par une réduction de la richesse spécifique et une diminution du couvert végétal. L'action mécanique de la pluie détériore la structure superficielle du sol moins protégé, ce qui modifie les états de surfaces et conduit à une diminution de la perméabilité ainsi qu'à une mobilisation des particules de sable qui seront enlevées par le vent ou le ruissellement. La matière organique du sol disparaît, ainsi qu'une partie des éléments nutritifs ; la capacité de stockage pour l'eau est réduite. La baisse de productivité biologique du milieu qui s'ensuit peut être irréversible à l'échelle d'une ou plusieurs générations, car sous les climats arides la végétation spontanée ne présente généralement qu'un faible dynamisme. Si l'exploration des mécanismes liés aux changements des états de surface est déjà bien entamée, (4)(6), il reste à bien saisir

progresser dans cette voie . Les relations étroites qui existent entre démographie et désertisation constituent un autre champ de recherche prometteur dans l'analyse des processus.

- Evaluation de l'intérêt comparé des moyens de lutte. De très nombreux programmes ont été mis en place pour lutter contre la désertisation. N'ayant le plus souvent comme objectif que d'arrêter localement les manifestations les plus évidentes de la dégradation des milieux (extension de dunes...), ils ne s'attaquent pas, l'analyse n'en étant pas faite, aux causes ni aux facteurs de la désertisation. Si, par ailleurs, la pertinence des moyens de lutte peut être souvent mise en cause, c'est essentiellement au travers de leur médiocre adaptation au contexte sociologique. Efficacité technique et adéquation avec le contexte sociologique devraient faire l'objet de recherches et d'évaluations.

Perspectives

Les écosystèmes les plus dégradés nécessitent,

pour leur reconstruction, une forte intervention de l'homme.

Trois démarches (1)(2) sont actuellement envisageables :

- la restauration, qui vise à la reproduction exacte de l'écosystème préexistant. Elle n'est possible que dans les situations où l'écosystème de référence n'est pas irréversiblement dégradé et où subsiste donc une dynamique naturelle qu'il est possible de remettre en œuvre par une réduction de la pression humaine ;
- la réhabilitation, qui, s'adressant à des éco-

systèmes désertisés, a pour objectif majeur de rétablir les fonctions principales (production, reproduction) de l'écosystème préexistant, sans pour cela se préoccuper d'un strict respect de la composition floristique initiale. Elle fait appel à des espèces "clefs de voûte" qui assurent en particulier le maintien de la stabilité et de la résilience de l'écosystème simplifié reconstruit. Toute la recherche reste à faire dans ce domaine. La conception de la réhabilitation est fondée à la fois sur la connaissance des mécanismes de dégradation des écosystèmes qu'elle vise à reconstituer et sur l'étude du fonctionnement en mélange des espèces constituant l'écosystème simplifié mis en place ;

- la réaffectation qui consiste à changer l'usage d'un espace, éventuellement irréversiblement dégradé, en y installant des nouveaux écosystèmes par introduction, par exemple, de peuplements d'espèces exotiques (plantations de cactus, d'acacias...) dont la gestion est le plus souvent délicate.

La mise en place d'un réseau d'observatoires des changements écologiques à long terme permettrait l'approfondissement des connaissances sur les mécanismes de fonctionnement et de réponse aux perturbations des écosystèmes arides.



Lutte contre l'envahissement par les sables. Zone présaharienne de la Tunisie (photo E. J. LeFib, I)

ceux conduisant à des ruptures brutales de la fonction de résilience dans les écosystèmes.

La notion d'espèces "clefs de voûte" est évoquée mais le rôle de telles espèces et leur importance ne sont que suggérés. Les indicateurs sensibles manquent ou ne sont encore que trop rarement employés pour que l'on puisse juger de leur fiabilité dans la détection des seuils de rupture et en particulier d'irréversibilité. Il semble que la compréhension de la structure des formations végétales nécessiterait de nouvelles analyses pour que l'on puisse significativement

pour leur reconstruction, une forte intervention de l'homme.

Trois démarches (1)(2) sont actuellement envisageables :

- la restauration, qui vise à la reproduction exacte de l'écosystème préexistant. Elle n'est possible que dans les situations où l'écosystème de référence n'est pas irréversiblement dégradé et où subsiste donc une dynamique naturelle qu'il est possible de remettre en œuvre par une réduction de la pression humaine ;
- la réhabilitation, qui, s'adressant à des éco-

(1) ARONSON J. et LE FLOCH E. (soumis) Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems. A view from the South. Restoration Ecology.

(2) ARONSON J., FLORET C., LE FLOCH E., OVALLE C. et PONTANIER R. (soumis) Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in central Chile, southern Tunisia and northern Cameroon. Restoration Ecology.

(3) BOUDET G. 1979. Quelques observations sur les fluctuations du couvert végétal sahélien au Gourma malien et leurs conséquences pour une stratégie de gestion sylvo-pastorale. Revue Bois et Forêts des Tropiques 184 : 31-44.

(4) CAZENAVE A. et VALENTIN C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. "Didactiques" ORSTOM, Paris, 229 p.

(5) CLAUDE J., GROUZIS M. et MILLEVILLE P. ed. 1991 Un espace Sahélien La MARE d'OURSIS Burkina Faso. ORSTOM Paris, 241 p.

(6) ESCADAFAL R. 1989 Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. "Etudes et Thèses" ORSTOM, Paris, 317 p.

(7) GROUZIS M. 1988. Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso). "Etudes et Thèses" ORSTOM, Paris, 326 p.

(8) HIERNAUX P., DIARRA L. et MAIGA A. 1989. Dynamique de la végétation sahélienne après sécheresse. Un bilan du suivi des sites pastoraux du Gourma en 1988. Doc. de programme Dd AZ 192. Bamako CIPEA.

(9) LE FLOCH E., GROUZIS M., BILLE, J.C. et CORNET A. ed. 1992 L'aridité - une contrainte au développement. "Didactiques" ORSTOM Paris, 600 p.

(10) LE HOUEIROU, H.N. (sous presse) An overview of vegetation and land degradation in World Arid Lands. In : Vegetation and land degradation in dry regions (MENSCHING, GUPTA et OHMORI ed.).

(11) ELIDIN M. et MILLEVILLE P. ed. 1989 Le Risque en Agriculture. "A travers champs" ORSTOM Paris, 619 p.

(12) POUGET, M. 1990 Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales. Deuxièmes journées de télédétection. "Colloques et Séminaires" - ORSTOM Paris, 449 p.

(13) DE WISPELAERE G. 1980. Les photographies aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans un géosystème sahélien sénégalais. Cahiers ORSTOM, sér. Sc. Hum. 27 (3-4) : 155-166.

Productivité primaire comparée des écosystèmes pâturés au Nord et au Sud du Sahara

Les anciennes stratégies paysannes sont impuissantes à faire face aux besoins croissants et à une variabilité accrue de la production primaire en raison de la dégradation des écosystèmes pâturés. La stratégie traditionnelle, lorsque les besoins augmentaient, était d'étendre les superficies cultivées et les aires de pacage. Cette stratégie n'est plus viable car toutes les terres cultivables tendent à être entièrement cultivées et il n'y a plus de "no man's land" pastoral.

Ch. Floret

CEFE/CNRS B.P. 5051-34033 Montpellier Cedex 01 France H.N.

Le Houérou

CEFE/CNRS B.P. 5051-34033 Montpellier Cedex 01 France

R. Pontanier

ORSTOM B.P. 434-1004 Tunis El Menzah, Tunisie

Les recherches sur la zone aride nord-africaine se poursuivent en étroite collaboration entre le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CNRS, Montpellier), l'ORSTOM et l'Institut des Régions Arides de Tunisie. Des institutions de recherches de plusieurs pays au sud du Sahara y sont associées pour une réflexion sur l'utilisation des ressources végétales dans le cadre d'un "développement durable" (Programmes "Jachères", "Introduction des couples Légumineuses-microorganismes" et "Suivi de la désertisation").

que sur des sols sableux à sablo-limoneux. On a montré que la productivité de l'olivier et des pâturages est plus régulière et beaucoup plus élevée sur les sols sableux grossiers profonds (4,6,3).

Ces observations rejoignent celles de Cornet (1981) et celles de Penning De Vries et Djiteye (1982) pour les zones sahéliennes ; ces deux dernières études montrent en outre que, malgré des pluviosités plus fortes, les durées de disponibilité en eau du sol pour la végétation sont considérablement raccourcies au Sahel par rapport aux régions nord-sahariennes.

Cette différence est due à la très forte demande évapotranspiratoire en zone sahélienne pendant la saison pluvieuse ; cette demande est beaucoup plus faible dans les zones à pluie d'hiver.

Efficacité des pluies pour la production

Le Coefficient d'Efficacité Pluviale (CEP = Rain Use Efficiency = RUE), qui est le rapport de la production primaire aérienne annuelle (Kg MS.ha⁻¹.an⁻¹) à la pluviosité annuelle (mm) permet de comparer utilement la productivité de la végétation de zones différentes à la fois sur le plan des conditions écologiques et de la végétation (7, 4). Ce coefficient, exprimé en kg de MS.ha⁻¹.an⁻¹.mm⁻¹, représente la productivité moyenne du millimètre de pluie.

La figure 1 montre les valeurs du CEP (RUE) pour les zones au Nord et au Sud du Sahara. Il apparaît que le CEP tend à diminuer avec la pluviosité moyenne, tant au Nord qu'au Sud du Sahara, ce qui montre une plus mauvaise utilisation de l'eau au fur et à mesure que l'aridité augmente. Les raisons en ont été analysées (4) : augmentation avec l'aridité de la proportion des petites pluies inefficaces dans le total annuel, augmentation corrélative de la température et de la demande évapotranspiratoire, mauvaise occupation de l'espace par les communautés végétales.

Ce graphique montre également que les formations végétales au Nord du Sahara rentabilisent mieux l'eau que celles du Sahel, à pluviosité moyenne égale.

Similitudes et différences des milieux

Les caractéristiques des zones arides nord-africaine et sahélienne sont présentées sur le tableau 1. Parmi les nombreux travaux qui ont permis cette caractérisation, on pourra se référer aux auteurs cités en bibliographie (5,6,2,3).

Aridité climatique et aridité édaphique

Pour une hauteur et une distribution données des précipitations, les différents types de sols d'une région écologique ne présentent pas les mêmes caractères d'aridité édaphique. Ainsi, sur la base de mesures du bilan hydrique des sols pendant une période de 5 ans sur deux milieux représentatifs des zones pré-sahariennes de l'Afrique du Nord, Floret et Pontanier (1984) montrent que la durée de sécheresse édaphique (définie par un potentiel matriciel égal ou supérieur à -1,6 MPa dans tout le profil du sol) est en moyenne de 60% plus longue sur des sols limoneux à limono-argileux

Caractéristiques comparées des zones arides nord-africaines et sahéliennes

	Zone aride Nord-Africaine	Zone aride Sahélienne
Surface	500 000 km ²	3 000 000 km ²
Pluie moyenne annuelle	100-400 mm	100-600 mm
Période pluvieuse	octobre-mars (6 mois)	juin-septembre
Régime pluviométrique	bimodal	monodal
Coefficient de variation de la pluviosité en fonction de la moyenne	35 à 65%	25 à 45%
Températures	350 mm/100 mm variables en saison froide moyenne annuelle 20°C (gel)	600 mm/100 mm chaudes : moyenne annuelle 28-30°C (pas de gel)
ETP Penman	1400-1600 mm/an 1 mm/j hiver 7 mm/j été	1800-2200 mm/an 4-5 mm/j janvier 6-8 mm/j avril-mai
Végétation	5-6 mm/j juillet-sep. Steppes : graminéennes chamaephytiques crassuléscentes succulentes	Scrub épineux épars à graminées annuelles
Coefficient d'efficacité pluviale	3,3 kg MS/ha/an/mm	2,7 kg MS/ha/an/mm pour la strate herbacée

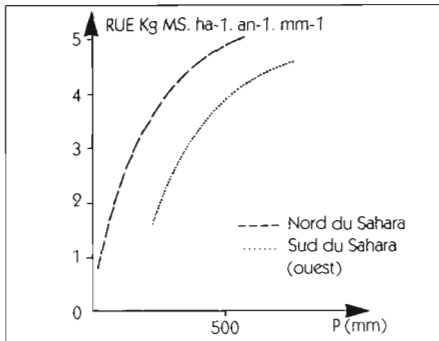


Figure 1
 Comparaison de l'efficacité de la pluie (moyenne annuelle) pour la production pastorale (RUE) entre le Nord et le Sud du Sahara (production des ligneux non prise en compte pour le Sud du Sahara)

Ceci n'est cependant pas tout à fait exact car pour le Sahel, seul le CEP du tapis herbacé a été pris en compte.

Mais même en incluant les ligneux souvent clairsemés, il subsisterait un écart entre les CEP au Nord et au Sud du Sahara. Cette différence peut s'expliquer de la manière suivante :

- Les périodes de disponibilité maximale d'eau au nord sont étalées sur près de 6 mois à des saisons où les températures, donc l'ETP, sont faibles à modérées.

- Les communautés végétales sont très largement dominées par des espèces annuelles au Sahel, même s'il subsiste des arbustes, alors que les steppes nord-africaines sont constituées par des espèces pérennes (graminées ou chaméphytes). Ces dernières peuvent produire même lorsque surviennent des pluies hors saison et même si les pluies saisonnières sont déficitaires ; de plus elles peuvent explorer une beaucoup plus grande profondeur de sol. Dans les phytocoenoses sahéliennes au contraire, l'interruption fréquente des périodes pluvieuses au moment de la germination, de la levée et de l'établissement, constitue un risque très élevé d'échec de la mise en place du tapis herbacé qui souvent ne sera établi qu'après plusieurs échecs.

- Les sols sahéliens présentent un faible niveau trophique avec, en particulier une carence chronique en phosphore et en azote (8).

Cependant, les valeurs de production pastorale qui apparaissent sur la figure 1 sont basées sur des mesures de productions réalisées sur des parcours non dégradés. Dans la plupart des cas, actuellement, les bons parcours n'existent plus, surtout en Afrique du

Nord, où la production était basée sur des espèces pérennes. Au Sahel, tant que l'érosion n'est pas trop forte, la production herbacée annuelle est moins réduite par rapport à l'état antérieur.

Enfin, il faut noter que la variabilité de la production primaire qui s'accroît avec la dégradation est en moyenne 50% supérieure à celle de la pluviosité et que cette variabilité est plus forte en Afrique du Nord qu'au Sahel (tableau 1).

Actuellement, en raison de la dégradation des écosystèmes pâturés, des méfaits de l'érosion, et de la croissance exponentielle de la population, les anciennes stratégies paysannes sont impuissantes à faire face aux besoins croissants et à une variabilité accrue de la production primaire. La stratégie traditionnelle, lorsque les besoins augmentaient, était d'étendre les superficies

être satisfaits par les anciennes pratiques de la cueillette. Les anciennes pratiques pastorales elles-mêmes tendent à disparaître au profit de l'agro-pastoralisme et de l'association agriculture-élevage, avec l'utilisation généralisée des résidus de cultures pour l'alimentation du cheptel, parfois avec l'introduction d'une sole fourragère pour assurer le maintien de la fertilité des terres et l'équilibre nutritionnel des animaux.

Une recherche doit se développer, en particulier, sur l'amélioration et une meilleure utilisation de la végétation post-culturelle (jachères) puisque ce sont souvent les meilleurs parcours potentiels.

Il faut chercher aussi à introduire ou à réinstaller une strate arbustive adaptée, si possible fixatrice d'azote.



Photo : A. Cornet - Surpâturage au Fierlo

cultivées et les aires de pacage.

Cette stratégie n'est plus viable car toutes les terres cultivables tendent à être entièrement cultivées et il n'y a plus de "no man's land" pastoral. La seule solution réside donc dans l'intensification, en particulier par l'utilisation systématique et généralisée de l'agriculture de ruissellement.

Cette dernière consiste à sacrifier une partie du territoire, en particulier les sols incultivables (squelettiques), pour favoriser le ruissellement et le conduire sur les meilleures terres afin d'assurer des disponibilités en eau suffisantes à la production.

L'intensification implique aussi la rénovation et la généralisation des anciennes techniques agroforestières afin de maintenir la fertilité ou de restaurer des terres, de satisfaire les besoins fourragers des animaux, les besoins en énergie, en bois, en fruits et produits artisanaux divers qui ne peuvent plus

(1) Cornet A. 1981 - Mesure de biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone sahélienne du Sénégal. *Acta Oecol., Oecol. Plant.*, 2 (3) : 251-266

(2) Floret Ch. Le Houérou H.N., Pontanier R., - Climatic hazards and development. a comparative study of arid zone North and South of the Sahara. In *Time scales of biological responses to water constraints. The case of mediterranean biota*, J. Aronson, F. di Castri, J. Roy, eds. Springer-Verlag (accepté)

(3) Floret Ch., Pontanier R. 1982 - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Climat-sol-végétation et aménagement. Travaux et Documents de l'ORSTOM*, Paris, 150, 544 p.

(4) Le Houérou, H.N. 1984 - Rain-use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *J. of Arid Env.* 7, 3 : 213-247.

(5) Le Houérou, H.N. 1989 - The grazing ecosystems of the African Sahel 288 p. *Ecological Studies*, n°75, Springer Verlag, Heidelberg

(6) Le Houérou, H.N. 1992 - Relations entre la variabilité des précipitations et celles de la production primaire et secondaire en zone aride. In *Le Floc'h E., Grouzis M., Cornet A. & Bille J.C. L'aridité, une contrainte au développement*, 193-216, "Didactiques", ORSTOM, Paris.

(7) Le Houérou, H.N. et Hoste, C.F., 1977 - Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean basin and in the African Sahelo-Sudanian zone. *J. of Rge. Mgt* 30, 3 : 181-189.

(8) Penning De Vries F.W.T., Djiteje M.A. Eds. 1982 - La productivité des pâturages sahéliens. *PUDOC Publ., Center for Agric. Publ. and Docum.*, Wageningen, 525 p.

Les oasis, espaces intensivement cultivés dans un environnement marqué par l'aridité

Travaux de recherche pour le maintien et le développement de l'agriculture d'oasis

Lieux de production, dans un environnement difficile où s'organise et se concentre l'activité agricole, les oasis anciennes, comme celles de création récente, assument de multiples fonctions. Ce sont des étapes, des escales, des lieux habités, des bases d'appui pour conquérir et contrôler de vastes territoires, des points stratégiques pour maintenir des populations aux confins des pays sahariens et sahéliens. Les oasis peuvent aussi devenir des bases de repli pour les sociétés pastorales sahéliennes touchées par les épisodes récents de sécheresse.

V. Dolle (CIRAD) Secrétaire du GRIDAO, Responsable du programme de recherche pour le développement des zones sèches CIRAD Montpellier.

M. Ferry (INRA) Station de recherche franco-espagnole sur le palmier dattier et les zones arides Elche Espagne.

G. Toutain (INRA) Productions végétales - INRA Paris.

Les oasis, îlots de survie dans un environnement marqué par l'aridité

Les oasis peuvent se définir comme des espaces intensément cultivés dans un milieu marqué par l'aridité ou par la désertification (5), milieu dans lequel le bilan hydrique est largement déficitaire.

La majeure partie de l'année, l'insolation y est intense, les faibles apports pluviométriques (< à 200 mm) ne compensent pas une évaporation importante (températures élevées, vents desséchants importants).

Dans les oasis, la vie s'organise autour de l'eau, ressource rare. Les conditions d'accessibilité à l'eau (eaux de surface, eaux souterraines), son abondance et les techniques d'exhaure employées pour la valoriser, déterminent l'extension en surface de l'oasis et en partie son mode d'organisation.

Dans l'oasis, îlot de survie dans un environnement fragile, les agriculteurs combinent différentes productions animales et végétales. Sous les palmiers dattiers, plantes souvent pivots des systèmes de production oasiens, plusieurs étages de culture s'organisent harmonieusement en profitant du microclimat favorable créé par eux et de l'eau d'irrigation judicieusement partagée. Les oasis à palmiers dattiers s'étendent dans le monde sur plus de 800 000 ha, elles font vivre directement de 7 à 10 millions d'oasiens. Il faut ajouter à ces populations d'oasis celles qui vivent partiellement des oasis (pasteurs nomades, etc...), celles des oasis sans palmiers, celles des oasis en zones continentales à hiver froid (Asie Centrale, Chine) et

de vastes zones arides dans lesquelles les systèmes oasiens intensifiés peuvent permettre de maintenir et d'accueillir une population en expansion. Les régions concernées se rencontrent ainsi aussi bien en Afrique du Nord et au Sud du Sahara, au Proche et Moyen Orient, en Asie, en Amérique, en Australie...

Des systèmes complexes, des problèmes multiples

Création anthropique pouvant atteindre des niveaux élevés d'organisation technique, économique, sociale, l'oasis, agro-écosystème complexe, présente une grande vulnérabilité dès que certaines pratiques disparaissent :

- Lutte contre les agressions du milieu externe, ensablement, etc...
- Entretien des canaux d'irrigation et des réseaux de drainage.
- Maintien de la fertilité des sols dans un système où les cultures se succèdent toute l'année de façon intensive.
- Gestion de répartition des ressources en eau et du foncier.
- Organisation et cohésion sociale pour valoriser au mieux les ressources rares.
- Systèmes techniques de production maîtrisés pour le maintien de la variabilité génétique (palmier dattier) et des niveaux de performance (systèmes de culture et d'élevage intensifs).
- Association de pratiques intensives dans l'oasis et de valorisation extensive des ressources de l'environnement de l'oasis : pastoralisme, cueillette...

De nombreuses voies de recherche pour le développement de l'agriculture d'oasis

Un groupe de Recherche et d'Information pour le Développement de l'Agriculture d'Oasis (GRIDAO) a été constitué pour regrouper tous les savoirs et savoir-faire dans les domaines spécifiques de l'agriculture d'oasis. Son but est de rendre cohérentes toutes les interventions de recherche et de favoriser une nouvelle synergie des compétences. Initié par le CIRAD et par l'INRA, le GRIDAO est maintenant un groupement pluridisciplinaire de partenaires du Nord et du Sud ayant en commun une riche expérience de recherche pour le développement de l'agriculture d'oasis.

Le palmier dattier, plante centrale du sys-



tème de production oasien, est atteint par une maladie (*Fusarium oxysporum*) qui, à terme, entraîne sa disparition au Sud du Maroc puis en Algérie. De nombreux efforts se sont portés sur les moyens de lutte contre cette maladie dont l'impact économique sur les variétés à haute valeur commerciale est important. La lutte chimique n'étant pas envisageable (coût, risque dans un écosystème complexe et fragile), la lutte par voie génétique a été entreprise par de nombreuses équipes de recherche en Europe et au Maghreb. Des cultivars résistants ont été identifiés, issus de prospections ou de croisements dirigés puis multipliés *in vitro*. Plusieurs techniques de multiplication *in vitro* ont été développées : l'embryogenèse somatique, la multiplication par la reversion végétative d'organes floraux, la multiplication par bourgeonnement à partir de bourgeons de rejets. Cette dernière technique, utilisée par des chercheurs de l'INRA associés à d'autres équipes a produit des vitroplants ayant fructifié récemment (4), ce qui a permis de vérifier la conformité de ces vitroplants avec leurs "pieds mères".

Les équipes de recherche engagées dans ces travaux doivent entreprendre encore d'importants efforts pour poursuivre et confirmer leurs résultats compte tenu de la complexité du processus de culture *in vitro*, particulièrement pour le palmier dattier, plante ligneuse sur laquelle il y a peu de données concernant la physiologie, les mécanismes d'organogénèse, etc...

L'inventaire du patrimoine génétique des oasis est entrepris car la connaissance du patrimoine et de sa diversité est un préalable aux opérations de multiplication de matériel génétique. Les équipes de recherche du GRIDAO, comme celles des pays maghrébins, participent à ces travaux fondamentaux pour le développement futur de l'agriculture d'oasis autour du palmier dattier (6 et 1).

Des techniques de lutte biologique sont également développées avec la participation de chercheurs de l'INRA Antibes et de structures de recherche des pays à agriculture d'oasis : Maroc, Algérie, Mauritanie, Niger et de programmes internationaux (2) pour maîtriser le développement de prédateurs du palmier dattier, cochenilles et acariens (*Parlatoria blanchardi*, *Oligonychus afrasiaticus*).

Le palmier dattier ne garantit pas toujours à lui seul la prospérité de l'oasis. Associé à

d'autres plantes, il participe à la constitution de systèmes de production aux multiples composants : étage fruitier sous le palmier dattier, sous culture irriguée, légumières, céréalières, fourragères. La compréhension des mécanismes d'association des différents éléments du système de production, de leurs interactions agronomiques et socio-économiques est essentielle pour la mise en oeuvre d'opérations de développement.

Les chercheurs du CIRAD et de ses départements, systèmes agraires, cultures annuelles, cultures fruitières regroupés en équipes pluridisciplinaires participent à des travaux de recherche pour l'analyse du fonctionnement des systèmes de production oasiens et l'amélioration, de façon durable et reproductible de leurs performances (3).

La complexité des associations dépend de la richesse des ressources en eau, des fonctions de l'oasis, de leur histoire et de leur situation géographique ainsi que des contraintes qu'elles subissent. Du système le plus simple au plus complexe, la densité en palmiers conditionne à chaque fois totalement les possibilités de développement des cultures associées car la structure et l'architecture de l'oasis influent directement sur la nature du climat oasien créé.

Architecture de l'oasis

"Le climat radiatif" est directement lié à l'architecture du système agroforestier oasien, mieux la connaître et mieux apprécier les flux radiatifs aux différents "étages" de l'oasis doit permettre d'utiliser au mieux la ressource rare, l'eau, et l'espace qui y est associé. Une équipe pluridisciplinaire de chercheurs du CIRAD (GERDAT Modélisation, DSA, IRFA) et de l'INRA Tunisie a engagé des travaux de modélisation de l'architecture oasienne et de ses différentes composantes pour étudier ce "climat radiatif".

Une première analyse de la structure de la végétation à partir de mesures précises "in situ" permet une description sommaire des formations végétales complexes caractéristiques des situations oasiennes. Les mesures "in situ" atteignent vite leurs limites (nombre, répétition, diversité des milieux) et rendent impossible, compte tenu de leur lourdeur, une analyse détaillée du Rayonnement Photosynthétiquement Utilisable (R.P.U.). Pour atteindre cet objectif, il devient rapidement nécessaire de modéliser les composants architecturaux de l'oasis.

Une maquette tridimensionnelle de ces composants architecturaux permet alors d'effectuer des simulations et des calculs statistiques grâce à l'utilisation du logiciel AMAP de modélisation de l'architecture des plantes.

La modélisation de transferts radiatifs à partir d'un modèle numérique existant (modèle TRANSAD) implique au préalable de nombreuses prises de données sur le terrain. Il devient ensuite possible, en couplant le modèle AMAP et le modèle TRANSAD, de simuler le développement d'une palmeraie et donc l'évolution dans le temps du climat radiatif sous couvert. Le calcul du R.P.U. est alors envisageable en fonction de la densité de plantation et de son architecture.

Les résultats de ces calculs devraient alors permettre de déterminer un optimum de densité et d'organisation de l'espace du point de vue radiatif pour utiliser au mieux l'espace oasien.

Enfin, pour valoriser les informations existantes, les faire circuler, stimuler les échanges entre les équipes, une banque de données a été constituée par le GRIDAO. Elle regroupe plus de 800 références, gérées sur le logiciel Texto par le GRIDAO au CIRAD Montpellier. Un fonds documentaire de 200 références est consultable. Il couvre l'ensemble des sujets relatifs à l'agriculture d'oasis - palmier dattier et cultures associées, gestion des ressources en eau, lutte contre la désertification, etc. - et traite aussi l'histoire et la dynamique des sociétés oasiennes.

Les équipes pluridisciplinaires de recherche regroupées autour du GRIDAO participent, par ces différents travaux avec leurs partenaires des pays "oasiens" en développement, au maintien des écosystèmes oasiens et à la protection de façon durable de leur environnement.

(1) BRAC DE LA PERRIERE R.A. 1988 Les recherches sur les ressources génétiques du palmier dattier en Algérie Annales de l'Institut Agronomique (El Harrach), vol. 12, n°1, 12.

(2) DJERBI M. 1988. Les maladies du palmier dattier. Projet régional de lutte contre le Bayoud. FAO.

(3) DOLLE V., TOUTAIN G. 1990 Les systèmes agricoles oasiens - CIHEAM Série A, Séminaires Méditerranéens n°11.

(4) FERRY M., TOUTAIN G., MONTFORT S. 1990 Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides Groupe de l'arbre, communication au colloque de l'arbre. Nancy 1990.

(5) LACOSTE Y. 1987 Encyclopaedia Universalis 13.

(6) PEYRON G. 1988 et 1989 Contribution à l'évaluation et la valorisation du patrimoine génétique égyptien. GRIDAO Montpellier.

(7) TOUTAIN G. 1977 Eléments d'agronomie oasienne de la recherche au développement - Paris - INRA-GRET

Epidémiologie et manipulation des eaux de surface

Les conséquences sanitaires de la manipulation des eaux de surface, pour la culture de la canne à sucre et du riz en Afrique. Une remise en question de l'épidémiologie et de l'intervention médicale.

Les aménagements agricoles ou agro-industriels, basés sur de nouvelles technologies, se multiplient pour répondre aux besoins d'une population en croissance exponentielle dans les pays en développement. On estime, en effet, que la population mondiale doublera d'ici à 30 ans et que 80% de cette population sera dans les PED. Ces aménagements impliquent de profondes modifications, à la fois du couvert végétal et des réseaux hydrographiques, utilisés pour l'usage domestique ainsi que pour les activités agro-industrielles et pour l'évacuation des déchets. Ces actions influent sur l'épidémiologie des maladies liées à l'eau et exigent une adaptation des stratégies de prévention et de lutte aux nouvelles conditions créées par les modifications du milieu.

Jacques Brengues

Centre ORSTOM 911 Avenue Agropolis B.P. 5045
Montpellier cedex

Jean-Pierre Hervé

Centre ORSTOM B.P.1386, Dakar, Sénégal

Jean-Marc Hougard

Centre Pasteur du Cameroun B.P. 1274, Yaoundé,
Cameroun

Jean Mouchet

ORSTOM 213 rue La Fayette 75480 Paris cedex 10

Des recherches sur l'eau et la santé dans les contextes du développement en Afrique, ont été entreprises en 1989 par l'ORSTOM, à l'initiative du ministère français de la Recherche et de la Technologie*. Elles font suite aux préoccupations quant aux retombées sanitaires de certaines actions de développement.

L'objectif final du programme est l'élaboration de méthodes de prévention et de lutte. Ces actions de santé devront se dérouler dans un cadre intersectoriel, étant donné que l'intervention sanitaire gère le plus souvent une situation créée par les activités agricoles ou industrielles. L'exécution en revient non seulement aux structures nationales de santé mais aussi aux organismes de développement. Le Cameroun et le Sénégal ont été choisis pour débiter ce programme. Ces deux pays ont l'avantage de présenter des contextes de développement et d'environnement très différents.

*Le programme eau et santé a bénéficié du soutien du ministère de la Recherche et de la Technologie, département de la recherche pour le développement, de l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM); du Centre Pasteur du Cameroun (CPC); de l'Organisation de coordination pour la lutte contre les endémies en Afrique Centrale (OCEAC); de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), Division du contrôle des maladies tropicales.

choisi deux cultures africaines, l'une vivrière, celle du riz, l'autre industrielle, celle de la canne à sucre.

Modes traditionnels et usage de l'eau

Dans notre démarche, nous considérerons d'abord l'homme, dans son contexte culturel et social, ainsi que le milieu physique et biologique, puis l'action de l'homme sur ce milieu et enfin les conséquences sanitaires de ces changements de l'environnement.

L'homme, particulièrement en Afrique, a tendance à conserver son mode de vie traditionnel, issu de la culture de son groupe ethnique, à travers les changements et les migrations. En milieu rural, par exemple, son comportement par rapport à l'eau est



Canne à sucre en culture pluviale en Afrique (cliché : J.P.Hervy).

Ainsi, deux zones ont été retenues :

- une zone de forêt humide du sud-Cameroun (cours inférieur de la Sanaga) où des aménagements, déjà réalisés ou prévus, sont mis en place, au détriment de la forêt ;

- une zone sahélienne du Sénégal (basse et moyenne vallée du fleuve) où la construction de barrages suivie de l'aménagement de périmètres irrigués, modifie l'environnement et le mode d'occupation de l'espace.

Ces programmes se fondent sur le partenariat et la pluridisciplinarité ; sciences biologiques, médicales et agronomiques collaborent avec les sciences humaines et sociales, pour couvrir un champ de recherche large et diversifié.

Les premiers résultats obtenus de 1989 à 1991 (2), répondent à nos espérances. Pour illustrer notre problématique, nous avons

guidé par l'appartenance à un sexe, un groupe d'âge, une activité professionnelle ou une fonction sociale. Ainsi, les migrants du nord-Cameroun, coupeurs de canne à sucre dans les plantations de Mbankjock, au sud du pays, conservent souvent leurs habitudes dans le mode de prélèvement, d'utilisation et de stockage de l'eau (Mobignol et Pokam, 1991). Mais ces attitudes ont cependant tendance à s'estomper avec le mélange des groupes ethniques et la pression de nouvelles conditions de vie. Celles-ci se manifestent particulièrement en milieu urbain où le migrant est confronté à un nouveau système social qui a ses propres règles, et où s'exerce la pression des structures nationales et des groupes dominants.

Les situations peuvent évoluer de façon imprévue. Ainsi, par exemple, les Sénégalais rentrant de Côte-d'Ivoire pour des raisons conjoncturelles, demandent à participer à une nouvelle redistribution des terres, dans

les périmètres d'aménagements agricoles, sur la vallée du fleuve, leur pays d'origine. En d'autres termes, l'homme conserve la mémoire de son passé avec sa culture mais, pour survivre, il doit s'adapter au nouveau milieu dans lequel il s'établit.

Le milieu physique et biologique a aussi ses contraintes. Deux éléments abiotiques, la température et la pluviosité, ne sont pas maîtrisables par l'homme mais conditionnent la plupart des aménagements. Parmi les êtres vivants, les microorganismes (virus, bactéries, parasites), les insectes, les mollusques et les rongeurs, quelquefois alliés de l'homme, sont souvent ses concurrents voire ses ennemis, (agents pathogènes et vecteurs).

Dans ses actions de développement, l'homme doit donc se prendre en compte mais aussi respecter les exigences et assumer les risques du milieu qu'il a modulé. Quatre maladies transmises par des vecteurs, le paludisme, les schistosomiasés, la filariose de Bancroft et les borrelioses nous ont semblé de bons indicateurs de santé. Nous examineront comment la culture du riz et celle de la canne à sucre agissent sur ces indicateurs.

Ces deux cultures exigent un apport d'eau important. A défaut d'une pluviosité suffisante, l'irrigation devient nécessaire pour compenser l'évaporation ; ces compléments peuvent varier de 500 à 1500 mm.

Les conséquences sanitaires

En ce qui concerne la riziculture, les deux modes culturels ont des conséquences sanitaires très différentes. La culture pluviale n'entraîne pas, habituellement, de modifications importantes de l'état sanitaire, sauf si elle est source de déplacements de populations ou de transformations du milieu.

Ainsi la culture sur brûlis peut entraîner une déforestation favorable au développement d'insectes héliophiles vecteurs de paludisme, tels *Anopheles gambiae*.

L'irrigation est, a priori, plus dangereuse mais les effets pervers diffèrent suivant le contexte bio-climatique, épidémiologique et humain. Elle entraîne toujours une forte augmentation de la densité des anophèles (*Anopheles gambiae* et *Anopheles funestus*), vecteurs à la fois du paludisme et de la filariose, en milieu rural africain. Cette augmentation est très favorable à la création ou au développement de foyers de filariose (1).

En ce qui concerne le paludisme, deux cas de figure sont à distinguer. Dans les zones de paludisme stable (régions équatoriales et tropicales d'Afrique du Centre et de l'Ouest), l'augmentation de la densité anophélienne a peu d'influence sur le nombre et la gravité des cas cliniques, dans une population fortement prémunie. La nuisance provoquée par le grand nombre de piqûres d'anophèles incite la population à se protéger au moyen de moustiquaires imprégnées d'insecticide, dont l'achat est facilité par l'augmentation de revenus apportée par la riziculture.

L'aménagement de la vallée du Kou, au Burkina Faso, illustre cette situation (3). En revanche, dans une région de paludisme instable, la riziculture peut provoquer une épidémie meurtrière. Tel a été le cas dans la vallée de la Ruzizi, dans les montagnes du Burundi (4).

Les mollusques, hôtes intermédiaires des schistosomes, bulins et planorbes, prolifèrent plus dans les canaux d'irrigation et les retenues de drainage que dans les parcelles cultivées, essentiellement du fait des fortes variations de température dues à la faible épaisseur du film aquatique. Ce sont la température et la durée de l'assèchement des eaux de surface qui sont responsables de l'absence de planorbes (et de la schistosomiose intestinale) en zone sahélienne.

L'irrigation peut corriger le deuxième facteur et repousser la limite nord des mollusques (cas de Bandiagara) (7). La riziculture provoque aussi la prolifération des rongeurs. Un exemple spectaculaire en a été récemment rapporté, lors de la mise en eau du périmètre irrigué de Diomandou, sur la vallée du Sénégal. En quelques mois, la population des rongeurs a été multipliée par cent. Outre leur rôle de ravageurs des cultures, ces rongeurs sont aussi responsables de morsures graves (notamment chez les enfants) et sont porteurs d'agents pathogènes, transmissibles à l'homme, tels que les leptospires, les borrelioses ou les schistosomes (*S. mansoni*). Ainsi, par exemple, sur le fleuve Sénégal, près du quart des *Arvicantis niloticus* examinés étaient porteurs de *Borrelia crocidurae*, agents d'une fièvre récurrente souvent mortelle chez l'homme, en l'absence de traitement approprié.

La canne à sucre, culture industrielle, demande une importante main-d'oeuvre souvent obtenue par immigration comme l'ont montré Handschumacher (5) sur la vallée du Sénégal

et Mobignol et Pokam (1991) à Mbandjock, au Cameroun. La concentration, la coexistence et le brassage de populations de diverses origines, dans des conditions de vie et d'hygiène souvent précaires, ne sont pas sans danger. Cette situation favorise l'importation et la dissémination de nombreux agents pathogènes, avec l'infection de sujets nonimmuns ou fragiles, tels que les jeunes, les personnes âgées ou dénutries. La liste des affections incriminées est longue mais le péril fécal, avec son long cortège de misères, en reste l'épicentre. Parmi les maladies parasitaires, nous ne retiendrons que la bilharziose intestinale, responsable depuis 1989 d'une très grave épidémie à Richard-Toll (Sénégal). Elle est directement liée à la culture irriguée de la canne à sucre, dans le contexte de l'aménagement du fleuve Sénégal. En effet, la mise en place d'un barrage en aval, à Diama, a amené une désalinisation et une stabilisation du niveau de l'eau, dans les plantations et dans les canaux.

Cette nouvelle situation a permis la prolifération de *Biomphalaria pfeifferi*, le planorbe hôte intermédiaire de la maladie, aux points de contact avec l'homme (2). C'est un exemple caricatural d'un danger sanitaire majeur imprévu occasionné par un aménagement agricole, par ailleurs tout à fait performant.

Des solutions possibles

Pour conclure, il reste à proposer des solutions constructives, dont la mise en oeuvre implique une étroite collaboration entre les populations, les structures gouvernementales, les organismes publics et les sociétés privées de développement. En premier, une prise de conscience de la part des populations est indispensable. Celles-ci doivent placer la santé dans leurs priorités budgétaires. L'augmentation des ressources qu'entraînent les aménagements agricoles devrait faciliter cette prise en charge considérée actuellement comme essentielle.

L'éducation sanitaire, pratiquée à l'école ou dans des structures associatives, devrait être fortement encouragée et aidée par les pouvoirs publics. Ces derniers devraient adapter leurs structures sanitaires et leurs modes d'intervention aux nouvelles conditions qu'imposent les aménagements agricoles.

Enfin, une meilleure collaboration devrait s'instaurer entre le secteur public et le sec-

teur privé. Ainsi, nous avons constaté, dans les deux pays concernés, que la société sucrière du Cameroun (SOSUCAM) et la compagnie sucrière du Sénégal (CSS) étaient tout à fait disposées, comme les "Sugar Estates" du Zwaïland, à participer à l'amélioration de l'état de santé de leurs employés et de leurs familles et même de celui des populations locales.

Actuellement, on ne dispose malheureusement que d'un arsenal de méthodes et de techniques nettement insuffisant ou ina-

dapté pour faire face à toutes les situations. C'est précisément l'objectif du programme de recherche mis en place que de pallier cette carence.



(1) J. Brengues 1975 La filariose de Bancroft en Afrique de l'Ouest. Mémoire ORSTOM 79-299 p.

(2) J. Brengues, J.P. Hervé, J.M. Hougard et J. Mouchet 1992 Grand programme "Eau et Santé" (l'eau et la santé dans les contextes du développement). Rapport d'activité 1989-1991, perspectives d'avenir (rapport d'étape). Doc. ORSTOM non

publié 35 p.

(3) P. Carnevale et al. 1983 La transmission du paludisme dans un périmètre rizicole et en zone de savane de Haute-Volta. Compte rendu 2ème conférence intern. paludisme et babesioses, Annecy 12-22 sept. 1983 140 p.

(4) M. Coosemans 1987 Recherches épidémiologiques sur le paludisme dans la vallée de la Ruzizi et dans l'imbo sud (République du Burundi). Thèse Doc.Sci.Univ.Cath.Louvain 182 p.

(5) P. Handschumacher 1991 Note sur les emplacements des populations de la rive gauche de la vallée du fleuve Sénégal. Quelques implications sur l'épidémiologie des maladies parasitaires. Doc. ORSTOM non publié 11 p.

(6) J. Mouchet et J. Brengues 1990 Les interfaces agriculture - santé dans les domaines de l'épidémiologie des maladies à vecteurs et de la lutte antivectorielle. Bull.Soc.Path.Ex 83 376-93.

(7) B. Sellin et F. Mouchet 1986 Recherches malacologiques menées au CERMES dans les Etats membres de l'OCCGE. Abstr. IVème Congrès protection santé humaine et des cultures en milieu tropical. Marseille 616-21

Les pâturages sahéliens et leur gestion

La gestion des parcours naturels est réalisable à court terme dans les conditions normales, mais elle doit avoir prévu les solutions d'urgence en cas de grave pénurie. Cette sécurisation sera le meilleur moyen de rendre confiance aux éleveurs, on pourra alors leur demander, en plus de gérer l'existant, de favoriser les remontées biologiques par des mises en repos et des restaurations de parcours dont la technique est maîtrisée.

André Gaston

Jean Cesar

CIRAD/IEMVT

10, rue Pierre Curie 94704 Maisons-Alfort France.

La zone sahélienne d'Afrique occupe une vaste bande au Sud du Sahara, s'étendant du Sénégal à la Mer Rouge, sur une largeur variant de 200 à 400 km.

Physionomiquement, la végétation sahélienne est une steppe arbustive à épineux. La végétation herbacée est constituée principalement de graminées annuelles se développant surtout sur les sables, substrat dominant au Sahel.

Il existe aussi des herbacées vivaces, mais elles sont de plus en plus rares en raison des sécheresses répétées : outre certaines graminées telles que *Panicum turgidum* et

Andropogon gayanus, on trouve une cypéracée, *Cyperus jemicus*.

Les ligneux adaptés à la sécheresse sont surtout des épineux : de grands acacias qui ont tendance à se raréfier. Par contre, des espèces telles que *Leptadenia pyrotechnica* et *Boscia senegalensis* semblent se développer au détriment d'autres ligneux, rarifiés par la sécheresse.

Si les rémissions climatiques permettent aux graminées annuelles d'occuper à nouveau le terrain assez rapidement, il n'en est pas de même pour les herbacées vivaces et les ligneux.

Les ligneux sont peu abondants, sur substrat sableux le couvert des cimes n'est jamais fermé, ce qui n'est pas le cas pour la végétation sur cuirasse, on a alors un taillis très

dense, avec de nombreux *Pterocarpus lucens*. L'aspect particulier de cette formation, visible seulement d'avion et sur photographies aériennes, lui vaut le nom de brousse tigrée.

En plus de ces grandes formations, il existe au Sahel des végétations liées à un facteur écologique particulier : l'eau.

C'est le cas de la vallée du fleuve Sénégal, le Delta intérieur du fleuve Niger au Mali, les rives du Lac Tchad, les plaines d'inondation du Logone. Ces stations sont occupées par de grandes étendues de graminées vivaces, dont la plus connue est le Bourgou (*Echinochloa stagnina*). Ces espèces, par l'effet du retrait progressif des eaux sont accessibles à l'état vert par les animaux au cours de la saison sèche, où elles constituent une réserve sur pied appréciable.

Les premiers thèmes de recherche, à partir des années 1960, concernant cette zone écologique, étaient axés sur l'inventaire destiné à la gestion de l'élevage.

Ultérieurement, après la sécheresse, qui a débuté en 1973, les recherches ont été étendues à l'évolution des écosystèmes, sous les actions combinées du climat et du surpâturage ainsi qu'à la gestion conservatoire de cette ressource naturelle renouvelable, incluant les expérimentations sur



Éleveur transhumant dans le sud du Tchad. 1966 - Photo. Andre Gaston - CIRAD/EMVI

la restauration des pâturages dégradés.

Les résultats obtenus, par exemple dans le domaine de l'inventaire, se sont concrétisés par l'édition d'un Atlas "Élevage et potentialités pastorales sahéliennes" édité en collaboration avec le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA-Wageningen).

Dans le domaine de l'évolution des écosystèmes sahéliens, de nombreux sites sont suivis depuis les années 1960-1970, c'est-à-dire avec la sécheresse, en particulier au Sénégal, Mali, Burkina Faso, Niger et Tchad.

On a pu ainsi évaluer (densité, composition floristique, biomasse) les variations du tapis herbacé et mettre en évidence de brusques réductions, mais également une très forte résilience de la strate herbacée et, à un degré moindre, des ligneux, car souvent localisée dans ce dernier cas.

A titre d'exemple, un site sahélien du Tchad situé au nord du 13e parallèle était couvert en 1964 d'une savane herbeuse à graminées vivaces : en 1975, 1988, 1991 elles avaient disparu, la savane est devenue une steppe.

Plusieurs sites du Sahel tchadien ont ainsi été suivis et constituent actuellement des observatoires de l'évolution des écosystèmes, dans le cadre d'un réseau national, Réseau d'Observation des Pâturages Naturels (ROPANAT), du Laboratoire de Recherches zootechniques et vétérinaires de Farcha et de la Direction de l'Élevage.

Devant la dégradation consécutive à la sécheresse et à la surexploitation qui apparaît localement, des essais de réhabilitation ont été réalisés en Mauritanie, Sénégal, Tchad, Djibouti, en collaboration avec les structu-

res nationales et avec l'aide de la Communauté européenne et du Fonds d'aide français. Le principe consiste à collecter l'eau de ruissellement pour la diriger sur les terrains qui ont été ameublés, stopper les semences des espèces spontanées qui normalement sont entraînées par l'eau, introduire des espèces nouvelles. Les résultats obtenus sont encourageants, la réhabilitation est possible, à condition d'obtenir une protection momentanée contre le bétail, cas particulier du grand problème de la gestion des pâturages sahéliens ; ceci conduit à développer la problématique de leur gestion.

De tout temps, les conditions écologiques ont imposé aux éleveurs des stratégies destinées à assurer une alimentation équilibrée et à faire face aux pénuries d'herbe et d'eau. Ils exploitent, en saison des pluies, les parcours les plus septentrionaux, puis se déplacent vers le sud, parfois jusqu'à la zone soudanienne. Ce comportement, généralisé à toute la zone d'élevage extensif, est certes satisfaisant du point de vue alimentation et abreuvement du bétail, mais il est pénalisant pour les hommes, qui n'ont pas accès aux facilités d'éducation et de santé.

L'utilisation des parcours est régie par les droits d'usage entre groupes ethniques et sociaux.

Depuis la décennie 1970, cette organisation qui fonctionnait grâce de bonnes conditions climatiques et d'une démographie humaine et animale relativement basse, est remise en question. Plusieurs facteurs interviennent : crise climatique, croît des troupeaux grâce à l'éradication des épizooties et doublement ou triplement en zone soudanienne des surfaces cultivées qui limitent la

transhumance ou la rendent difficile.

De l'ensemble de ces facteurs découle la nécessité d'une gestion de ces espaces. Si le principe est unanimement admis, la mise en œuvre suscite de nombreux problèmes en raison du contexte socio-culturel.

Avant toute mise en œuvre d'une gestion, obligatoirement concertée avec les éleveurs, il faut :

- s'assurer du contexte dans lequel est perçue l'occupation de l'espace dans leur aire d'utilisation,
- comprendre comment est perçue l'intrusion temporaire d'autres groupes,
- comprendre comment sont organisés les déplacements du groupe vers et à travers les aires d'utilisation d'autres groupes.

On peut alors envisager des entités géographiques et constituer des communautés pastorales qui assureraient la gestion de leur territoire et régleraient les problèmes communautaires. De tels programmes ont vu le jour dans les pays du Sahel, soit sur des territoires déjà utilisés, car pourvus en points d'eau, soit à la faveur d'ouverture de points d'eau, permettant l'exploitation de nouveaux parcours.

Cette gestion est une première étape qui devrait conduire vers une adéquation entre charge animale et productivité primaire, problème clef. En effet, dans les conditions actuelles la productivité inter-annuelle varie au moins de 1 à 5 et la tendance des éleveurs consiste à privilégier l'augmentation numérique du cheptel.

En période climatique normale, l'utilisation des parcours, dans le cadre d'une gestion organisée, se déroule sans trop de problèmes. Par contre, les grands à-coups climatiques bouleversent complètement le système, le disponible fourrager n'est pas suffisant et provoque des déplacements importants vers le sud, dans des zones déjà très occupées par des agropasteurs.

Force est de reconnaître que la gestion des pâturages sahéliens peut, dans une courte période, passer d'une situation excellente à une situation catastrophique. Dans ce dernier cas, aucune organisation ne résiste à l'impérieuse nécessité de la survie du bétail. La gestion ne doit donc pas se contenter d'utiliser judicieusement ce qui existe, il faut pouvoir évaluer chaque année le disponible fourrager, prévoir des structures d'accueil

pour les années difficiles et démarrer des opérations de restauration de pâturages pour convaincre les éleveurs que la dégradation n'est pas irréversible.



(1) BOUDET G. 1976 Les pâturages sahéliens, les dangers de dégradation et les possibilités de régénération. Principes de gestion améliorée des parcours sahéliens. FAO - 58 p.
 (2) BOUDET G., CARRIERE M., CHRISTY P., GUERIN H., LE JAN C., WEDDOUD OULD CHEIKH A., PROMTEP S., REISS D. 1987 Pâturages et élevage au sud de la Mauritanie. Etude intégrée sur les pâturages, leur conservation et leur restauration. Le cheptel et les éleveurs. IEMVT, Maisons-Alfort 282 p

(3) CLANET J. 1975 Les éleveurs de l'ouest tchadien. La mobilité des éleveurs du Kanem et leur réponse à la crise climatique de 1969-1973. Thèse 268 p.
 (4) GASTON A. 1981 La végétation du Tchad (Nord-Est et Sud-Est du Lac Tchad). Evolution récente sous les influences climatiques et humaines. Thèse Paris XII 333 p., 1 carte.
 (5) INSTITUT D'ELEVAGE ET DE MEDECINE VETERINAIRE DES PAYS TROPICAUX Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. [République du Tchad, République du Niger, Burkina Faso, République du Mali, République du Sénégal, République Islamique de Mauritanie]. Synthèse thématiques. Wageningen, Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale, 1985-1991 200 p., nombreuses cartes thématiques, format 80 x 60.

Forêt et Alimentation

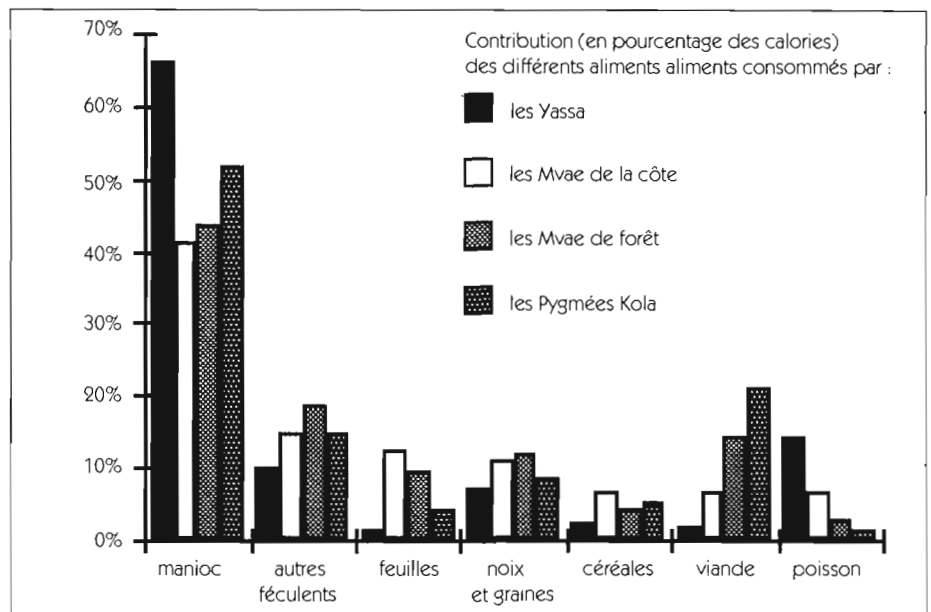
L'alimentation est au cœur des problèmes de déforestation puisque, à côté des exploitations forestières, il s'agit souvent, pour les populations locales, de subsistance : on coupe la forêt pour obtenir des terrains pour la culture des aliments de base, plantain, manioc, ignames.

C.M. Hladik, A. Froment, A. Hladik
 UPR 263 du CNRS "Anthropologie Alimentaire Différentielle"

Quels systèmes peut-on envisager dans les pays forestiers tropicaux pour un développement durable ? Ces forêts qui disparaissent, sont-elles indispensables ? De telles questions brûlantes concernant la gestion de l'environnement ont été récemment posées lors d'un Symposium international (UNESCO, Paris, Sept. 91) organisé par notre équipe sur le thème : "L'Alimentation en forêt tropicale : interactions bioculturelles et applications au développement" en vue d'obtenir une comparaison des différentes situations à l'échelle des continents. Des études pluridisciplinaires permettent d'apporter à la fois un éclairage nouveau et une série de réponses nuancées que nous allons tenter de résumer sans en trahir l'esprit. En fait, tant que la pression démographique reste faible et avant l'exploitation mécanisée du bois, la forêt tropicale a toujours pu se régénérer ; les analyses historiques de ces régions permettront sans doute de démontrer, comme certains chercheurs en

font déjà l'hypothèse, que l'homme cultivateur, au cours des siècles, s'est implanté dans tous les milieux forestiers. La forêt tropicale est diversifiée à l'extrême et constitue un réseau dynamique de nombreuses

interactions entre les organismes vivants. Il en résulte une très grande hétérogénéité de composition selon les lieux et une très grande richesse spécialement, pour l'homme capable de s'y mouvoir. Dans certaines zones même, que l'on pourrait définir comme zones agro-forestières "naturelles", les défrichements ont favorisé la régénération de certaines plantes alimentaires comme par exemple le palmier à huile (*Elaeis guineensis*) en Afrique.



Importance relative des différents groupes d'aliments chez quatre populations du Sud Cameroun, exprimée en pourcentage de l'apport énergétique total du régime

	Yassa	Mvae de la côte	Mvae de la forêt	Kola
Nourriture d'origine animale				
Viande	26	86	201	288
Poisson	220	120	45	19
Aliments végétaux				
Tubercules de manioc	660	412	438	520
Autres féculents	129	212	275	250
Feuilles	7	59	76	20
Noix et graines	30	75	83	10
Total calories	1 940	1 710	1 930	1 905

Consommation (moyenne annuelle en grammes per capita et par jour) et ration calorique moyenne observées dans les quatre ethnies du Sud Cameroun

En ce qui concerne les ressources alimentaires, nous nous sommes attachés à déterminer quelles espèces étaient concernées certes, mais aussi quelles en étaient les productions, selon quelles périodes et quelles en étaient les valeurs nutritives

L'étude de terrain menée au Sud-Cameroun par notre équipe CNRS-ORSTOM, en collaboration avec l'Institut des Sciences Humaines de Yaoundé, représente la plus grande enquête quantitative jamais réalisée auprès de populations forestières, exclusivement chasseurs-collecteurs comme les Pygmées ou agriculteurs, pratiquant aussi la cueillette, la chasse et le piégeage en forêt.

La nourriture a été pesée et les rations calculées sur un échantillon d'environ 1200 personnes représentant les trois ethnies (Yassa, Mvae et Bakola) de la forêt côtière et de l'intérieur, au cours de chaque saison

du cycle annuel. L'état nutritionnel et la dynamique de croissance ont été établis à partir d'une analyse multidimensionnelle de nombreuses mensurations anthropométriques. Les activités ont été chronométrées et le coût de la dépense énergétique calculé. Les résultats de cette vaste étude sont à la fois qualitatifs et quantitatifs car ils concernent la consommation réelle en rapport avec la dépense énergétique mais également une prise en compte des valeurs culturelles accordées aux aliments, obtenues au cours des approches ethnographiques simultanées.

Dans le contexte où les ressources forestières naturelles sont menacées par l'extension des exploitations forestières et le développement de projets agro-industriels dans cette région, on doit tenir compte de l'importance de la part de nourriture tirée de la forêt, protéique notamment, sous forme de gibier et de poisson.

L'ensemble de l'enquête montre que les populations forestières étudiées jouissent d'une nourriture de très bonne qualité, basée sur une grande variété d'aliments provenant à la fois des produits de la forêt et de l'agriculture.

La complémentarité des diverses ressources se retrouve aussi au niveau des variations saisonnières dans l'exploitation des denrées. Contrairement aux résultats d'enquêtes antérieures, la ration en calories est élevée, de 1900 à 1950 kcal.

Mais par ailleurs, le milieu forestier est propice à la transmission de maladies infectieuses, dont les diarrhées, qui influencent considérablement l'état nutritionnel. Aussi le mieux-être des populations passe-t-il d'abord par un assainissement de l'habitat et une meilleure couverture sanitaire.

La promotion de nouvelles techniques de gestion : aménagement de systèmes agroforestiers impliquant le maintien et la culture d'arbres utiles ainsi que le contrôle des populations animales pour la production de gibier, pourrait donner aux habitants des zones tropicales une plus grande maîtrise dans l'exploitation des potentialités qui leur sont offertes.



Pesée des aliments de cueillette et en provenance des plantations forestières, à l'entrée d'un village de Centrafrique. Cette étude de la production alimentaire globale complète les enquêtes alimentaires quantitatives effectuées dans chaque foyer pour déterminer la ration individuelle

(1) BAHUCHET S. 1985 - Les Pygmées Aka et la forêt Centrafricaine. SELAF, Paris

(2) FROMENT A., PASQUET P., KOPPERT G. et LOUNG J. F. 1991 - "Bien manger, vivre bien". Etat nutritionnel et santé des populations forestières du Sud Cameroun (Région de Campo) Colloque "L'Alimentation en forêt tropicale - Interactions bioculturelles et applications au développement" Unesco, Paris, Septembre 1991

(3) GARINE I. de et G.A. HARRISON (Eds.) 1988 - Coping with Uncertainty in Food Supply. Clarendon Press, Oxford. 483 p.

(4) HLADIK A., BAHUCHET S., DUCATILLION C. et HLADIK C.M. 1984 - Les plantes à tubercules de la forêt dense d'Afrique Centrale. Revue d'Ecologie (Terre et Vie), 39 : 249-290

(5) HLADIK C.M. et HLADIK A. 1988 - Sucres et « faux sucres » de la forêt équatoriale - évolution et perception des produits sucrés par les populations forestières d'Afrique. Journ. d'Agric. Trad. et de Bota. Appl., 35 : 51-66

(6) HLADIK C.M., BAHUCHET S. et GARINE I. de 1989 - Se nourrir en forêt équatoriale : Anthropologie alimentaire des populations des régions forestières humides d'Afrique. Unesco, Paris, 97 p.

(7) HLADIK C.M. et GARINE I. de 1990 - Approche bioculturelle des systèmes alimentaires en Afrique. Actes du Colloque "Carrefour des Sciences". CNRS, Paris : 179-180

(8) PAGEZY H. 1982 - Seasonal hunger as experienced by the Oto and the Twa of a Ntomba village in the equatorial forest (lake Tumba, Zaire). Ecology of Food and Nutrition, 12 : 139-153.

L'interface savane-forêt

L'interface (ou écotone) savane-forêt, revêt une importance à la mesure de celle des systèmes qu'il sépare : forêts denses humides et savanes couvrent près de 30% des terres émergées. La longueur de cet écotone s'accroît sans cesse avec la fragmentation de la forêt dense.

Jean-Claude Menaut

Laboratoire d'Ecologie, Ecole Normale Supérieure,
46, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05

Dans les zones d'interface, la multiplication des modes possibles d'utilisation des terres entraîne une concentration particulièrement forte des populations humaines.

Les écotones sont caractérisés de façon différente selon les types de problèmes étudiés :

- les écotones influencent-ils les flux d'énergie, de nutriments, d'eau et de matériel biologique ?

- comment seront modifiés ces flux par les changements du milieu, naturels ou induits par l'homme ?

- dans quelle mesure l'altération d'un écotone influence-t-elle les systèmes qu'il sépare ?

- enfin, un changement global affecte-t-il plutôt l'écotone lui-même (nature, localisation) ou chacun des systèmes ?

Les réponses dépendent de la nature de l'écotone : possède-t-il un fonctionnement propre ou n'est-il que le reflet de celui des systèmes adjacents ? L'écotone peut n'être qu'un simple processus de cicatrisation, un gradient (zone de transition), ou un système diffus, invasif. A très fine échelle, l'écotone est souvent brutal. Il est pauvre en espèces, stable, et il n'y a pas de relations dynamiques entre les deux systèmes d'égale maturité qu'il sépare. Le feu semble souvent en être responsable. Dans ce cas, l'effet de changements globaux ne sera pas détecté sur l'écotone qui ne peut servir d'indicateur. Les changements s'opéreront d'abord dans les deux systèmes. Une ceinture plus ou moins épaisse peut au contraire se développer : l'écotone, riche en espèces de la savane et la forêt, devient alors une zone d'échange. Il possède une signification dynamique : ses variations fonctionnelles, spatiales et temporelles coïncident.

A l'échelle du paysage, l'interpénétration des deux systèmes apparaît. L'écotone devient lui-même un système dynamique diffus, avec des îlots structuraux disséminés dans l'un ou l'autre système.

La composition et la taille de ces îlots indi-

quent leur tendance évolutive et tout changement dans leur composition et leur taille est un bon indicateur des états futurs.

A l'échelle régionale, l'écotone devient une véritable formation végétale. Ainsi, en Afrique, les savanes guinéo-congolaises séparent la forêt dense de la savane soudano-zambézienne. Elles sont arbustives, pauvres en espèces, au contraire des savanes sèches, arborées et riches en espèces. A cette échelle, la dynamique de la formation devient difficile à appréhender et reflète mal l'évolution relative des savanes et des forêts. Sur de longues échelles de temps, le climat régule la proportion de savanes et de forêts, les sols ne jouant un rôle que sur la vitesse locale du processus. Au cours des huit derniers millénaires, la forêt d'Afrique de l'Ouest a couvert la majorité des zones actuelles de savanes, mais s'est rétrécie aussi à quelques refuges montagneux.

A court terme, on peut observer une dégénération de la savane ou de la forêt (perte des espèces sensibles ?). Une telle perte permet l'invasion d'espèces plus tolérantes aux nouvelles conditions. Un processus de succession d'un type à l'autre apparaît sans que l'écotone en soit affecté. La progression forestière en savane peut cependant se faire

par effet de rive (avancée progressive de la lisière) ou par essaimage (colonisation diffuse) dans les bosquets où le feu pénètre peu ou sur les termitières érodées dont le sol favorise l'installation des ligneux. Il a clairement été démontré que les pratiques agricoles traditionnelles facilitaient l'extension forestière. Les puissantes graminées pérennes de savane sont éliminées, les feux régressent, favorisant la germination des essences de forêt. En revanche, l'exploitation mécanisée détruit tout système naturel. La zone de transition se couvre de cultures intensives et la notion même d'écotone disparaît.

(1) Aubréville A. 1966 Les lisières forêt-savane des régions tropicales. *Adansonia* 6 (2) : 175-187.

(2) Avenard J.M., Bonvallot J., Latham M., Renard-Dugerdil M. et Richard J. 1972 Aspects du contact forêt-savane dans le Centre et l'Ouest de la Côte-d'Ivoire : étude descriptive. ORSTOM, Trav. Doc. 35, 254p.

(3) Hansen A.J., Risser P. and di Castri F. 1991 Epilogue : biodiversity and ecological flows across ecotones. Draft, SCOPE workshop on ecotones, Paris.

(4) Hills T.L. and Randall R.E. (Eds.) 1968 The ecology of the forest/savanna boundary - McGill Univ., Montreal.

(5) Hopkins B. 1965 Forest and savanna - Heinemann, London, 100p.

(6) Maley J. 1983 Histoire de la végétation et du climat de l'Afrique nord-tropicale au quaternaire récent. *Bothalia* 14 : 377-389.

(7) Menaut J.C. 1983 The vegetation of African savannas - In : F. Bourlière (Ed.), *Tropical savannas*, pp 109-149. Elsevier, Amsterdam.

(8) Mitja D. 1990 Influence de la culture itinérante sur la végétation d'une savane humide de Côte-d'Ivoire - Thèse Univ. Paris VI, 371p.

(9) Richard J.F. (Ed.). 1990 La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest. Min. Coop. Dévelop., Paris.

(10) Spichiger R. et Lassailly V. 1981 Recherches sur le contact forêt-savane en Côte d'Ivoire : note sur l'évolution de la végétation dans la région de Béoumi - *Candollea* 36 : 145-153.

(11) van der Maarel E. 1976 On the establishment of plant community boundaries. *Ber. Deutsch. Bot. Ges.* 89 : 415-443.



Lisière-Rôniers des galeries - Photo : J. C. Menaut

La Mangrove

La mangrove, qui couvre plus de quinze millions d'hectares en Afrique, Asie et Amérique de Sud, est l'un des écosystèmes les plus menacés de la planète. La mise en valeur des terres, l'exploitation forestière inconsidérée, le développement parfois abusif de l'aquaculture mettent en danger de précieuses ressources naturelles. La végétation terrestre et la faune marine coexistent en un équilibre fragile, encore mal connu, qui ne résiste pas à des interventions brutales. Aussi les projets d'aménagement de la mangrove doivent-ils toujours tenter de concilier les intérêts de la production (agricole et aquacole) et l'intégralité de l'écosystème.

Cl. Marius

Pédologue ORSTOM

Un écosystème côtier caractéristique des zones intertropicales

La mangrove est une formation végétale caractéristique des littoraux tropicaux soumis à l'action de marée, notamment des estuaires et deltas. Elle est représentée par des palétuviers dont les deux espèces les plus importantes sont : *Rhizophora*, caractérisée par des racines échasses et *Avicennia*, caractérisée par des racines aériennes : les pneumatophores. La mangrove des littoraux des Océans Indien et Pacifique est beaucoup plus riche que celle qui borde l'Océan Atlantique.

L'installation des différentes espèces de la mangrove est étroitement liée aux sols et à leur évolution. Elle est chronologique et constitue une "chronoséquence" dont la connaissance est fondamentale pour la cartographie de ces zones. Dans les régions à climats contrastés, (Afrique de l'Ouest), on trouve, à l'arrière des palétuviers, des zones nues ou recouvertes d'une formation herbacée halophyte "les tannes" dont la formation est liée à la sursalinité des sols, alors que dans les régions équatoriales et tropicales humides, la mangrove fait place à une forêt marécageuse ou à des marais d'eaux douces ou saumâtres caractérisés par des cypéracées et des joncs (Plaine des joncs du Delta du Mékong).

Un des écosystèmes les plus riches du monde tropical

Plus de 1000 références consacrées aux usages de la mangrove ont été recensées, par-

mi lesquelles les plus importantes sont liées à l'alimentation, à la pêche et surtout au bois. En effet, le bois de *Rhizophora* est très recherché pour le chauffage, le tanin et la construction. *Avicennia* est exploité pour la pâte à papier. De nombreuses espèces sont utilisées dans la pharmacopée. La mangrove est une source de protéines considérable grâce aux coquillages, poissons, crevettes, fruits de mer qu'elle fournit. L'extraction du sel est une des ressources économiques importantes et, ces dernières années, le tourisme s'est fortement développé dans la mangrove (Vénézuéla, Sénégal). Mais c'est l'agriculture et principalement la riziculture qui s'est considérablement développée dans la mangrove en Asie, en Afrique de l'Ouest et en Amérique du Sud (Suriname, Guyana), avec des aménagements qui dépendent en grande partie de certaines contraintes liées principalement aux

caractères physiques et chimiques des sols et des sédiments sur lesquels se sont développés les sols.

L'ORSTOM, en collaboration avec l'Université Louis Pasteur de Strasbourg et l'Université de BORDEAUX III, a donc étudié avec des moyens appropriés (carottier à piston stationnaire) les sédiments et les sols de dix mangroves du globe, notamment au Sénégal, Brésil, Indonésie, Madagascar, Vietnam, etc... , en liaison avec les universités et institutions de recherches de ces pays, parmi lesquels, nous retiendrons plus particulièrement, l'Institut de Géosciences de l'Université de Bahia (Brésil), l'Institut Sénégalais de la Recherche Agronomique (Sénégal), l'Institut de Recherche pour le Développement du Delta du Mékong.

L'objectif de ces études est d'acquérir une meilleure connaissance du mode de dépôt des sédiments, de leur composition minéralogique et géochimique, de la genèse des sols et de leur évolution afin de mieux comprendre le fonctionnement de cet écosystème, soit en vue de sa préservation, soit en vue d'une mise en valeur préservant son équilibre.

Les principaux résultats : sédiment et sol

Le sédiment de la mangrove a généralement pour origine deux sources, l'une continentale, l'autre océanique. Le continent fournit du quartz, de la kaolinite, de l'illite et l'océan, du quartz et de la smectite, de la halite et de la pyrite. Le cortège des minéraux argileux



Mangrove a *Rhizophora* Photo Cl. Marius

varie selon les régions : association kaolinite-smectite, au Sénégal ; kaolinite-smectite-chlorite en Guyane ; dominance d'illite au Vietnam, dominance de kaolinite en Indonésie et au Brésil. Cette diversité est liée à celle des bassins versants qui fournissent les sédiments.

Du point de vue géochimique, une étude statistique faite sur 730 échantillons a permis de mettre en évidence trois phases géochimiques principales : une phase correspondant à la silice et liée au quartz, une phase correspondant à Al et Ti et liée à la phase argileuse et une phase correspondant aux alcalins et alcalino-terreux et liée à la phase marine.

Le sol sur lequel se développe la mangrove est formé d'une vase fine, généralement argilo-limoneuse. Inondé quotidiennement par la marée, il est caractérisé par la présence en son sein de la pyrite, résultant de l'action des sulfates fournis par l'eau de mer sur le fer provenant du continent, en milieu anaérobie, riche en bactéries sulfato-réductrices.

Nos travaux ont montré que la pyrite était, en grande partie, stockée dans les gaines racinaires de *Rhizophora* et que le pH "in situ" était proche de la neutralité. Si par une évolution naturelle "tannification" ou par un aménagement à but agricole, "poldérisation", le sol n'est plus inondé, l'oxydation de la pyrite conduit à la formation de la "jarosite", sulfate de fer et de potassium, avec baisse du pH, d'où le nom de "sol sulfaté acide" qu'on leur donne. Dans les régions, à saisons contrastées (Afrique de l'Ouest), le sol contient, en plus du soufre, des sels marins. Le sol est alors sulfaté, acide et salé. La sécheresse qui sévit au Sénégal depuis 1968 a considérablement transformé les sols et la végétation.

Cette évolution des sols et des eaux de la Casamance a été étudiée par plusieurs chercheurs (Le Brusq, Loyer, Marius, Pages).

Cette évolution se manifeste par une sur-salure de la Casamance qui est devenue un "estuaire inverse", par un approfondissement des horizons "à jarosite", l'apparition généralisée de gypse et d'aluns, sels caractéristiques de milieux arides et très acides, par la silification des racines de palétuviers, la dissolution du quartz, l'altération de la smectite en kaolinite et la néo-formation de smectite par dissolution de diatomées...

L'étude de l'évolution des paysages de mangroves de l'Afrique de l'Ouest, de la Casa-

mance à la Guinée (Moreau, 1991) par télédétection a montré une nette diminution de la zone à *Rhizophora* au profit d'une mangrove décadente ou d'un tanne inondé et le développement de plus en plus important de zones nues sursalées "les tannes vifs".

L'aménagement de la mangrove

Les deux activités principales qui nécessitent un aménagement de la mangrove sont l'agriculture et l'aquaculture.

L'aptitude des sols de la mangrove à un aménagement agricole dépend essentiellement de trois contraintes : l'hydrologie, la salinité et l'acidité.

Du point de vue hydrologique, deux possibilités s'offrent aux aménageurs : ou bien l'on ne peut pas investir dans le drainage et seule la riziculture est possible, avec éventuellement le cocotier; ou bien l'on dispose de capitaux pour investir dans le drainage et s'assurer une parfaite maîtrise et alors toutes les cultures sont possibles, notamment les cultures industrielles (cocotier, palmier à huile, canne à sucre, légumes, etc...). C'est le cas de la Malaisie, du Suriname.

Du point de vue salinité : les sols de mangroves récemment aménagés sont plus ou moins salés et donc adaptés uniquement à des cultures tolérantes aux sels quand leur quantité n'est pas élevée, c'est la riziculture "tidale", (Delta du Mékong). Il faut cependant distinguer la zone tropicale humide où la salinité ne pose pas de problèmes, de la zone tropicale à saisons contrastées où la salinité peut constituer une contrainte permanente, même dans les zones "poldérisées", par une resalinitation en saison sèche par évaporation (Afrique de l'Ouest).

Du point de vue de l'acidité, les sols de mangroves sous *Rhizophora* s'acidifient rapidement quand on les draine pour éliminer les sels (Sénégal) et le pH peut s'abaisser à des valeurs inférieures à 2, avec toutes les conséquences liées à l'acidité et plus particulièrement à la libération du fer, de l'aluminium et des acides organiques dans la solution. Ces contraintes chimiques liées à l'acidité peuvent être surmontées par un aménagement approprié, notamment, dans le cas de la riziculture, en limitant le drainage au minimum (30-50 cm) pour empêcher l'acidification du sous-sol et donc la remontée des substances acides toxiques.

L'autre option d'aménagement de la man-

grove est l'aquaculture qui se développe de plus en plus, notamment la crevetteculture, parce qu'elle est plus rentable.

Malheureusement dans certaines régions (Delta du Mékong), la mangrove est défrichée de manière abusive pour établir des bassins à crevettes dont le rendement est très faible. Un aménagement rationnel de la mangrove consiste à associer foresterie, aquaculture et riziculture. Pour cela, la mangrove doit être conservée en bordure des cours d'eaux sur une frange de 100 m au moins pour lutter contre l'érosion côtière. En arrière de cette mangrove pourrait se développer l'aquaculture, l'eau étant encore salée ou saumâtre, et enfin, dans une zone endiguée, la riziculture. Ce type d'aménagement était utilisé, de manière traditionnelle, par les populations locales de l'Afrique de l'Ouest jusqu'à la sécheresse actuelle. Il est encore mis en œuvre en Indonésie (Tambaks). Les projets d'aménagement nécessitent donc des études sur le milieu physique ainsi que des études socio-économiques sur la base desquelles serait planifiée l'utilisation de ce milieu, intégrant la foresterie (SADIO, 1991), l'agriculture et l'aquaculture. C'est notamment le cas du programme conjoint ORSTOM-CNRE (CNRE : Centre National de Recherche sur l'Environnement) malgache pour l'étude de la mangrove de Madagascar et du programme ORSTOM-IRDDM (IRDDM : Institut de Recherche pour le Développement du Delta du Mékong) pour la mangrove de Camau (Vietnam).

(1) AUBRUN A. 1988 La mangrove ancienne de Basse Casamance. Sédimentologie - Géochimie - Mise en valeur. Thèse U.L.P STRASBOURG - Mars 1988

(2) BLASCO F. 1991 Les Mangroves : la Recherche - Avril 1991 pp 445-45

(3) DIOP Salif E.M. 1990 Côte Ouest Africaine ORSTOM - Etudes et thèses 1990

(4) DJUWANSAH M.R. 1990 Les mangroves de la zone équatoriale Étude sédimentologique, minéralogique et géochimique (GUYANE, INDONESIE). Thèse U.L.P STRASBOURG - septembre 1990

(5) LEBIGRE J.M. 1990 Les marais mantimes du Gabon et de MADAGASCAR. Thèse - Doctorat d'État - Université BORDEAUX III - janvier 1990

(6) MARIUS C., LUCAS J. 1991 Holocene Mangrove swamps of West Africa Journal of African Earth Sciences. Vol 12 N° 1/2 pp 41-54

(7) MOREAU N. 1991 Contribution de la télédétection à l'étude de l'évolution des paysages de mangroves de l'Afrique de l'Ouest Thèse Univ BORDEAUX III - décembre 1991

(8) SADIO S. 1991 Pédogénèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides et salés du Sine Saloum (Sénégal). ORSTOM Etudes et thèses - 1991 - 270 p

(9) VEILLEFON J. 1977 Les sols des mangroves et tannes de Basse Casamance Mem ORSTOM N° 83 - 1977

Variabilité climatique et changement global

Parmi les effets résultant des changements du climat et de l'environnement global liés aux actions anthropiques (émission de composés radiativement et/ou chimiquement actifs), ceux concernant la modification du cycle de l'eau et des écosystèmes sont particulièrement critiques.

Le possible déplacement des grandes régions climatiques de quelques centaines de kilomètres soumettrait de nombreuses populations à des contraintes bien supérieures à celles associées aux actuelles variations naturelles du climat. La contrainte climatique, la pression démographique et la nécessité d'extraire plus de ressources de survie pourraient alors placer les pays en développement dans une situation critique : l'adaptation aux changements globaux est en effet d'autant plus difficile que les pays concernés sont déjà en situation marginale.

L

a communauté scientifique française est consciente de l'urgence d'accélérer l'effort de recherche, de formation et de sensibilisation sur ces questions d'adaptation aux changements globaux. Le recours aux archives du passé et à l'étude des fluctuations actuelles du climat est une source irremplaçable de données pertinentes. La prévision climatique, réalisée à partir des meilleurs outils disponibles, même si la qualité en est encore perfectible, est la seule approche pour apprécier les impacts sur, et les interactions avec, la société et les activités socio-économiques. Sur tous ces sujets les textes ci-après attestent de l'activité des équipes françaises.

Il faut en outre souligner qu'à travers le développement d'un réseau de recherche régionale pour le bassin méditerranéen et l'Afrique au nord de l'équateur, conçu dans le cadre du programme international "Géosphère-Biosphère" avec un pôle fort à Toulouse, la France contribue au renforcement de la coopération scientifique, pour un développement durable, avec les pays en développement de la région.

Jean-Claude ANDRE
Directeur du CNRM, Météo - France

Crises climatiques et phénomènes migratoires

Dans l'ensemble de la zone sahélienne lato sensu, les sociétés pastorales et agro-pastorales sont les plus sensibles aux aléas climatiques. Aux variabilités pluviométriques s'ajoutent des contraintes pédologiques et géomorphologiques qui conditionnent les itinéraires et les réseaux migratoires. Connues par ces sociétés, inscrites dans leurs calendriers historiques, répertoriées dans de nombreux ouvrages, ces crises climatiques (déficits ou mauvaises répartitions des pluies) ont provoqué des migrations vers les zones méridionales plus humides ; elles ont parfois été suivies par un retour sur les parcours "restaurés", après des pluies favorables. Avec le développement des cultures de rente, un mouvement de réorientation s'est opéré vers le Nord.

Edmond Bernus

ORSTOM - Sociologue - 27, quai de Tournelle
75005 Paris

André Bourgeot (CNRS)

Labo. d'anthropologie sociale - Collège de France
11, Pl. Marcelin Berthelot 75231 Paris cedex 05

Depuis une vingtaine d'années, la zone sahélienne a connu une longue sécheresse avec deux paroxysmes (1972-73 et 1983-84) dont les effets cumulatifs ont engendré une grave crise écologique, révélatrice d'une crise non seulement économique et politique, mais aussi sociale.

Ces sécheresses, précédées par des campagnes de vaccination et des politiques d'hydraulique pastorale (puits profonds, stations de pompage), ont contribué à générer un croît démographique des populations humaines et animales. Cet accroissement est intervenu dans un contexte de dégradation et de déclin des ressources naturelles renouvelables, créant ainsi une série de déséquilibres structurels.

Les capacités de réponse de ces sociétés à ces aléas sont variées : elles n'obéissent pas à un modèle unique car chaque société privilégie ses propres finalités. Le développement spontané des cultures pluviales et des cultures irriguées (de contre-saison) n'ont réussi ni à enrayer le processus de transformation des migrations en exode tous azimuts, ni à réintroduire une stabilité sociale. De surcroît, on assiste à une nouvelle colonisation de la zone sahélienne par la multiplication désordonnée de centres urbains (industries, administrations, marchés) consommateurs de bois (bois de feu et bois d'oeuvre).

Ces nouvelles pressions aggravent la péjora-

tion du couvert végétal qui n'est jamais symétriquement restauré par le retour de pluies suffisantes. C'est ainsi que les migrations, autrefois saisonnières, deviennent de plus en plus anarchiques et conflictuelles, rigidifiant l'existence des frontières nationales.

Les éleveurs, dont les parcours sont éloignés des zones agricoles, n'ont jamais cessé d'entretenir des relations avec les paysans : ils sont tributaires de leurs récoltes, ils les rencontrent sur les marchés.

Ces sociétés pastorales, confrontées à la recherche d'un espace indispensable à la pratique d'un élevage extensif, se heurtent souvent à des sociétés agricoles, culturellement différentes, aux logiques et finalités opposées. Leurs rapports deviennent compétition pour l'espace et rivalité dans le domaine foncier, objet d'enjeux politiques et économiques qui débouchent souvent sur des affrontements violents. Les champs se multiplient aux dépens des parcours (bas-fonds cultivés, bourgoutières transformées en rizières) et l'espace pastoral, perçu comme libre et non approprié, est défriché. La croissance démographique rend difficile une augmentation parallèle des surfaces mises en culture et des troupeaux et la compétition foncière tourne souvent à l'avantage du paysan..

De la gestion d'un espace aux ressources précaires, chaque année remise en cause, dépend la subsistance des hommes et des animaux : les sociétés ont longtemps répondu à cette variabilité par des stratégies de mobilité, associées à des migrations du travail. C'est encore par leur capacité à se déplacer, à diversifier leurs ressources, que les sociétés pastorales témoignent de leur dynamisme et de leur résistance : lorsqu'elles ont perdu la maîtrise de leur espace,



Source du s'abreuvent les troupeaux, à l'ouest de l'Air (Niger)
Photo : E. Bernus

parfois de leur capital (troupeau), la mobilité devient fuite, la migration exode de survie. Dans ce contexte, ces sociétés ne se révèlent plus capables de contrôler leur environnement. La crise actuelle de la zone sahélienne n'est pas seulement liée aux facteurs naturels, aux déficits pluviométriques, c'est à dire à une fatalité implacable : elle est aussi liée à une crise de société.

La complexité de plus en plus grande des problèmes demande une approche globale : les nombreuses variables qu'il faut prendre en compte exigent le recours à une pluridisciplinarité qui associe sciences de la nature et sciences de l'homme dans une perspective d'"écologie humaine". Ces sociétés déstabilisées, désresponsabilisées et souvent dépossédées de leurs terres, doivent reprendre place dans leur écosystème.

Crises climatiques et phénomènes migratoires : programmes et réseaux actuels

- OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL,
34 rue la Pérouse, 75115 Paris Cedex 16.

Meilleure gestion du milieu aride par une observation continue du milieu : valorisation des connaissances, recherche des lacunes, définition de priorités, circulation de l'information, bulletin...

- RESEAU ZONES ARIDES (RZA), CEPE/CNRS,
BP 5051, F-34033, Montpellier Cedex.

Réunions annuelles, Bulletin, Bibliographies, Actions communes pluridisciplinaires...

- RESEAU PARCOURS, c/o CIHEAM / IAM-M,
3191 route de Mende, BP 5056, 34033 Montpellier, cedex 01. Bulletin, informations sur les projets.

- Groupe de réflexion, "Sociétés pastorales : écologie, économie", sous la direction d'A. Bourgeot. Ministère de la Recherche et de l'Espace, Département "Recherche pour le développement".

Exemples de quelques programmes réalisés
- Barral H., Benefice E., Boudet G., Denis J.P., de Wispelaere G., Diakite I., Diaw O.I., Dieye K., Doutre M.P., Meyer J.F., Noël J., Parent G., Piot J., Planchenault D., Santoir C., Valentin C., Valenza J., Vassiliades G.

1983, Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo, ACC/GRIZA/LAT/ISRA ; GERDAT/ORSTOM, Paris, 172 p.

- Barry J.P., Boudet G., Bourgeot A., Celles J.C., Coulibaly A.M., Maniere R.

1983, Etude des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali, ACC/GRIZA/LAT, Paris, 114 p.

- Raynaud Cl.

1980, Recherches multidisciplinaires sur la région de Maradi : rapport de synthèse, DGRST/ACC, 76 p.

(1) Actes du colloque de Ouagadougou 1979 Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale. Logique paysanne et rationalité technique. (4-8 déc. 1978), Paris, Mémoire ORSTOM, n°89, 600p.

(2) Bernus E. et Pouillon F. éditeurs scientifiques 1990 Sociétés pastorales et Développement, Paris, ORSTOM, Cah. Sc. Hum., vol. 25, n°1-2, 1990, 287 p.

(3) Bourgeot A. et Guillaume H. éditeurs scientifiques 1986

Nomadisme : Mobilité et flexibilité? Paris, ORSTOM, Département H. Bull. de liaison n°8, 164 p.

(4) Bret B. coordinateur 1989 Les Hommes face aux Sécheresses. Nord-est brésilien, Sahel africain, Paris, Travaux et Mémoires de l'HEAL, n° 42, EST/HEAL, 422 p.

(5) Dupre G. sous la direction de 1991, Savoirs paysans et développement, Paris, Karthala-ORSTOM, 524 p.

(6) Gallais J. (sous la direction de), 1977, Stratégies pastorales et agricoles des sahéliens durant la sécheresse 1969-1974, Travaux et Documents de Géographie Tropicale n° 30, Bordeaux, CEGET/CNRS, 281 p.

(7) Gallais et al. 1991 Sahel, Nordeste, Amazonie. Politiques d'aménagement en milieux fragiles, Paris, UNESCO, L'Harmattan, 200 p.

(8) Grouzis M., Le Floch E., Bille J.C., Cornet A. éditeurs, 1992, L'aridité : une contrainte au développement, Paris, ORSTOM, Coll. Didactiques.

(9) Landais E. (éd. scient.) et Faye J. (ss. la dir. de), 1986, Méthodes pour la recherche sur les systèmes d'élevage en Afrique intertropicale, Actes de l'Atelier, ISRA, Mbour (Sénégal), 2-8 Février 1986, Etudes et Synthèses de l'LEM.V.T., n° 20, 733 p.

Un Sahel désert ou un Sahara vert

Quel futur pour les déserts tropicaux ?

La contribution de la Paléoclimatologie à notre anticipation de l'avenir des régions continentales est très importante et les données qu'elle fournit sur des scénarios réels doivent impérativement être considérées en même temps que les résultats de modèles mathématiques théoriques.

N. Petit-Maire

avec la participation des membres du PIGC "Déserts" de l'UNESCO-IUGS - Labo. de Géologie du Quaternaire. CNRS - Marseille Luminy Cedex 8

Le changement climatique

Le climat futur de notre planète sera certainement différent de ce qu'il est aujourd'hui. Il sera déterminé soit par la continuation de processus naturels maintenant assez bien connus, au moins pour les derniers 150 000 ans, soit par l'interférence de l'homme qui s'oppose à cette évolution.

L'analyse des archives géologiques constituées par les sédiments déposés au fond des océans (1), les couches de glace à hautes latitudes (2) ou encore les épais loess de Chine (3), met en évidence l'existence, depuis plusieurs millions d'années, de changements climatiques globaux à peu près synchrones. Une succession semi-périodique de phases de réchauffement et de refroidissement est liée, à l'échelle de millénaires, à d'importantes variations de la cryosphère, de la circulation océanique profonde et du niveau marin, comme de la circulation et de la composition atmosphé-

riques (4). Les environnements continentaux ont été profondément modifiés par ces fluctuations, surtout dans la zone tropicale, particulièrement fragile en raison du fort gradient latitudinal des isohyètes (1mm/1,4 km) autour du Tropique.

Cette évolution est liée à des variations astronomiques (5) qui modifient l'insolation de la Terre, à des latitudes clefs et des saisons clefs, que l'astrophysicien André Berger a calculées non seulement pour le passé mais aussi pour le futur. Elles indiquent une tendance vers un refroidissement global.

Ce processus, comme dans les scénarios passés similaires, sera très lent, non-linéaire, et aboutira dans 5 000 ans à une période très froide. Le taux de refroidissement global sera d'environ 0,01°C/siècle.

Nous verrons plus loin que la thèse astronomique est largement confortée par les données de la paléoclimatologie.

A l'opposé, l'homme induit maintenant une forte augmentation de l'effet de serre naturel en polluant l'atmosphère par des gaz radiatifs tels le dioxyde de carbone, le méthane et la vapeur d'eau. Le rapide ré-

chauffement consécutif contrarie la très lente tendance naturelle et pourra annuler ou retarder ses effets.

Les modèles mathématiques qui tentent d'anticiper notre avenir ont une large marge d'incertitude, la réponse de l'océan à une situation totalement nouvelle étant difficilement prévisible. Par ailleurs, aucune prévision moyenne ne peut être faite pour les zones continentales, étant donné la diversité des facteurs géographiques, géomorphologiques, géochimiques, néotectoniques et biologiques impliqués. Ainsi, dans les deux cas de figure possibles, l'approche la plus réaliste du futur de certaines vastes écozones dont le passé climatique est connu réside dans l'analyse des deux paléosituations les plus approchantes. L'une, "froide", serait atteinte au pas de millénaires, l'autre "chaude" (la plus probable) au rythme précipité d'un ou de quelques siècles.

Nous allons retracer rapidement les effets de ces deux tendances opposées sur les paléoenvironnements du Sahara méridional et du Sahel.

Le futur naturel, un scénario froid (fig. 1)

Le futur naturel, un scénario "froid", ressemblerait à l'évolution climatique enregistrée par les Sciences de la Terre entre environ 100 000 et 20 000 BP, c'est à dire à la dégradation du dernier interglaciaire pléistocène correspondant à une forte diminution de l'insolation d'été à 65°N. Elle est faite d'une suite

irrégulière de réchauffements et de refroidissements menant progressivement le globe vers une glaciation majeure et vers un niveau marin à moins 120 m par rapport à l'actuel.

Pendant cette longue interphase, le Sahara a connu plusieurs oscillations climatiques, dont deux ou trois épisodes lacustres, mais la tendance générale à une diminution des précipitations et la moindre régénération des biotopes après chaque épisode plus sec l'a finalement amené, vers 20 000 BP, à 300 ou 400 km au sud de sa limite actuelle (17°N), ainsi que l'ont montré M. Sarnthein et M. Talbot. Le Sahel avait alors reculé d'autant vers l'Equateur (fig. 1).

La télédétection révèle jusqu'aux treizième et quatorzième parallèles des structures duaires bien organisées qui impliquent des précipitations locales inférieures à 100 mm lors de leur déposition.

Les pseudo-rythmes orbitaux nous situent actuellement, sur la courbe astronomique, au début d'une nouvelle dégradation climatique, l'optimum de notre interglaciaire étant terminé.

L'étude des carottes prélevées à Vostok, dans les glaces de l'Antarctique (2), a montré que la température de surface avait bais-

sé de 4°C depuis 6 000 ans, tandis que les gaz radiatifs, méthane et dioxyde de carbone, avaient accusé une légère diminution après l'optimum.

Le Sahara, lui, a nettement amorcé une nouvelle extension au détriment du Sahel : l'isohyète 100, dans ce laps de temps, a migré d'en viron 500 km vers le sud (fig. 1), ainsi qu'en témoignent les travaux de Brookes, Haynes, Kröpelin, Mead, Pächur, Uerpmann, Van Neer, etc. au Sahara oriental et ceux de Durand, Fabre, Guérin, Lézine, Petit-Maire, Riser, Roset, Schulz, etc. au Sahara occidental.

L'Histoire a enregistré les conséquences socio-économiques de cette aridification naturelle tout le long de la ceinture désertique afro-asiatique : déclin des empires sub-sahariens, des colonies romaines, de l'Egypte, mais aussi des civilisations de Mésopotamie, d'Anatolie et de la route de la Soie.

A l'échelle humaine, des "bonnes" et des "mauvaises" années, rythmées par les variations à court terme de l'activité solaire, ont, à l'intérieur de la grande tendance astronomique, été enregistrées par toutes les traditions orales ou les archives de l'ancien monde. Depuis un ou deux millénaires, l'homme s'est fait le puissant allié de la

destruction progressive des biotopes semi-arides en fragile équilibre, le surpâturage et la déforestation empêchant la régénérescence naturelle d'une végétation pourtant adaptée à la sécheresse, après les courts épisodes moins humides.

Ainsi, dans le cas d'une évolution globale non perturbée par l'homme, ce dernier continuerait sans doute à ajouter la désertification à l'aridification naturelle due à un affaiblissement progressif des pluies de mousson.

Plusieurs millénaires s'écouleraient avant qu'une situation aussi drastique que celle représentée sur la figure 1 ne soit atteinte : A. Berger estime que, si rien ne vient entraver les effets de cette évolution astronomique, environ 26% de la détérioration globale correspondant au dernier maximum glaciaire serait réalisée dans 5 000 ans.

Le futur "forcé" par l'homme, un scénario "chaud"

Le futur "forcé" par l'homme vers un scénario "chaud" est bien différent. Depuis le début de l'ère industrielle, les taux de CH₄ et de CO₂ dans notre atmosphère, mesurés dans les glaces de Vostok depuis 150 000 ans, ont augmenté de façon alarmante (respectivement 1 700 ppbv et 348 ppmv actuellement, contre 650 ppbv et 280 ppmv pendant les derniers maxima interglaciaires). La température globale a déjà augmenté de 0,8°C en atmosphère non polluée (6). La réponse de l'océan, différée par son importante inertie, est encore à venir mais la plupart des modèles prévoient une augmentation des températures océaniques de surface qui, selon Washington et Meehl, sera maximale à 20°N et 45°S. Il semble donc logique d'attendre que, comme par le passé et bien que la cause du réchauffement océanique ne soit pas la même (absence du signal astronomique de précession), le Sahel et le Sahara reçoivent des précipitations plus abondantes.

Le début du réchauffement global et les deux étapes de la déglaciation, récemment datés avec précision par E. Bard et coll. (7), ont touché les environnements du Sahara actuel à des vitesses et des intensités différentes, selon la position géographique de la zone considérée.

Les littoraux ont connu les premiers de profondes modifications de leur morphologie.

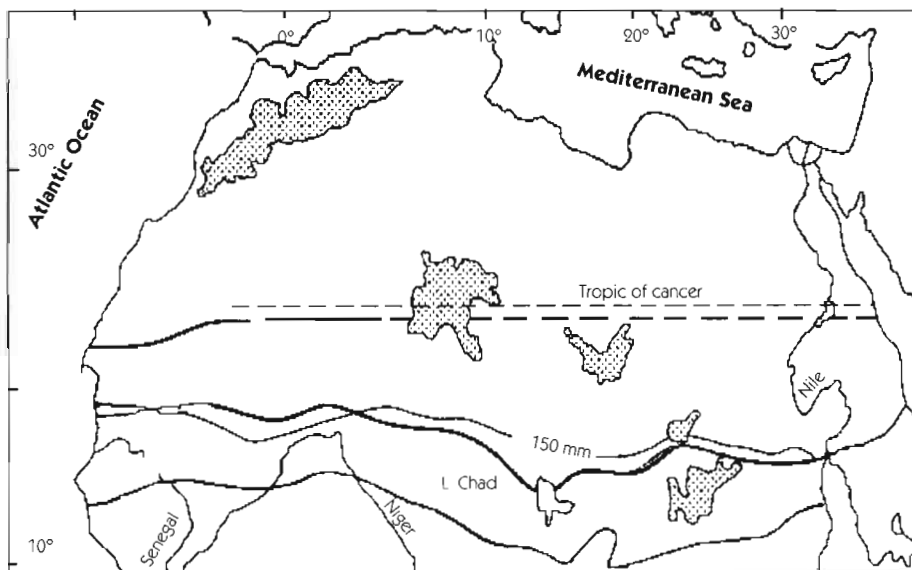


Fig. 1 les derniers 20 000 ans couvrent le dernier maximum glaciaire (20 ka) et le dernier optimum chaud (9 ka). Corrélativement à ces grandes fluctuations climatiques globales, la limite entre le Sahara méridional et son "rivage", le Sahel, a varié de quelque 1 000 km en latitude. Au scénario froid correspond une extension du désert vers l'Equateur, due à la faible évaporation de la surface océanique tropicale et à la réduction corrélatrice de la portée et de l'importance des pluies de mousson. Au scénario contraire, chaud, correspond une régression du désert au profit du Sahel dont les biotopes (végétation, faunes) remontent alors presque jusqu'au Tropique. En raison de la diminution de l'insolation terrestre d'été sur les hautes latitudes, nous nous dirigeons vers une nouvelle phase froide et le Sahara s'est déjà étendu à nouveau de 500 km vers le Sud, pendant la même période. Ces grands rythmes naturels n'ont rien à voir avec les actions anthropiques mais l'homme, depuis sa prolifération dans les zones semi-arides aux marges des déserts, s'est fait un puissant allié de l'aridification climatique.



L'homme a été témoin des deux montées abruptes du niveau marin : 3,7 m/siècle vers 13 500 BP et 2,5m /siècle vers 11 000 BP. Au Sahara atlantique, on a la preuve que des populations épipaléolithiques ont été chassées par la mer des zones du plateau continental émergées pendant la régression de la phase froide précédente.

Si l'accroissement actuel de l'effet de serre produit -ainsi que les experts de l'OMM le prévoient pour le XXI^e siècle- une montée marine moyenne de +0,65 m, les côtes basses entre l'estuaire du Sénégal et la péninsule du Rio de Oro seront à nouveau inondées ; les puits proches de la côte, utilisés par les populations nomades, deviendront, par intrusion d'eau salée, impropres à la consommation humaine et animale. Une grande partie du delta du Nil sera submergée.

Au cœur du Sahara, des décalages chronologiques dans les modifications des environnements, traduisant un accroissement des précipitations, existent selon l'altitude ou la latitude des régions considérées. A partir de 18 000 BP, les massifs sahariens, Tibesti et Hoggar, ainsi que les bordures océaniques du désert voient déjà une réponse du ruissellement et la formation de petits paléosols encore entrecoupés d'épisodes de reprise éolienne.

Au contraire, dans les grands bassins continentaux isolés, aujourd'hui hyperarides (8,9),

aucun changement significatif n'apparaît - à l'Est comme à l'Ouest- avant 11 000 ans BP, date à laquelle la migration progressive mais irrégulière de la limite saharo-sahélienne (isohyète 100 mm) atteint presque le Tropique du Cancer. Vers 9 500 BP, des lacs d'eau douce ou des marécages sont établis en permanence dans les dépressions topographiques ou les dépressions interduinaires des ergs construits pendant la phase froide précédente, rapidement consolidés par la végétation.

Ces nappes d'eau sont nourries par des précipitations locales, estimées cinquante fois supérieures à celles enregistrées à l'heure actuelle dans les mêmes régions, et par la montée des nappes souterraines. Des chaînes trophiques complètes, aquatiques et terrestres, sont constituées vers 7 000 BP. La présence de paléosols confirme qu'une couverture steppique à graminées, plus ou moins clairsemée et discontinue, a pu exister dans presque tout le Sahara actuel et même dans le Tanezrouft, aujourd'hui presque totalement minéral. Les restes de grands mammifères retrouvés jusqu'à 22°N, à l'Est comme à l'Ouest, confirment la remontée d'une steppe sahélienne à près de 500 km au nord de sa limite actuelle.

L'homme, enfin, a, vers 7 000 BP, migré à travers le Sahara depuis les littoraux méditerranéens (10).

La réaction des biotopes est rapide

Ainsi, dans la zone tropicale du Nord de l'Afrique, la réponse des environnements à l'augmentation globale des températures a été incroyablement rapide, à l'échelle géologique. En deux millénaires, la biomasse d'un territoire de 2 500 000 km² a dû au moins tripler. La carte paléogéographique d'une région aujourd'hui parmi les plus désertiques du Sahara, le Nord du Mali (11), montre de façon frappante cette transformation étonnante, corrélative à un réchauffement passé de l'atmosphère plannétaire. Cela semble moins surprenant si l'on pense que les paléosols "dormants" de phases humides précédentes sont prêts à répondre à un nouvel ensemencement lorsque le climat redevient favorable. La "colonisation" du désert par des "migrants" venus du Nord ou du Sud peut donc ainsi s'effectuer assez vite, même sans le secours des techniques actuelles de développement agricole.

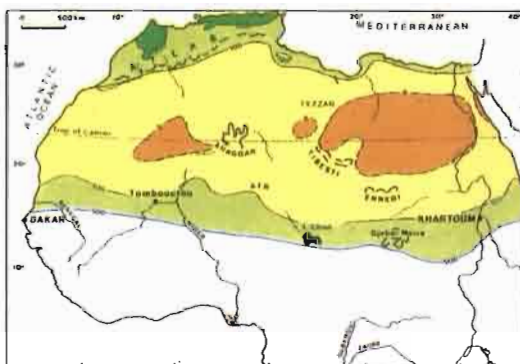
De plus, tous les voyageurs familiers des zones arides savent à quelle vitesse le désert peut reverdir après une courte période de pluie, du fait de la forte capacité de reprise des espèces herbacées annuelles, adaptées à l'irrégularité des précipitations tropicales.

Dans l'éventualité d'une hausse des températures de surface et d'un accroissement corrélatif de l'évaporation sur les océans tropicaux qui renforcerait la portée et la puissance des moussons sur le Nord de l'Afrique, l'on pourrait s'attendre à une nouvelle rétraction des biotopes sahariens et à une extension du Sahel vers le Tropique.

Le Sahara actuel, du fait d'un retour de précipitations plus importantes et plus régulières, retrouverait donc un aspect "vert" avec une relative rapidité, tandis que la recharge des nappes proches de la surface ferait remonter le niveau des puits et parfois affleurer l'eau au fond des dépressions. Ces effets bénéfiques seraient d'autant plus rapides que l'absence actuelle de végétation favoriserait l'infiltration des eaux de pluie (peu d'évapotranspiration) et que l'absence de populations sédentaires protégerait les nouveaux biotopes d'une dégradation des sols, pour le moins dans l'immédiat : la réponse des environnements sahariens à une amélioration des précipitations pourrait de ce fait, et paradoxalement, être plus rapide que celle des biotopes sahéliens où l'eau serait immédiatement utilisée à la fois par les végétaux et par l'homme.

LES SITUATIONS CLIMATIQUES PASSÉES UNE CLEF POUR LE FUTUR

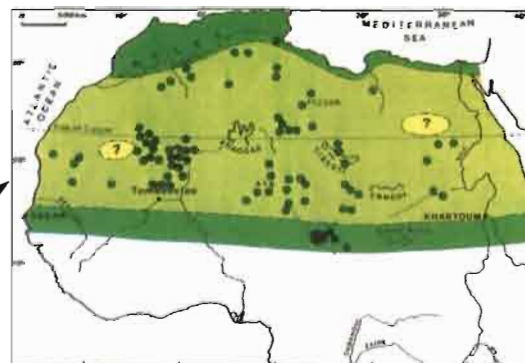
• Present



• Précipitations moyennes annuelles

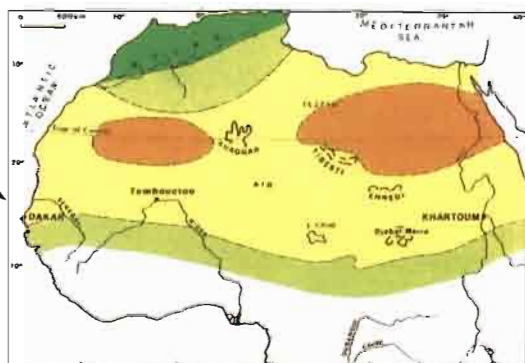


Evolution sous l'influence de
l'homme (effet de serre)



• 9 000 B. P. Interglacial

• 20 000 B. P.



Futur naturel
Forçage astronomique

Fig. 2 : que nous réserve l'avenir ?

Le futur naturel froid, très lent ($-0,01^{\circ}\text{C}/\text{siècle}$), est maintenant exclu en raison de la rapide augmentation de l'effet de serre. Si les conséquences de ce réchauffement, bien qu'il soit d'origine bien différente, sont les mêmes sur l'océan tropical (hausse des températures de surface \rightarrow intensification de l'évaporation \rightarrow renforcement des moussons), le scénario naturel "chaud" du passé pourra se reproduire.

Cependant, l'exemple du passé montre aussi que de tels changements ne se produisent pas au rythme des décades, mais à celui des siècles, et avec des variations locales très grandes.

Quel futur pour le Sahara ? (fig. 2)

La nature va-t-elle, lentement mais inexorablement, à l'échelle de millénaires, étendre à nouveau les déserts tropicaux vers l'Equateur, ou bien l'accroissement du taux atmosphérique des gaz à effet de serre va-t-il reverdir le désert à l'échelle de siècles ? Une poursuite du réchauffement global est donnée comme inévitable par la plupart des experts. Le taux de méthane dans l'atmosphère a déjà atteint

2,5 fois ses valeurs interglaciaires maximales et sa puissance radiative est 3,7 fois plus grande que celle du CO_2 dont les émissions d'origine industrielle n'ont guère pu être réduites depuis que les scientifiques ont donné l'alarme.

La montée des températures globales, mise en évidence dans les deux hémisphères, va très probablement continuer.

Selon H. Flöhn, nous sommes déjà entrés dans un tournant abrupt vers le "scénario chaud" : l'évaporation sur les océans tropicaux aurait augmenté de quelque 15 % depuis trente ans et serait responsable des nombreuses anomalies (tempêtes, El Ninos intenses, cyclones extratropicaux sur le nord du

Pacifique et de l'Atlantique, marées exceptionnelles) enregistrées ces dernières années. S'il en est ainsi, il faut nous préparer à cet "hyper-interglaciaire" artificiel, prédit par Arrhenius dès 1896, à l'aube de l'ère industrielle.

Le Sahara méridional reverdira-t-il ?

L'avenir le dira. Aucun des lecteurs de cet article ne le saura jamais. Cependant, il est urgent de se préparer à ce futur, avantageux pour les uns, catastrophique pour les autres. Les programmes pour le développement agricole des régions arides, à la marge méridionale des déserts tropicaux, devraient considérer l'éventuel retour de conditions

plus humides.

Ils pourraient même en accentuer les effets bénéfiques en prévoyant la réactivation de paléolacs ou de paléorivières actuellement disparus, situés par exemple à proximité de fleuves ou de rivières susceptibles de connaître des crues importantes, ou encore l'irrigation préférentielle des zones où les géologues ont reconnu la présence de paléosols récents, certainement fertiles.

- (1) Winn K., Sarnthein M., Erlenkeuser H. (1991) - 180 Stratigraphy and Chronology of Kiel Sediments Cores from the East Atlantic. *Reports, Geol.-Palaönt. Inst. Univ. Kiel*, 45 : 100 p.
- (2) Lorius C., Jouzel J., Raynaud D., Hansen J., Le Treut H. (1990) - The Ice-core record : climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, 347 : 139-145
- (3) Hovan S.A., Rea K.R., Pisias N.G., Shackleton N.J. (1989) - A direct link between the China loess and marine 18O records : aeolian flux to the north Pacific. *Nature*, 340 : 296-298. (4) Petit-Maire N., Fontugne M., Rouland C. (1991) - Les derniers 130 000 ans : Changements climatiques intertropicaux et variations du taux de méthane atmosphérique. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 312, II : 1235-1241.
- (5) Shackleton N. J., Berger A., Peltier W.R. (1990) - An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene

- timescale based on ODP Site 677. *Earth Sciences*, 81 : 251-261.
- (6) Bücher A., Dessens J. (1991) - Secular Trend of Surface Temperature at an Elevated Observatory in the Pyrenees. *Journal of Climate*, 4 : 859-868.
- (7) Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G. (1990) - U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados : sea level during the past 130,000 years. *Nature*, 346 6283 : 456-458.
- (8) Petit-Maire N. (1991) - Paléoenvironnements du Sahara. Lacs holocènes à Taoudenni (Mali). Editions du CNRS, Paris-Marseille : 242 p.
- (9) Pachur H.J., Hoelzmann P. (1991) - Paleoclimatic Implications of Late Quaternary Lacustrine Sediments in Western Nubia, Sudan. *Quaternary Research*, 36 : 257-276.
- (10) Petit-Maire N., Dutour O. (1987) - Holocene populations of the Western and Southern Sahara. Mechtoids and Paleoclimates. In : Close A. Ed Prehistory of Arid North Africa 259-286. Dallas, USA. SMU Press.
- (11) Petit-Maire N., Riser J. (1988) - Le Sahara à l'Holocène Mali. 1 carte couleur 1/1000.000. CCGM, Paris.

La prévision climatique

Les anomalies climatiques proviennent de la variabilité de la circulation générale de l'atmosphère. De nombreuses études empiriques ont mis en évidence des relations entre la circulation atmosphérique et les conditions en surface. Sur les océans en particulier, on observe fréquemment dans certaines régions des températures plus chaudes ou plus froides que la normale, qui évoluent pendant des durées qui peuvent atteindre plusieurs mois ou plusieurs saisons.

J.F. Royer

Météo-France 42, av. G. Coriolis 31057 Toulouse cedex

Centre National de Recherches Météorologiques

J.P. Céron

Météo-France, 42, av. G. Coriolis, 31057 Toulouse cedex - Ecole Nationale de la Météorologie

Les modèles numériques de circulation générale

Les modèles numériques de circulation générale de l'atmosphère, dérivés des modèles de prévision du temps, permettent de représenter les conditions en surface et leur influence sur les processus atmosphériques : ils constituent l'un des principaux outils de recherche sur la simulation du climat et la

prévision climatique.

Les expériences de sensibilité réalisées sur ces modèles ont permis de confirmer que des anomalies thermiques de l'océan pouvaient, en modifiant les échanges de chaleur et de vapeur d'eau entre l'océan et l'atmosphère, exercer une influence à long terme sur la circulation de l'atmosphère et conduire à l'apparition d'anomalies climatiques dans certaines régions du globe.

Plusieurs centres de recherche ont entrepris d'appliquer les modèles de circulation atmosphérique, pour effectuer des tentatives expérimentales de prévision mensuelle. Parmi ceux-ci, on peut citer le National Meteorological Center (NMC) et le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) aux États-Unis, le Meteorological Office (UKMO) en Grande-Bretagne, le Centre Européen de Prévisions

Météorologiques à Moyen Terme (CEPMET) à Reading, et, en France, le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) et le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM).

La méthodologie la plus appropriée à la formulation de prévisions climatiques consiste à réaliser, avec un modèle, un ensemble de plusieurs prévisions partant de situations initiales voisines, et à calculer des statistiques d'ensemble sur les résultats de ces prévisions.

Cette technique nécessite des moyens de calcul très puissants, et n'a pu être mise en application que très récemment avec l'apparition des superordinateurs (Cray 2, Cray YMP). Bien qu'encore insuffisants pour justifier la réalisation systématique de prévisions mensuelles opérationnelles, les résultats donnés par les modèles numériques apparaissent très prometteurs, surtout si l'on considère que l'application de modèles à ce problème n'en est qu'à ses premiers essais.

Les modèles eux-mêmes sont en constante amélioration, et sont encore loin d'avoir atteint leur optimum, car la capacité des moyens de calcul actuels impose encore trop souvent de sacrifier la précision du calcul et de la représentation des processus physiques au profit de l'efficacité. Une meilleure prise en compte des conditions

en surface telles que les caractéristiques des sols et de la végétation, les valeurs initiales de l'humidité des sols, de l'étendue et des propriétés du manteau neigeux devraient aussi avoir un impact positif sur les prévisions mensuelles. Ceci est rendu possible par les techniques d'observations satellitaires.

Le couplage Océan-Atmosphère

A l'échelle mensuelle, la simple persistance des anomalies thermiques océaniques observées le mois précédent constitue un bon prédicteur, capable d'expliquer une partie appréciable (de l'ordre de 50%) de la variance des températures à la surface de l'océan. Mais pour étendre l'échéance des prévisions climatiques au-delà de l'échelle mensuelle, il devient nécessaire de calculer l'évolution du contenu thermique et de la profondeur de la couche mélangée océanique, en fonction des échanges avec l'atmosphère et du mélange turbulent provoqué par la tension du vent en surface, ainsi que des advections thermiques provenant des courants océaniques et des remontées d'eau froide (upwellings).

On est donc conduit à utiliser un modèle de circulation océanique basé sur les équations dynamiques et thermodynamiques des couches superficielles de l'océan. Les

modèles océaniques utilisant comme condition aux limites des flux en surface qui dépendent de l'état de l'atmosphère, il est nécessaire de calculer simultanément l'évolution de l'atmosphère ; c'est à dire de réaliser un modèle couplé Océan-Atmosphère.

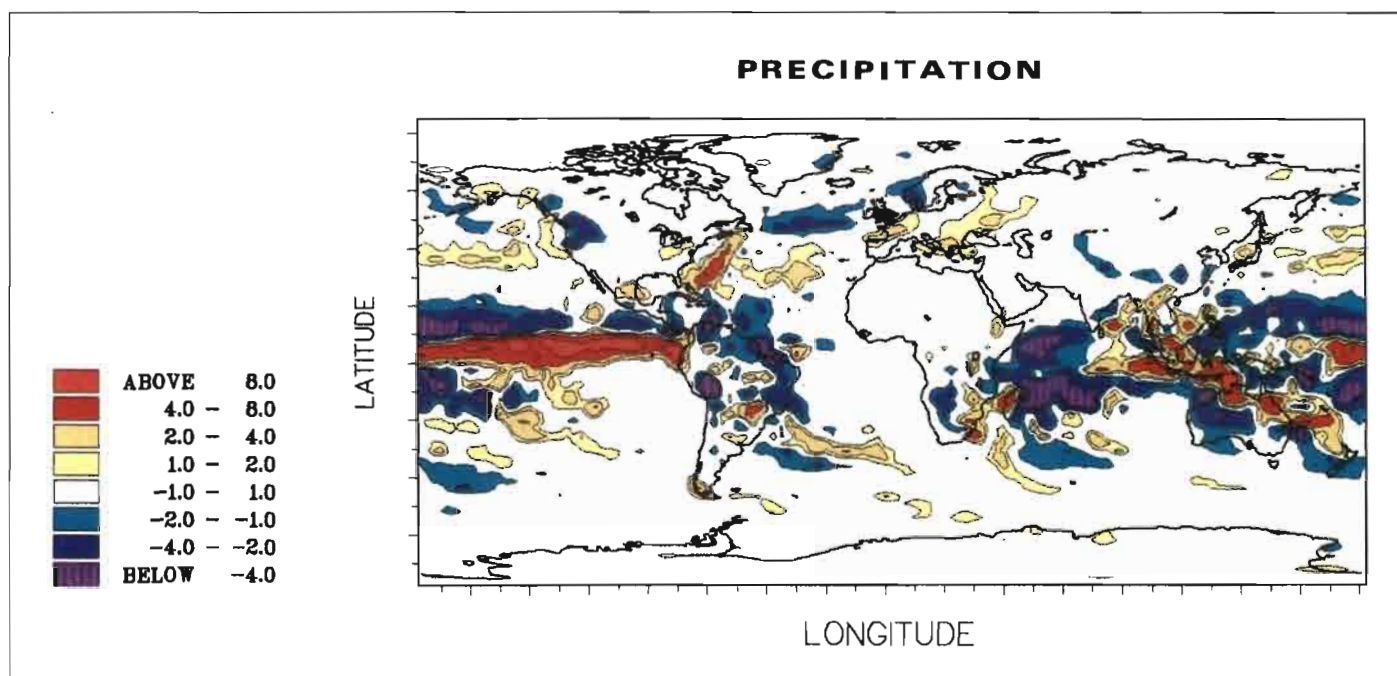
Les modèles couplés sont également un outil indispensable pour l'étude et la prévision de l'impact climatique des modifications apportées par l'homme à son environnement naturel, telles que l'accroissement de la teneur atmosphérique des gaz à effet de serre.

En France, la communauté scientifique concernée par les problèmes de modélisation climatique a entrepris de regrouper ses efforts pour réaliser un Modèle Climatique Communautaire couplant un modèle atmosphérique - dont les éléments de base sont développés par Météo-France et par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) - avec un modèle d'océan global - développé au Laboratoire d'Océanographie Dynamique (LODYC).

Ces efforts de recherche sont soutenus par les programmes nationaux (Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat) ou européens (Programmes "EPOCH" et "Environnement" de la Commission des Communautés Européennes) et constituent une contribution aux grands

programmes internationaux, tels que le Programme International Géosphère Biosphère (PIGB) ou le Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PMRT).

- (1) Déqué M. 1990 : Impact of prescribed sea surface temperatures on extended range forecasting. *J. of Marine Systems*, 1, pp. 61-70.
- (2) Hastenrath 1991 : Climate anomalies in the tropical Americas : diagnostics and predictability. *La Météorologie*, VII série, n° 37, pp. 22-30.
- (3) La prévision du temps et du climat Supplément au n° 201 de La Recherche, Juillet-Août 1988.
- (4) Michaud R. 1990 : Extended memory of the initial conditions in long-range forecasts of the January 1983 atmospheric circulation. *J. of Climate*, 3, pp. 461-482.
- (5) Palmer T.N., Brankovic C., Molteni F., Tibaldi S., Ferranti L., Hollingsworth A., Cubash U., Klinker E., 1990 : The European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Program on extended-range prediction. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 71; pp. 1317-1330.



Anomalie du champ de précipitation (en mm/jour) simulé par le modèle de circulation générale de Météo-France en réponse aux anomalies de température de l'océan de l'hiver 1982-83 (expérience réalisée au CNRM par J.F. Mahfouf). Cette réponse est caractéristique d'un phénomène El Niño, avec un accroissement des précipitations au dessus de l'anomalie océanique chaude dans la partie Est du Pacifique Equatorial, et une réduction dans la partie Ouest.

d'Est Tropical) (4) ;

- des états de surface continentaux présentant en moyenne un albédo plus fort et une diminution du contenu en eau du sol associée à une dégradation de la végétation (5) ;
- un moindre recyclage de l'eau atmosphérique en liaison avec les dégradations anthropiques sur les forêts-savanes (6) ;
- un réchauffement de la surface des océans de l'hémisphère sud et un refroidissement de ceux de l'hémisphère nord (7). Le dipôle constitué par cette opposition de tendance entre Atlantique Nord et Sud apparaît fortement lié, à l'échelle décennale, à la pluviométrie au sud du Sahara (fig. 2).

Ce dernier résultat, en partie associé à la circulation thermohaline Atlantique, constitue un des acquis les plus prometteurs en termes d'aménagement à long terme.

Variabilité locale

De nombreuses institutions françaises (CNES*, CNET*, CNRS*, INRA*, METEO-FRANCE, ORSTOM*, entre autres) se sont attachées à mieux décrire et comprendre la dynamique des précipitations, le bilan d'énergie en surface et le cycle de l'eau, en milieu quasi-désertique (expériences COPT 81* (10), EPSAT* (11) et HAPEX-II SAHEL* (12).

Cette approche longtermes négligée est en effet fondamentale pour la compréhension de la variabilité climatique tropicale. Ainsi, on situe mieux aujourd'hui la difficulté de la mesure des précipitations depuis que l'on sait que 50% de la pluviométrie au Sahel tombe en moins de trois heures. On est également capable maintenant de modéliser le fonctionnement d'une ligne de grains (13).

Enfin, le déroulement de l'expérience HAPEX-II SAHEL en 1992 nous permettra de mieux appréhender les échanges d'énergie entre sol, végétation et atmosphère.

Perspectives

L'approche générale de la variabilité climatique ne peut être que multidisciplinaire (programme PIGB*) car elle nécessite un suivi permanent et une bonne connaissance des paramètres physiques (paramètres météorologiques, océanographiques, de surface continentale, de végétation), et des faits de société (évolution démographique).

Il est donc important de poursuivre la constitution de fichiers de données homogènes et fiables et d'utiliser au mieux les nouvelles

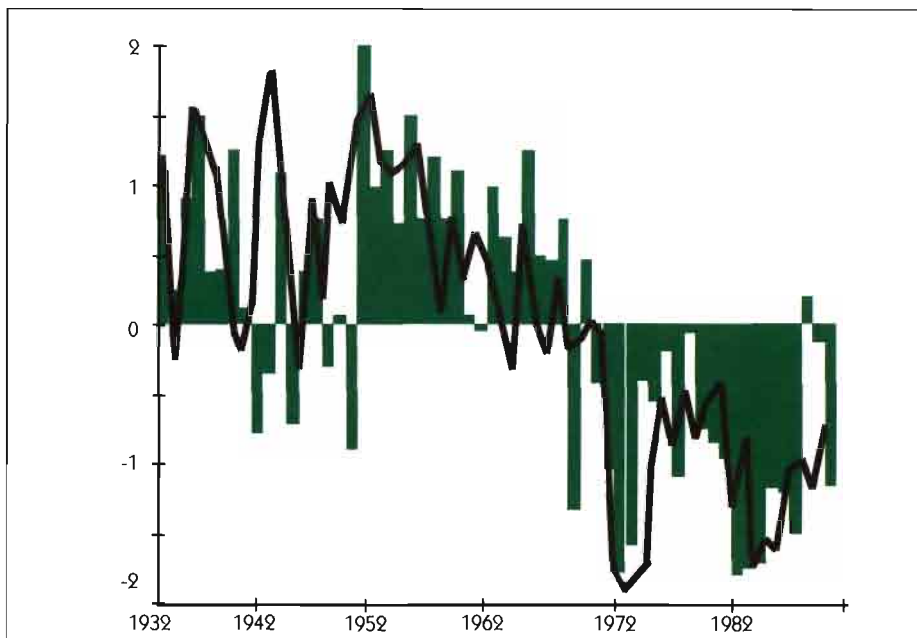


Fig. 2 : Evolution de l'indice pluviométrique soudano-sahélien (barres verticales, (3)) et du dipôle thermique Atlantique (différence de température entre l'Atlantique nord et l'Atlantique sud, (8)). Les valeurs sont exprimées en unités d'écart-types sur la période 1933-1990 et le coefficient de corrélation linéaire entre les deux séries est de 0,72.

techniques de mesures et de traitement.

C'est l'interaction constante des diverses méthodes d'investigation, diagnostiques par l'analyse de données, et numériques par expériences de sensibilité des modèles climatiques (couplant atmosphère, océan, sols et végétation) qui permettra de mieux appréhender la haute complexité du fonctionnement du climat et de sa variabilité.

Glossaire

COPT 81 : Convection Profonde Tropicale, 1981

EPSAT : Estimation des Précipitations par Satellite

HAPEX-II-SAHÉL : Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment, Niger, 1992.

OA : Oscillation Australe

OQB : Oscillation Quasi Biennale

PIGB : Programme Interaction Géosphère Biosphère

ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

CNET : Centre National d'Etudes des Télécommunications

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

ORSTOM : Institut Français pour le Développement en Coopération.

(1) Sircoulon J. : "Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940", Cahiers ORSTOM, série hydrol., vol. XIII, n°402, 1976, pp. 75-174.

(2) Desbois M., Kayiranga T., Gnamien B., Guessous S. et Picon L. : "Caractérisation of some elements of the Sahelian Climate and their interannual variations for July 1983, 1984 and 1985 from the analyses of METEOSAT ISCCP Data", Journ. of Clim., 1988, 9.

(3) Moron V. : "Variabilité spatio-temporelle des précipitations en Afrique occidentale et centrale (1933-1990)" Soumis à la météorologie.

(4) Fontaine B. et Janicot S. : "Wind field coherence and its variations over West Africa", Journ. of Clim., May 1992, in press.

(5) Courel M.F. : "Etude de l'évolution récente des milieux sahéniens à partir des mesures fournies par les satellites", Thèse d'Etat, Paris I, 1984.

(6) Monteny B. A. : "Contribution à l'étude des interactions végétation-atmosphère en milieu tropical humide. Importance du rôle du système forestier dans le recyclage des eaux de pluie", Thèse d'Etat, 1987.

(7) Folland C.K., Palmer D.E., et Parker D.E. : "Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-1985", Nature, n° 320, pp. 602-607, 1986.

(8) Bottomley M., Folland C.K., Hsiung J., Newell R.E. et Parker D.E. : "Global Ocean Surface Temperature Atlas", Londres, 20 pp. et 313 fig.

(9) Hubert P., Fouere P., et Lebel T. : "Influence de l'échantillonnage des intensités pluviométriques sur l'estimation des précipitations cumulées", Veille Climatique Satellitaire, n° 38, pp 50-56, 1991.

(10) Roux F. : "Les lignes de grains de COPT81 : environnement, précipitations, cinématique et thermodynamique", Thèse d'Etat, 1987, 368 p.

(11) Cadet D.L. et Guillot B. : "Epsat : Estimation des Pluies par Satellite", Programme de recherche, fascicule ORSTOM, 63 p., 1991.

(12) Hoepffner M. : "Présentation de l'expérience Hapex", édité par l'ORSTOM, 1991.

(13) Redelsperger J.L., Lafore J.P. : "A three-dimensional simulation of a tropical squall-line : convective organisation and thermodynamic vertical transport", Journal of Atmospheric Sciences, n° 45, pp 1334-1356, 1988.

Variabilité historique et récente

La variabilité climatique historique et récente à laquelle sont confrontés les PED est l'un des problèmes majeurs posés à l'humanité en cette fin de siècle. Ces pays, situés en majorité dans les basses latitudes, montrent une régionalisation et une saisonnalité principalement fondées sur la pluviométrie. Ainsi la variabilité climatique dans ces pays concerne essentiellement le cycle de l'eau. Alors que la répartition dans l'espace et dans le temps des cumuls de précipitations détermine les plus fortes contraintes à l'aménagement, les fréquences, intensités et durées des anomalies pluviométriques (sécheresses, excédents), définies par leur écart aux "normales", modifient sa qualité et son devenir.

Bernard Fontaine

Centre de Recherches en Climatologie / CNRS
21004 Dijon Cedex

Serge Janicot

METEO-FRANCE / LMD-CNRS
91128 Palaiseau Cedex

Le diagnostic précis de la variabilité climatique historique et récente dans les PED est fortement limité par l'imprécision des mesures disponibles. Localement, les fortes discontinuités spatiales et intermittences temporelles des précipitations en milieu tropical (pluies et orages violents) sont mal résolues par les réseaux de pluviomètres et de pluviographes existants.

A plus grande échelle, une bonne représentativité du climat par l'ensemble des données météorologiques disponibles aux stations (densité et qualité du réseau, permanence des observations sur une période significative d'au moins trente à cinquante ans) n'est pas toujours assurée (1).

Enfin les nouveaux types de mesures développés récemment (télédétection (2), analyses des modèles de prévision) améliorent de beaucoup la couverture spatiale et fournissent de nombreux paramètres complémentaires (bilan radiatif, couverture nuageuse, flux atmosphériques, températures de surface de la mer, indice de végétation - fig. 1-).

Ils restent néanmoins difficilement exploitables pour décrire la variabilité climatique car leur mode de définition varie avec le temps.

Variabilité à long terme et téléconnexions

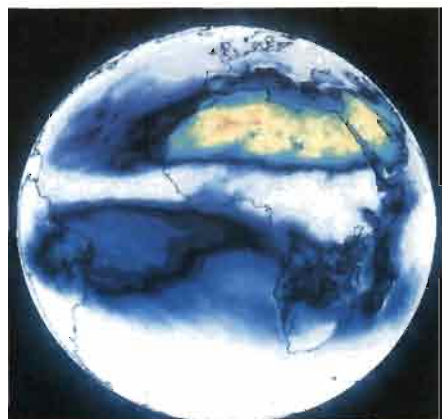
La communauté scientifique française s'est attachée à décrire la variabilité pluviométrique à long terme dans ces pays et à la connecter aux anomalies et fluctuations connues des circulations atmosphérique et océanique aux échelles globale et régionale.

Ainsi la variabilité climatique au sud du Sahara a pu être largement documentée grâce à la présence et à la collaboration de nombreux organismes (ORSTOM, ASECNA, services météorologiques nationaux et français, centre AGRHYMET). Les banques de données constituées ont montré que dans la bande soudano-sahélienne, la variabilité climatique est relativement homogène dans l'espace, persistante au pas de temps interannuel et marquée par une tendance pluviométrique négative depuis la fin des années cinquante (fig. 2). Cette organisation temporelle l'apparente plus à la variabilité climatique des régions péri-Atlantique (Nordeste, Caraïbes, côtes africaines) qu'à celle de l'Afrique de l'Est, de l'Afrique australe ou des régions concernées par la mousson sud-asiatique, davantage affectées par des oscillations de périodes de deux-trois ans (OQB*) ou de cinq-six ans (OA*).

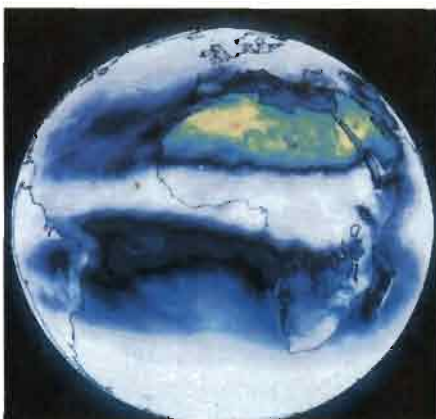
Les résultats récents issus d'analyses diagnostiques et d'expériences de sensibilité sur modèles climatiques ont permis d'identifier les liaisons majeures que cette variabilité entretient avec les circulations atmosphérique et océanique.

Ainsi les sécheresses sud-Sahariennes sont principalement associées à :

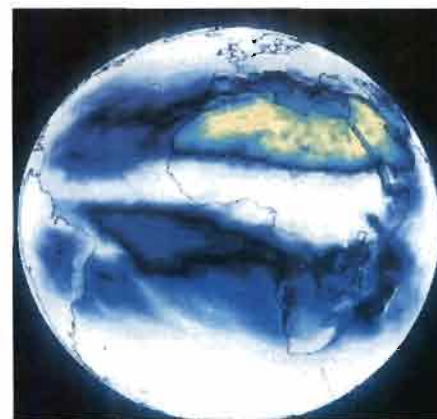
- un renforcement des marges nord-est et sud-est de l'anticyclone des Açores ;
- un affaiblissement des circulations divergentes méridiennes (de type Hadley) et zonales (de type Walker) sur l'Afrique de l'Ouest, en liaison avec une diminution de la convergence du flux de mousson, un renforcement du flux d'est à quatre kilomètres d'altitude (Jet d'Est Africain) et un affaiblissement du flux d'est à quinze kilomètres d'altitude (Jet



juillet 83 : moins convectif, Sahara plus chaud.



juillet 84 : zone convective plus étendue vers l'Atlantique



juillet 85 : zone convective située plus au nord.

Fig 1 Images des radiances METEOSAT infrarouge. Moyennes mensuelles pour juillet 1983, 1984 et 1985(2). Les régions blanches correspondent à de faibles valeurs, c'est à dire à des occurrences fréquentes de sommets de nuages froids (fortement convectifs). On voit aussi clairement la ZCIT (zone de convergence intertropicale). Les régions subtropicales (régions bleues), où peu de nuages à sommet élevés existent, présentent les radiances les plus fortes. On peut noter des valeurs de radiances maximales au-dessus du Sahara (régions jaunes et rouges).

Clichés : Fontaine, Janicot, CNRS.

Des Ressources

Quand on parle d'environnement, l'un des problèmes essentiels est celui des ressources renouvelables : les sols, l'eau, les espèces animales et végétales

La question est double :

- comment éviter l'épuisement de ces ressources : comment éviter que l'érosion des sols aille plus vite que l'altération qui fabrique les sols ; comment éviter que l'exploitation biologique des océans aille plus vite que le renouvellement des richesses biologiques marines ; comment éviter que les pompages d'eau dans les nappes phréatiques aillent plus vite que l'alimentation naturelle de ces nappes ; ...
- comment éviter la dégradation de la qualité de ces ressources ; les baisses de la fertilité, physique et chimique, des sols ; les pollutions, biologiques et chimiques, des eaux, des sols, des plantes ; les déséquilibres biologiques, conduisant à la disparition de certaines espèces au profit d'autres qui vont provoquer de véritables invasions biologiques : il s'agit là de dégradations d'écosystèmes entiers.

Douze milliards d'êtres humains à l'horizon 2100 : tel est le défi que nous avons à relever. Cela ne sera possible que si toutes les ressources renouvelables, dont les sociétés humaines ont besoin pour vivre bien, en bonne santé, sont mobilisées dans une perspective d'utilisation durable : les sols, avec leurs fonctions biologiques, alimentaires, de filtre actif ; les hydro-systèmes dont il faut savoir gérer les cycles hydrologiques, les qualités chimiques, les fonctions biologiques ; les espèces et surtout les écosystèmes dont il faut savoir valoriser les fonctions et les richesses, individuelles de chaque espèce, et collectives de chaque écosystème.

Le présent chapitre illustre, par quelques exemples de recherches menées dans les zones intertropicales, en partenariat avec des équipes de recherche des pays du Sud, la préoccupation de réussir une meilleure gestion des ressources renouvelables.

Alain Ruellan

Directeur du programme environnement du CNRS

Diversité biologique

La gestion de l'environnement doit prendre en compte la diversité biologique sous tous ses aspects, en particulier les mécanismes assurant son maintien, non seulement pour des raisons économiques (ressources génétiques ...) mais aussi pour une question d'éthique : a-t-on le droit de faire disparaître délibérément des espèces et des écosystèmes au nom d'une rentabilité immédiate ? L'irréversibilité de tels actes pose le problème de la responsabilité de nos sociétés devant les générations futures.

Pierre Charles-Dominique

Laboratoire d'Ecologie Générale, MNHN - URA 1183/CNRS 4, avenue du petit Château 91800 BRUNOY

Jean-Louis Guillaumet

Laboratoire de Phanérogamie, MNHN, ORSTOM 16 rue Buffon 75005 PARIS

C'est dans les forêts tropicales humides, milieux particulièrement menacés aujourd'hui, que se trouvent la plus grande partie des espèces animales et végétales du globe (50 à 70%). Il est donc urgent, dans la perspective d'une politique de conservation et de gestion rationnelle, d'établir une estimation des diversités faunistiques et floristiques, tout en développant des recherches permettant de comprendre les mécanismes qui contribuent à leur maintien.

La diversité biologique (liée aux formes biologiques) et la diversité spécifique (nombre d'espèces) sont indissociables et doivent toutes deux être prises en considération. Dans la pratique, la diversité spécifique absolue est impossible à mesurer et, le plus souvent, seuls sont pris en compte les groupes taxonomiques qui sont à la fois les plus significatifs et les plus faciles à recenser. Pour les végétaux ce seront le plus souvent les arbres et arbustes, pour les animaux la totalité ou seulement une partie des familles. Par exemple, chez les vertébrés les inventaires peuvent couvrir la majeure partie des familles de mammifères, d'oiseaux, de reptiles, d'amphibiens et de poissons, alors que pour les invertébrés, qui représentent les groupes les plus diversifiés et les plus mal connus, seul un petit nombre d'entre eux peuvent être échantillonnés avec une certaine sécurité (quelques familles d'insectes, de chélicérates, de mollusques, de lombrics ...). On indique donc toujours les groupes taxonomiques considérés quand on parle de richesse spécifique (1).

En termes de biomasse, les vertébrés sont 10 à 20 fois moins représentés que les invertébrés, et cette disproportion est encore accrue si l'on considère la diversité spécifique (dominée par les insectes). Cependant, les vertébrés constituent de bons indicateurs écologiques dans la mesure où la plupart d'entre eux se situent au sommet des pyramides de consommation.

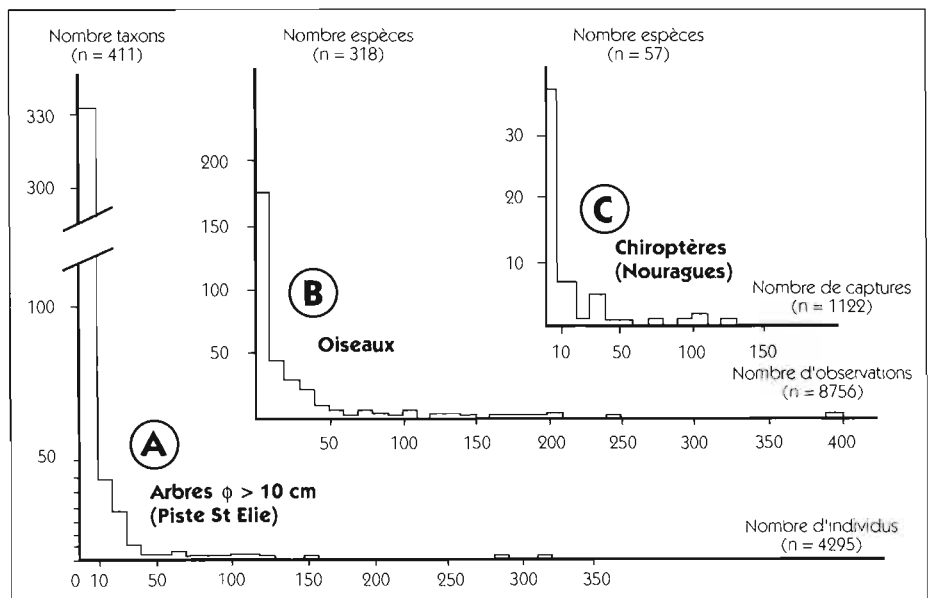
Paysages et diversité biologique

La superficie échantillonnée a également son importance. En effet, le nombre d'espèces augmente au fur et à mesure que la surface s'accroît. Ainsi, des relevés botaniques effectués au Surinam font apparaître 90 espèces d'arbres (diamètre \geq 10 cm) sur 0,5 ha, 120 sur 1 ha, 150 sur 2 ha et 170 sur 3 ha (2). On parle de diversité à l'échelle du biotope, du paysage (gama diversité),

de la région ou du continent. Pour la seule Guyane française, plus de 5 000 espèces de plantes ont été inventoriées et pour l'ensemble de la forêt amazonienne le nombre de 30 000 paraît raisonnable. Tout en gardant l'exemple de la Guyane française, couverte à 90% par la forêt, 35 espèces de sauriens, 76 espèces de serpents, 650 espèces d'oiseaux (+ 56 espèces marines), 72 espèces de mammifères non volants, et 85 espèces de chauves-souris (+ 21 probables) ont été recensées.

En fait, les peuplements sont composés d'un petit nombre d'espèces représentées par de très nombreux individus et d'un grand nombre d'espèces plus ou moins rares. En forêt guyanaise, sur 7 ha contigus, 4 295 arbres de plus de 10 cm de diamètre, correspondant à 411 taxons presque tous déterminés au niveau de l'espèce ont été inventoriés (figure 1) ; 9 espèces (=2%) étaient représentées à elles seules par plus de 100 individus chacune (n=1477, soit 34% des arbres) ; 69 espèces (=17%) étaient représentées par 11 à 100 individus chacune (n=2052, soit 48% des arbres) ; et 333 espèces (=81%) n'étaient représentées que par 1 à 10 individus chacune (n=766, soit 18% des arbres). A signaler que sur l'ensemble du relevé, la moitié des espèces arborées n'étaient représentées que par un seul individu (soit 4,7 % de l'inventaire).

Les mêmes modalités de distribution se retrouvent dans les peuplements de vertébrés étudiés en forêt guyanaise (graphique B



Abondance relative des espèces pour trois différents peuplements étudiés en Guyane française.
A) Arbres d'au moins 10 cm de diamètre (d'après Sabatier, Prévost et Riéra, in prep.)
B) Oiseaux observés ou capturés en trois stations forestières distantes d'une centaine de mètres l'une de l'autre (d'après Thiollay 1986).
C) Chiroptères capturés au filet à la station des Nouragues (Charles-Dominique, in prep.).

et C). Sur trois transects distants de 80 et 120 km, 8 756 oiseaux (318 espèces) ont été inventoriés par observations directes et captures au filet (Thiollay (3) 1986), 21 espèces (7,5%) ont été rencontrées plus de 100 fois chacune (n=3522, soit 40% des observations); 129 espèces (40,5%) 11 à 100 fois chacune (n=4153, soit 48% des observations); et 167 espèces (52,5%) 1 à 10 fois chacune (n=1081, soit 12% des observations). A la station des Nouragues, au centre de la Guyane, 57 espèces de chauves-souris ont été contrôlées par piégeage (1 122 captures, Charles-Dominique, obs. pers.). Quatre espèces (7%) ont été piégées plus de 100 fois chacune (n=440, soit 39% des captures); 16 espèces (28%) 11 à 100 fois chacune (n=562, soit 50% des captures); et 37 espèces (65%) 1 à 10 fois chacune (n=120, soit 11% des captures).

Pour les insectes, l'exemple souvent cité est celui de 47 espèces de fourmis (c'est-à-dire plus qu'il n'en existe sur l'ensemble des îles britanniques) récoltées sur un seul arbre en Amazonie péruvienne (Hölldobler et Wilson (4) 1990). Sur une seule station en forêt guyanaise (Nouragues) 39 espèces de guêpes (Stone com. pers.) et 230 espèces de blattes (Grandcolas (5) 1991) ont été répertoriées,

et sur l'ensemble de la Guyane française 1 500 espèces de longicornes (Cerambyciidés) ont été collectées par Tavakilian (com. pers.) qui estime leur nombre total à près de 2 000.

Biodiversité des communautés animales et des communautés végétales

La coexistence d'espèces très proches pose un problème théorique fondamental puisqu'il est généralement admis qu'une niche écologique ne peut être occupée que par une seule espèce. Il faut tenir compte du fait que les forêts tropicales sont composées d'une mosaïque de petites unités, juxtaposées selon des combinaisons très diverses. Chacune d'entre elles peut correspondre à un stade du cycle sylvigénétique, mais aussi à une combinaison particulière d'espèces végétales. Dans les forêts tropicales humides, l'action de la communauté des animaux frugivores assure une partie importante du transport des graines qui se fait de façon extrêmement hétérogène, puisque les lieux de dissémination dépendent à la fois de leurs habitudes alimentaires, de leurs parcours, et de leurs comportements sociaux. Cette redistribution

des graines, conjuguée aux accidents naturels de la forêt, à la compétition entre plantes et à la prédation des phytophages, oriente la croissance et la survie des plantes selon des combinaisons variées à l'extrême. De nouveaux assemblages de plantes se créent, contribuant à la formation d'une mosaïque en perpétuel renouvellement. La biodiversité des communautés d'animaux frugivores pourrait donc être partiellement responsable de la composition floristique de ces assemblages, et donc de la complexité des structures des forêts tropicales; en retour, c'est cette diversité de la mosaïque forestière qui permettrait le maintien d'un grand nombre d'espèces végétales et animales.

(1) Pielou, E. C. 1974. Populations and community ecology principles and methods. Breach, New York, N. Y. 124 pp.

(2) Sabatier, D. et M.F. Prévost, 1989. Quelques données sur la composition floristique et la diversité des peuplements forestiers de Guyane française. Bois et Forêts des Tropiques, 219. 31-55

(3) Thiollay J.M. 1986. Structure comparée et peuplement avien de 3 sites de forêt en Guyane. Rev. Ecole (Terre Vie) 415. 91-05

(4) Hölldobler B. et Wilson E.O. 1990. The ants, Springer Verlag 732 p.

(5) Grandcolas P. 1991. Les blattes de la forêt tropicale guyanaise. Structure du peuplement et étude ethau écologique des zitoborinaies. Thèse. doc. Univ. Rennes I.

La conservation des ressources génétiques végétales du domaine tropical

La diversité du monde vivant, fruit de l'évolution et facteur d'équilibre de la biosphère, constituait jusqu'à une époque récente, une ressource biologique inépuisable. Ce patrimoine génétique entretenu par la nature et les paysans est en train de disparaître du fait de l'évolution des sociétés humaines et de la puissance de leurs interventions

A. Charrier

ORSTOM. Laboratoire de Ressources Génétiques et Amélioration des Plantes Tropicales.
BP 5045. 34032 Montpellier Cedex

L'accélération de l'érosion génétique

La nature subit des pressions de plus en plus fortes par la destruction systématique de la flore ou de la faune, l'exploitation excessive d'écosystèmes, des aménagements importants, des pollutions diverses ...

Les équilibres biologiques et le jeu de l'évolution s'en trouvent perturbés. Des formes spontanées, réserves générales de diversité et sources de plantes cultivées locales, doivent s'accommoder d'espaces réduits et d'écosystèmes modifiés, comme par exemple les zones littorales méditerranéennes, la région sahélienne ou les zones forestières tropicales. Alors que nous avions l'habitude de subir la diversité, nous devons désormais la protéger de nos propres pressions : c'est dans ce contexte que la protection de la nature et la conservation des plantes ou animaux domestiques se sont développées au cours de la deuxième moitié du XXème siècle.

L'évolution de l'agriculture au cours du XX^{ème} siècle, surtout dans les pays développés, se traduit par une spécialisation et une tendance à la monoculture, une uniformisation des techniques de production et des demandes des consommateurs. Les nombreuses variétés locales, souvent hétérogènes, disparaissent au profit de quelques variétés homogènes à large diffusion. La sélection n'est plus le fait de chaque communauté villageoise mais de groupes scientifiques appartenant à des organismes ou à des entreprises qui ont une ambition internationale. Cette évolution est à la base de l'expansion agricole et de la sécurité alimentaire qui ont permis le développement industriel : les pays en développement empruntent le même parcours avec un décalage d'une cinquantaine d'années. Il n'est donc pas question de revenir en arrière, mais il faut être conscient que l'agriculture sera de moins en moins un réservoir de diversité.

Pour les plantes cultivées, quelques botanistes et agronomes ont joué un rôle pionnier dans la conservation des ressources génétiques à la fin du siècle dernier et au début de ce siècle : est-il besoin de rappeler l'action de Vavilov en URSS, de Harlan aux USA, et de Français comme de Candolle, Chevalier ou Portères ? Sous leur impulsion, la conservation des ressources phylogénétiques a pris forme ; des banques de gènes des principales espèces cultivées ont été créées ; les formes spontanées apparentées aux cultures ont été protégées dans des réserves naturelles...

L'internationale des plantes cultivées

La domestication des plantes cultivées a eu lieu sur tous les continents après la dernière glaciation, c'est-à-dire vers 10 000 ans avant notre ère, avec des modalités qui ont varié selon les plantes et dans le temps. Ce processus s'est poursuivi jusqu'à nos jours et n'est pas forcément terminé. Les centres d'origine et de diversification des plantes cultivées, tout au moins les plus riches, se trouvent dans les régions tropicales.

La domestication a utilisé les plantes sauvages qui se trouvaient sur les différents continents. Elle a consisté à retenir des plantes ayant des caractères, ou surtout une association de caractères, plus favorables pour l'utilisation prévue (syndrome de domestication). La grande différence entre les plantes sauvages et leurs formes cultivées ne portent souvent que sur des formes

différentes de quelques gènes comme cela a été montré chez les céréales (5).

Les grandes migrations humaines de l'Antiquité à nos jours ont été marquées par des échanges de plantes cultivées à l'échelle des continents. Ainsi, après la découverte de l'Amérique, les grands navigateurs ont disséminé des plantes cultivées nouvelles en Afrique, en Asie et en Europe au cours des XVI, XVII et XVIII^{ème} siècles. Une nouvelle série d'échanges s'est produite avec la colonisation, dans le courant du XIX^{ème} siècle et le début du XX^{ème} siècle. La plupart des échanges ont porté sur de très petites quantités de graines.

La dissémination des plantes cultivées s'est accompagnée d'une adaptation à des milieux nouveaux (acclimatation en Europe d'espèces tropicales) et parfois de nouvelles utilisations. Il est à noter une autre conséquence de ces échanges : en même temps qu'on échangeait les plantes que leurs parasites.

Ces échanges ont conduit à une situation où beaucoup de cultures considérées comme autochtones sont en fait des cultures introduites. Au Cameroun, chez les Bamilékés, par exemple, l'agriculture vivrière est basée sur les plantes suivantes :

- maïs (provenant d'Amérique),
- haricot (provenant d'Amérique) et vigna (provenant d'Afrique),
- igname (provenant d'Afrique),
- taro (provenant du Sud-Est asiatique).

Dans ces conditions, il est bien difficile de définir un "patrimoine national" pour les plantes cultivées et les ressources génétiques ont bien de la peine à reconnaître les frontières politiques actuelles.

Les activités ressources génétiques

Depuis la création du Centre international pour les ressources phylogénétiques (IBPGR) en 1974, un effort considérable a été fait pour la prospection et la conservation des plantes cultivées pour l'alimentation, ayant une importance économique et menacées d'érosion génétique.

A ce jour, les principales banques de gènes conserveraient de l'ordre de 2,5 millions d'accessions. Par ordre décroissant d'importance, on citera les céréales qui représentent la moitié du matériel, les légumineuses à graines, les espèces fourragères, les plantes légumières et les plantes à tubercules, sans oublier les espèces industrielles.

La conservation des ressources génétiques a été organisée par l'IBPGR en un réseau de

collections de base : il y aurait environ 60 banques de gènes détenant du matériel original en quantité, réparties dans une quarantaine de pays représentant différentes zones géographiques et pays en développement. Les centres internationaux de recherche agronomique et certains centres nationaux ont été largement impliqués. Neuf des treize CIRA ont développé comme activité prioritaire la conservation, l'évaluation et l'utilisation des ressources génétiques ; ils détiennent près de 500 000 échantillons. Il n'y a que 15 % des pays associés aux CIRA qui réalisent des programmes nationaux de ressources génétiques, par manque de moyens, d'infrastructures et d'équipes qualifiées, d'où l'importance des programmes coopératifs internationaux.

Depuis les années 60, les organismes français de recherche en coopération (CIRAD et ORSTOM) ont réalisé des prospections et la conservation des ressources génétiques des plantes cultivées tropicales, principalement en Afrique. Nous devons cette orientation à quelques responsables et conseillers clairvoyants, et à un chercheur en particulier, J. Pernès qui s'était forgé une vision originale de l'amélioration des plantes en milieu tropical fondée sur son expérience africaine.

Comme les CIRA, les instituts français se sont intéressés aux principales plantes alimentaires (céréales, plantes potagères et fruitières, racines et tubercules). Des collectes de cultivars locaux et d'espèces apparentées des genres *Abelmoschus*, *Oryza*, *Pennisetum* et *Sorghum* en Afrique, ont été réalisées avec un soutien international de l'IBPGR et déposées pour conservation dans les collections internationales (2).

Ainsi pour les riz, à partir de 1974, l'ORSTOM et l'IRAT ont réalisé avec leurs partenaires 14 prospections dans 11 pays d'Afrique, à Madagascar mais aussi en Inde et en Australie. Focaliser la recherche sur les riz africains à cette époque paraissait une gageure au regard des collectes effectuées par l'IRRI en Asie ; néanmoins, 4 000 échantillons originaux ont été collectés représentant les variétés locales d'*Oryza sativa* (2 800) mais aussi de l'espèce domestiquée en Afrique *O. glaberrima* (770) ainsi que les formes spontanées (500). Ce matériel couvre la variabilité de l'ensemble des riz d'Afrique et a été confié pour sa conservation à l'IRRI, à l'IITA et au

WARDA.

La collecte des mils et des sorghos dans les régions soudano-sahéliennes a été effectuée par l'ORSTOM pour le compte de l'IBPGR dans 12 pays d'Afrique occidentale et centrale. Environ 3 500 cultivars locaux de chacune de ces deux céréales ont été mis en conservation au centre ICRISAT en Inde et dupliqués à la banque de gènes du Canada à Ottawa. Ces dernières années ont été centrées sur les mils sauvages de la zone sahélienne, collectés de la Mauritanie au Soudan.

L'exemple le plus frappant est à mettre au crédit du programme IBPGR-ORSTOM de collecte d'un légume-fruit méconnu en Europe : le Gombo, très apprécié en Afrique de l'Ouest et en Inde. La seule collection existant à l'USDA(USA) comptait 200 souches d'origine méditerranéenne. Les prospections des années 80 en Afrique et en Asie du Sud-Est ont permis de rassembler 2 500 cultivars et différentes espèces du genre *Abelmoschus* conservées au NBPGR (Inde), à l'IITA (Nigeria) et à Fort Collins (USA).

Pour l'essentiel, le matériel végétal collecté, introduit ou créé, existe dans les stations agronomiques des pays partenaires en régions tropicales mais sa conservation n'est pas toujours assurée par manque de moyens et d'équipes (ISRA Sénégal, INERA Burkina-Faso ; IDESSA et Adiopodoumé Côte-d'Ivoire ; DRA Togo ; IRA Cameroun ; DGRST Congo ; FOFIFA Madagascar...). La duplication de ces collections en France permet d'assurer la conservation ex situ pour quelques décennies en chambre froide (riz, maïs, sorgho, mil, panicum, gombo) et in vitro (ananas, bananier, igname, manioc). Des collections importantes de l'ordre de 30 000 échantillons sont ainsi conservées à l'ORSTOM et au CIRAD.

Les cultures tropicales industrielles

L'action des instituts français est surtout associée à leur implication dans les cultures tropicales industrielles dites "de rente" non prises en compte par les CIRA. En dehors du cotonnier, il s'agit de plantes pérennes arbustives comme le palmier à huile et le cocotier, les caféiers et le cacaoyer, l'hévéa, des espèces forestières (teck, terminalia, pins, eucalyptus, acajou ...) et fruitières (manguier, goyavier, agrumes). Des actions de prospection dans les zones de diversification ont été organisées en partenariat.

Les collectes d'hévéa faites par l'IRCA en Amazonie dans les années 70 sous l'égide de l'IRRDB ont permis une diversification jamais atteinte de cette culture fondée depuis un siècle sur quelques arbres introduits par Wickam en Malaisie. Elles ont été réparties entre le Brésil, la Malaisie et la Côte-d'Ivoire. Dans ce dernier pays, 2 500 génotypes sont conservés en collection au champ pour sélectionner des géniteurs et des clones.

Un autre exemple d'engagement total des organismes français est associé à la collecte et la conservation des ressources génétiques caféières. Des botanistes du MNHN, de l'IRCC et de l'ORSTOM ont réalisé l'exploration de caféiers spontanés en forêt tropicale. Ces collectes ont permis de rassembler dans les années 60 plus de 2 000 caféiers réputés sans caféine, appartenant à 50 taxons dans la collection de Kianjavato à Madagascar. A la même époque, une prospection ORSTOM dans le Sud-Ouest éthiopien s'est fixé pour objectif de rechercher les caféiers arabica à l'état natif, croissant en moyenne altitude : des essais d'acclimatation d'une cinquantaine d'origines différentes de *C. arabica* éthiopiens ont été réalisés en basse altitude à Madagascar, au Cameroun et en Côte-d'Ivoire. Leur conservation (un millier de caféiers) est assurée en altitude dans ces mêmes pays. Enfin, depuis 1975, une quinzaine de taxons de caféiers spontanés d'Afrique tropicale, de la Guinée à la Tanzanie, ont été récoltés et rassemblés dans une collection de base unique, à Divo en Côte-d'Ivoire. Le centre de ressources génétiques caféières de ce pays compte 8 500 génotypes originaux et une vingtaine d'espèces en collection de conservation à long terme. Parallèlement, une réflexion sur la conservation in situ des caféiers a été engagée dans le cadre de réserves forestières (1).

En fait, la conservation de ces différentes espèces ligneuses est réalisée dans des collections en champ de plusieurs milliers d'arbres accueillies par les stations agronomiques des pays partenaires d'Afrique (Côte d'Ivoire, Cameroun, Bénin, Gabon, Congo, Madagascar), du Brésil... En dehors des quelques espèces forestières dont les graines sont stockées par le CTFT (Nogent sur Marne) et de la collection mondiale de cotonniers conservée en chambre froide au CIRAD (Montpellier), la duplication de ces collections importantes et parfois uniques n'est pas possible en France, car elles produisent des graines récalcitrantes à la dessiccation préalable au stockage en chambre

froide. Des recherches conduites au CNRS et à l'ORSTOM ont permis de développer des technologies de conservation adaptées : culture in vitro ; cryoconservation... (3). Des duplicata réduits de quelques dizaines de souches voire quelques centaines sont ainsi conservés en France à titre expérimental.

Le pôle Agropolis

La plupart des équipes françaises intervenant dans le domaine des ressources génétiques tropicales sont regroupées sur le pôle Agropolis Languedoc-Roussillon. Cet ensemble atteint une masse critique et une expertise reconnue. Les moyens ont été en grande partie mis en place au cours des années 80 pour assurer la conservation, l'évaluation et la valorisation des ressources phytogénétiques : marquage génétique (marqueurs biochimiques et moléculaires) ; culture in vitro pour la multiplication, le stockage et la cryoconservation ; chambres froides et congélateurs pour le stockage des graines ; expérimentation contrôlée en champ et sous terre ; bases de données et analyse des données.

Ainsi, des recherches sur les ressources génétiques sont réalisées sur des thèmes tels que la biologie et l'écologie des populations, l'analyse de la diversité génétique, les méthodologies de conservation et de gestion des collections... De réelles capacités de formation en rapport avec ces thèmes existent dans l'enseignement supérieur. On doit surtout à J. Pernès (1984) d'avoir développé une approche conceptuelle nouvelle des ressources génétiques et une école de pensée francophone grâce à son enseignement de DEA dispensé à l'Université de Paris XI - Orsay.

(1) A. Charrier et J. Berthaud, 1990, Use and value of genetic resources of Coffea for breeding and their long-term conservation Mitt.Inst. Allg. Bot Hamburg. Band 23a. S.53-64, Proceedings of the twelfth plenary meeting of ABTFAT Symposium !

(2) A. Charrier et S. Hamon. 1991 Germplasm Collection, Conservation and Utilization Activities of the Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM). In : Crop Genetic Resources of Africa, vol II, Eds N.Q Ng, p. Perrino, F. Attere et H. Zedan. IITA, IBPGR, UNEP p 41-52

(3) Engelmann F. 1992. In vitro conservation of tropical plant germplasm - a review. Euphytica, sous presse.

(4) Pernès J. 1983. La génétique de la domestication des céréales. La Recherche, N°146, vol 14 p.910.

(5) Pernès J. et Al. 1984. Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome 2 : Manuel Ed. Lavoisier, Paris.

La gestion de la fertilité des terres tropicales : l'intensification agricole

Un colloque récent organisé à Montpellier "Savanes d'Afrique, Terres Fertiles ? Comment produire plus et durablement en zones de savanes au Sud du Sahara", a montré que seule une approche multidisciplinaire et multisectorielle (production, recherche, développement, agro-industrie, bailleurs de fonds) peut permettre de dégager des solutions adaptées à une gestion durable de la fertilité des terres pour satisfaire aux besoins en produits agricoles, animaux, ligneux et énergétiques des populations. Dans ces conditions, un doublement de la production agricole sans destruction du patrimoine foncier, est un objectif réaliste pour cette zone de trois millions de km².

Christian Pieri

CIRAD Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement
B.P. 5035 34032 Montpellier cedex 1

Les pays occidentaux sont souvent passés d'un extrême à l'autre dans leur appréciation de la fertilité des terres tropicales. A ceux qui, découvrant l'exubérance des forêts tropicales, évoquaient avec lyrisme la richesse inépuisable de ces terres chaudes, ont répondu les voix de ceux qui, en observant les cuirasses ferrugineuses du continent africain, n'hésitaient pas à conclure que "les sols tropicaux avaient la couleur et la fertilité de la brique".

Sans en être resté à cette vision manichéenne, il est vrai que les résultats décevants des années dites de "développement" ont suscité dans l'opinion mondiale un doute profond quant à la réelle capacité des terres tropicales de soutenir une agriculture plus intensive, sans que ne se déclenchent des processus pernicieux de dégradation des écosystèmes.

Ce problème de la fertilité des terres est particulièrement crucial en agriculture pluviale, (c'est-à-dire sans recours à l'irrigation). Tel est le cas de l'Afrique, où moins de 10 % des surfaces rizicoles sont conduites sous irrigation.

La recherche agronomique tropicale française, relayée dans les années 60 par les centres nationaux de recherche africains, a particulièrement été confrontée au problème de la gestion de la fertilité de ces terres tropicales. En effet, l'Afrique a connu depuis cinquante ans, et tout particulièrement au cours des deux dernières décennies, des changements profonds qui ont induit une pression d'exploitation des res-

sources naturelles sans précédent : doublement de la population en vingt ans, développement d'une agriculture commerciale avec extension du domaine cultivé, suppression progressive des règles traditionnelles de contrôle social de gestion des espaces ruraux.

Ainsi, dès les années 70, le bassin arachidier du Sénégal comptait moins de 2 % des terres en jachère, et la forêt ivoirienne qui couvrait quinze millions d'hectares au début du siècle se réduisait à dix millions en 1960 et à quatre millions et demi en 1980.

Grâce à une présence continue sur le terrain au cours de toutes ces années, dans des stations de recherche, puis, de plus en plus, en contact direct avec les producteurs de l'Ouest africain (8), les chercheurs du CIRAD, avec leurs partenaires tant africains que français (ORSTOM, CNRS, Universités), ont pu dégager les causes et les solutions les plus adaptées aux problèmes de la gestion durable de la fertilité des terres.

Les travaux ainsi réalisés ont été orientés dans trois directions principales :

- le diagnostic de situations agricoles et le zonage des espaces ruraux, notamment en fonction de leur état de fertilité ;
 - la mise au point de techniques d'amélioration des terres et de la production agricole ;
 - la prédiffusion et l'adaptation de ces innovations aux différentes situations agricoles.
- Cette recherche finalisée a donné des résultats tangibles pour le développement (le cas du coton en Afrique francophone est souvent cité : une production de 155 000 tonnes en 1969 s'élevant à près d'un million de tonnes 20 ans plus tard) mais aussi en matière de démarche et méthodologie de recherche.

Ainsi le zonage des grandes régions agricoles, largement fondé sur une analyse statique des ressources en sol, a progressivement intégré les facteurs physiques d'évolution des unités de paysage (circuit des eaux, sensibilité à l'érosion, 1) puis les facteurs socio-économiques. A l'instar des travaux réalisés par le Département d'Agronomie de l'INRA en France (6), de telles études ont conduit les agronomes tropicaux français de l'ORSTOM et du CIRAD à élargir la notion de fertilité (4) qui ne peut être réduite à une propriété d'un sol mais correspond plutôt à celle de fonctionnement d'un milieu cultivé, celui-ci étant conçu comme un système piloté à travers des techniques par un agriculteur. En outre, la notion de risque ne saurait être dissociée de l'appréciation de la fertilité, ce qui, particulièrement en zone semi-aride, a suscité la mise au point d'une méthode simple d'appréhension du risque agroclimatique (5).

Une telle approche intégrée, indispensable dans l'optique de la diffusion des innovations, s'est avérée également fructueuse en termes de produits de la recherche. On peut citer à titre d'exemple la prise en compte de plus en plus grande par les chercheurs des mécanismes biologiques de régulation au sein des agro-écosystèmes, notamment du rôle des racines et de la micro et mésofaune (2, 3). Il en résulte des applications agronomiques : développement des couvertures végétales au sein des cultures pour protéger les sols contre l'érosion et réduire les effets des écarts thermiques et hydriques de surface (7).

On peut aussi souligner les travaux de recherche visant à réduire le coût des intrants commerciaux d'intensification agricole, tels que les engrais, par la valorisation des ressources fertilisantes locales d'origine minérale (ex. les phosphates 9) ou organique. Pour conclure, il faut souligner que "gérer" la fertilité, "manager" dit-on en anglais, est plus une affaire d'hommes que de seule technologie. Rien ne saurait être durablement obtenu dans les pays tropicaux sans qu'il y ait mise au point simultanée de technologies, de services (par exemple d'approvisionnement en intrants, de vente des productions...) et une politique agricole qui se complètent et se renforcent. L'expérience accumulée au contact des sociétés africaines a appris aux chercheurs français que l'on ne saurait oublier, dans toute décision ou acte, aussi techniques que semblent être ceux qui relèvent de la gestion de la fertilité

des terres, la dimension et les implications socioculturelles des recommandations faites par les experts. Ceci commence à être de mieux en mieux perçu. La Banque Mondiale a consacré récemment une étude sur "les ressorts psychologiques des décisions économiques en Afrique". N'est-ce qu'en Afrique ? Est-ce bien pris en compte dans les recommandations faites au développement agricole ?

Cette même expérience nous conduit enfin à souligner que bien gérer la fertilité suppose de bonnes données et analyses scientifiques. On ne saurait trop insister sur le besoin de sites expérimentaux durables et suivis, comme lieux de rencontre et de formation privilégiés pour tous ceux qui, directement ou indirectement, sont concernés par la gestion de la fertilité. Dans des régions et des situations agricoles aussi diverses que les cerrados brésiliens, la savane ivoirienne, les hauts de la Réunion, des dispositifs expérimentaux impliquant directement chercheurs, paysans et vulgarisateurs indiquent une voie possible (7).

D'autres expériences associant recherche et ONG locales tracent également d'autres voies prometteuses.

La recherche agronomique française a ainsi une expérience et un savoir faire à la disposition des pays tropicaux qui souhaitent s'engager dans la voie d'une intensification raisonnée tout en préservant leur patri-moine foncier. Une intensification qui "aménage et ménage", comme celle que préconisait Olivier de Serres il y a 400 ans aux paysans français.

- (1) BERTRAND R., KILIAN J., RAUNET M., GUILLOBEZ S., BOURGEON G., 1985 La connaissance des systèmes de paysages naturels, un préalable à la protection du milieu. L'approche morphopédologique. Bull. Rech. Agron. Gembloux, 20 (3-4) : 545-559.
- (2) DOMMERGUE Y., DIEM H.G., GANRY F., 1979 The effect of soil microorganisms on plant productivity. In : MONGI H.G., HUXLEY P.A., eds. Soils research in agroforestry. Nairobi, ICRAF, p. 205-241.
- (3) GANRY F., 1990 Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse doctorat d'Etat. Sciences naturelles, Univ. Nancy-I, 355 p.
- (4) PIERI C., 1989 Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et du Développement et CIRAD, Paris, 444 p.
- (5) REYNIERS F.N., FOREST F., 1988 Improving the water supply and its efficiency in sub-saharan African rainfed agriculture. In : Irrigated agriculture in Africa.
- (6) SEBILLOTTE M., 1982 Fertilité du milieu et agriculture. Bull. Tech. Inf., 370-372 : 331-333 (numéro spécial "Fertilité du milieu et agriculture").
- (7) SEGUY L., BOUZINAC S., PIERI C., 1991 An approach to the development of sustainable farming systems. Proceedings of the international Workshop on "Evaluation for sustainable Land management in the developing world". Chiang Rai, IBSRAM, Bangkok, Thaïlande, in press.
- (8) TOURTE R., 1977 Traditional african systems of agriculture and their improvement. In : Foodcrops of the lowlands tropics. Oxford University Press, Oxford, 345 p.
- (9) TRUONG B., FAYARD C., 1987 Proposition d'une filière d'engrais au Burkina Faso à base de phosphate naturel de Kodjan, partiellement solubilisé. Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, Ouagadougou et Ministère de la Coopération Française, Paris. CIRAD/RAT/DRN E.A. n-2.

Etats de surface et gestion de l'eau

Les modèles de bilan hydrique et d'érosion doivent impérativement prendre en compte les états de surface, à savoir : la végétation, la rugosité du sol et la présence de croûtes à la surface du sol.

Christian Valentin

Pédologue, ORSTOM, B.P. 11416, NIAMEY, NIGER

Seule une partie de l'eau qui tombe sur le sol s'y infiltre, une partie reste en surface et s'évapore, une partie enfin ruisselle, favorisant ainsi l'érosion. Etre capable de prévoir cette répartition constitue un enjeu majeur pour la gestion de l'eau. Quels facteurs interviennent ? Bien sûr, les propriétés du sol,

au reste les mieux étudiées : sa granulométrie plus ou moins argileuse et sa porosité. En fait, les modèles fondés uniquement sur ces caractères pédologiques demeurent inopérants. Ce sont en effet les "états de surface" qui conditionnent, en premier lieu, l'infiltration, le ruissellement ou la détention de l'eau dans des flaques.

Il s'agit de la végétation et de la surface du sol proprement dite. Cette dernière se ca-

ractérise par sa rugosité, sa dureté et sa porosité. En particulier, l'existence de croûtes à la surface du sol limite considérablement l'infiltration de l'eau et les échanges gazeux. Ces croûtes peuvent également empêcher la levée des semences et stériliser ainsi des étendues de terres plus ou moins grandes. Un tel processus de dégradation de la surface du sol intervient non seulement dans les zones arides, mais quasiment partout où la végétation ne protège plus la terre de l'impact des gouttes de pluie.

Un grand programme concernant l'influence de ces états de surface sur l'infiltration, le ruissellement et l'érosion a été lancé voilà plus de dix ans par l'ORSTOM dans neuf pays africains, de la Tunisie au Congo,

ainsi qu'au Brésil et au Mexique. Il a largement fait appel à des techniques de simulations de pluies menées sur des parcelles de 1 et 50 m².

Des implications hydrologiques, agricoles et écologiques

De ce programme est issue une typologie simple d'états de surface, fondée sur un nombre réduit de types de croûtes superficielles (6), sur l'activité faunique (termites et vers) et sur la porosité vésiculaire. A chacun des onze grands types identifiés, correspondent les principaux paramètres nécessaires à la modélisation hydrologique.

Une méthode originale de cartographie des bassins versants a été développée pour prendre en compte la variabilité spatiale des états de surface. Elle a permis, particulièrement dans les régions arides et semi-arides, d'améliorer considérablement la simulation des écoulements, l'évaluation des crues de fréquence rare, et la transposition des résultats à des bassins non équipés. Si les états de surface contrôlent en grande partie l'infiltration et le ruissellement, ils interviennent également sur l'évaporation.

Des études sont actuellement menées au Niger, dans le cadre du programme HAPEX-Sahel, pour quantifier cet effet non seulement au niveau de la parcelle, ou du ver-

sant, mais à celui de l'ensemble d'un degré carré. Le levé d'une carte à 1/200 000 de ces états de surface, à partir de relevés de terrain et de données satellitaires, devrait faciliter l'extrapolation des autres paramètres du bilan hydrologique.

La prise en compte des états de surface permet également d'introduire, dans les modèles de bilan hydrique, le ruissellement, terme souvent négligé car difficile à mesurer alors qu'il peut représenter jusqu'à 30, voire 50% de ce bilan. Il est ainsi fréquent qu'à l'aridité due à la faiblesse et à la mauvaise distribution des pluies, se surajoute celle qu'entraînent l'encroûtement superficiel des sols et l'imperméabilisation qui en résulte. La possibilité qu'offre la typologie des états de surface de déterminer plus précisément les ressources en eau, effectivement disponibles pour les cultures, intéresse, en tout premier lieu, les agronomes partenaires de l'ORSTOM et ceux du CIRAD. Une collaboration étroite s'est ainsi instaurée entre différentes institutions, au Sénégal, au Burkina Faso et au Mali, notamment sous l'égide du programme R3S financé par la CCE.

Enfin, en sus de leurs variations spatiales, traduites en termes cartographiques, il convient de suivre les variations des états de surfaces dans le temps. Or, chaque type d'état de surface, recensé dans la typologie, peut être resitué dans une chaîne évolutive. Dès lors, la caractérisation des états de sur-

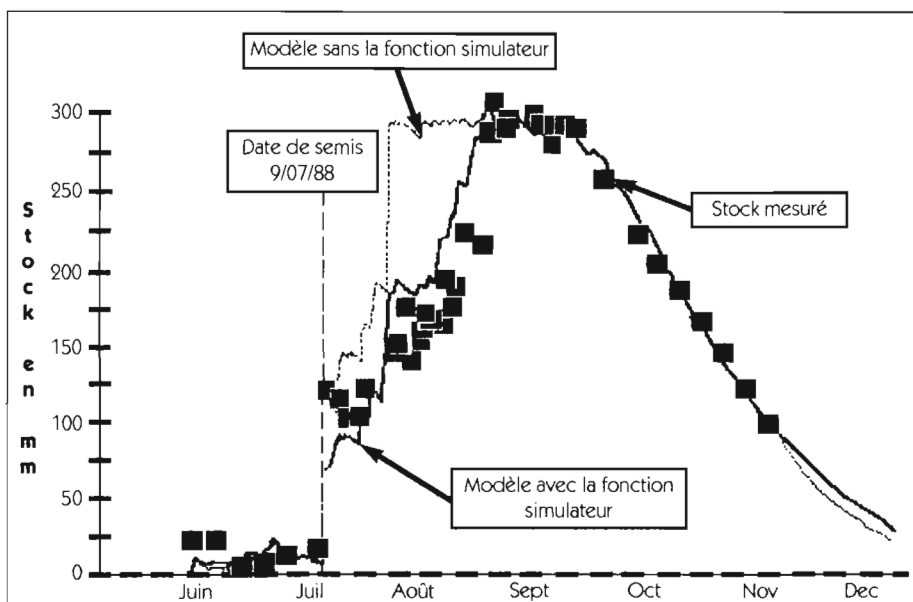


Etat de surface d'un champ de mil à proximité de Niamey (Niger) Bien que très sableux (5% d'argile, 6% de limon, 89% de sable), ce sol génère un important ruissellement, responsable des inondations fréquentes de la ville d'Agadez (Niger). Les croûtes gravillonnaires et d'érosion (au premier plan) empêchent la levée du mil et provoquent un important ruissellement. Le mil ne parvient à se développer que sur les microbuttes sableuses non encroûtées, là où l'eau de pluie peut s'infiltrer.

face permet non seulement un diagnostic de dégradation du milieu (sol et végétation) en fonction des différentes contraintes subies (climats, surpâturage, déforestation, réduction de la durée de la jachère, ...) mais aussi l'élaboration de scénarios à partir de différentes hypothèses quant aux évolutions de la pluviométrie, de la démographie et des systèmes de production.

On comprend ainsi toute l'importance que revêtent la caractérisation et le suivi des états de surface dans le programme SALT "Savanes à Long Terme". Celui-ci doit déboucher sur des modèles de fonctionnement et d'évolution des savanes de l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, à partir de neuf sites répartis depuis la frange forestière en Côte d'Ivoire jusqu'aux confins sahariens au Mali, et des régions océaniques au Sénégal jusqu'aux zones continentales au Niger.

Interfaces entre la géosphère, la biosphère et l'atmosphère, les états de surface constituent un thème de recherche fortement fédérateur. Leur caractérisation a déjà conduit à des progrès importants, tant pour les méthodes que pour les résultats des études de l'environnement orientées vers le développement.



Légende de la figure :

Exemple d'amélioration d'un modèle de bilan hydrique du sol sous culture de mil au Mali par l'introduction du terme de ruissellement évalué par la typologie des états de surface (*"modèle simulateur"), d'après Albergel et al. (1991).

Glossaire

Porosité vésiculaire : pores fermés, plus ou moins sphériques, correspondant à l'emprisonnement de gaz. Leur présence dans les premiers millimètres de la surface du sol constitue un excellent indicateur de faible diffusivité des fluides.

Degré carré : aire comprise entre deux méridiens et deux parallèles.

(1) **Albergel (J.)**, 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au Km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse doct Univ Paris VI, ORSTOM, Collection "Etudes et Thèses", 336 p.

(2) **Albergel (J.), Valentin (C.)**, 1991. "Sahélisation" d'un petit bassin versant : Boulsa-Koghnere au centre du Burkina Faso, in : J. F. Richard (Edit), Dégénération des Paysages en Afrique de l'Ouest. Minécoop Paris/Presses Universitaires de Dakar, pp. 119-133.

(3) **Albergel, J., Perez, P. and Vacksmann, M.**, 1991. Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. In : Soil water-balance in the Sudano-Sahelian zone. International Association of Hydrological Sciences, Publication No. 199 : 483-496.

(4) **Casenave A., Valentin C.** 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Collection "Didactiques". 230 p.

(5) **Casenave A., Valentin C.** 1991 A runoff capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa, soumis pour publication au Journal of Hydrology. 20 p.

(6) **Casta P., Chopart J.L., Janeau J.L., Valentin C.** 1989. Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après 6 ans de culture continue avec ou sans labour Agronomie Tropicale, 44 (4), 255-262.

(7) **Chevallier P.** 1986. Simulation de pluie, télédétection, modélisation. Exemple de la Mare d'Oursi - Burkina-Faso. Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM Colloques et Séminaires, pp. 90-104.

(8) **Collinet J.** 1988. Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 521 p.

(9) **Escadafal R.** 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). ORSTOM, Paris, Collection "Etudes et Thèses", 317 p.

(10) **Valentin C.** 1991. Assessing the space and time variations of the surface features and the cultivation profile. in : The Establishment of Experiments for the Management of Acid Soils. IBSRAM, Techn. Notes n°5, 105-128 p.

(11) **Valentin C.** 1991. Surface crusting in two alluvial soils of northern Niger. Geoderma. 48 : 201-222.

(12) **Van der Watt H.V.H., Valentin C.** 1991. Soil surface crusting in Africa. Advances in Soil Science, (in press).

Les eaux souterraines

Le développement durable est un concept qui a de très immédiates résonances avec les ressources en eau souterraine des PED : dans quelques pays arides, les seules ressources sont non renouvelables, donc non durables; ailleurs, les ressources sont renouvelables, mais parfois à un rythme modeste, dépendant des pluies efficaces; enfin, le renouvellement s'accompagne de sérieux risques de pollution, même si la ressource est abondante.

J.J. Collin

Chargé de Mission Recherche et Développement
Département Eau - BRGM

Nappes captives profondes et "fossiles" des bassins sédimentaires

La partie saharienne de l'Afrique et une partie importante de l'Asie comportent des bassins sédimentaires de roches poreuses dont l'extension, pour chacun, atteint des centaines de milliers, voire des millions de km² avec des réserves d'eau de milliers de milliards de m³. Ces volumes "astronomiques" sont cependant totalement inaccessibles

en tant que ressources : l'eau contenue étant récupérable uniquement par détente élastique, dans une très faible proportion du volume total. Le déclin de pression entraîne des conditions d'exploitation défavorables, le réservoir profond restant plein sans être pour autant capable de poursuivre sa production dans des conditions économiques. Ces nappes d'eau fossile sont des gisements éphémères, peu ou pas rechargés. Plusieurs Etats, avec des prélèvements annuels à buts agricoles dominants compris entre 1 et 10 milliards de m³ - soit des débits instantanés de l'ordre de centaines de m³/s (un fleuve en eaux moyennes) - ne disposent, au mieux, que de très peu de si-

cles de réserves. L'économie de telles exploitations est donc semblable à celle des hydrocarbures : la rente financière pétrolière alimente l'agriculture en capitaux nécessaires aux pompages. La ressource en eau n'est pas plus durable que les moyens d'en financer l'exploitation !

La volonté de développer une agriculture fortement irriguée, avec objectif d'indépendance alimentaire, ne peut donc être envisagée que dans une perspective transitoire. L'enjeu est donc une optimisation des pompages qui peut s'exprimer en quantités produites et/ou en durée escomptée. Des outils ont donc été développés, en particulier la modélisation hydrodynamique qui permet la prédiction des évolutions de la charge et le choix des scénarios. Le couplage de ces modèles avec des outils d'aide à la décision sous contraintes est actuellement en cours.

Quoiqu'il en soit, le caractère épuisable, inéluctable, devra toujours être rappelé aux responsables des décisions, sachant qu'un usage limité à l'eau potable peut être comparé, pour un futur plus durable, à un épuisement rapide pour une production agricole immédiate.

Exploitation et gestion des nappes d'eau de subsurface renouvelables

C'est dans ce domaine - le plus communément répandu - que se situe la nécessité de l'évaluation des ressources renouvelables des nappes libres, concept qui doit être tempéré par une attitude réaliste sur la capacité des aquifères à tamponner les irrégularités des apports des pluies efficaces aux nappes. Il faut, en effet, savoir compter sur des inerties qui permettent, pendant une ou plusieurs années, d'exploiter des débits supérieurs aux apports... mais la sagesse consiste à limiter cette pratique aux seuls aquifères capacitifs.

La recherche hydrogéologique française s'est donc attachée à l'évaluation de la recharge des nappes. C'est un domaine de recherche pluridisciplinaire, avec intercomparaison des résultats de plusieurs méthodes. Des approches hydrodynamiques - flux dans la zone non saturée - géochimiques et isotopiques, mais aussi des approches de type global (études des fonctions de transfert "boîte-noire") ont été réalisées et associées dans plusieurs grands programmes financés par la Coopération Française et la CEE.

L'exploitation des aquifères superficiels à ressources renouvelables est actuellement essentiellement vouée à l'eau potable des villages (et au pastoralisme). En conséquence la ressource renouvelable moyenne, fût-elle seulement de quelques dizaines de mm/an de pluie efficace (quelques dizaines de milliers de $m^3/an/km^2$), est amplement suffisante.

Pour des besoins supérieurs (collectivités urbaines, périmètres irrigués), le facteur limitant est la capacité de mobilisation de débits suffisants. La recherche, depuis une dizaine d'années, s'attache surtout à connaître les aquifères de roches fissurées. Les objectifs déjà atteints sont une méthodologie d'implantation d'ouvrages sur des sites favorables à l'obtention de gros débits, et de maîtrise de la capacité de ces ouvrages à drainer l'apport de la recharge évoqué plus haut.

Dans ce domaine, le caractère durable du développement permis par l'eau souterraine est - au regard de la ressource - assez bien garanti. La limitation du rayon d'influence des ouvrages, conséquence du compartimentage des aquifères, apporte



Ronds irrigués dans le désert

une réponse rapide quant au débit maximal exploitable et ne met pas en péril d'autres ouvrages au-delà de quelques hectomètres. De même, la faible inertie interannuelle des réservoirs peu capacitifs fait rapidement rencontrer la limite d'exploitabilité.

Dès qu'une densité d'ouvrage devient excessive, la ressource tarit en une ou quelques saisons (cas de certaines régions de l'Inde). Grâce au renouvellement, ce n'est pas un système de production irrémédiablement perdu pour le futur, mais une semonce envers la surexploitation exercée au présent. Des efforts sont entrepris pour maximiser la recharge des abords des zones exploitées et créer des réserves souterraines saisonnières, notamment pour de petits périmètres irrigués.

Qualité des eaux et pollutions

Pour les petites collectivités qui ne peuvent pas épurer l'eau de surface, l'eau des forages, bactériologiquement pure, est un facteur de progrès sanitaire, mais celui-ci pour être effectif doit être accompagné d'un ensemble de mesures hygiéniques. L'avantage de la filtration naturelle par les roches aquifères et leurs terrains de couverture, à l'exception des karsts, est à préserver. Une bonne technique de réalisation des forages (cimentation en tête, dalle de protection) est le premier stade ; elle doit être complétée par l'adaptation aux PED du concept de périmètre de protection qui réglemente

les accès aux abords des ouvrages et limite les risques de contaminations.

Avec le développement des concentrations urbaines, on a vu apparaître dans les PED d'intenses pollutions par les nitrates. Celles-ci sont dues à la nitrification des déjections, infiltrées en l'absence de réseau d'assainissement et trop peu diluées dans de faibles pluies. La résultante est une pollution des nappes de plusieurs centaines de mg/l : aucune nappe sub-urbaine ne devrait plus faire l'objet simultanément de prélèvements et de rejets.

Dans les plus avancés des PED - fûssent-ils bien arrosés - la pollution agricole diffuse (engrais, pesticides - dont certains, bannis depuis longtemps dans les pays développés sont très nocifs et durables -) est déjà un sujet de grave préoccupation à l'égard des eaux souterraines. Dans certains de ces pays, l'absence d'alternative "eau de surface" amplifie ce risque.

Parmi les mesures conseillables, en plus de la formation au contrôle, il faut adjoindre une éducation des agriculteurs.

Glossaire

Aquifère - Litt. : Qui porte de l'eau - terrain poreux et assez perméable pour contenir de l'eau susceptible de s'écouler naturellement (vers les sources) ou d'être pompée.

Capacitif : Adjectif désignant des terrains fortement poreux ou fissurés, contenant beaucoup d'eau. Toutefois, un terrain capacitif n'étant pas nécessairement très perméable peut être un médiocre aquifère du point de vue de la productivité des ouvrages d'exploitation.

Nappe captive : Nappe d'eau souterraine confinée dans une couche aquifère sous une couche imperméable. L'eau est alors "sous pression" et remonte - parfois jaillit - lorsque l'on perce la couverture. Contraire : nappe libre, sans couverture étanche.

Pluie efficace : Partie des précipitations qui n'est pas consommée par l'évaporation physique ni la transpiration végétale, disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration vers les nappes souterraines.

(1) **CARLIER (P.), MILVILLE (F.), NORMAND (M.), POINTET (T.), RICOLVI (M.), THIERY (D.)** - La recharge naturelle des aquifères de socle en climats aride et semi-aride (Etude expérimentale au Burkina Faso) - Natural recharge of substratum aquifers in sahelian and sudanese climates (Experimental study in Burkina Faso).- In : Proceedings of the Sahel Forum on the state-of-the Art of Hydrology and Hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa, Ouagadougou, fév. 1989, p. 284-285.

(2) **COLLIN (J.J.), SALEM (G.)** - Pollutions des eaux souterraines par les nitrates dans les banlieues non assainies des pays en développement. Le cas de Pikine (Sénégal).- Symposium international sur des solutions intégrées pour des problèmes de pollution de l'eau (SISSIPA) Lisbonne (Portugal), 119-23 juin 1989

(3) **MARGAT (J.)** - Les gisements d'eau souterraine.- La Recherche, n° 221 (n° spécial "L'eau"), mai 1990, p. 590-596.

(4) **MARGAT (J.)** - L'économie de l'eau dans le monde ressources, besoins, problèmes. A chacun ses problèmes d'eau.- In : Le grand livre de l'eau (Ed. à l'occasion de l'exposition "Vive l'eau", Paris-La Villette), 1990, p. 277-288.

La lutte contre les trypanosomoses animales pour une production durable

La lutte contre les trypanosomoses ne peut constituer un objectif isolé, mais fait partie d'une approche globale du développement d'un pays ou d'une région (problèmes fonciers, gestion des pâturages et des ressources en eau, transhumances, autres pathologies associées, etc.). Pour aider les décideurs, l'EMVT a développé des outils de diagnostic rapide de situation, en particulier de typologie des troupeaux avant intervention, puis de suivi de la charge animale pour l'ajuster aux potentialités des pâturages, dont les techniques de conservation et de restauration sont étudiées parallèlement. Ces deux aspects obligatoirement liés entre eux restent essentiels pour maintenir une production agricole durable

**G. Tacher
D. Cuisance**

EMVT-CIRAD (Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), 10, Rue Pierre Curie, 94704 - Maisons-Alfort Cedex (France)

J.L. Frézil

ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération)- Centre de Montpellier, 911 Avenue Agropolis, 34032 Montpellier Cedex 1 (France)

Un obstacle à une production animale essentielle

Transmises par les glossines ou mouches "tsé-tsé", les trypanosomoses continuent à représenter une contrainte pathologique majeure pour le développement d'un élevage productif en Afrique subsaharienne.

Or, l'écart se creuse tous les jours davantage entre une population humaine qui s'accroît à un rythme de 3,2 p.100/an et une pro-

duction de viande et de lait qui n'augmente respectivement que de 1,4 et 2,3 p.100, aboutissant à des prévisions d'importations de 2 à 5 millions de tonnes de viande et de 10 à 15 millions de tonnes de lait à la fin du siècle (5, 9). De plus, le bœuf et le cheval (ou l'âne) sont les seules sources de traction et de fumure pour l'agriculteur dans la plupart des situations sans parler de leur fonction de "capital" ou de "garantie" et de leur rôle social et culturel (9, 15).

Les trypanosomoses provoquent des mortalités importantes surtout chez les jeunes animaux, une forte baisse de fécondité et de lactation des mères et des chutes drastiques de poids.

Elles impliquent des traitements curatifs ou prophylactiques onéreux lorsque leur répétition devient fréquente. A titre d'exemple, en République Centre Africaine les pertes annuelles sont évaluées à 3,9 milliards de francs CFA/an pour 2,5 millions de têtes de bovins.

Sur les 7 millions de km² infestés par trente et une espèces et sous-espèces de tsé-tsé en Afrique, on pourrait produire 1 million de tonnes d'équivalents-viande par an en éliminant le fléau (9).



Les barrières de pièges et d'écrans sont des méthodes écologiquement acceptables pour la protection des zones pastorales (Sidéradougou, Burkina Faso) - Photo: D. Cuisance

Une nouvelle situation de l'élevage

Alors que pendant des siècles, l'élevage des zébus en Afrique occidentale et centrale s'est localisé essentiellement dans la zone sahélo-soudanienne (en dehors de l'aire des tsé-tsé), on assiste depuis 1960 à un déplacement vers les zones subhumide et humide (infestées), seules régions à offrir encore l'espace et les ressources alimentaires ; le "glissement" s'est accéléré depuis 1973 sous l'effet de la sécheresse et des événements politiques. La géographie de l'élevage change ainsi de façon rapide et parfois imprévisible.

Les conséquences en sont très variées :

- la compétition entre agriculteurs et éleveurs devient forte pour l'occupation des sols,
- les investissements lourds des campagnes d'éradication des glossines ne sont plus assurés de rentabilité,
- le bétail n'est plus en limite des zones à glossines, mais au milieu de celles-ci (contrariant les possibilités d'isolement), avec des saisons sèches courtes (limitant les possibilités de lutte) et des risques trypanosomiens élevés (espèces de tsé-tsé plus nombreuses et densités plus élevées),
- les techniques de lutte applicables en zone sèche (épandages insecticides) deviennent moins efficaces dans ces zones pluvieuses avec des risques écotoxicologiques plus élevés (réseau hydrographique dense).

De plus, la raréfaction des services techniques de lutte s'est accentuée tandis que les bailleurs de fonds se sont orientés vers des financements à court terme en faveur d'une prise en charge progressive des méthodes de lutte ou de protection par les éleveurs eux-mêmes.

Cette évolution dans le domaine des trypanosomoses animales a beaucoup de points communs avec la situation des trypanosomoses humaines qui tient aux mêmes causes (sécheresse, instabilité politique, recherche de nouvelles terres, etc.).

Des méthodes périmées ou controversées de lutte contre ces insectes

La suppression des biotopes à tsé-tsé par le déboisement total ou sélectif ainsi que celle de leurs hôtes-nourriciers par abattage de la faune sauvage sont totalement écartées comme moyens actuels de lutte. Force est de constater malheureusement que la déforestation et la disparition de la faune se poursuivent pour d'autres raisons.

L'emploi des insecticides rémanents (DDT, dieldrine, endosulfan) sur les lieux de repos diurnes ou nocturnes des glossines a constitué pendant 30 ans la méthode privilégiée de lutte avec un objectif d'éradication. L'intervention par voie terrestre ou aérienne dans la zone soudano-guinéenne avec des services techniques importants a permis quelques succès (Nigeria, Zimbabwe, Tchad, Botswana). Cette stratégie reposant sur des interventions avec progression planifiée pendant plusieurs années ne peut plus être poursuivie actuellement à quelques rares exceptions près (Zimbabwe). L'objectif d'éradication envisageable en zone sèche n'est plus accessible en zone humide où se développe l'élevage (importance des biotopes à traiter, isolement impossible, durée d'intervention réduite, milieu vulnérable ...) (4).

De nouvelles méthodes à trouver

Face à un contexte d'élevage mobile, une situation entomologique complexe et contraignante en zone sub-humide, des financements à long terme devenus rares et un souci mondial de protection de l'environnement, il devenait nécessaire de revoir la stratégie en fonction des nouveaux produits offerts par la recherche appliquée, développée efficacement dans trois pays d'Afrique occidentale et centrale (Côte-d'Ivoire, Burkina Faso et Congo) par les équipes de l'IEMVT et de l'ORSTOM.

Bétail trypanotolérant

Un élevage traditionnel de 10 millions de taurins (NDamas, Baoulés, ...) vit en Afrique occidentale et centrale au contact permanent des glossines, ouvrant des perspectives intéressantes de développement en zones infestées (7). Dans un projet commun, les équipes IEMVT-GTZ* (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) et du CRTA* (Centre de Recherches sur les Trypanosomoses Animales, devenu récemment CIRDES : Centre International de Recherche-

Développement sur l'Élevage en zone Sub-humide), ont étudié les facteurs-clefs de cette "trypanotolérance" pour développer ou induire cette qualité naturelle chez d'autres races bovines.

La caractérisation clinique révèle une maîtrise de l'anémie et de la parasitémie chez ces races par rapport aux zébus (1) tandis que la caractérisation immunogénétique (polymorphismes biochimiques, antigènes érythrocytaires, ...) montre une étroite association du gène A de l'hémoglobine et du gène F de l'albumine qui sont monomorphes chez ces races (1, 14). L'étude de ces marqueurs de races se poursuit pour mieux identifier les marqueurs de "trypanotolérance" avec déjà des schémas pratiques de sélection.

Celle-ci vise à créer rapidement des lignées et des familles pour une diffusion de ce matériel génétique précieux grâce, en particulier, à l'insémination artificielle (création actuelle d'une banque de sperme) et à la méthode de transfert d'embryons (en cours d'essai).

La promotion de ce bétail "tolérant" constitue une voie naturelle pour s'affranchir de la contrainte glossinienne, en particulier en milieu villageois, sans emploi de moyens artificiels à effets secondaires indésirables.

Lutte génétique

Face aux difficultés d'emploi sélectif des insecticides contre les tsé-tsé, l'IEMVT-CIRAD s'est orienté très tôt vers des méthodes plus "douces", plus "ciblées", donc écologiquement acceptables. Après des études fines au laboratoire (conditions d'insémination, spermatogénèse, doses d'irradiation etc.) (8) puis sur le terrain (longévité, distribution, dispersion, etc.), les chercheurs IEMVT et GTZ ont défini le mode d'emploi de la méthode du mâle stérile, technologie "propre", élégante et sélective (destruction de l'espèce par elle-même), pouvant être appliquée en saison des pluies pour éliminer les individus survivant à d'autres techniques.

Sur 3 500 km² d'une zone pastorale du Burkina Faso (Sidéradougou), l'équipe franco-allemande a associé de façon originale l'emploi alterné de leurres attractifs mortels pour les glossines durant la saison sèche avec les lâchers de mâles stériles en saison des pluies. Plus d'un million de mâles stériles fournis par des élevages de masse autonomes et uniques en Afrique (300 000 femelles) ont permis d'assainir cette zone infestée par trois espèces de tsé-tsé. Il constitue le premier essai d'intégration réussie de

deux méthodes sélectives non polluantes contre les tsé-tsé (3, 13).

Le piégeage des glossines

L'équipe ORSTOM du Burkina Faso a mis au point, dès 1973, un piège biconique (Challier-Laveissière) à fort pouvoir d'attraction visuelle pour les glossines ripicoles de la région (2). Associant d'abord le blanc et le noir, les chercheurs ont reconnu la supériorité de la couleur "bleu électrique".

Dès 1974, les équipes de l'ORSTOM et celles du CRTA ont utilisé ces nouveaux outils pour créer et tester des "barrières" d'isolement autrement plus efficaces et respectueuses de l'environnement que les déboisements. Les pièges devenaient aussi le moyen efficace d'établir les cartes de distribution des glossines.

Par la suite, la mise au point des écrans, simples panneaux de tissu bleu, imprégnés d'un pyrèthrine à effet de contact foudroyant, a permis d'abaisser les coûts.

D'abord sur de petites surfaces puis à l'échelle de projets importants, les équipes de l'ORSTOM (11) et celles du CRTA (3, 13) ont déployé ces systèmes dans des campagnes contre la maladie du sommeil (trypanosomoses humaines) et contre le "nagana" (trypanosomoses animales).

Au cours des dernières années, les recherches du CRTA se sont orientées vers l'identification de facteurs olfactifs accroissant l'attractivité des pièges et des écrans, et sur leur conditionnement dans des diffuseurs simples à longue action pour les glossines savañicoles et ripicoles (12).

En collaboration avec le NRI* (Natural Resources Institute), l'Université de Hannover* et le service de lutte du Zimbabwe* (Teste and Trypanosomiasis Control Branch), l'équipe franco-allemande a testé diverses odeurs animales (urines, fèces, sécrétions, haleine, ...) et divers composés chimiques. Un accroissement de 3 à 6 fois a été obtenu avec l'acétone et l'octénol pour *G. m. submorsitans* et de 1,5 à 3 fois avec le métracésol et l'octénol pour *G. tachinoides*. Cet apport a permis de réduire de 6 fois la densité d'implantation des écrans dans certaines barrières de protection (3, 12).

Les pièges et les écrans apparaissent comme de nouvelles technologies simples, souples, peu chères, aboutissant au contrôle des glossines (chute de densité de plus de 90 p.100) et pouvant être déployées par des non-spécialistes dans certaines conditions (11).

Les équipes IEMVT-ORSTOM avec l'ANDE* (Agence Nationale de Développement de

l'Élevage de République Centrafricaine) appuient actuellement un programme de lutte contre les glossines chez les éleveurs Mbororos de République Centrafricaine par piégeage autogéré des abreuvoirs à bétail (4). Un piège en matière plastique fabriqué localement (10) donne lieu à un essai de diffusion et d'appropriation avec l'espoir que l'innovation soit "irradiante".

Des risques et des incertitudes

Une stratégie de contrôle des glossines implique une pérennité de la lutte sur de vastes surfaces. La participation des communautés rurales (agriculteurs et éleveurs) devient alors indispensable mais n'est pas garantie (11). Elle nécessite une bonne connaissance non



La mise au point d'un moyen simple de lutte comme un piège ou un écran est une condition nécessaire à une prise en charge technique et financière par les éleveurs (projet ANDE en RCA)

seulement de la situation entomologique mais aussi du milieu humain (systèmes de production, budgets familiaux, attentes des éleveurs et des agriculteurs, représentation culturelle de la maladie, etc.) pour éviter une démotivation liée aux méthodes répétitives et permettre une bonne évaluation de leur applicabilité.

Ces méthodes "propres" sont sans effet direct sur l'environnement. En revanche, comme pour toutes les autres techniques, se pose le problème de la gestion des terres libérées afin d'éviter les occupations anarchiques menant à la dégradation d'écosystèmes tropicaux fragiles (6).

***GTZ** : Postfach 5180 D-6236 Eschborn 1, (Allemagne)

***CRTA/CIRDES** : 01-B.P. 454, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

***NRI** : Central Avenue, Chatham Maritime, KENT ME 4 4TB, Grande-Bretagne

***Université de Hannover** : Tierärztliche Hochschule, Institut für Parasitologie, Bünteweg 17, D - 3000 Hannover Allemagne

***TTCB** : Department of Veterinary Services, P.O. Box 8283, Causeway, Harare Zimbabwe

***ANDE** de République Centrafricaine : B.P. 1509, Bangui, République Centrafricaine

(1) Authié (E.), Cuisance (D.), Force-Barge (P.), Frézil (J.L.), Gouteux (J.P.), Jannin (J.), Lancien (J.), Laveissière (C.), Lemesre (J.L.), Mathieu-Daudé (F.), Nitchman (S.), Noireau (F.) Penchenier (L.), Tibayrenc (M.), Truc (P.). Some new prospects in epidemiology and fight against human african trypanosomiasis. International Congress of the Southwest European Associations of Parasitology, Valencia (Spain), 1-5 juillet 1991.

(2) Challier (A.), Laveissière (C.). Un nouveau piège pour la capture des glossines (*Glossina* : Diptera, Muscidae) description et essais sur le terrain. Cah. ORSTOM, sér. Ent. méd. Parasit. 1973, 11, 251-262.

(3) Clair (M.), Cuisance (D.), Politzer (H.), Mérot (P.), Bauer (B.). Tsetse fly eradication in Burkina Faso and evaluation of traps and targets. Reprints from Sterile Insect Technique for Tse Tse Control and Eradication. Proceeding of the final research coordination meeting, Joint FAO-IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Vom (Nigeria), 6-10 Juin 1988 (published by IAEA, Vienne, 1990 31-43).

(4) Cuisance (D.), Cailton (P.), Kota-Guinza (A.), Ndokoué (F.), Pounékrozou (E.), Demba (D.). Lutte contre *Glossina fuscipes fuscipes* par piégeage chez les éleveurs Mbororo de République centrafricaine. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 1991, 44 (1) : 81.

(5) De Haan (C.), Bekure (S.). Animal Health Services in Sub-Saharan Africa ; Initial experiences with new approaches. World Bank Report, Washington (USA), 1991

(6) FAO La lutte contre la trypanosomose, élément d'une production agricole durable Réunion du groupe d'experts sur les aspects écologiques et techniques du Programme de lutte contre la trypanosomose animale africaine et de mise en valeur des zones en cause. Harare (Zimbabwe), 24-26 juin 1991.

(7) Hoste (C.H.). Contribution du bétail trypanotolérant au développement des zones affectées par la trypanosomose animale africaine. Revue Mondiale de Zootechnie. (à paraître).

(8) Itard (J.), Bauer (B.). Elevages de glossines. Synthèse. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop. 1984, 37 (N° spécial), 143-175.

(9) Jahnke (H.E.), Tacher (G.), Keil (P.), Rojat (D.). Livestock production in tropical Africa, with special reference to the tsetse affected zone. Réunion du Réseau africain d'étude du bétail trypanotolérant, Nairobi (Kenya), 23-27 nov. 1987.

(10) Gouteux (J.P.), Cuisance (D.), Demba (D.). La lutte par piégeage contre *Glossina fuscipes fuscipes* pour la protection de l'élevage en RCA I. Mise au point d'un piège adapté à un milieu d'éleveurs semi-nomades. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop. 1991, 44 (3) (à paraître).

(11) Laveissière (C.), Grébaut (P.), Le Masson (J.J.), Meda (H.) Couret (D.), Doua (F.), Brou (N.). Les communautés rurales et la lutte contre la maladie du sommeil en forêt de Côte-d'Ivoire. OCCGE, Institut Pierre-Richet, 1990, 135 p.

(12) Mérot (P.), Filledier (J.). Attractifs olfactifs pour les glossines riveraines. Bilan de cinq années de recherches. 21e Réunion ISCTRC/OUA, Yamoussoukro (Côte-d'Ivoire), 21-25 oct. 1991.

(13) Politzer (H.), Cuisance (D.). An integrated campaign against riverine tsetse *Glossina palpalis gambiense* and *Glossina tachinoides* by trapping and the release of sterile males. Insect. Sci. Applic., 1984, 5, 439-442

(14) Queval (R.), Bambara (L.). Le polymorphisme de l'albumine dans la race Baoulé et une population de zébus soudanais. Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop., 1984, 37 (N° spécial), 288-296.

(15) Tacher (G.), Jahnke (H.E.), Rojat (D.), Keil (P.). Livestock development and economic productivity in tsetse-infested Africa Réunion du Réseau africain d'étude du bétail trypanotolérant. Nairobi (Kenya), 23-27 nov. 1987

La macrofaune du sol

Une part importante (60%) de la déforestation en région tropicale est liée au besoin de nouvelles terres à cultiver. Les méthodes de culture itinérante traditionnelle sur brûlis ne sont plus adaptées aux conditions actuelles ; par ailleurs, les méthodes plus modernes en développement croissant ne respectent pas, bien souvent, les processus biologiques qui en assurent naturellement la conservation.

Patrick Lavelle

ENS-Laboratoire d'Ecologie-
45, rue d'Ulm- 75005 Paris

La mise au point de techniques d'exploitation viables à long terme est une nécessité absolue pour conserver les sols et limiter ainsi la déforestation et les graves problèmes d'environnement qu'elle génère (perte de biodiversité et modifications climatiques).

La mise en culture des milieux tropicaux naturels s'accompagne le plus souvent de profondes perturbations des peuplements animaux du sol, plus nettes dans les cultures annuelles que dans les cultures pérennes.

Au sein de cette faune très diversifiée, la macrofaune principalement composée de termites, vers de terre, fourmis et autres grands arthropodes de la litière, joue un rôle fondamental dans la conservation de la fertilité des sols en milieu naturel. Ces invertébrés exercent, en interaction avec la microflore du sol, une gestion fine des réserves organiques, qui se résume à une forte activation de la minéralisation aux échelles sélectives de temps et d'espace de l'absorption racinaire.

A plus long terme, l'activité conjointe de ces organismes se traduit par une inhibition de la minéralisation assurant la conservation des réserves organiques. Ces animaux assurent, par leurs activités mécaniques, l'entretien de la structure physique du sol en agrégeant des particules, en régulant la macroporosité ou en creusant des galeries qui facilitent le drainage.

Les termites, plus particulièrement, participent à l'entretien du paysage par la création éventuelle de petits îlots de fertilité accrue sur lesquels poussent les arbustes en savane. Faciliter ou restaurer l'activité de la macrofaune dans les sols cultivés est une des voies envisagées pour

améliorer la viabilité à long terme des systèmes agricoles tropicaux.

Ce thème conceptualisé dans le programme international "Tropical Soil Biology and Fertility" lancé en 1984 par l'IUBS et le MAB-UNESCO a été développé dans divers programmes cofinancés par la Communauté Européenne ou le Ministère de l'Environnement français (programme SOFT).

Des résultats significatifs, parfois spectaculaires, ont été obtenus.

A Yurimaguas (Amazonie péruvienne), l'introduction d'une espèce de ver de terre adaptée aux conditions de la culture a permis une augmentation de la production de 40% à la première récolte (maïs) et 78% à la deuxième (riz), dans un système de culture traditionnelle.

A Lamto (Côte d'Ivoire), on a obtenu de la même manière une augmentation de 20% de la production de l'igname. Des effets positifs significatifs ont par ailleurs été mesurés sur divers paramètres de la fertilité tels que la teneur en C, N, le pH, la toxicité aluminique, la densité apparente ou l'agrégation du sol.

Des recherches fondamentales se poursuivent pour évaluer l'efficacité des espèces disponibles en fonction des types de sols et de cultures.

On s'intéresse particulièrement aux interactions entre ces invertébrés et la microflore du sol, à leurs effets sur la minéralisation de l'azote et du phosphore, et à la distribution spatiale et temporelle des nutriments assimilables ainsi produits.

Un autre thème important est l'effet de cette macrofaune du sol sur les propriétés physiques du sol, états de surface, micro et macroagrégation, structure de la porosité, infiltration et densité apparente.

Sur le terrain, on multiplie les expériences à petite ou grande échelle permettant de

mettre au point des techniques optimisant les effets de ces espèces.

Ces recherches d'abord limitées aux seuls vers de terre s'étendent maintenant aux termites. La manipulation de ces insectes sociaux étudiés dans des systèmes de culture au Cameroun et au Congo, paraît plus difficile que celle des vers de terre ; elle peut permettre d'envisager des actions complémentaires, particulièrement dans les zones arides ou semi-arides d'où les vers de terre sont absents.

Les recherches sur la faune du sol se poursuivent dans de nombreux pays de la zone tropicale humide, particulièrement la Côte-d'Ivoire, le Congo, le Tchad, le Mexique, le Pérou, l'Inde, le Rwanda et la Guyane française.

Les principales équipes spécialisées dans l'étude de la faune des sols tropicaux se trouvent à l'ORSTOM (Centres de Bondy, Martinique, Niamey et Brazzaville particulièrement), à l'Ecole Normale Supérieure (Laboratoire d'Ecologie), à l'Université de Paris-Créteil et au Muséum d'Histoire Naturelle.

Les ressources aquatiques vivantes et leurs usages

Les ressources aquatiques vivantes et les usages auxquels elles donnent lieu constituent un modèle pour comprendre la dynamique des écosystèmes exploités. La recherche dans la zone intertropicale mobilise de nombreuses disciplines des sciences de la nature comme des sciences sociales.

Jean René Durand

ADEME Service Habitat et Tertiaire
500, route des Lucioles 06565 Valbonne Sophia
Antipolis Cedex

Jacques Weber

Ministère de L'environnement MEESP 14 Bd du
Gal Leclerc 92524 Neuilly s/ Seine Cedex

Les ressources aquatiques vivantes donnent lieu à une industrie très diversifiée, allant de la pirogue individuelle à des flottilles industrielles, mais toujours basée sur les capacités de ces ressources à se renouveler. Ces capacités de renouvellement sont à la fois dépendantes des évolutions environnementales et de l'importance des prélèvements effectués par l'homme. La pérennité des ressources et de l'exploitation à laquelle elles donnent lieu repose sur notre capacité, d'une part à comprendre l'incidence des fluctuations environnementales à court et long terme sur leur variabilité, d'autre part à réguler les taux d'exploitation. La régulation des taux d'explo-

tation des ressources aquatiques vivantes mobilise un nombre important de chercheurs au sein de programmes pluridisciplinaires ayant pour objet la compréhension des pêcheries dans leurs dimensions écologique, technique, économique, sociale, voire politique. Ainsi, le programme Delta Central du Niger que l'ORSTOM conduit au Mali depuis 1985 avec une importante équipe de sciences de la nature et de sciences sociales.

Les programmes de recherche français sur les pêches artisanales, en Afrique, dans la Caraïbe, l'Océan Indien, le Pacifique, relèvent également de cette démarche multidisciplinaire. L'importance de ces travaux est accrue par le fait que des stocks halieutiques en nombre croissant à travers le monde sont considérés comme pleinement exploités ou surexploités.

Au plan biologique et technologique, les programmes sont coordonnés au sein de la FAO, du Conseil International pour l'Exploration de la Mer, des Commissions Internationales de Pêche et aidés par le Ministère de la Coopération et la Communauté Européenne.

Conduits pendant longtemps espèce par espèce, ces programmes tendent aujourd'hui à une approche en termes d'écologie de populations multispécifiques réagissant à des prélèvements. Ces recherches écologiques vont de pair avec un développement des travaux sur la dynamique des flottilles dans l'espace et le temps, l'objectif étant de permettre l'élaboration de politiques visant à la préservation des ressources. La recherche thonière dans l'océan mondial intertropical fait ainsi l'objet d'efforts soutenus depuis vingt ans au sein de l'ORSTOM avec la collaboration de l'IFREMER et génère de fortes retombées économiques dans les pays riverains en développement, tels les Seychelles, la Côte-d'Ivoire, le Sénégal.

La recherche biologique sur les stocks exploités par les pêcheries, artisanales comme industrielles, a mobilisé de nombreux chercheurs depuis les années soixante et permis une connaissance remarquable des peuplements et de leur exploitation le long de la côte d'Afrique.

Au plan économique, les recherches portent sur les systèmes de production basés sur l'exploitation de ressources en propriété commune. L'étude des modes d'appropriation, c'est-à-dire d'allocation et de partage des ressources, revêt un intérêt majeur pour les pêcheries comme pour tous les biens communs ou "global commons", la recherche sur le cas des pêcheries ayant valeur de modèle pour de nombreux problèmes environnementaux.

Les ressources exploitées par les flottilles artisanales locales retiennent particulièrement l'attention, tant en mer que dans les eaux continentales.

Au plan juridique, la Convention sur le Droit de la Mer a conféré aux Etats riverains des droits souverains sur leur Zone Economique Exclusive (ZEE). L'attribution de ces nouvelles compétences qui concernent l'exploitation, la conservation et la gestion des ressources vivantes a donné un coup d'arrêt à l'expansion des flottilles à long rayon d'action en limitant leur accès aux zones de pêches. Elle a engendré par contre un accroissement de l'investissement dans les flottilles côtières, stimulé par le développement des échanges de produits de la mer venant se substituer à l'offre des flottilles disparues. Dans les eaux côtières et continentales, exploitées de façon artisanale, l'évolution des formes coutumières d'appropriation ainsi que leur prise en compte par le droit national sont au coeur de recherches encore à développer car conditionnant le devenir de l'exploitation comme des ressources.



Pêche artisanale à Nouakchott. Cliché: B. Surugue

Le développement de l'aquaculture est de nature à alléger à terme la pression sur les ressources aquatiques vivantes qui sont limitées face à une demande croissante au moins au rythme de l'évolution démographique. L'impact de l'aquaculture sur l'environnement, en termes de pollution, n'est pas le souci premier dans les pays en développement, l'aquaculture ne se développant que selon des modalités extensives ou semi-intensives. Plus importante au stade actuel est la question de l'adéquation des modes d'élevage aux économies rurales: tandis qu'elle connaît une rapide expansion en Asie du Sud-Est, l'aquaculture demeure largement expérimentale en Afrique. Les compétences françaises du CIRAD, de l'IFREMER, de l'INRA et de l'ORSTOM se sont fédérées dans un Groupe National d'Aquaculture Tropicale pour affronter ces enjeux scientifiques et économiques. La compréhension des relations entre fluctuations environnementales et variabilité des ressources est abordée au sein de programmes également pluridisciplinaires et internationaux, à différentes échelles d'espace et de temps. Le Programme National "Déterminisme du Recrutement" (PNDR), mobilise la communauté scientifique fran-

çaise pour l'exploration de la variabilité de la ressource aux stades larvaires.

La comparaison des zones d'upwelling à l'échelle mondiale doit aboutir à une meilleure compréhension du rôle joué par ces remontées d'eaux froides dans les fluctuations d'abondance des ressources pélagiques: celles-ci constituent entre un tiers et la moitié des débarquements mondiaux et l'une des principales sources d'activité économique pour certains pays.

Les conséquences des El Nino sur l'économie des pays de la façade pacifique de l'Amérique Latine montrent l'importance de tels travaux.

La compréhension des interactions entre environnement et ressources est également recherchée par des travaux sur les relations entre la pêche et le climat et notamment les relations entre les sécheresses et les pêches.

Depuis 1990, les recherches sont orientées vers l'analyse croisée des dynamiques des ressources et des systèmes d'exploitation qui leur sont liés.

Des instruments sont mis en place pour mener une recherche interdisciplinaire, indispensable pour affronter la complexité des systèmes naturels et des systèmes sociaux qui en dépendent à des degrés divers pour leur survie.

Quelques publications récentes parmi une littérature aussi riche qu'abondante, à seule fin d'illustration de la diversité des domaines explorés. De nombreux films et audiovisuels sont également disponibles auprès des organismes de recherche

- (1) P. Cury, C. Roy (eds.) 1991: Pêcheries ouest-africaines: variabilité, instabilité, changement. Paris, ORSTOM, 525 pages.
- (2) J.R. Durand, J. Lemoalle, J. Weber (eds) 1991: La Recherche face à la Pêche Artisanale. Symp Int ORSTOM-IFREMER, Montpellier, France, 3-7 Jul. 1989, Paris, ORSTOM, 2 t., 1070 pages.
- (3) C. Fay, 1990: Système halieutique et espaces de pouvoir: transformation des droits et des pratiques de pêche dans le Delta Central du Niger (Mali), 1920-1980. Cah. Sci. Humaines, ORSTOM, 1-2: 205-228.
- (4) A. Fonteneau, J. Marcille (eds), 1988: Ressources, pêche et biologie des thonidés tropicaux de l'Atlantique Centre-Est. F.A.O., Doc. Techn. Pêches, 292: 387 pages.
- (5) P. Freon, 1988: Réponses et adaptations des stocks de clupeïdes d'Afrique de l'Ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation. Paris, ORSTOM, Etudes et Thèses, 287 pages.
- (6) F. Laloe, A. Samba, 1990: La Pêche Artisanale au Sénégal, ressource et stratégies. Paris, Etudes et Thèses, ORSTOM, 354 pages.
- (7) J. Lazard, Y. Lecomte, B. Stomai, J.Y. Weigel, 1991: Pisciculture en Afrique Subsaharienne. Ministère de la Coopération et du Développement, Paris, 155 pages.
- (8) J. Quensière, 1991. Systémique et pluridisciplinarité: l'exemple du programme d'étude de la pêche dans le delta intérieur du Niger, in SEMINFOR 4, "le transfert d'échelle", C. Mullon ed., Paris, ORSTOM 475-492.
- (9) IFREMER - 1989 Avancées en agriculture tropicale Symposium de Tahiti-Polynésie française, 20 fév, 4 mars, Actes de Colloque n°9 Brest IFREMER, 780 pages

L'écosystème corallien : évolution et modélisation

Les modèles de fonctionnement de l'écosystème récifal utilisés par les différentes disciplines scientifiques reflètent la multiplicité des approches.

Un modèle unitaire rendant compte à la fois de la cohésion fonctionnelle de la machine algo-coralienne et de ses aspects phénoménologiques pourrait être établi à partir d'un modèle d'endo-upwelling géothermique.

Francis Rougerie

Directeur de recherches
Département TOA, ORSTOM-Tahiti

Une des particularités de l'écosystème récifal corallien est de pouvoir être appréhendé à

différentes échelles topologiques (un récif constitue un ensemble fractal) et phénoménologiques :

- à l'échelle de l'unité fonctionnelle de base, le polype corallien, dont la partie animale assure la calcification de l'édifice calcaire tandis

que les micro-algues symbiontes (zooxanthelles) photosynthétisent la matrice organique ;

- à l'échelle de la colonie corallienne, dont la spécificité s'exprime par l'existence de milliers d'espèces et de plus de quatre cents genres ;

- à l'échelle de la barrière récifale formée par la croissance et l'agrégation des coraux et des algues calcaires encroûtées.

Le récif barrière : une singularité dans le champ océanique

Ce niveau de macro-intégration atteint son optimum dans le cas des atolls où, après la

disparition par subsidence de l'îlot central, la barrière récifale n'enserme plus qu'un vaste lagon - réceptacle sédimentaire. Les atolls affleurant au niveau des houles de l'océan tropical constituent en fait les plus anciennes (jusqu'à cinquante millions d'années) et les plus massives des structures vivantes de notre planète.

Au plan paléontologique, la filiation corallienne est prestigieuse puisqu'elle représente, au travers des archéocoraux et des récifs spongieux du Cambrien, une lignée issue directement des premières formes de vie symbiotiques et stromatolitiques.

L'extension actuelle des récifs coralliens est de l'ordre de 600 000 km². La modestie de ce chiffre est largement compensée par la très grande diversité biologique qui les caractérise, aussi bien au niveau des biotopes que des espèces libres inféodées.

Paradoxalement, ces oasis récifaux, dont la productivité primaire est très élevée et similaire à celle des forêts tropicales humides, se développent dans un océan tropical caractérisé par sa carence en sels nutritifs et en plancton.

Vers un nouveau modèle de fonctionnement récifal

S'agissant des études récifolagounaires, les approches traditionnelles s'ordonnent selon des plans qui reflètent directement l'origine des disciplines scientifiques concernées.

Les travaux portant sur la fertilité des lagons, leurs ressources et leurs caractéristiques hydrologiques, privilégient un plan horizontal, à base de transect île-lagon-passe-océan. Pour les géologues et les géomorphologues, le plan vertical, à base de forage et de dragage, est la condition nécessaire à l'obtention d'échantillons permettant de dater les calcaires récifaux et d'en définir la minéralogie ou la pétrologie.

Au plan de la signification écologique et de l'exploitation des ressources, le hiatus paraît grand entre les ressources renouvelables (poissons, crustacés, nacres) et les ressources fossiles (phosphates des atolls, hydrocarbures des réservoirs dolomitiques etc.). Ces différentes biomasses, biocénoses et faciès récifaux, construits, détritiques ou diagénétiques représentent les multiples facettes

d'une capitalisation des produits issus du métabolisme des petites polypes coralliens; eux-mêmes sont sous l'étroite dépendance de la production primaire (autotrophe) réalisée par leurs zooxanthelles symbiontes.

L'écosystème algo-corallien est caractérisé par la forte unicité de la fonction autotrophocalcification assurée par la symbiose polypezooxanthelles, à laquelle semble s'opposer la très grande diversité biogéochimique des structures récifolagounaires et des faciès associés. Le récent modèle de fonctionnement par endo-upwelling géothermique peut constituer une réponse à l'ensemble des problèmes posés : dans ce modèle, les eaux océaniques profondes pénètrent à travers les flancs poreux (carbonate ou basalte) et, chauffées par le flux géothermique émanant du socle, s'élèvent jusqu'en haut de la structure calcaire poreuse, où elles débouchent au niveau de la couronne récifale (nettoyée par les houles océaniques).

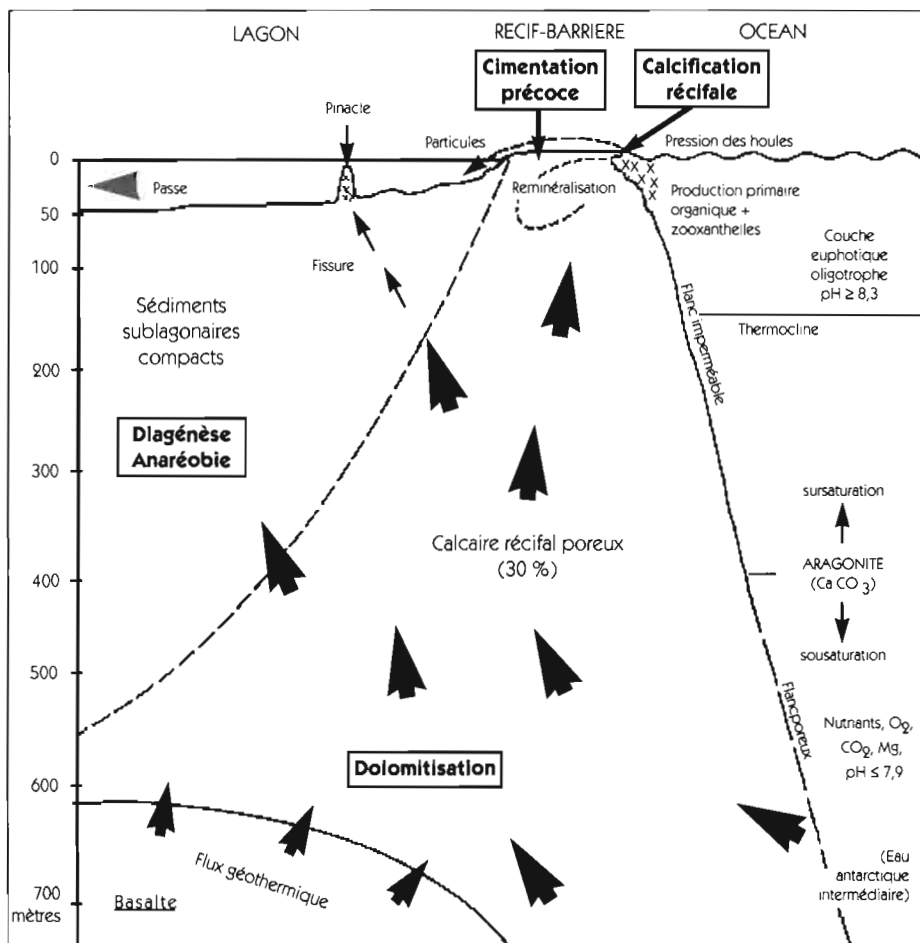
Ce processus de convection thermique interne au récif permet aux zooxanthelles symbiontes d'être alimentées en sels nutritifs neufs venus de l'océan profond. Ce processus peut également rendre compte des diverses diagénèses (cimentation précoce, dolomitisation) et faciès récifo-lagounaires (pinacles, gisements de phosphates, etc.) (Fig. 1).

Les barrières récifales d'îles hautes et d'atolls constituent le signal biologique marquant les sites de sortie des eaux endo-upwellées : le processus est analogue à un hydrothermalisme de basse énergie et ses implications peuvent couvrir la large gamme de ce que l'on appelle le phénomène récifal, à toute échelle de temps et d'espace.

Un programme de vérification et de validation est en cours au centre ORSTOM de Tahiti et fait appel aux traceurs océaniques, aux biomarqueurs et à l'outil isotopique. Dans le même temps, des programmes lagounaires consacrés aux ressources vivantes sont en cours en Nouvelle-Calédonie et à Tahiti dans le cadre du développement des états insulaires.

Une application du modèle d'endo-upwelling : le blanchissement des coraux

Les premiers phénomènes de blanchissement des coraux ont été observés aux Caraïbes à la fin des années soixante-dix et ont été notés depuis, avec une intensité croissante, en diverses zones du Pacifique (Panama, Indonésie, Polynésie). Ce blanchissement peut affecter les coraux sur des secteurs entiers de récifs barrières, de banquettes récifales et d'atolls, et se traduit au bout de quelques mois par une mortalité de 20 à 60 % des coraux blan-



Modèle de fonctionnement des récifs barrières et atolls par endo-upwelling géothermique : le flux d'eau profonde riche en sels nutritifs, débouchant au niveau de la couronne algo-corallienne, entretient la forte productivité primaire et des diagénèses spécifiques (cimentation précoce, dolomitisation, phosphatogénèse...)

chis - soit 10 à 20 % de l'ensemble d'un récif barrière. Il s'agit donc là d'un processus létal très significatif dont l'occurrence répétée peut mettre en cause la survie d'un récif à l'échelle locale, voire régionale.

Ce phénomène amène à poser de nombreuses questions auxquelles peu de réponses sont disponibles. Il apparaît cependant être en relation avec une température océanique excédentaire : en Polynésie par exemple, un blanchissement brutal a affecté les 500 km de récifs barrières des îles de la Société à partir d'avril 1991 (photo ci-dessous), alors que la température océanique atteignait 29,5° C, soit 1,5° C de plus que la moyenne saisonnière. Une synergie avec une augmentation en cours de l'irradiation U.V. atteignant l'océan, consécutive à la diminution de la couche d'ozone, est également possible.

L'application du modèle d'endo-upwelling permet de proposer l'hypothèse d'une diminution du flux de sels nutritifs atteignant l'écosystème algocorallien, par suite de l'atténuation de la cellule de convection interne, lorsque la couche océanique est anormalement chaude. Toutes ces hypothèses demandent à être vérifiées sur le terrain récifal, et à une échelle de temps inférieure à celle de la répétition du phénomène - et donc à la dégradation des récifs à l'échelle locale puis régionale. Là, comme dans beaucoup d'autres écosystèmes de notre planète, l'idée prévaut d'une sorte de compte à rebours létal, dont la vitesse est directement proportionnelle à l'impact de l'homme sur son environnement, et donc en premier lieu à sa démographie exponentielle. Et pourtant il semblerait que la nature ait également horreur des exponentielles...



Blanchissement des coraux en Polynésie en 1991 - ce phénomène brutal et d'une grande beauté a entraîné la mort de 15% des coraux des récifs barrières des îles de la Société. L'effort de recherche actuel paraît timide eu égard à la gravité du problème.

L'écosystème corallien : une recherche qui s'organise

Du fait de l'éloignement des zones récifologiques par rapport aux grands pôles de recherche des pays développés et des difficultés logistiques qui en découlent, les programmes portant sur les milieux coralliens ont longtemps été parcellaires, voire réductionnistes. C'est paradoxalement sous l'égide d'un programme MAB de l'UNESCO que la première tentative de recherche intégrée faite par la communauté récifale française a pu se dérouler sur la période 1975-1980 dans un atoll des Tuamotu (Polynésie française). Des financements CORDET permettent ensuite de renforcer cet effort de coopération entre des équipes du MUSEUM/EPHE (Paris), du C.O.M (Marseille-Endoume), de l'ORSTOM (Nouvelle-Calédonie et Tahiti) et de quelques universités. Le cinquième congrès international sur les récifs coralliens de l'International Society for Reef Studies (I.S.R.S), organisé à Tahiti en 1985 par B. Salvat, permit de situer l'importance et la vitalité de la recherche récifale française, dont le champ d'action porte sur les trois océans tropicaux : Polynésie et Nouvelle-Calédonie pour le Pacifique, Mayotte et Madagascar pour l'océan Indien, la Martinique et la Guadeloupe pour l'Atlantique. Plus récemment, la coopération des équipes récifales a été formalisée sous l'égide du P.R.C.O (Programme de Recherche Corallien), programme national financé par l'ORSTOM et l'INSU.

Trois grands thèmes ont été sélectionnés :

- flux de matière : calcification et décalcification, transformation de la matière organique par les poissons, fixation de l'azote ;
- processus d'endo-upwelling géothermique ;
- paléoenvironnement : paléoproduktivité, niveau des mers tropicales, magnétostratigraphie.



Un pâte corallien est un mini oasis où s'agrègent des espèces benthiques et libres.

Un projet de forage sur atoll est à l'étude, qui devrait permettre à la communauté récifale française d'avoir une séquence complète jusqu'au basalte et d'étudier in situ les flux interstitiels et les diagénèses. La jeune Université Française du Pacifique a créé en 1989 à Tahiti un DEA consacré à la connaissance et à la gestion des écosystèmes coralliens. Son responsable actuel, R. Bagnis, a pu, après de longues années de recherche sur les toxines des poissons coralliens (ciguatera), faire avancer de façon significative ce problème complexe aux implications socio-économiques importantes.

Enfin, l'Observatoire Océanologique Européen de Monaco (J. Jaubert) intervient dans des zones récifales sous stress, Golfe Persique et Mer Rouge. Un projet de forage sur atoll est à l'étude, qui devrait permettre à la communauté récifale française d'avoir une séquence complète jusqu'au basalte et d'étudier in situ les flux interstitiels et les diagénèses.

La jeune Université Française du Pacifique a créé en 1989 à Tahiti un DEA consacré à la connaissance et à la gestion des écosystèmes coralliens. Son responsable actuel, R. Bagnis, a pu, après de longues années de recherche sur les toxines des poissons coralliens (ciguatera), faire avancer de façon significative ce problème complexe aux implications socio-économiques importantes. Enfin, l'Observatoire Océanologique Européen de Monaco (J. Jaubert) intervient dans des zones récifales sous stress, Golfe Persique et Mer Rouge.

(1) 5ème Congrès International sur les Récifs Coralliens, 1985. 6 vol., Antenne MUSEUM-EPHE Moorea, Polynésie française.

(2) Reef Diagenesis, 1986. Edited by J.H. Schroeder and B.H. Purser Springer-Verlag, Berlin, 455 p.

(3) The evolution of Reef communities, 1987. J. A. Fagerstrom Edited by John Wiley, New York, 600 p.

(4) 6ème Congrès International sur les Récifs Coralliens, 1988. 3 vol., I.S.R.S., Townsville, Australia.

(5) Coral Reef geomorphology, 1988. By André Guilcher. Edited by John Wiley Chichester, 228 p.

(6) Les atolls-oasis 1990, Rougerie F. et Wauthy B., La Recherche, N° 223, vol. 21, pp. 832-842

(7) L'endo-upwelling géothermique, 1990 Rougerie F., ORSTOM-Actualités, N° 31, pp. 9-15

(8) Blanchissement des coraux : phénomène régional ou signal d'alarme planétaire, sous presse. Rougerie F., Salvat B., Tatarata M., La Recherche.

Innovations, technologies et méthodes

Le développement durable s'inscrit dans un contexte d'incertitude tant en matière de ressources que de changements climatiques. La recherche sur les milieux et les impacts vise à réduire les marges d'incertitude, celle sur les technologies vise d'abord à prendre des décisions de "précaution" en limitant les flux perturbateurs. Le principe de précaution conduit à privilégier les actions multicritères. Dans ce contexte, les priorités technologiques ont été identifiées et certaines font l'objet de communications dans ce chapitre.

- I**l s'agit principalement :
- de maîtriser la consommation d'énergie fossile dans les transports ; cette action vise aussi à réduire la tension sur le pétrole, et à prévenir la congestion et la pollution urbaine,
 - de produire l'électricité sans impact sur le climat et de l'utiliser avec la plus grande efficacité possible,
 - de gérer la chaîne du froid et de fabriquer des isolants thermiques en évitant l'usage de C.F.C mais aussi de H.C.F.C qui ont un fort impact sur l'effet de serre ;
 - d'éliminer la dégradation anaérobie des déchets organiques putrescibles dans les décharges de manière à éviter la formation de méthane ;
 - de promouvoir le stockage du carbone par le développement de la forêt et l'utilisation du bois, ainsi que les substitutions du carbone fossile par du carbone renouvelable (énergie, chimie).

L'évolution des systèmes techniques à la base des économies vers plus de sobriété et plus de propreté repose d'abord sur la recherche technologique, mais elle repose aussi sur l'aptitude des sociétés à faire effectivement les choix du développement durable. A ce niveau, la technologie rejoint les sciences humaines.

Modélisation, bases de données et bases de connaissances pour l'environnement.

Un certain nombre de problèmes fondamentaux concernant l'environnement sont caractérisés par la complexité des systèmes en cause, la multiplicité de leurs composantes (physiques, chimiques, biologiques, écologiques, humaines et sociales), la non-linéarité des phénomènes sous-jacents, la nécessité de prendre en compte la structure spatiale et les différentes échelles d'espace et de temps, la multiplicité des causes et des effets, la diversité des objectifs... Leur étude implique à l'évidence une approche interdisciplinaire, où la modélisation prend de plus en plus d'importance.

Alain Pavé

Laboratoire de Biométrie - Génétique et biologie des populations - Université Claude Bernard - Lyon I - 43, bvd du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne cedex

Les acquis méthodologiques

La modélisation, à savoir la construction, l'étude et l'utilisation de modèles, principalement de modèles mathématiques, a acquis un statut de méthode : le modèle est reconnu comme étant l'un des outils de base de la recherche scientifique (1).

Cependant, il apparaît clairement des secteurs où l'utilisation du langage mathématique se fonde dans la tradition du discours scientifique (c'est le cas de beaucoup des domaines de la physique) et d'autres où cette introduction est plus récente et où les problèmes posés sont d'une nature nouvelle (par exemple, traiter des systèmes structurés, des systèmes "bruités"...). Ceci a conduit à des pratiques différentes et au développement de démarches et d'outils spécifiques ; si bien que la modélisation tend à devenir une spécialité. Les automaticiens, les économètres, les biométriciens et les informaticiens ont largement contribué à l'émergence de cette méthode (2).

Enfin, très liée à l'analyse systémique, la modélisation a largement contribué à rendre celle-ci opérationnelle.

Largement admise, cette méthodologie présente plusieurs facettes, notamment :

- l'utilisation du modèle comme élément du langage et de la réflexion scientifiques, objet et outil de la pensée conceptuelle ;
- l'extension de la notion de modèles à d'autres représentations que mathématiques ou numériques (formalismes des bases de

données, de l'intelligence artificielle, des divers modes de représentation

comme les cartes thématiques, les langages en "boîtes et flèches" des modèles à compartiment ou des diagrammes de Forrester) ;

- l'intégration du modèle à l'approche expérimentale (3) ;

- l'approche spéculative, à savoir l'analyse des propriétés d'objets formels, le plus souvent mathématiques et l'interprétation de celles-ci comme comportements possibles d'objets réels.

Il s'agit alors d'une approche analogique, le modèle sert de paradigme ;

- l'utilisation de modèles pour définir des actions régulatrices (contrôles). Ainsi J.L. Lions (4) propose les trois termes de ce qu'il appelle "l'Outil Universel", à savoir : Modélisation, Analyse (du modèle), Contrôle.

Enfin, l'informatique facilite l'élaboration, l'étude et l'utilisation de modèles. Elle a largement contribué à la mise en oeuvre de modèles de plus en plus sophistiqués, à populariser la méthode et aussi à augmenter, par un effet en retour, la culture, notamment mathématique, du plus grand nombre. Enfin, elle a conduit à l'émergence de nouveaux outils de modélisation (intelligence artificielle, modèles relationnels des bases de données...) Néanmoins et bien que les résultats soient déjà impressionnants, il reste encore beaucoup à faire dans le domaine de l'intégration des outils, question qui relève essentiellement du développement de nouveaux logiciels.

Les contributions dans les recherches sur l'environnement

Si l'on admet le statut scientifique et épistémologique du modèle et de la modélisation, il est clair que ce doivent être des élé-

ments clés des recherches sur l'environnement. Il faut aussi qu'il soit bien entendu que si le modèle et la modélisation peuvent être des médiateurs dans les approches interdisciplinaires, ils peuvent aussi constituer des motifs de tensions dans la mesure où, comme nous l'avons souligné, les secteurs scientifiques en ont des pratiques et en font des usages différents.

Les modèles au niveau planétaire et les changements globaux

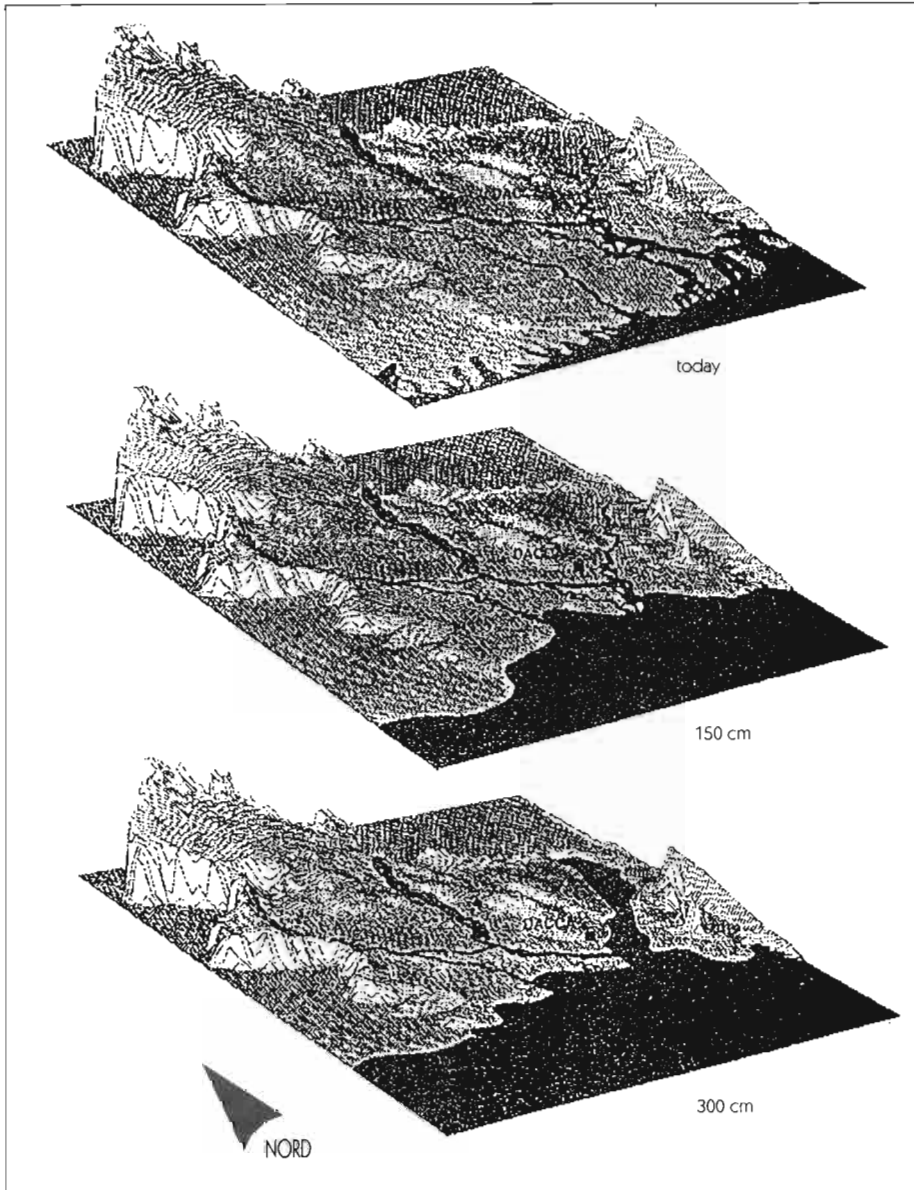
On a vu ces dernières années plusieurs propositions de modèles (5) en vue de prévoir l'évolution du climat sous une hypothèse de doublement de CO₂ (prévisible vers 2050). Il est clair qu'une bonne estimation des incidences climatiques est importante pour définir des politiques tant techniques et scientifiques qu'économiques et sociales. Les modèles actuellement proposés s'accordent sur la prévision d'une augmentation globale de la température moyenne de 1,5°C à 4,5°C, plus importante dans les zones froides mais plus accentuée dans la région boréale que dans l' australe.

Cependant, l'amplitude et la répartition spatiale des augmentations de températures, des modifications de la pluviosité et de l'humidité sont très différentes entre modèles. Dans l'état actuel, ces modèles sont très "physico-chimiques" et n'intègrent que peu ou pas de composantes "bio-écologiques" pour la prévision tant des réactions des systèmes écologiques aux modifications climatiques que de leur influence sur les climats.

Enfin, ils n'envisagent les problèmes qu'à l'échelle globale, les conséquences locales relèvent d'autres approches. Par exemple, en utilisant des systèmes d'informations géographiques on a pu donner les prévisions d'inondation des terres basses du Bangladesh suivant plusieurs scénarios d'augmentation du niveau des mers résultant d'un réchauffement global (figure 1) (6).

Les modèles de systèmes écologiques

L'écologie est une des disciplines des Sciences de la Vie qui a le plus recours à la modélisation et ceci depuis de très nombreuses années (un livre publié en 1978 parlait des années 20-30 de "l'âge d'or de l'écologie théorique"(7). De la modélisation de la dynamique des populations jusqu'à l'approche



Raising of sea water level in Bangladesh

écosystémique, on trouve de nombreuses tentatives fructueuses, et quelquefois controversées.

Il y a néanmoins à faire des efforts à toutes les échelles d'espace et de temps, en particulier dans la modélisation de la dynamique des grands écosystèmes intégrant précisément les aspects spatiaux (par exemple le modèle MUSE de la dynamique de la savane développé dans le cadre du Programme SALT (Savanne A Long Terme) (8).

En effet, actuellement les modèles les plus courants ne représentent que les dynamiques des grands compartiments et sont donc axés sur l'étude des grands cycles biogéochimiques.

Les modèles intégrant aspects sociaux et environnementaux

Les aspects sociaux économiques ont été introduits dans les modèles numériques dès le début des années 70 aux Etats Unis et à l'IIASA (on peut citer les modèles de Mesarovic & Pastel) avec des succès mitigés. Aujourd'hui, on voit émerger des modèles informatiques s'appuyant par exemple sur des techniques d'intelligence artificielle intégrant le comportement d'acteurs humains, la dynamique des ressources, les problèmes environnementaux et les aspects économiques (l'ORSTOM, en France, soutient actuellement de telles tentatives). Ce

type d'approche très interdisciplinaire est très prometteur et sera sans doute plus efficace que les tentatives numériques des années 70. En tout état de cause, un large effort de modélisation reste à faire, mais sur des bases de plus en plus convaincantes (9).

Bases de données, bases de connaissances et traitement de l'information géographique

On peut replacer le problème des bases de données dans la thématique modélisation pour deux raisons :

- les modèles fonctionnels ou descriptifs sont construits à partir de l'analyse de données observationnelles ou expérimentales, leur calage, leur validation et leur utilisation demande donc un accès à ces données, leur bonne organisation et leur gestion est donc un problème clé,
- l'élaboration d'une base à partir d'un système de gestion de bases de données établissant les relations entre données est un travail de modélisation de la structure de ces données qui n'est pas indépendant de la nature des données, du contexte technique et scientifique et des objectifs d'utilisation.

On retiendra cependant que la plupart des systèmes de gestion de bases de données ont été conçus principalement pour des données administratives, comptables ou documentaires et sont mal adaptés aux données scientifiques (celles-ci sont diverses et de types complexes : qualitatives, quantitatives, incomplètes, spatialisées, organisées en chroniques...)

Les systèmes à bases de connaissances sont une généralisation qui permet d'introduire des techniques relevant de l'intelligence artificielle, par exemple d'établir des relations entre les données factuelles qui ne soient pas figées dans la structure de la base et d'introduire des notions telles que celle de point de vue ou encore des raisonnements sophistiqués, par exemple en univers incomplet ou incertain. De plus en plus il y a rapprochement entre l'approche base de données et les travaux sur les bases de connaissances (des nouveaux modes de représentations "centrées-objet" facilitent ce rapprochement). Encore largement du domaine de la recherche ces approches conduiront à des outils très utiles.

Enfin, le traitement de l'information géographique a fait l'objet depuis une dizaine

d'années de beaucoup d'efforts. Les SIG (Systèmes d'Information Géographiques) couplant système de gestion de bases de données relationnel et couche logicielle de manipulation des données spatialisées ont été conçus. Ces systèmes d'une grande utilité sont encore du domaine du spécialiste (10). Dans un proche avenir, on trouvera des systèmes alliant les techniques de l'intelligence artificielles à celles des SIG et intégrant des modèles dynamiques (11).

Les progrès à faire

Ceci étant précisé, on peut repérer certains progrès méthodologiques à faire par rapport aux problèmes fondamentaux énoncés précédemment. Ainsi il y a lieu :

- d'abord de spécifier les relations entre modèles, expérimentation, observation et instrumentation, c'est-à-dire d'une part la définition de protocoles expérimentaux ou de campagnes de mesures qui permettent le recueil de données pertinentes pour des modèles de fonctionnels (notamment pour l'évaluation ou l'estimation des paramètres de ces modèles), d'autre part la mise au point et l'utilisation de modèles dans le dispositif de mesure lui-même (le passage de la mesure "physique" à la "donnée" qui peut conduire à la réalisation de véritables "capteurs logiciels"). Enfin, comme nous l'avons signalé, l'organisation et le stockage des ensembles de données qui posent le problème des bases de données scientifiques et techniques ;

- de préciser les démarches et outils à utiliser pour la construction et l'élaboration de modèles : par exemple, de bien spécifier quels sont les modèles élémentaires fiables des processus fondamentaux (incluant les actions et comportements humains), à quels niveaux ils s'expriment, quelles sont les règles d'association de ces modèles élémentaires pour représenter des systèmes "complexes" (c'est-à-dire comprenant beaucoup de variables et de processus reliant ces variables), quelle est la traduction au niveau des structures spatio-temporelles ;

- de bien définir les liens entre modèles et les concepts de niveau d'organisation, d'échelle et d'intégration temporelle et spatiale. Par exemple, peut-on imaginer représenter le comportement global d'un système avec des modèles simples ou du moins plus simples que la liste des modèles individuels décrivant les éléments et les interactions entre ces éléments ? De même, la dyna-

mique à long terme d'un système ne peut-elle pas s'exprimer, évidemment dans ses grandes tendances, de façon plus simple que par le prolongement des dynamiques à court terme (par exemple, les modèles d'évolution climatique doivent-ils s'appuyer sur les modèles de dynamique d'atmosphère employés en météorologie, ou au contraire être élaborés sur la base d'une autre formulation, adaptée à l'échelle de temps envisagée ?) ;

- de développer l'extension de la notion et de la pratique des modèles à d'autres formalismes que celui des mathématiques ;
- d'envisager les conséquences de ce qu'on appelle tout particulièrement la "non linéarité" des phénomènes, concept issu des mathématiques. De nombreux phénomènes, naturels ou non, semblent avoir des comportements analogues à ceux des objets mathématiques dits non-linéaires. D'où, d'une part l'extension de l'emploi du terme, et d'autre part la prise de conscience que des actions apparemment minimes peuvent avoir des conséquences considérables.

Ainsi, si certaines évolutions de notre environnement, par exemple du climat, sont gouvernées par de tels phénomènes non-linéaires, alors l'hypothèse de transitions brutales n'est pas a priori à écarter. Ce type de phénomène doit absolument être pris en compte dans l'évaluation des risques (il n'y a notamment pas symétrie du risque, celui-ci n'est pas réductible à l'incertitude) et dans la définition et la mise en oeuvre d'actions qui préservent le fonctionnement, ou anticipent sur un fonctionnement nouveau dans un nouvel état stationnaire.

On peut aussi se poser la question de la prévision de tels "risques" : il est facile de montrer, dans le cas de modèles simples, que l'approche d'un point critique peut s'accompagner d'une augmentation de la variabilité des phénomènes ; exemple : une augmentation de la variabilité climatique, au moins à une certaine échelle qui doit être précisée, ne préfigurerait-elle pas une transition brutale ?

Pour répondre à ces questions, il faut d'abord s'appuyer sur l'existant au niveau des disciplines : sur leurs méthodes, sur leurs modèles mais aussi sur leurs théories. Il faut le faire non seulement sur les disciplines qui sont aujourd'hui impliquées, mais également sur d'autres, comme les mathématiques, qui peuvent beaucoup apporter. Inversement, les recherches sur l'environnement, en fournissant des problématiques

nouvelles, peuvent contribuer aux développements méthodologiques et théoriques de ces disciplines et c'est sans doute la condition nécessaire d'une implication durable de leurs chercheurs.

Les différents organigrammes de recherche accordent de plus en plus d'importance aux aspects méthodologiques (INRA, ORSTOM, CIRAD), le programme environnement du CNRS a créé pour sa part une action de recherche "Méthodes, modèles et théories pour la recherche sur l'environnement" qui tend à fédérer le maximum de compétences.

- (1) N. Mouloud - Les modèles. Encycl. Univers., Ed. 1980.
- (2) A. Pavé - Biométrie, Modélisation et Intelligence Artificielle "Communication, Cognition and Artificial Intelligence", 6, 2/3, 153-176, 1989
- (3) J.M. Legay - La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale. Informatique et Biosphère, Paris, 1973
- (4) J.L. Lions - El Planeta Tierra, el papel de las matematicas y de los super ordenadores. Instituto de España, 1990.
- (5) Modèles du Canadian Climate Center, du Geophysical Fluids Dynamics Lab. et du United Kingdom Meteorological Office En France, signalons les travaux du Centre National de Recherche Météorologique (autour du modèle Arpège) et du Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS. On pourra se référer au rapport du Groupe de Travail de l'Académie des Sciences sur "l'effet de serre". L'idée de "modèle communautaire", actuellement débattue dans la communauté scientifique française s'intéressant à l'évolution climatique, va dans ce sens. On pourra consulter : L'évolution du climat et de l'environnement global : le modèle communautaire français. Météo France, les Universités et le CNRS, Rapport rédigé par Carriolle D., février 1991.
- (6) Simonett O., L'Eplattenier R.L. - GIS-Einsatz auf globaler Ebene bei UNEP/GEMS/GRID. In: Umweltbeobachtung (Hrsg. Elsasser H., Knoepfel P.). Wirtschaftsgeographie und Raumplanung des Geographischen Instituts der Universität Zürich, 8 : 117-125.
- (7) Scudo F.M. et Ziegler J.R. - The Golden Age of Theoretical ecology - 1923-1940. Lect. Notes in Biomathematics, Springer-Verlag, 1978. Il s'agit pour la plupart de textes traduits du Français ...
- (8) Menaut J.C., Ginioux J., Prado C. et Clobert - Tree community dynamics in a humid savanna of the Ivory Coast : modelling the effect of fire and competition with the grass and neighbours. J. of Biogeography, 17 : 471-481, 1990.
- (9) Représentation, Modélisation, Développement. Actes de l'atelier "Recherche Opérationnelle et Développement - 1990" (Org. P. Matarasso). Centre d'Echotechnique du CNRS, 1991.
- (10) Ashdown M. & Schaller J. - Geographic Information Systems and their applications in MAB-Projects. UNESCO - Man And Biosphere Program, German National Committee, Bonn, 1990
- (11) Coulson R.N., Folse L.J., Loh D.R. - Artificial Intelligence and Natural Resource Management. Science, 1987, 237, 262-267.

Télédétection spatiale

Contribution de la recherche et de la technologie française

La France est l'un des rares pays maîtrisant la chaîne spatiale complète depuis les lanceurs et les satellites jusqu'à la commercialisation des produits, en passant par la production industrielle de stations de réception et de systèmes de traitement des données.

On peut schématiquement décomposer les activités de la télédétection spatiale en France en trois groupes principaux : les recherches fondamentales et la formation, les grands champs d'applications, la conception de nouveaux instruments.

François Blasco

Institut de la carte nationale du tapis végétal - Université de Toulouse III - 39, allée Jules Guesde 31062 Toulouse cedex

Les recherches fondamentales et la formation

L'une des difficultés méthodologiques majeures en télédétection spatiale est de supprimer ou d'atténuer les perturbations dues à l'atmosphère et à la géométrie de l'observation.

Depuis quelques années, nos chercheurs espèrent quantifier, à partir de capteurs orbitaux et de manière rigoureusement fiable, les flux hydriques, thermiques ou gazeux à l'interface sol-atmosphère dans les divers types de milieux. Bien entendu les résultats de ces recherches ont un intérêt immédiat dans le domaine agricole (9) et dans les grands programmes internationaux liés au Global Change. Ce sont des opérations lourdes, fortement pluridisciplinaires dont l'illustration est fournie par l'expérience Hapex-Sahel conduite en 1992 au Niger avec l'appui de mesures aéroportées par des équipes du CNES, du CNRS, de l'INRA, de l'ORSTOM, etc.... Ces recherches fondamentales devraient, entre autres retombées, contribuer au développement de nouveaux algorithmes d'exploitation des données spatiales. Par ailleurs, les progrès des recherches fondamentales, de même que la qualité des interprétations des enregistrements spatiaux, sont en général directement liés à la qualité des travaux de terrain qui leur sont associés (4).

Le projet national de télédétection spatiale (PNTS) assure la coordination des recherches. Ces recherches s'accompagnent en France d'un effort de formation et de transfert de technologie de grande ampleur grâce

à de multiples programmes universitaires ou autres (GDTA, MAE, MCD, MRT, etc...) On peut dire qu'aujourd'hui pratiquement tous les pays d'Asie tropicale savent exploiter correctement les données spatiales. La situation est variable d'un pays à l'autre sur les autres continents (3).

Les grands champs d'application

Les grands champs d'applications de la télédétection spatiale, pour ce qui concerne la biosphère continentale, vont de la cartographie topographique et de la production opérationnelle de spatio-cartes (IGN) aux études géologiques (BRGM : Scanvic, 1991), forestières (CIRAD, CNRS), en passant par les ressources en eau (CEMAGREF), les pâturages (IEMVT) et la prévision des récoltes (INRA, CCR), etc... Ces champs d'applications reposent essentiellement sur l'utilisation des données à haute résolution spatiale : SPOT, Landsat TM et MSS. Parmi les exemples les plus significatifs de recherches à vocation d'application immédiate, il convient de citer les travaux récents de l'IFREMER consacrés à l'étude des littoraux, notamment pour la sélection des sites favorables à l'aquaculture, à partir des données de SPOT et de Landsat TM.

Exemple d'application : Etudes forestières et cartographie des écosystèmes. Niveaux de discrimination réalisés par les équipes françaises (2)

Petites ou très petites 1/1 000 000 à 1/10 000 000	NOAA AVHRR	Forêts/non forêts
Echelles moyennes 1/200 000 à 1/1 000 000	LANDSAT MSS, IRS, MOS	Physionomie - densité Phénologie (décidues, sempervirentes etc...)
Grandes échelles 1/50 000 à 1/200 000	SPOT, LANDSAT TM, ERS 1	Physionomie, phénologie, stades dynamiques, faciès édaphiques,

Les retombées économiques et écologiques des méthodes mises au point dans ce domaine (6) concernent de nombreux pays insulaires et des dizaines de milliers d'îles.

Pour bien des pays tempérés et tropicaux, la télédétection spatiale est devenue un outil de gestion et d'aide à la décision.

La conception de nouveaux instruments : "Le capteur Végétation".

Les problèmes d'environnement globaux nécessitent une couverture aussi complète, aussi précise et aussi fréquente que possible de l'ensemble de la planète. De nombreux laboratoires mettent sur pied des programmes destinés, d'une part, à tenter d'extraire à partir des données spatiales des paramètres de structure, de productivité et de fonctionnement des écosystèmes terrestres et, d'autre part, à évaluer les grands phénomènes naturels ou d'origine anthropique, tels que l'évolution des zones désertiques (10) ou celle des forêts intertropicales à l'échelle planétaire (TREES). Disons pour simplifier que l'utilisation de capteurs dans les domaines optiques et thermiques présente un fort handicap, en régions intertropicales de forêts denses humides, en raison des couvertures nuageuses. Comme par ailleurs l'utilisation du SAR (Synthetic Aperture Radar ; Bande C) du satellite européen ERS 1 (lancé le 17 juillet 1991) n'a pas encore débuté, les chercheurs tentent, essentiellement à partir d'indices de végétation, notamment du NDVI (1) de rendre opérationnel un système de surveillance continue des forêts, à partir de capteurs conventionnels plus ou moins complémentaires (7).

En outre, les recherches réalisées dans les domaines de l'évaluation de la production de biomasse des écosystèmes naturels et de l'estimation de la production agricole ont

Contrôle des inondations au Bangladesh en utilisant SPOT (scène KJ 237/303)

d'après F. Blasco et al., 1992 - Remote Sensing of Environment - à paraître



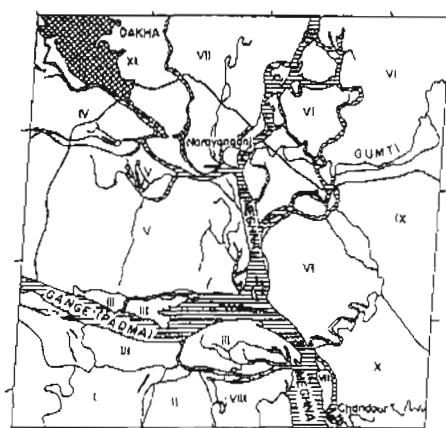
1. Le réseau hydrographique en pleine saison sèche (9 janvier 1987)



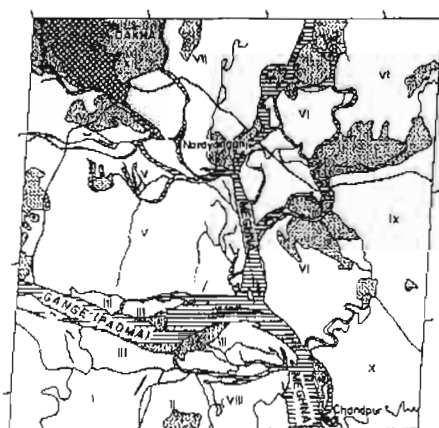
2. Extension de l'inondation après un cyclone de moyenne intensité (7 novembre 1987)



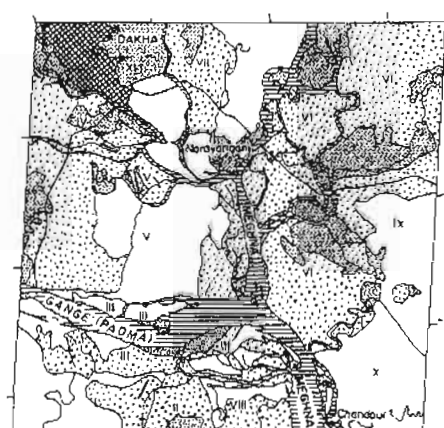
3. L'ampleur d'un désastre (10 octobre 1988)



1.



2.



3.

- routes principales
- ▨ fleuves
- villes
- ▨ régions inondées

montré la nécessité de concevoir un nouvel instrument spatial.

Les chercheurs français, plus particulièrement ceux du CNES, du CNRS et de l'INRA, ont ainsi conçu un nouveau capteur ("Végétation") dont l'originalité et les performances exceptionnelles proviennent de la combinaison de la haute résolution spatiale et d'un large champ de vision (5). Cette combinaison optimale (et l'adjonction d'une bande dans le moyen infrarouge) est probablement, pour de nombreuses années encore, la seule capable de fournir aux spécialistes de l'environnement planétaire et des productions végétales, des données qui font aujourd'hui cruellement défaut.

L'instrument "Végétation" qui pourrait équiper SPOT IV en 1996 sera un outil de gestion performant, au service des hommes.

Liste des abréviations

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CCR	Centre Commun de Recherche (JRC) (EEC)
CEMAGREF	Centre d'Etudes du Machinisme Agricole du GREF
CIRAD	Centre Interorganisme de Recherches en Agronomie pour le Développement
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CRPE	Centre de Recherches en Physique de l'Environnement
EEC	European Economic Community
ERS 1	Earth Resources Satellite (ESA)
ESAP	Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan (Toulouse)
FAO	Food and Agriculture Organization
GDTA	Groupeur pour le Développement de la Télé-détection Aérospatiale
HAPEX	Hydrological Atmosphere Pilot Experiment
IEMVT	Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire en pays Tropicaux
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
LERTS	Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télé-détection Spatiale (CNES-CNRS)
MAE	Ministère des Affaires Etrangères
MCD	Ministère de la Coopération et du Développement
MRT	Ministère de la Recherche et de la Technologie
MSS	MultiSpectral Scanner (Landsat)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
TM	Thematic Mapper (Landsat)
TREES	Tropical Ecosystems Environment observations by Satellite (EEC-ESA)

- (1) **ACHARD F. et BLASCO F.** 1990 Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in West Africa with the use of NOAA, AVHRR, HRPT data "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing" 56 (10) : 1359-1365.
- (2) **BLASCO F.** 1990 - Guidelines on use of Landsat and SPOT for land use and forest change, FAO, sept. 90, 63 p. bibl. : 23 p.
- (3) **BASTOS-NETTO D. et BLASCO F.** 1989 La télédétection au service du développement. Conférence de Berlin. Fondation Allemande pour le Développement, 1/6 sept. 1986. Régions tropicales humides : 129-137.
- (4) **KERR Y.** 1992 L'expérience française Hapex-Sahel. Programme National de Télédétection Spatiale. INSU 77, avenue Denfert Rochereau 75014 Paris
- (5) **LERTS** 1992 - The "Vegetation" Instrument on board SPOT IV A mission for global monitoring of the Continental biosphere. 83 p. 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex (France).
- (6) **LOUBERSAC L.** 1991 - Milieux côtiers tropicaux du Pacifique Sud : information géographique dérivée de SPOT. ICIV, Université Paul Sabatier, Toulouse, 106 p.
- (7) **MALINGREAU J.P.** 1990 - TREES : Tropical Ecosystem Environment Observation by Satellite. 10 p. CEC, Ispra, Italie.
- (8) **SCANVIC J.Y. et al.** 1991 - SPOT Remote Sensing as an aid to development : the Loess plateau, North West China. China International Symposium on geological hazards and prevention, Pékin, Oct. 1991.
- (9) **SEGUIN (B.) et al.** 1991 - The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infra-red data. Remote Sensing of Environment, 213 : 141-148.
- (10) **TUCKER (C.J.) et al.**, 1991 - Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. Science, vol. 253, pp. 299-301.

La fixation biologique de l'azote

Dans de nombreux pays tropicaux, les sols sont appauvris en éléments indispensables à la croissance des végétaux, en particulier azote et phosphore, et la majorité des paysans n'ont pas les moyens financiers de compenser ces carences par des apports d'engrais minéraux. Afin de limiter la dégradation des sols et d'en relever la teneur en azote, il est possible d'utiliser des symbioses entre des végétaux supérieurs et des bactéries du genre Rhizobium pour les légumineuses et Frankia pour les non-légumineuses, qui, grâce à leur nitrogénase, transforment l'azote de l'air en ammoniac assimilable pour les plantes-hôtes.

Jean-Jacques Drevon

INRA 1 place Viala 34 060 Montpellier cedex

Bernard Dreyfus

ORSTOM Dakar BP 1386 Dakar Sénégal

Mamadou Gueye

Inst. Sénégalais de Recherche Agronomique, MIRCEN

Rachid Serraj

Université de Marrakech

La fixation symbiotique de l'azote a lieu dans des nodosités que l'on trouve sur les racines et plus rarement sur les tiges. Sur le plan des connaissances, rappelons que les premières étapes de la formation des nodosités consistent en une déformation en crosse des poils absorbants, suivie d'une différenciation de cellules du cortex in-

terne, à l'origine du méristème nodulaire. Durant ces étapes, s'opère une reconnaissance spécifique entre le rhizobium et sa légumineuse-hôte. C'est ainsi qu'aucune déformation des poils absorbants n'est observée lorsque du soja est inoculé avec un rhizobium de luzerne et réciproquement. Les bases moléculaires de cette spécificité sont très étudiées : les gènes nod ABC sont communs à tous les rhizobiums alors que d'autres gènes comme nodIII, concernent plus spécialement le spectre d'hôte. On sait, à la suite de travaux récents des laboratoires CNRS-INRA de Toulouse, que l'activité des gènes nod de R. meliloti produit un oligosaccharide sulfaté, appelé NodRm-I, capable d'induire à des concentrations inférieures à 1 nM la déformation spécifique de poils absorbants de luzerne (14).

La reconnaissance entre les partenaires de la symbiose implique aussi des gènes végétaux comme l'atteste la découverte de mutants de pois incapables de noduler avec leurs rhizobiums spécifiques, ni d'ailleurs

avec des mycorhizes qui sont des champignons symbiotiques des plantes (5). De plus, l'expression des gènes nod est induite par des flavonoïdes émis par la plante.

On connaît d'autres gènes spécifiques de la symbiose, dont la mutation provoque la formation de nodosités non fixatrices (phénotype Nod+ Fix-).

Ce sont en particulier les gènes bactériens fix LJ, impliqués dans la régulation de la synthèse de la nitrogénase, ainsi que les gènes végétaux des nodulines, protéines présentes dans la fraction végétale des nodosités mais absentes dans les autres organes de la plante. Les plus abondantes d'entre elles sont les leghémoglobines (3, 7) qui ont pour fonction essentielle de transporter l'oxygène dans les cellules infectées.

Pour améliorer la fixation symbiotique de l'azote au champ, on peut inoculer les légumineuses avec des rhizobiums particulièrement efficaces. En France on peut évaluer à quelque 200 millions F/an le bénéfice de cette pratique qui s'est développée sur soja (70 000 ha inoculés / 120 000 ha cultivés) et luzerne pérenne (40 000 ha inoculés / 700 000 ha cultivés), à la suite des travaux de l'INRA (10).

La qualité des inoculums commerciaux français, Biodoz (Lipha, Lyon) et Rhizosarb (Bioprox-Protex, Château-Renault), est garantie par une APV (autorisation provisoire de vente) délivrée par le ministère de l'Agriculture après que le produit ait été analysé par l'INRA.

Sur le plan fondamental, les spécialistes d'écologie microbienne étudient, à l'aide de marqueurs sérologiques et moléculaires, le devenir des rhizobiums ainsi introduits dans des sols français (4).

L'inoculation en PED est beaucoup moins avancée en raison d'un moindre développement des programmes de recherche, mais aussi parce que les rhizobiums spécifiques des légumineuses d'importance économique majeure sont généralement présents dans les sols tropicaux. Il en résulte un difficile problème de compétition entre ces souches natives et les souches inoculées (1). On peut cependant identifier, par enquête agronomique, des sols où la trop faible population des rhizobiums natifs se révèle être responsable d'une déficience de la fixation symbiotique et où, par conséquent, l'inoculation peut être avantageusement appliquée. Cette approche à Cuba, en coopération avec G. Hernandez (Instituto

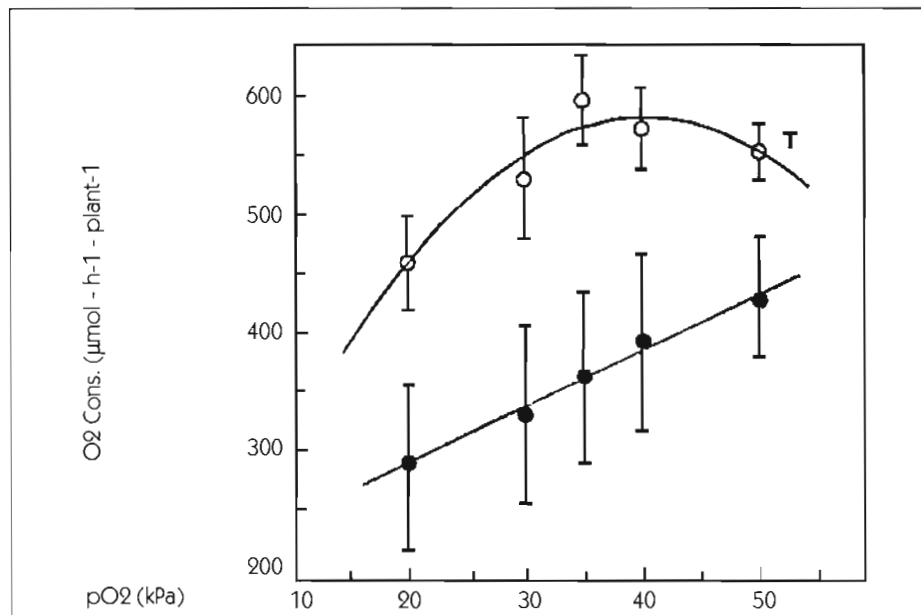


Figure 1 Inhibition de la diffusion intranodulaire de O₂ par un apport de 100mM NaCl. La consommation d'oxygène par les nodosités de soja est mesurée in-situ à l'aide d'une électrode à oxygène dans un dispositif de renouvellement permanent de l'atmosphère du milieu racinaire.

de Suelos, La Havane), a permis d'économiser 200 tN/an en inoculant 1 500 ha/an de haricot (sur 6 000 ha cultivés en fermes d'Etat) depuis 1988. Au Rwanda, grâce à 20 ans de travail continu de A. Hakizimana (ISAR, Butaré) avec l'appui du CIRAD, de l'INRA et de la FAO, 2 000 ha de soja sont inoculés chaque année en milieu paysan ; la production locale d'inoculum est faite en fermenteurs UPII fournis par le CIRAD. Au Sénégal, 200 km de dunes littorales ont été plantés avec succès en Casuarina inoculés massivement en pépinières (13).

Une autre voie d'amélioration de la fixation d'azote consiste à sélectionner des symbioses tolérantes aux facteurs édaphiques ou climatiques limitants dont les principaux sont la salinité, la sécheresse, la faible teneur des sols en phosphore assimilable, les teneurs exceptionnellement élevées en nitrates.

Ceci exige de mieux comprendre les mécanismes physiologiques et biochimiques impliqués et d'identifier les gènes correspondants : synthèse d'osmoprotecteurs tels que la glycine bêtaïne chez les rhizobiums en sols salins (11) ; abaissement de la conductance nodulaire à la diffusion de O₂ en présence de nitrate (9), d'un déficit hydrique (8) ou d'un excès de sel (fig. 1).

On peut aussi accroître la place des légumineuses dans les systèmes de culture, comme le proposent le CIRAD et l'ORSTOM. Ainsi dans les rizières d'Asie et d'Afrique, l'enfouissement de légumineuses aquatiques à nodu-

les de tige, telles que Sesbania et Aeschynomene, permet de doubler les rendements du riz (12). Des plantations de légumineuses arborescentes, telles que des Acacias multipliés in vitro, auraient des effets similaires dans des systèmes forestiers ou agroforestiers (6).

Les connaissances et l'expérience technologique acquises par les équipes françaises dans ce domaine sont enseignées dans un cours international de 4 semaines organisé à Montpellier par l'INRA avec le concours du CIRAD, du CNRS et de l'ORSTOM.

- (1) Amarger N. et Lobreau J.P. 1982 Appl. Environ. Microbiol., 44, 583-8.
- (2) Batot J., Daveran-Mingot M.L., David M., Jacobs J., Garnerone A.M. et Kahn D. 1989 EMBO J., 8, 1279-86
- (3) Bogusz D., Llewellyn D.J., Stuart C., Dennis B.S., Appleby C. et Peacock W.J. 1990 The Plant Coll., 2, 633-41.
- (4) Brunel B., Cleyet-Marrel J.C., Normand P. et Bardin R. 1988 Appl. Environ., Microbiol., 54, 2636-42.
- (5) Duc G., Trouvelot A., Gianinazzi-Pearson V. et Gianinazzi S. (1989) Plant Science, 60, 215-22.
- (6) Galiana A., Tibok A. et Duhoux E. 1991 Plants Soil 135, 161-6.
- (7) Gallucci P., Dedieu A., Journet B.P., Huguet T. et Barker D. 1991 Plant Mol. Biol., 17, 335-49
- (8) Guérin V., Trinchant J.C. et Rigaud J. 1990 Plant Physiol., 92, 595-601.
- (9) Heckmann M.O., Drevon J.J., Saglio P. et Salsac L. 1989 Plant Physiol., 90, 224-9
- (10) Lagacherie B. et Obaton M. 1973 C.R. Acad. Agric., 67-77.
- (11) Le Rudulier D., Gloux K. et Riou N. 1991 Biochem. Biophys. Acta, 1061, 197-205.
- (12) N'doye I. et Dreyfus B. 1988 Soil Biol. Biochem. 20, 209-13
- (13) Sougoufara B., Diem H.G. et Dommergues Y.R. 1989 Plant Soil, 118, 133-7.
- (14) Truchet G., Roche P., Lerouge P., Vasse J., Camut S., De Billy F., Promé J.C. et Dénarié J. 1991 Nature, 351, 670-3.

Modélisation de la croissance forestière

Les formations boisées couvrent environ 30% de la surface des terres émergées, soit 41 millions de km². Les deux tiers constituent à proprement parler des forêts qui se partagent approximativement par moitié entre pays industrialisés et pays en développement. Ces formations sont variées puisqu'il s'agit aussi bien des forêts denses humides tropicales et équatoriales primaires ou des savanes arborées que des forêts artificielles plantées ou de la taïga. Cette diversité est dans une large mesure déterminée par la nature des sols et des climats. Elle est aussi liée aux actions humaines : exploitation sélective, défrichement, colonisation naturelle après abandon de terres cultivées, introduction d'espèces, plantation. La modélisation de la croissance forestière permet dans une certaine mesure de rendre compte de la dynamique des peuplements et donc de la production ligneuse.

J.-C. Bergonzini

CTFT 45bis, av. la belle Gabrielle 94130 Noget sur Marne - tel. 43 94 43 00

F. Houllier

ENGREF 14, rue Girardet 54042 Nancy cedex

Bien que les mécanismes écophysologiques qui gouvernent la croissance des arbres et la dynamique des peuplements forestiers soient identiques - utilisation des ressources en eau et en éléments minéraux par transformation de l'énergie lumineuse - ils se traduisent par des structures et des dynamiques nettement différentes selon la nature des peuplements.

Dans certains cas, on maîtrise les paramètres qui contrôlent la répartition spatiale (écartement), la diversité spécifique et génétique (plantation clonale) et l'âge (peuplement équienne) ; dans d'autres, on est confronté à des mosaïques de phases sylvigénétiques de densités différentes, composées d'arbres de dimensions et d'espèces variées, parfois non identifiées, et dont la régénération dépend de multiples facteurs (ex. de la faune).

Les questions posées changent selon les types de formations, leurs fonctions, leur mode d'exploitation ou les interrogations qui pèsent sur leur pérennité.

Les méthodes utilisées pour représenter la dynamique des peuplements sont, elles aussi, variées.

Deux exemples sont présentés ici.

Modèles de production pour les forêts plantées

Les plantations artificielles ont souvent été réalisées à des fins explicites de production de bois d'oeuvre, de trituration, voire de chauffage (ex. eucalyptus et pins tropicaux). Les modèles de croissance s'attachent donc surtout à prédire la production ligneuse en fonction de l'âge, des caractéristiques du milieu et des interventions sylvicoles (éclaircies, élagage, fertilisation...). La relative simplicité de ces peuplements fait qu'on peut les utiliser facilement pour étudier les phénomènes de concurrence [entre arbres] pour l'exploitation des ressources du milieu.

Les principes de ces modèles sont suffisamment bien connus (cf. figure 1) pour qu'on puisse affirmer qu'un corpus cohérent de connaissances empiriques et de méthodes biométriques existe pour représenter la croissance de ces peuplements et fournir des outils d'aide à la gestion.

Cependant, la demande de modèles est encore loin d'être satisfaite car leur conception continue de requérir simultanément une bonne technicité en biométrie et de solides bases de données dendrométriques. Les problèmes scientifiques ont tendance à se déplacer dans deux directions. A l'aval, vers le couplage entre la simulation de la croissance et la prédiction de la qualité des produits : les caractères anatomiques, le rendement matière, la densité du bois, la nodosité des sciages, certaines propriétés physiques sont en effet déterminés par la manière dont l'arbre s'est développé. A l'amont, vers la recherche de modèles plus explicatifs fondés sur une description des processus écophysologiques et capables, par exemple, d'évaluer l'impact des fluctuations climatiques annuelles, d'explorer l'effet de changements globaux ou d'appréhender les problèmes de maintien de la fertilité des sols.

Un réseau de dispositifs pour appréhender les éléments de la dynamique des forêts denses

Dans les forêts denses primaires, on cherche plutôt à préciser les notions d'équilibre et de stabilité des peuplements - en termes

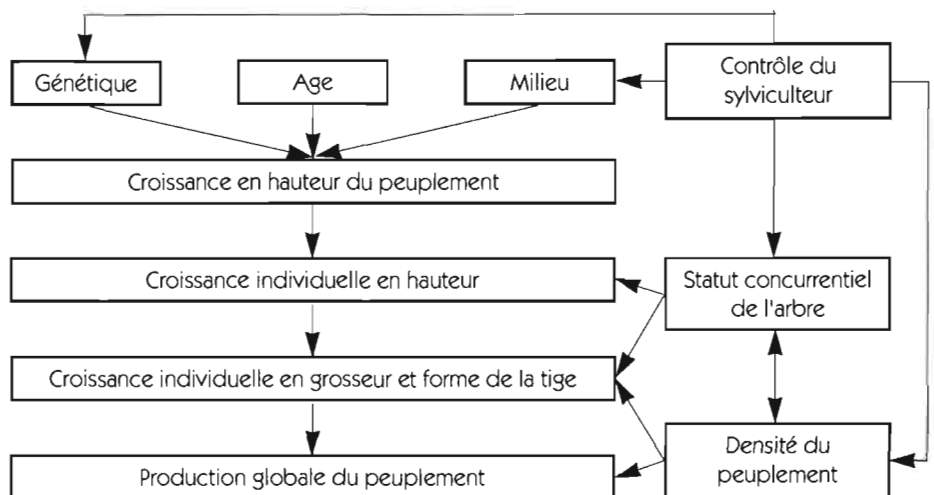


Figure 1 - Structure simplifiée des modèles de croissance pour les peuplements monospécifiques équiennes. La croissance en hauteur dépend essentiellement de l'âge, du matériel génétique et de la fertilité de la station. Les autres caractéristiques dendrométriques (extension des houppiers, forme et volume des tiges) sont déduits de la croissance en hauteur ainsi que du statut social de l'arbre et de la densité des peuplements qui sont contrôlés par le sylviculteur



UAIC, République Populaire Du Congo. Programme de plantations industrielles, d'eucalyptus. Mai 1981. Plantation de 4-5 ans. Espacement 3,5m x 3,5m Hauteur 23m. Parcelle d'expérimentation. Photo. Quillet, coll. CTFT.

de diversité spécifique, de répartition spatiale, de dimensions des individus et de taux de renouvellement - et à quantifier les phénomènes de reconstitution de la forêt après des perturbations, notamment après l'exploitation sélective des plus gros arbres.

C'est dans cet esprit que, depuis une dizaine d'années, le CIRAD-CTFT conçoit et met en place un réseau expérimental formé de plusieurs dispositifs installés dans différents pays (Côte d'Ivoire, Centrafrique, Guyane française, Brésil, Indonésie). Pour chaque dispositif, plusieurs parcelles de grande surface (9 hectares chacune) ont été délimitées et soumises à des traitements variés ; leurs arbres (quelques milliers par parcelle) ont été individualisés, identifiés, cartographiés et sont mesurés chaque année.

Ce réseau fournit aux gestionnaires des indications techniques sur la réaction globale des peuplements et sur le comportement individuel des arbres après divers traitements ainsi que sur la nature des inter-

actions des multiples espèces qui composent ces forêts : leur taux de mortalité et leur longévité, leur tolérance à l'ombre, leur vitesse de croissance. Ces caractéristiques se traduisent notamment par des structures diamétriques distinctes. Plus finement, l'étude de la croissance d'un arbre en fonction de sa position verticale et horizontale dans le peuplement ainsi que des dimensions relatives de ses voisins constitue un vaste champ d'investigation.

Ces dispositifs fournissent aussi un moyen d'aborder l'étude de la répartition spatiale des différentes espèces en relation avec leur stratégie de développement et leur mode de dissémination des graines. On peut ainsi étudier l'abondance de la régénération en fonction de la position des semenciers et, par exemple, des conditions locales d'éclaircissement ou de densité du peuplement.

Bien que des théories, plus qualitatives que quantitatives, existent, qui rendent compte des principaux modes de sylvigénèse (par chablis ou par substitution), la modélisation de la dynamique de ces peuplements

modèles plus délicate.

Plusieurs pistes complémentaires sont actuellement explorées. La conception de modèles démographiques globaux, décrivant les transitions entre classes de diamètre, est surtout adaptée aux peuplements naturels mais bute sur la représentation de la régénération. La prédiction de la croissance individuelle en diamètre en fonction de l'environnement immédiat de chaque arbre, caractérisé par des indices synthétiques de compétition fournit des résultats mitigés. Pour progresser, il sera sans doute nécessaire de compléter les bases de données existantes par mesures de hauteurs et de houppiers et de décomposer la croissance de l'arbre en processus couplés : croissance en hauteur, développement du houppier, croissance en grosseur de la tige.

Des études comparatives menées sur ces dispositifs, on peut ainsi espérer extraire quelques lois universelles qui serviront à édifier la base d'une théorie générale de la dynamique des forêts tropicales humides.

	Avant exploitation : 1982-84			Après exploitation : 1987-89		
	G (m ² /ha)	ΔD (cm/an)	ΔG (m ² /ha/an)	G (m ² /ha)	ΔD (cm/an)	ΔG (m ² /ha/an)
Témoin	31,6	0,162	0,38	32,2	0,174	0,43
Exploité	32,6	0,142	0,32	24,9	0,309	0,65
Exploité+éclaircie	30,5	0,145	0,35	20,9	0,457	0,84

Réaction globale du peuplement à trois traitements dans un dispositif CIRAD-CTFT de République Centrafricaine (d'après Favrichon). G = surface terrière des peuplements, ΔD = accroissement annuel moyen en diamètre des arbres, ΔG = accroissement annuel moyen en surface terrière. La diminution brutale de la densité du peuplement, due à l'exploitation, aboutit à une augmentation simultanée de la croissance individuelle et de la production globale du peuplement. La durée de cette réaction positive reste à déterminer.

Essence	Avant exploitation : 1982-84		Après exploitation : 1987-89	
	Parcelles témoins	Parcelles exploitées	Parcelles témoins	Parcelles exploitées
Ebène	0,16	0,08	0,16	0,10
Essia	0,25	0,25	0,30	0,35
Sapelli	0,25	0,20	0,24	0,33
Limba	0,71	0,54	0,65	0,87
Ayous	0,26	0,28	0,24	0,33
Ilomba	0,16	0,11	0,16	0,30

Accroissement annuel moyen en diamètre (cm/an) de diverses espèces pour deux traitements différents dans un dispositif CIRAD-CTFT de République Centrafricaine (d'après Favrichon). Avant exploitation, les vitesses moyennes de croissance varient selon les espèces. L'ampleur de la réaction à l'exploitation est, elle aussi, variable : minime pour l'ébène et l'essia, très forte pour l'ayous et l'ilomba.

ventions susceptibles d'améliorer la production des espèces économiquement intéressantes et de favoriser la reconstitution des peuplements après exploitation (tableaux 1 et 2). Il permet de plus de préciser les traits biolo-

est sensiblement moins avancée que pour les plantations. La diversité des espèces, l'hétérogénéité des structures, la moindre connaissance des milieux, l'intrication des phénomènes spatiaux et des processus temporels rendent en effet l'élaboration de

- (1) Alder D. 1980 Estimation des volumes et des accroissements des peuplements forestiers : étude et prévision de la production. FAO (Rome) 198 p.
- (2) Bariteau M., Geoffroy J. 1989 Sylviculture et régénération naturelle en forêt guyanaise. Revue forestière française, XLII (4), 309-323.
- (3) Bergonzini J.C. 1991 Natural forest in French Guyana. Proceeding of the seminar on sustainable tropical forest management, Djakarta, 9-10 Déc. 91 (à paraître).
- (4) Bertault J.G. 1986 Etude de l'effet des interventions sylvicoles sur la régénération naturelle au sein d'un périmètre expérimental d'aménagement en forêt dense humide. Thèse, Université de Nancy.
- (5) Dixon R.K., Meldahl R.S., Ruark G.A., Warren W.G. 1990 Process modelling of forest growth responses to environmental stress. Timber Press (Portland), 441 p.
- (6) Houllier F., Bouchon J. et Birot Y. 1991 Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. Revue Forestière Française, XLIII (2), 87-108.
- (7) Houllier F., Leban J.M., Colin F. et Nepveu G. 1991 Modélisation de la croissance des arbres et des peuplements et de la qualité des bois. Communication volontaire au Xème congrès forestier mondial (Paris).
- (8) Maitre H.F. 1990 Recherches sur la dynamique des peuplements arborés en vue de définir une sylviculture et la production durable de l'écosystème forestier tropical humide. Conférence sur la conservation et l'utilisation rationnelle de la forêt dense d'Afrique centrale et de l'ouest. Abidjan, Nov 1990.
- (9) Mengin-Lecreux P. 1990 Simulation de la croissance d'un peuplement de forêt dense : le cas de Yapo (Côte d'Ivoire) CTFT/SODEFOR.
- (10) Persson R. 1987 Forest resources of the world and their future. In Forest decline and reproduction : regional and global consequences, Kariukstis, Nilsson et Straszak (eds), IIASA (Laxenburg), 453-462.
- (11) Tran-Hoang A., Favrichon V. et Maitre H.F. 1991. Dispositifs d'étude de l'évolution de la forêt dense centrafricaine suivant différentes modalités d'intervention sylvicole : présentation des principaux résultats après huit années d'expérimentation. Projet ARRF-Bangui et CTFT (Nogent/Seine)

Glossaire

Dendrométrie : discipline qui s'intéresse à la mesure des arbres (hauteur, diamètre, volume...) et des peuplements.
 Équienne : se dit d'une population ou d'un peuplement dont tous les individus ont le même âge.
 Surface terrière : somme des surfaces des sections des tiges à 1,30 m dans un peuplement.

Gestion sylvicole et qualité du bois

La diversité des forêts tropicales, handicap face à l'ancienne standardisation des industries devient un atout grâce à la tendance actuelle à l'hyperchoix des matériaux. Mais cette diversité doit être connue, répertoriée, accessible pour le calcul de l'ingénieur.

B. Thibaut

Directeur de Recherches au CNRS

D. Guitard

Professeur à l'Université Bordeaux 1

M. Fournier

Professeur à l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts

La relation entre gestion sylvicole et qualité du bois procède d'une double dialectique. D'un côté, des propriétés spécifiques recherchées par les utilisateurs induisent un type de sylviculture. De l'autre, les techniques sylvicoles sont mises à profit pour améliorer ces propriétés souhaitées.

En caricaturant, on pourrait dire qu'en forêt naturelle les qualités intrinsèques des bois "précieux" conduiraient à une politique de "cueillette" (l'extractivisme), gestion à faibles intrants, préservant au mieux la diversité biologique sur d'immenses surfaces. A contrario, dans les plantations à croissance rapide, les techniques à coût élevé de la foresterie clonale seraient utilisées pour obtenir une production standardisée, optimisée à la fois en quantité et en qualité sur des surfaces agricoles réduites. Mais le concept même de "qualité" est directement lié à l'état des technologies de valorisation et celles-ci, à leur tour, ne se développent qu'en fonction des productions espérées de la sylviculture.

La rapidité des changements et l'ampleur des choix possibles rendent indispensable une évolution interdépendante des techniques sylvicoles et des technologies de valorisation des bois. Cela conduit à mettre en place des programmes multidisciplinaires de recherche où dialoguent sciences du végétal et sciences des matériaux.

Partant du renouveau des sciences du bois impulsé par le ministère de la Recherche à la fin des années 70, un réseau de scientifiques appartenant à plusieurs organismes, CIRAD, CNRS, ENGREF, Universités Bordeaux 1, Montpellier 2, s'est progressivement mis en place à cette interface forêt-bois, en liaison étroite avec les recherches plus strictement forestières ou en technologie du bois menées principalement par le Centre Technique Forestier Tropical.

Fonctionnement de l'arbre et qualité du bois

L'ambition scientifique est d'analyser le processus d'édification d'un arbre qui se fait par deux mécanismes en interrelation au cours du temps) la croissance primaire (allongement des axes) détermine la morphologie des arbres.) la croissance secondaire (croissance en diamètre des axes) produit le matériau nécessaire à la stabilité mécanique de la structure.

Les analyses faites sur des arbres d'âge très différent (Wapa en Guyane, Eucalyptus au Congo) combinant les approches des architectes, des anatomistes et des mécaniciens ont montré l'étroite relation entre les phases de la croissance primaire (et ses accidents éventuels) et l'élaboration du bois dont la qualité dépend directement (fig. 1).

Des campagnes de mesure (actuellement en cours) sur ces deux espèces sont encore nécessaires pour quantifier ces relations afin de les intégrer dans des modèles de fonctionnement de l'arbre (4). Les travaux de l'équipe De Reffye bénéficiant des acquis des architectes (4) permettent de décrire le développement architectural des arbres. La connection avec les mécaniciens (5, Gril) va permettre d'enrichir la modélisation informatique de simulations réalistes du

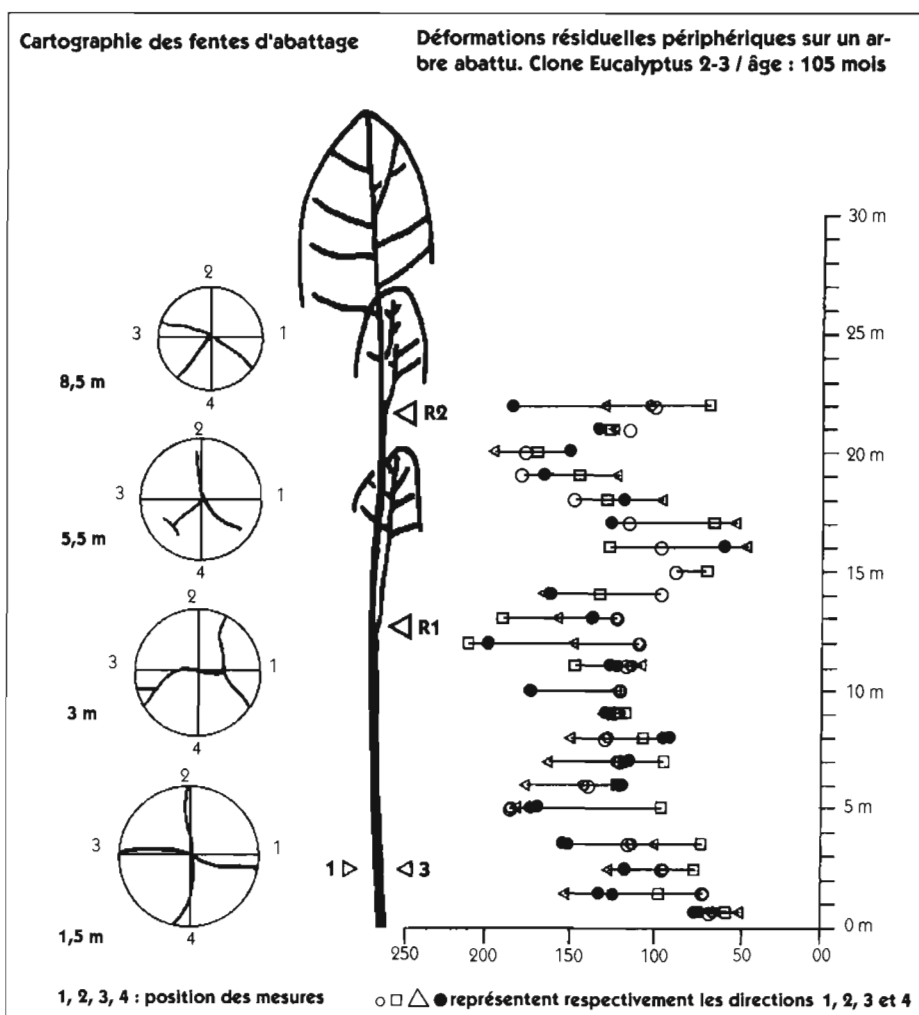


Fig.1 : Morphologie de l'arbre, contraintes internes et fentes à l'abattage d'un Eucalyptus de plantation à Pointe Noire - Congo - d'après H. Baillères, B. Chanson, M. Fournier et C. Loup
Commentaires : Les déformations résiduelles mesurées en périphérie de l'arbre debout (photo) ou abattu traduisent l'état de contraintes internes de l'arbre : une valeur élevée correspond à une contrainte élevée, une grande longueur de segment reliant les 4 valeurs à une même hauteur signifie une forte dissymétrie des contraintes dans l'arbre. Ces deux circonstances sont favorables à l'éclatement du bois à l'abattage. La présence à 11m et à 22m de hauteur de complexes reitérés R1 et R2 (grosses branches qui reproduisent le schéma architectural de l'arbre) a une influence directe sur les profils de contraintes internes dans l'arbre.



comportement mécanique des différents axes en fonction de leur chargement, de leur croissance et des épisodes de réorientations de ces axes.

Ces recherches de base sont accompagnées de recherches plus finalisées visant à :

- diagnostiquer précocement les risques d'obtenir des arbres inutilisables et même dangereux (Wapa en Guyane) en raison des hauts niveaux de contraintes internes,
- optimiser l'époque de récolte dans la vie de l'arbre en définissant des critères objectifs de "maturité" plutôt que des critères de diamètre d'exploitabilité,
- guider les interventions sylvicoles lourdes (plantation, tailles diverses ...) pour améliorer la qualité des arbres et du bois produits,
- disposer de "modèles standard" de développement d'espèces (clonées ou pas) afin de prédire le plus tôt possible les qualités de l'arbre "mûr",
- analyser le comportement dynamique des arbres soumis au vent afin de prendre les mesures sylvicoles visant à réduire le risque de casse avant récolte.

Multimatériaux à base de bois

La diversité des forêts tropicales, handicap face à l'ancienne standardisation des industries devient un atout grâce à la tendance actuelle à l'hyperchoix des matériaux. Mais

cette diversité doit être connue, répertoriée, accessible pour le calcul de l'ingénieur.

Compte-tenu des atouts environnementaux et technologiques des bois, la fourniture de demi produits de qualité pour l'industrie moderne est un enjeu de taille pour les PED. La possibilité de valoriser la majorité des espèces d'une forêt naturelle change complètement les données de la gestion sylvicole.

Ces forêts produisent des arbres rectilignes au bois très homogène. Cela est favorable à la fabrication de feuilles de bois (les placages) de haute qualité, parfaitement adaptées à la réalisation de multimatériaux modernes pour de nombreux secteurs industriels (aéronautique, sport et loisirs...).

Trois axes de recherche sur ce thème :

- Constitution d'une banque de données sur les bois de la forêt naturelle, compatible avec les banques de données sur les matériaux de l'ingénieur. C'est un travail de longue haleine que plusieurs générations de chercheurs ont entamé dès la création du CTFT accumulant ainsi un capital de tout premier plan.
- Etude des processus de première transformation de l'arbre en placages. Les travaux du CTFT et du LMGC ont conduit à la mise au point d'un outil de simulation numérique et d'outils expérimentaux permettant de déterminer rapidement les conditions optimales du déroulage ou du tranchage. Les nombreuses expérimentations ont prouvé que ni le diamètre, ni la densité du bois n'étaient des facteurs limitants dans la fabrication de placages de qualité : le champ est ouvert pour la quasi-totalité des arbres de forêt naturelle.
- Elaboration de logiciels de simulation des propriétés de multimatériaux fabriqués à partir de feuilles de bois et d'autres matériaux. La première génération mise au point au LRBB permet de prédire les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle de tels multiplis en faisant varier de nombreux paramètres.

Cette démarche doit se prolonger par des activités de valorisation avec des partenaires industriels notamment dans les PED pour la production de placages. La Guyane française pourrait servir de base pour des opérations de recherche - développement et de démonstration en profitant des synergies possibles localement.

Equipes impliquées et grands programmes

La plupart des équipes impliquées sont regroupées dans le G.S. "Rhéologie et Mécanique du Bois" (GDR81 du CNRS) dont dépendent les programmes Eucalyptus et Multimatériaux. Dans le programme "Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre" (contrat MRT 89-92), ces mêmes équipes sont associées aux botanistes spécialistes de l'architecture :

- CTFT Centre Technique Forestier Tropical (CIRAD Paris et Kourou) : B. PARENT (1), J. GERARD (1), D. FOUQUET (1).
 - ENGREF Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (Kourou) : D. BOUVARD (2).
 - Laboratoire de Botanique Tropicale (Université Montpellier 2, URA 327 du CNRS) : F. HALLE (3) ; C. EDELIN (4).
 - LMGC Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (Université Montpellier 2, URA 1214 du CNRS) : B. THIBAUT (4), J. GRIL (4).
 - Laboratoire de Modélisation (CIRAD Montpellier) : P. DE REFFYE (1).
 - Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (UMR 123 CNRS, INRA, Université Bordeaux 1) : M. FOURNIER (2) , D. GUITARD (3), P. MORLIER (3), B. CHANSON (4).
- Structures des PED associées dans ces programmes
- Unité d'Afforestation Industrielle du Congo, Pointe Noire : Y. LAPLACE
 - Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, Cameroun : A. FOUJLET.

(1)CIRAD - (2)ENGREF - (3)EDUCATION NATIONALE - (4)CNRS

(1) F. CAILLIEZ 1991 L'aménagement des Forêts Tropicales, Bois et Forêts des tropiques, n° 227, 17-23

(2) D. FOUQUET 1991 Valorisation du matériau "Bois et Dérivés" dans la construction en Guyane, Bois et Forêts des Tropiques, n°227, 63-67

(3) P. DE REFFYE, C. EDELIN, M. JAEGER, C. CABART 1986 Simulation de l'architecture des arbres. 1er Colloque international L'Arbre, Naturalia Monspelienis, n°hors série 1986, 223-240.

(4) F. HALLE, R.A.A. OLDEMAN, P.B. TOMLINSON 1978 Tropical trees and forests : an architectural analysis. Springer Verlag, Berlin.

(5) M. FOURNIER, B. CHANSON, D. GUITARD, B. THIBAUT 1991 Mécanique de l'arbre sur pied, modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents, évolutifs. Annales des Sciences Forestières, vol. 48, 513-548.

(6) B. THIBAUT 1988 Le processus de coupe du bois par déroulage. Thèse d'Etat, Montpellier.

(7) B. THIBAUT éditeur Actes des trois premiers séminaires du Programme "Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre", Montpellier 1989, 1990, 1991.

(8) J.C. COUE, D. GUITARD, H. BAILLERES 1990 Stabilité dimensionnelle des contreplaqués à base de bois d'essences différentes. Compte-rendu de fin d'étude Contrat MRT 88.A.0339.

(9) O. DELAVALT 1991 Anatomie dynamique et forme des arbres : Cartographie du bois de tension dans de jeunes axes aériens d'Eperua Falcata Aubl. Caesalpinaceae et essai d'interprétation. Mémoire de DEA : Ecosystèmes Forestiers Tropicaux, Montpellier.

Energies renouvelables et développement

La disponibilité de services énergétiques adaptés est indispensable au développement, en particulier dans les zones rurales. Les besoins de base à satisfaire sont variés : éclairage domestique et collectif (écoles, bâtiments publics...), télécommunications et audiovisuel, conservation des denrées et des médicaments, pompage pour l'eau potable et l'irrigation...

Bernard Chabot

Chef du Service Techniques Nouvelles, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

Eclairage, télécommunications, audiovisuel, conservation des denrées, pompage de l'eau : pour tous ces services énergétiques, l'électricité est la forme d'énergie la mieux adaptée, voire la seule possible. Mais actuellement plus de deux milliards de personnes dans le monde ne sont pas raccordées aux réseaux électriques et ce nombre risque même d'augmenter sur le long terme, car la croissance démographique des zones concernées compensera largement l'exode rural et les extensions de réseaux se feront à une vitesse insuffisante.

Or des solutions de production locale, propre et décentralisée d'énergie existent : elles sont basées sur l'exploitation des sources d'énergies renouvelables : eau, soleil, vent, biomasse.

Certaines de ces énergies renouvelables, comme la petite hydroélectricité, ont déjà dépassé le stade de la Recherche et du Développement et contribuent à hauteur de plusieurs Gigawatts par an à l'extension de l'électrification rurale décentralisée des pays en développement. D'autres, comme l'énergie éolienne ou les groupes thermiques utilisant des sous-produits forestiers ou agricoles, sont déjà utilisées pour alimenter des réseaux électriques locaux ou interconnectés.

Enfin, l'électricité photovoltaïque a déjà prouvé qu'elle peut être une solution de choix pour amener les services énergétiques de base dans les zones non électrifiées par les moyens conventionnels, y compris dans celles où la population est très dispersée. Cette bonne adéquation a conduit à renforcer la recherche sur cette filière suivant plusieurs axes :

- Amélioration des performances et réduction des coûts des modules photovoltaïques en explorant les possibilités de plusieurs

filiales : silicium multicristallin, silicium amorphe, couches minces polycristallines. Ainsi, par exemple, les photopiles en silicium multicristallin ont accru leur rendement de conversion énergétique de 9 à 13% ces huit dernières années et leur coût direct de fabrication a été divisé par cinq.

- Conception de systèmes photovoltaïques complets répondant à des besoins précis : éclairage portable, kits domestiques pour l'éclairage et la télévision, générateurs pour maisons autonomes, pompes à eau, réfrigérateurs pour la conservation des vaccins... Les récepteurs associés à ces systèmes intègrent au maximum les progrès possibles en efficacité énergétique, de façon à minimiser les besoins en énergie pour un niveau de confort donné, et ainsi minimiser le coût du service énergétique final.

- Recherches et tests sur la fiabilité des systèmes et de leurs principaux composants, compte tenu de l'environnement auquel ils sont destinés : sites isolés, climats chauds et humides.

- Etude des environnements et des impacts socio-économiques des projets de terrain, en vue de favoriser l'adaptation de cette technologie par les acteurs locaux. Par exemple, pour un programme de pompes solaires cela consistera à :

- choisir des villages en fonction de leur capacité à gérer une telle innovation par le biais d'un "comité de gestion de l'eau",
- informer la population sur les mesures à prendre pour valoriser au mieux l'eau pompée (besoins humains, des troupeaux, du petit maraîchage), de façon à aboutir à la création de revenus financiers,
- faciliter la prise en charge locale de financements et de prestations de services pour l'installation et l'entretien courant,
- évaluer les impacts socio-économiques, démographiques et sanitaires et valoriser les

résultats pour lancer d'autres programmes. La même philosophie s'applique aux programmes d'électrification rurale pour lesquels l'expérimentation s'est déjà faite à plus grande échelle : ainsi plus de 4 000 maisons photovoltaïques autonomes ont été réalisées dans les Départements et Territoires d'Outre-Mer. Là aussi l'attention à porter aux aspects socio-économiques pour la prise en charge effective de la technologie par les habitants est primordiale. L'expérience technique, économique et sociologique acquise par les partenaires de ces projets pourra facilement être utilisée pour des programmes encore plus ambitieux d'électrification rurale décentralisée, basés sur ces systèmes associant les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique au service du développement et de l'environnement local et planétaire.

(1) "Du neuf sous le soleil" Systèmes Solaires N° 64/65, Paris 1991.

(2) "Mobiliser les énergies renouvelables : Combien ? Comment ? A quel coût ? Avec quel impact ?" B. DEVIN et B. DESSUS, Revue de l'Énergie, N° 435, Novembre-Décembre 1991 Paris.

(3) "Le pompage solaire photovoltaïque : treize années d'expérience et de savoir faire au Mali" J. BILLEREY, Edition AFME, Paris 1991.

(4) "La demande d'électricité rurale : l'électrification hors réseau" Groupe Energie Développement AFME/CIREDE/CEP, N° 3, septembre 1991 Paris.

(5) "Énergies Renouvelables et production décentralisée d'électricité" B. CHABOT, actes du colloque "La production décentralisée d'électricité", Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du territoire, Paris 1991.

(6) "L'utilisation de l'électricité photovoltaïque pour l'électrification rurale : bilan et perspectives" B. CHABOT, actes du séminaire "Problèmes et perspectives de de l'électricité dans le bassin Méditerranéen", RABAT 1989, Observatoire Méditerranéen de l'Énergie, Sophia-Antipolis, 1991.

(7) "Les atouts de la petite hydroélectricité dans la lutte contre le réchauffement climatique". B. CHABOT, actes du congrès HYDROENERGIA de l'ESHA, Nice, 1991.

(8) "The Renewable Energy Sources/Rational Use of Energy Synergy : an efficient, cost effective and desirable solution for resolution of long term Energy/Environment problems" B. CHABOT, IEA International Conference on Technology Responses to Global Environmental Challenges, KYOTO 1991.

(9) "Rural Electrification Guidebook for Asia and Pacific Region" United Nations, ESCAP, Bangkok 1992.

Transport urbain, développement et environnement : la nécessaire recherche des formes de transport adaptées.

Si la voiture particulière est le mode dominant de transport dans les villes des pays industrialisés, la mobilité repose dans les autres cas sur des transports collectifs aux formes variées, dont l'offre est insuffisante par rapport à une demande en extension constante, souvent qualifiée de "pléthorique".

Xavier Godard

Directeur de Recherche INRETS
Directeur Scientifique CODATU

Tenant compte des limites du "modèle automobile", notamment sur le plan des ressources et de l'environnement, les recherches de l'INRETS se sont orientées vers l'analyse précise des formes de transport collectif existantes, de leurs défauts et de leurs potentialités dans les villes en développement, de manière à éclairer les politiques des prochaines années.

Des recherches en réseaux

Les programmes de recherche ont été menés sous l'impulsion de l'INRETS en réseaux d'équipes de recherche, au niveau français (LET, CRET, UPVM), mais surtout au niveau international où se sont notamment développés le réseau REDES (transport et services urbains) couvrant l'Amérique Latine et le réseau SITRASS (tous transports) couvrant l'Afrique sub-saharienne. Ces travaux ont été amplifiés et valorisés à travers les conférences CODATU (Jakarta, 1988 ; Sao Paulo, 1990 ; Tunis, 1993) dont l'organisation fait appel à un ensemble de personnalités scientifiques internationales du domaine.

Tableau Motorisation et partage modal

	Motorisation Voitures pour 1000 hab.	% Déplacements Voitures part.
Abidjan	29	45
Dakar	22	43
Jakarta	44	15
Karachi	18	10
Lagos	15	15
Mexico	142	22
Nairobi	50	34
Santiago	106	25
Sao Paulo	145	23
Chicago	194	79
Londres	318	53
Paris	304	56
Tokyo	311	32

Données 1985
Source Banque Mondiale

Les entreprises de service public

Le modèle de l'entreprise assurant un service public, moyennant un monopole d'exploitation et le plus souvent une subvention, a été appliqué sur tous les continents avec des difficultés telles qu'il a fallu y renoncer ou l'adapter.

Offre trop rigide, insuffisance des parcs d'autobus, subventions payées avec retard, interférence de la tutelle politique ont conduit la plupart de ces entreprises à un échec qui explique le développement du transport artisanal autant qu'il est expliqué par celui-ci.

Les minibus et taxis collectifs : entre l'artisanat et le transport informel.

Aux côtés des entreprises, fonctionnent dans la plupart des villes en développement des transports parfois qualifiés d'informels par défaut de connaissance mais qui apportent une contribution essentielle pouvant combiner, selon les cas, souplesse et auto-organisation, mais aussi faible productivité et insécurité. Leur reconnaissance, matérialisée à travers des mesures sélectives d'organisation, est un résultat des recherches qui s'intègrent peu à peu dans les politiques.

Une technologie parfois appropriée mais coûteuse : le métro

De nombreuses grandes métropoles se sont dotées de ligne(s) de métro, dont le coût d'investissement est considérable, sans mesure avec celui des autobus, mais dont la capacité de transport est bien sûr à une autre échelle.

Ce type de technologie, qui paraît sans doute utile pour les agglomérations multi-millionnaires si l'on évite quelques écueils dans leur réalisation, suppose une coopération particulière avec les pays développés qui en apportent le financement.

Les transports non motorisés : interrogations sur la bicyclette

La bicyclette est un mode de transport aux nombreuses vertus (faible coût d'usage, respect de l'environnement). Si plusieurs pays asiatiques, et non des moindres (Chine, Inde...) ont une forte tradition de son usage, il n'en est pas de même sur les autres continents où ce mode de transport est très peu utilisé, et parfois supplanté par les deux roues motorisés dans le cas africain.

Une recherche nécessaire : l'articulation transport-urbanisation

A travers la recherche de l'équilibre entre ces modes de transport, on s'interroge sur la durabilité des structures urbaines et des systèmes de transport correspondants, en intégrant l'énergie, l'environnement, ainsi que les facteurs financiers et sociaux.

(1) CODATU "Actes de la Conférence Codatu V de Sao Paulo" Septembre 1990.

(2) X. GODARD "Transports privés, transports publics. Expériences de villes du Tiers Monde" Rapport INRETS, 1987.

(3) X. GODARD (ss dir.) "Politiques de transport urbain en Afrique Sub-Saharienne. Synthèse de six études de cas" Collection TTD, CODATU-INRETS, Septembre 1991.

(4) O. FIGUEROA "Organisation et fonctionnement des transports collectifs à Santiago du Chili. Bilan de dix ans de déréglementation". Collection TTD, CODATU-INRETS, Juillet 1991.

(5) R. PRUD'HOMME (ss dir.) "Nouvelles perceptions et nouvelles politiques. Transport urbain dans les pays en développement" Conférence Codatu IV de Jakarta Paradigme, 1990.

(6) E. HENRY, O. FIGUEROA "Les enjeux des transports dans les villes latino-américaines", Rapport INRETS, 1987.

(7) Dossier "Transports en commun urbains dans les pays en développement" Revue RTS N° 31, INRETS, Septembre 1991.

L'habitat bioclimatique

Les nombreux organismes qui ont travaillé en France dans le domaine de l'environnement et du développement durable dans les PED ont œuvré très largement pour développer des outils, méthodologies, systèmes de construction à transmettre en tant que savoir-faire. Le CSTB et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie entreprennent parallèlement des programmes de recherche pour adapter aux conditions climatiques parfois extrêmes, les composants du bâtiment.

Eric Durand

Architecte, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - Centre de Sophia-Antipolis, 500, route des Lucioles 06565 VALBONNE Cedex

Jacques Gandemer

Chef du département Aérodynamique et environnement climatique - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 11, rue Henri Picherit 44300 NANTES

Le monde du bâtiment, et plus particulièrement celui de la construction de l'habitat individuel traditionnel, est très éparpillé tant en ce qui concerne les acteurs (professionnels d'une part - maîtrise d'ouvrage, conception, chantier - et autoconstruction d'autre part) que les moyens (méthodes, matériaux, composants...).

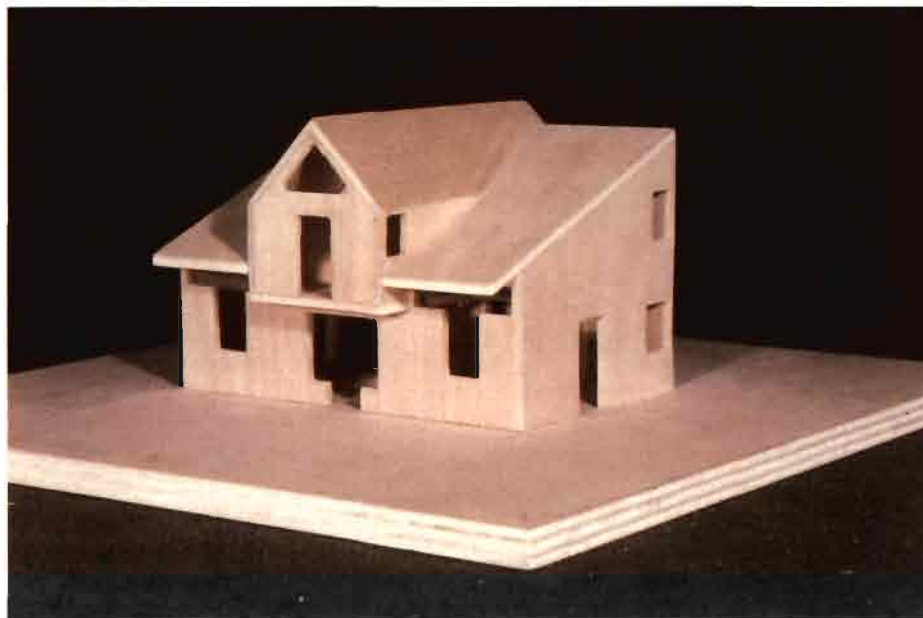
Face à cette multiplicité d'intervenants et de modes de construction, qui se conjugue avec une grande diversité en termes de financements, de gestion, de besoins pour les familles et de conditions climatiques et géographiques, nous avons conclu qu'il fallait en priorité produire des "éléments structurants et pédagogiques" que peuvent être les outils de conception.

Tout d'abord à travers quelques actions ponctuelles, puis dans le cadre du programme REXCOOP (Recherche et expérimentations en coopération), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, le C.S.T.B. et d'autres partenaires publics ou privés ont effectué des recherches et vécu sur le terrain des expériences ayant pour finalité la production d'un savoir-faire à transmettre le plus directement possible aux acteurs locaux.

En régions tropicales, le pouvoir d'achat des populations est trop faible pour permettre l'emploi d'une climatisation par machine frigorifique. Les constructions, le plus souvent récentes, ont très mal résolu

le problème du confort thermique intérieur. Il est cependant possible par une approche scientifique de concevoir un habitat moderne où le confort soit meilleur que celui régnant dans la plupart des habitations existantes en utilisant rationnellement les moyens de climatisation naturelle sans dépense d'énergie : réduction des apports de chaleur (par protection solaire et isolation) et refroidissement par ventilation.

parois opaques ont fait l'objet de plusieurs études menées par le Service GEC et actuellement le CSTB dispose d'un outil informatique de type tableur qui fournit une approche théorique globale afin de pouvoir compenser une faiblesse relative d'une paroi par une amélioration sur une autre. En ce qui concerne le refroidissement par ventilation, l'utilisation du vent, ou plus exactement de courants traversants dans l'habitat à des fins de renouvellement d'air et de confort thermique, était connue depuis fort longtemps sous un climat tropical humide, mais la concrétisation de ce principe restait dans la majorité des cas subjective et largement empirique. Une recherche a donc été menée par le Service AEC du CSTB Nantes, afin de définir avec précision les modalités "aérodynamiques" de réalisation d'une ventilation efficace convenant aux besoins de la climatisation naturelle (débit d'air, vitesse d'air dans les zones d'occupation, homogénéité des flux d'irrigation, etc...).



Exemple architectural d'un habitat développant la ventilation naturelle CSTB - Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide

Climatisation naturelle des habitations sous climat tropical humide

Depuis 1982, le CSTB Nantes (Service AEC Aérodynamique et Environnement Climatique) et le CSTB Champs-sur-Marne (Service GEC Génie Energétique et Climatique) coopèrent sur le thème de la conception d'un habitat à climatisation naturelle efficace sous climat tropical humide. La conception thermique, l'isolation et la protection solaire des baies vitrées et des

Ainsi ont tour à tour été étudiés :

- l'existence du phénomène vent,
- la présence d'effets topographiques,
- la nature de l'environnement proche,
- l'aérodynamique propre du bâtiment (forme, dimensions, répartition des ouvertures, niveau de perméabilité des façades, etc...),
- l'orientation du bâtiment par rapport au vent dominant,
- et la manière dont les écoulements inter-

nes peuvent librement se développer (cloisons, ouvertures et perméabilités)
Pour des raisons de contrôle de ces paramètres et compte tenu du nombre important des cas à traiter pour obtenir une vision générale des phénomènes, l'approche expérimentale a été réalisée en soufflerie atmosphérique (avec reproduction des caractéristiques du vent naturel) sur des maquettes (échelle 1/50) de maisons tropicales économiques.

Dans ce cadre, les paramètres architecturaux suivants ont vu leur efficacité quantifiée en termes d'écoulements d'irrigation intérieure de l'habitat :

- forme et pente du toit,
- combles ventilés,
- perméabilité des façades (taux et distribution),
- écopage de toiture (crosse de ventilation au vent et sous le vent),
- pilotis,
- manche à air intérieure,
- implantation de pare-soleil,
- introduction de claustra,
- mise en place de cloisons.

Cette démarche a été complétée par l'étude sur maquette de l'influence d'un effet de pente (10 et 20 %), de divers dessins de plans masse et d'un effet de masque végétal.

Parallèlement, et afin de valider la méthode de simulation et de mieux appréhender la fidélité de l'approche à échelle réduite en soufflerie, diverses actions de confrontation sur le terrain ont été menées : expérimentation spécifique, sur site et en soufflerie, de cellules d'habitation (case type en Guadeloupe) ou à partir de réalisations particulières (concours sur l'habitat individuel à la Martinique)

Ces confrontations ont permis de conclure à l'intérêt considérable que présente l'approche en soufflerie atmosphérique et à la qualité des informations recueillies.

De façon à donner à ce travail considérable un caractère moins théorique et dans le but de vulgariser un certain nombre de concepts aérodynamiques efficaces développant une forte ventilation, une concrétisation pratique de ces résultats a été réalisée à travers un certain nombre d'exemples de solutions architecturales pour la maison individuelle.

Toutes ces créations architecturales ont été testées en soufflerie sous l'angle de leurs performances en ventilation naturelle et une synthèse a été proposée. En outre, et

compte tenu des données météorologiques propres à la Martinique et à la Guadeloupe, les résultats ont pu être présentés en termes de fréquence annuelle de bonne ventilation correspondant à l'apparition d'un écoulement interne de 1 m/s .

La synthèse opérationnelle de l'ensemble de ces travaux vient d'être concrétisée par un guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide édité par le CSTB (à paraître)

Conception aérodynamique de l'habitat cyclonique

La tenue au vent des habitations soumises aux vents violents tels que les vents cycloniques pose le problème majeur de la sécurité propre du bâtiment, de sa destruction éventuelle et des coûts associés. Ces problèmes sont rendus encore plus sensibles pour des constructions légères et à forte perméabilité (développement de la ventilation naturelle).

De plus, les récents événements cycloniques (Flinga à La Réunion et Hugo à la Guadeloupe) ont montré l'ampleur des dégâts que pouvaient engendrer ces catastrophes naturelles et ont conduit le CSTB à engager dès 1989 un programme de recherche sur la conception aérodynamique de l'habitat en milieu cyclonique.

L'objectif de la recherche est de définir des concepts aérodynamiques et structurels limitant les risques de dommages des constructions soumises au vent très violent. La quantification des charges globales et des actions locales exercées par le vent sur les habitations de type traditionnel a été menée en soufflerie atmosphérique sur maquette à l'échelle du 1/50.

Un certain nombre de concepts réducteurs de charges a pu être dégagé. Equilibrage des pressions au niveau des acrotères (fentes), déflecteurs de guidage en zone d'écoulement décollé, cheminée à dépression (contrôle de la pression interne dont l'efficacité est remarquable puisque réduisant les sollicitations d'arrachement de plus de 50 %), géométrie et pente de toit à moindre sollicitation, éléments démontables ou "éjectables" sous forte sollicitation (débord de toiture, loggia, etc...).

Une stratégie de sauvegarde est aussi en cours d'analyse. A terme, c'est une véritable architecture cyclonique qui est visée.

Le logiciel CASAMO CLIM :

Réalisé par l'Ecole des Mines de Paris pour le compte de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, cet outil logiciel a pour vocation d'aider le concepteur, en fonction des données du climat local (ensoleillement, hygrométrie) à visualiser et dimensionner les différents éléments de l'enveloppe de son projet.

CASAMO CLIM a pour fonction principale l'évaluation des conditions de confort. Un travail sur l'enveloppe (forme, orientation, matériaux...) permet à l'architecte de trouver une solution pour assurer les meilleures conditions d'ambiance en saison chaude sans faire appel à une climatisation coûteuse.

CASAMO CLIM a été largement diffusé en France dans les départements et territoires d'Outre-Mer (ainsi que de nombreux guides et brochures "construire avec le climat") et fait actuellement l'objet dans le cadre du programme PULPE (Programme d'Utilisation de Logiciels Professionnels pour l'Enseignement.) d'un concours international destiné à récompenser les meilleurs cas d'étude.

(1) HUET O./ CELAIRE R. GRET / REXCOOP / MINCOOP Bioclimatisme en zone tropicale - Construire avec le climat (Dossier technologies et développement) 1986 172P (SCH.) Paris Doc Française SOP 2.2/GRE NOR.DOC-002725

(2) GANDEMER J./BARNAUD G.CSTB Nantes - Exemples de solutions architecturales développant la ventilation naturelle aux Antilles 1985 07 71P (Plans+ annexes + Bibl.) RAPP-001187

(3) ABDESSELAM M.ARMINES / CNRS - Climat tropical humide - Conception thermique du bâtiment (Techniques pour maîtriser l'énergie) 1988 Ouvrage CPB 1.2/AFM NOR.DOC - 000411

(4) ABDESSELAM M. AIRAB Guide d'aide à la conception climatique du bâtiment aux Antilles 1989 09 66 P (FIG.) Littérature grise CPB1 2 1/ABD NOR.DOC-000820 SOP2.2/TAN NOR : DOC -002289

(5) Conception thermique des bâtiments / T1 En Guyane / T2 En Guadeloupe / T3 A La Réunion CSTB / EDF 1982 36P +36P + 52P, Paris

(6) G. BARNAUD, I.-V. BERLIANU Mission du CSTB en Guadeloupe après le passage du cyclone Hugo CSTB Nantes, EN-ECA 89.13 L

Le traitement anaérobie des eaux résiduaires au Mexique

Les procédés anaérobies de traitement des eaux résiduaires présentent les meilleurs avantages pour permettre de résoudre de nombreux problèmes dans un contexte socio-économique difficile.

Jean-Pierre Guyot

Chargé de recherche ORSTOM, Département de biotechnologie UAM-I - Mexico

Oscar Monroy

Professeur titulaire UAM-I - Mexico

Adalberto Noyola

Chercheur titulaire UNAM-II, Mexico

Jean-Louis Garcia

Directeur de recherche ORSTOM, responsable UR 3B, Université de Provence, 13331 Marseille cedex 3

Depuis 1986, l'ORSTOM a installé au Mexique un programme de recherche-développement sur le traitement anaérobie des eaux résiduaires en étroite partenariat avec les chercheurs de l'Université Autonome Métropolitaine-Unité Iztapalapa (UAM-I) et de l'Institut d'Ingénierie de l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM-II). La problématique de ce pays se prêtait de manière idéale à une telle action, le cas des eaux usées urbaines étant particulièrement significatif : 12% du volume évacué reçoit un traitement. Sur les 256 usines d'épuration en service pour 650 villes de plus de 10 000 habitants, seules 5% des installations du parc atteignent des rendements d'épuration supérieurs à 80%, et 65% ne fonctionnent pas (statistiques mexicaines de 1989).

Néanmoins, ces problèmes ne sont pas propres au Mexique et peuvent s'étendre à tous les pays de la région. Ainsi l'action conjointe ORSTOM/UAM-I/UNAM-II peut être considérée non seulement comme un exemple au niveau mexicain, mais également au niveau régional. La technologie de traitement des eaux résiduaires par procédés anaérobies présente les meilleurs avantages pour permettre de résoudre de nombreux problèmes dans un contexte socio-économique difficile.

Sur ces bases ont ainsi été définies les grandes lignes d'action du programme conjoint ORSTOM-UAM-I/UNAM-II :

- Création et développement d'un laboratoire de recherche sur l'écophysologie de la digestion anaérobie (démarrage des réacteurs, production d'inoculum, etc.), la dégradation des effluents récalcitrants (composés xénobiotiques), l'ingénierie des procédés anaérobies de seconde génération (UASB, filtre anaérobie, réacteurs hybrides)

et le post-traitement des effluents traités.

- Promotion des procédés de traitement biologique anaérobie au travers de conférences auprès d'industriels et du monde universitaire, d'articles de vulgarisation grand public ou dans des revues spécialisées de différents secteurs industriels.

- Contrats de transfert de technologie entre le groupe de recherche franco-mexicain et les industriels.

- Participation à des enseignements de troisième cycle et à la formation par la recherche d'ingénieurs et de chercheurs dans les deux universités.

Après six ans de fonctionnement de ce programme, soutenu par les institutions participantes mais aussi fortement par la CEE et l'OEA, de nombreux résultats ont été obtenus : publications dans des revues internationales, articles de vulgarisation, brevets, organisation d'un colloque régional (10 pays représentés, 300 participants), conseils et missions d'expertises auprès d'entreprises, nombreux cours et conférences au Mexique et dans d'autres pays de la région (Guatemala, Colombie, Brésil), formation d'ingénieurs et de chercheurs, réalisation de réacteurs pilotes et industriels.

Une collaboration permanente existe entre le groupe franco-mexicain et le laboratoire ORSTOM de microbiologie des anaérobies installé à l'Université de Provence à Marseille. De manière plus ponctuelle, une collaboration informelle existe avec les centres INRA de Lille (G. Albagnac) et de Narbonne (R. Moletta) qui peut prendre la forme de conférences par des spécialistes venus de France, et d'accueil en France d'étudiants mexicains.



Réacteur UASB pilote de 50m³ UAM1 pour le traitement des eaux usées urbaines Mexico - photo JP. Guyot

Actuellement, notre groupe est régulièrement sollicité par des étudiants d'écoles d'ingénieurs françaises qui souhaitent effectuer des stages de longue durée à Mexico. Une collaboration importante se met également en place avec l'Institut Mexicain du Pétrole (IMP).

Parmi les réalisations les plus remarquables de notre groupe, nous pouvons citer la construction récente (fin 1991) de deux digesteurs industriels UASB de 2 400 m³ et 530 m³ pour traiter respectivement les eaux résiduaires d'une malterie et d'une usine de fabrication de panneaux d'agglomérés.

Par ailleurs et par l'intermédiaire de sociétés mexicaines de traitement des eaux, avec qui notre groupe a passé des contrats de transfert de technologie, trois projets d'ingénierie ont été vendus à des industriels pour la réalisation des installations suivantes: un réacteur UASB de 5 300 m³ pour traiter des effluents de brasserie, un réacteur hybride de 150 m³ pour les effluents d'une usine de production de concentrés pour boissons gazeuses et un réacteur UASB de 120 m³ pour les effluents d'une usine de production de farine protéique à partir de déchets d'abattoirs.

Pour 1992, nous venons d'obtenir un contrat pour la conception et la construction de deux digesteurs UASB pour les hôpitaux publics mexicains.

Actuellement, sont en cours d'opération quatre réacteurs pilotes : un réacteur UASB de 50 m³ financé par la CEE pour étudier le traitement anaérobie d'eaux usées urbaines, deux réacteurs UASB de 40 m³ et 10 m³ pour une étude de traitement des eaux résiduaires de deux usines concurrentes produisant de la levure de boulangerie sur milieu de culture à base de mélasse de canne à sucre (financement industriel), et un réacteur UASB de 5 m³ pour le traitement de vinasses, résidus de la distillation de la mélasse de canne à sucre (financement industriel). A l'heure actuelle, ces réalisations sont en voie d'évaluation et il n'est pas encore possible de fournir des résultats d'opération. Cependant le tableau suivant permet d'apprécier, à partir d'expériences pré-pilotes réalisées par notre groupe, les performances d'épuration (E%) que nous pouvons espérer de nos installations pilotes en cours.

Les effluents de distillerie et de levurerie sont particulièrement difficiles à traiter en raison de la nature du substrat de base utilisé dans ces industries sous ces latitudes pour le milieu de culture (mélasse de canne à sucre). Les raisons de cette récalcitrance sont liées à différents aspects : ces résidus

Effluent	Volume réacteur (litres)	Charge volumétrique Kg DCO/m ³ réacteur.jh	TRH	E%	Température °C
Levurerie	100	6	48	60	33
	100	10	48	60	33
Urbain	100	0,93	12	65	ambiante
Distillerie	120	36	72	55	35

sont épuisés en substances facilement biodégradables à cause des procédés intensifs de fermentation utilisés pour la production de levures ou d'alcool, la présence de polyphénols récalcitrants à la biodégradation qui donnent à ces résidus une teinte noirâtre caractéristique, de fortes concentrations en sels minéraux (sulfates, potassium et sodium) ainsi qu'une charge organique très élevée.

La dépollution de ces effluents pose un véritable problème technico-scientifique et pour répondre aux normes en vigueur, un post-traitement s'impose le plus souvent. Malheureusement, son coût peut être prohibitif en raison principalement de la présence de la teinte excessivement foncée de ce type d'effluent, qui s'obscurcit généralement après le traitement anaérobie (présence de sulfures), et du caractère récalcitrant de la matière organique résiduelle. Les perspectives de développement des procédés biologiques de traitement anaérobie

en Amérique latine sont énormes et le marché ne cesse d'évoluer de manière croissante. Le Brésil se situe parmi les leaders avec plus de cent réacteurs installés, mais la Colombie, le Vénézuéla et le Mexique sont en voie de développer très rapidement ces procédés.

Les industries de choix pour l'application du traitement anaérobie sont traditionnellement celles du secteur agro-alimentaire, mais une ouverture importante en direction des secteurs de la chimie et de la pétrochimie est à prévoir dans un futur proche en raison de l'évolution des recherches et des potentialités de certains effluents.

Notre groupe franco-mexicain travaille activement dans ce sens car le secteur pétrochimie est très important au Mexique. Actuellement, une école se dessine pour l'application des procédés anaérobies aux effluents très dilués tels que les eaux usées domestiques. Il existe déjà au Brésil et en Colombie des installations en grandeur réelle et de nombreuses opérations pilotes, notamment en

Hollande, Colombie et Mexique, tendent à démontrer l'applicabilité de cette technologie à ce type particulier d'effluent.

Glossaire

EOA : Organisation des Etats Américains

Mélasses : Résidu de canne à sucre après extraction du sucre

TRH : Temps de Rétention Hydraulique dans le réacteur de l'effluent liquide à traiter

UASB : Réacteur anaérobie à flux ascendant et à lit de boues

- (1) GARCIA J.L. 1990 Taxonomy and ecology of methanogens FEMS Microbiology Review 87, 297-308.
- (2) GUYOT J.P., MACARIE H., NOYOLA A. 1990 Anaerobic digestion of a petrochemical wastewater using the UASB process. Applied Biochemical Biotechnology 24/25, 579-589.
- (3) GUYOT J.P., MONROY O., NOYOLA A. 1991 Le traitement des eaux résiduaires au Mexique. ORSTOM Actualités 31, 6-8.
- (4) GUYOT J.P., NOYOLA A. 1991 L'Amérique Latine en anaérobiose. Biofutur 101, 44-50.
- (5) MACARIE H., NOYOLA A., GUYOT J.P. 1991 Anaerobic treatment of a petrochemical wastewater from a terephthalic acid plant. Water Science and Technology (sous presse).
- (6) MONROY O., NOYOLA A., RAMIREZ F., GUYOT J.P. 1988 Anaerobic digestion and water hyacinth as a highly efficient treatment process for developing countries. 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Italy, Tilche A., Rozzi A. (eds). Monduzzi Editore, pp.747-751.
- (7) NOYOLA A. 1990 Tratamiento anaerobio de aguas residuales : una experiencia de adaptación de tecnología en México. 1ere Conférence Régionale sur le traitement anaérobie des eaux résiduaires en Amérique Latine, Mexico, pp.337-357.
- (8) NOYOLA A., MACARIE H., GUYOT J.P. 1990 Treatment of terephthalic acid plant wastewater with an anaerobic fixed film reactor. Environmental Technology 11, 239-248.

La modernisation de la gestion des entreprises en Afrique : une forme d'innovation

Les programmes de restructuration industrielle, mis en oeuvre en Afrique depuis le début des années 1980, butent sur des difficultés persistantes. Les recommandations de gestion, maintes fois rappelées, restent inappliquées. Les tentatives de modernisation échouent face au manque de motivation du personnel et à la résistance des mentalités.

Alain Henry

Chargé d'études à la Caisse Centrale de Coopération Economique et chercheur associé à l'équipe "Gestion et Société" du CNRS dirigée par Ph. d'Iribarne

L'essor des entreprises privées et publiques en Afrique nécessite qu'un effort soit fait pour améliorer leur gestion et leur organisation.

En réalité, les outils de gestion "internationaux" qui sont proposés, parce qu'ils sont

forgés dans d'autres cultures, ne suffisent pas à résoudre les difficultés propres au contexte local. L'efficacité de ces systèmes d'organisation repose largement sur la présence directe d'une assistance technique. Les fonctions de contrôle restent bien souvent confiées à des Européens parce que les Africains se considèrent entre eux comme a priori soumis à la subjectivité des relations personnelles, ce qui tend à délégitimer leurs décisions.

Les échecs tiennent plus à une inadaptation des méthodes employées qu'à une quelconque incapacité des cultures africaines. Certains préceptes, prônés par les spécialistes, sont inapplicables parce que les prin-

cipes qui les inspirent supposeraient que les intéressés prennent des positions ressenties localement comme intenable. S'il y a effectivement lieu de moderniser les comportements, il convient de le faire en veillant à préserver leur compatibilité avec ce que, localement, la morale réprouve ou même en s'appuyant sur les devoirs qu'elle édicte. Dans cette perspective, une meilleure connaissance des systèmes de valeurs concernés peut éviter bien des malentendus.

Les difficultés d'un management interculturel ne sont pas réservées aux seules entreprises africaines ; partout, elles constituent une contrainte de gestion. L'observation d'unités de production techniquement identiques situées dans des pays différents, fait apparaître des manières de commander, de contrôler, de résister à l'autorité, d'entrer en conflit et de construire des compromis, irréductibles à une stricte "rationalité" universelle, et où se manifeste la force des traditions propres à chaque société nationale (Cf Ph. d'Iribarne, "La logique de l'honneur ; gestion des entreprises et traditions nationales", 1989, Le Seuil).

Ainsi, le poste d'agent de maîtrise recouvre des réalités fort différentes selon que l'on se place aux Etats-Unis, en France ou même au Japon. De même, des employés américains n'auront pas la même perception de leurs responsabilités que leurs collègues français. Les premiers tendent à s'appuyer sur une logique très dure, où toute action doit être contractuellement détaillée à l'avance. Pour les difficultés que cette logique ne suffit pas à résoudre, ils y juxtapsent un appel fréquent aux bons sentiments, à l'honnêteté. A l'inverse, les seconds considèrent plus volontiers qu'ils ne sont pas vraiment tenus de respecter ce qui a été fixé par écrit, ne serait-ce que parce qu'ils savent que le travail bien fait doit aussi répondre à des exigences qui ne sont pas mesurables à l'avance. Cependant, la fierté, presque esthétique, qu'ils attachent à leur travail leur impose spontanément des devoirs. Ils se sentent d'autant plus obligés d'agir que leur volonté d'indépendance dans leur travail apparaît préservée.

Adapter les outils de gestion à l'environnement culturel

Il semble possible d'améliorer sensiblement la gestion des entreprises africaines en appliquant des méthodes d'organisation qui, tout en répondant aux impératifs d'une

gestion industrielle moderne, soient d'une conception parfois étrangère à la mentalité occidentale. Bien entendu, il ne s'agit pas de remettre en cause ce qu'il y a d'universel dans les règles professionnelles en vigueur (normes de comptabilité ou d'exploitation des process, etc.), mais d'adapter l'organisation aux préoccupations spécifiques de ceux qui doivent appliquer ces règles techniques. Sur le plan pratique, le transfert des méthodes suppose des aménagements sur le contenu des outils de gestion ou sur le rôle qui leur prêté dans l'organisation.

A titre d'exemple, nous avons pu vérifier dans plusieurs entreprises africaines l'efficacité de l'utilisation de manuels de procédures descriptifs, précis et détaillés. Alors qu'ils sont actuellement insuffisants voire inexistant, ces documents semblent devoir occuper une place centrale dans leur système d'organisation. Un tel dispositif se justifie parce qu'il répond ici à des exigences collectives. Il semble ainsi très difficile de déroger à des instructions qui sont suffisamment détaillées pour être à la portée de tous, de peur d'être jugé comme faisant preuve de "malveillance" (attitude fortement réprouvée sur le plan social). Lorsque ces manuels existent, ils sont fréquemment consultés à tous les échelons de l'entreprise. Ils favorisent l'examen objectif des problèmes professionnels à résoudre.

L'importance de ces manuels pour les entreprises africaines peut être en partie comparée à celle qu'ils ont dans les entreprises américaines qui sont régies par un large édifice de textes. En Afrique, leur rôle a certainement été trop minimisé, notamment par influence des modes d'organisation français. Pourtant, des règles détaillées n'y sont guère ressenties comme une atteinte aux compétences individuelles, ni comme une ingérence dans le domaine d'initiative propre à chacun (préoccupations particulièrement françaises).

Mettre en place la fonction d'audit

Le caractère infranchissable de telles règles doit être conforté par l'existence d'une fonction d'audit interne rigoureuse. Compte tenu de l'importance accordée aux procédures, la fonction d'audit s'impose plus fréquemment dans les entreprises africaines et notamment dans celles qui sont de taille plus réduite. Enfin, le rôle de l'audit semble devoir dépasser le domaine administratif et

comptable pour s'étendre largement aux fonctions techniques de production et d'exploitation. Que l'on examine l'utilisation des procédures ou de l'auditeur interne, il s'agit de mieux garantir l'objectivité des décisions dans l'entreprise, en donnant notamment à chacun les moyens de s'assurer de la "bienveillance" de ses partenaires. Les systèmes de gestion "classiques" laissant ouverte cette question de confiance, l'entreprise risque de devenir le champ clos de procès d'intentions et de stratégies d'évitements stérilisants.

Dans un autre domaine, on sait que les banques souffrent souvent d'un important volume d'impayés. Les clients se sentent peu engagés vis-à-vis d'entreprises aux contours abstraits. En réalité, le recouvrement des créances se trouve facilité dès lors que l'on cherche à tenir compte d'un ensemble de principes cohérents. Ainsi, lorsque pour des raisons largement empruntées au taylorisme, on répartit les fonctions clientèles entre des services indépendants, on rend la tâche du recouvrement plus difficile voire même infaisable. D'une certaine manière, lorsqu'il n'y a pas une dette-à-quelqu'un, il n'y a plus vraiment de dette. Il serait pourtant tout à fait concevable de confier à un seul et même responsable, le service de quelques clients depuis la mise en place de leurs contrats jusqu'au recouvrement. Une connaissance personnelle entre les intéressés conduit les clients à se sentir "naturellement" obligés de régler leurs dettes. Au-delà des pressions personnelles, il est aussi nécessaire de disposer, comme ailleurs, du garde-fou des sanctions réglementaires.

Les moyens importants que les entreprises japonaises ont consacré dans les années 1950 à adapter les méthodes américaines de gestion aux singularités de leur contexte culturel, montrent qu'il s'agit d'un travail se révèle nécessaire et bénéfique. En Afrique, des solutions spécifiques sont parfois déjà employées, mais elles sont souvent inconsciemment occultées. Elles paraissent trop étranges aux yeux des experts, alors qu'elles ne sont pas habillées du prestige des "méthodes scientifiques d'organisation". Au-delà des exemples précédemment mentionnés, de nombreuses pistes d'innovations sociales sont encore à explorer dans l'organisation des entreprises africaines. La prise en compte de l'environnement culturel de l'entreprise sera facteur de développement durable.

Les bases de données

Pour pouvoir être identifiées, toutes les publications doivent être cataloguées. C'est l'objectif des bases de données bibliographiques, qui permettent l'accès aux publications primaires : ouvrages, manuels, articles de périodiques, thèses ou rapports. Certaines bases de données offrent non seulement ces références mais aussi des informations factuelles, des données numériques ou des textes.

Des bases de données propres aux pays en développement, qui regroupent des documents produits en France.

	Responsable	Réseau	Contenu	Vidéotex	Disque compact	Références sur les PED
AGRITROP	CIRAD	Agropolis, SNRA du Sud	agronomie, développement rural		3	60 000
HORIZON	ORSTOM		recherches fondamentales		3	30 000
IBISCUS	IBISCUS	autour de cette base les principaux organismes français de coopération	économie, développement services : postes en coopération répertoires organismes et projet français	3	1	60 000 500
MONDE ARABE	IREMAM	français	monde arabe et musulman		3	1 000 42 000
RITIMO	RITIMO	52 centres doc. d'ONG	production des ONG			10 000

Des bases où l'on peut trouver des références sur les pays en développement. Moins spécialisées, elles détiennent une part importante de références.

	Responsable	Réseau	Contenu	Vidéotex	Disque compact
BIRD	CIE		santé publique, enfance		3
DELPHES	Ch. de Commerce	francophone	économie		
PASCAL	INIST (CNRS)	français	sciences, tech. et médecine	3	3
FRANCIS	INIST (CNRS)	français	sciences hum. et sociales	3	3
EXPORT	CFCE		fichiers factuels : projets, données économiques	3	
URBAMET	Villes en développement	français	urbanisme, environnement		
CNIJ			juridique, texte intégral	projet	
ENERDATA	ENERDATA		données factuelles sur énergie		3

L'Institut de l'information scientifique et technique (INIST)

Seul centre de traitement intégré de l'information en Europe, l'INIST, Institut de l'information scientifique et technique a été créé en 1988 par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) pour collecter les résultats de la recherche afin de les diffuser vers les chercheurs et les industriels du monde entier. L'INIST exploite un fonds multidisciplinaire international de 27 500 titres de périodiques et de plus de 60 000 monographies (thèses scientifiques, comptes rendus de congrès, rapports de recherche). A sa force de production s'ajoute sa force de vente spécifique : INIST Diffusion, filiale du CNRS.

Ainsi, à partir d'une chaîne documentaire totalement intégrée, le système d'information permet la commande automatisée de copies d'article provenant de n'importe quel fonds (papier, fonds numérisé ou fonds de bibliothèques extérieures). Il assure également l'alimentation des bases de données PASCAL et FRANCIS sur des stations de travail en réseau. Elles permettent une indexation contrôlée multilingue des articles analysés et la production de bibliographies sur papier, disquettes, bandes magnétiques, ou le transfert des données sur disques optiques numériques (PASCAL et FRANCIS).

La participation française à des systèmes internationaux d'information.

	Responsable	Contenu
AGRI	FAO	agriculture
ASFA	FAO	pêche et aquaculture
BIEF	BIEF	bibliographies nationales
DIRR	OCDE	routes et transports
ERSAP	ESA	télétection
PANGIS	CIFEG	sciences de la terre.

Le RIO : un réseau international de la recherche dans les pays en développement

Les réseaux de la recherche permettent à des scientifiques travaillant dans des laboratoires éloignés de mener des programmes en commun, d'échanger des outils informatiques et de mettre les moyens de calculs puissants des grands laboratoires à la disposition d'équipes plus démunies.

Pascal Renaud

ORSTOM 213, rue La Fayette 75010 Paris

Monique Michaux

BP 5045 - 2051, av. du Val Monsferrand 34032 Montpellier cedex

Ces réseaux ont connu ces dernières années un tel développement que la plupart des établissements de recherche publics et privés d'Europe occidentale et d'Amérique du Nord y sont maintenant associés. En favorisant l'établissement de relations régulières entre chercheurs de villes, de pays, de continents différents, ils contribuent à renforcer les liens de la communauté scientifique internationale.

Pour les pays en développement, géographiquement éloignés des centres technologiques, les réseaux informatiques offrent un moyen efficace de favoriser le transfert technologique, ils permettent aux communautés scientifiques locales d'établir des liens continus avec des laboratoires de pointe des pays du nord.

La relative fragilité de l'infrastructure de télécommunication de ces pays est un facteur qui contribue à l'isolement des équipes scientifiques, et rend à la fois les réseaux informatiques particulièrement utiles et plus difficiles à mettre en oeuvre.

L'ORSTOM s'est engagé dans la réalisation d'un réseau informatique : le RIO. Relié aux grands réseaux internationaux des universités et de la recherche des pays du nord, il s'étend au sud vers une dizaine de pays dont sept en Afrique sub-saharienne. C'est, dans ce continent, le seul réseau de ce type.

Les réseaux de la recherche sont nés, il y a une vingtaine d'années, du besoin de partager des calculateurs chers et volumineux. Ils se sont radicalement transformés durant la dernière décennie avec l'apparition des minis puis des micro-ordinateurs.

Aujourd'hui, le besoin n'est plus seulement de partager des ressources puissantes mais de relier des ordinateurs personnels, leur permettre de partager des logiciels, des données... des idées. Les réseaux informatiques constituent un nouveau moyen de communication. Ces dernières années, leur audience s'est développée très rapidement.

Sponsorisés au départ, par les grands constructeurs (IBM, DEC...), ils sont maintenant organisés et appuyés par les grands établissements d'enseignement et de recherche. Aux Etats Unis la National Science Foundation, en France l'INRIA et l'Education Nationale ont joué un rôle moteur dans leur développement. Reliés les uns aux autres, ces réseaux dit "académiques" constituent un ensemble de plusieurs milliers de machines desservant plusieurs centaines de milliers d'utilisateurs dans une cinquantaine de pays.

Un instrument de coopération internationale

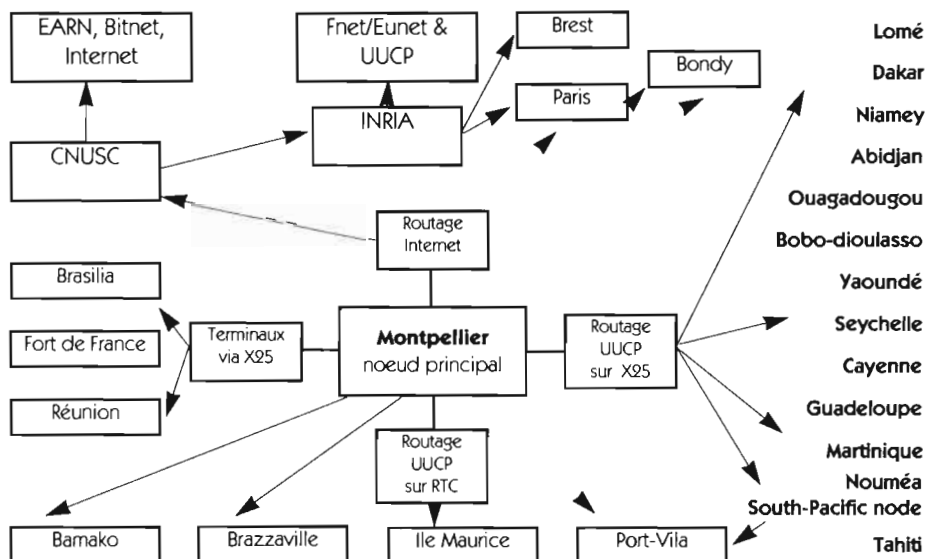
Ce maillage très fin qui à travers les ordinateurs relie des chercheurs et ingénieurs est non seulement un outil de travail précieux, mais aussi un facteur de rapprochement et un instrument de coopération de la communauté scientifique internationale.

En revanche, les pays en développement ne bénéficient que marginalement de cette explosion des réseaux. Cela tient évidemment au faible niveau technologique de ces pays, mais aussi au sentiment partagé par de nombreux responsables que les réseaux informatiques reposent sur une technologie lourde et sont générateurs de dépenses élevées

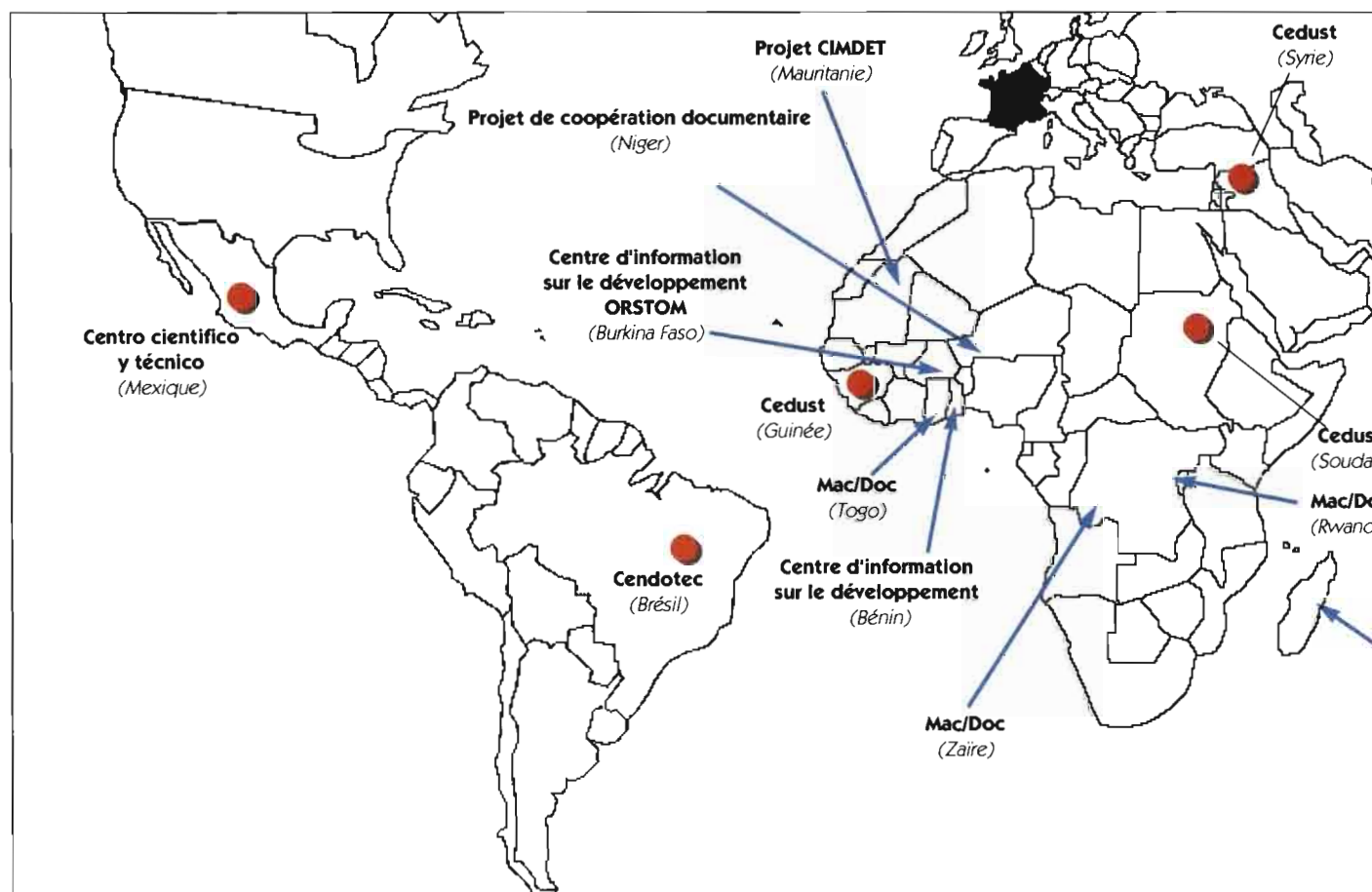
en télécommunication. L'expérience de l'ORSTOM montre qu'au contraire, il est possible de développer un réseau informatique sur une grande échelle géographique avec des moyens modestes, en s'appuyant sur l'infrastructure de télécommunication locale même si elle présente des faiblesses.

Un outil adapté aux pays en développement

Dans les pays du sud, les distances entre universités, entre laboratoires, entre équipes de chercheurs sont plus grandes et plus difficiles à franchir. Les moyens manquent, les infrastructures sont déficientes, les télécommunications sont souvent chères et saturées. Disposer d'un moyen de communication fiable est donc un atout d'autant plus précieux. Les réseaux informatiques permettent à leurs utilisateurs d'échanger des textes (c'est la messagerie électronique), des données (c'est le transfert de fichiers), des programmes informatiques, de débattre d'un sujet d'étude avec des collègues (c'est le forum électronique). Ils utilisent des techniques de contrôle et de compression de données, sont capables de grouper les opérations, d'attendre une période favorable pour transmettre (heures creuses) et de recommencer en cas d'anomalie jusqu'au succès de l'opération. L'augmentation considérable des performances des ordinateurs et leur baisse de coût permet de réaliser des réseaux performants et fiables avec des stations de travail bon marchés qui, en outre, sont exploités pour d'autres applications (statistiques, cartographie, télédétection...)



Les structures relais dans le monde



Centro científico y técnico

Liverpool 67 - 06600 Mexico DF
Mexique
Tél. : (52) 525 01 81 - Télex : 1777658 + SOFTME

Centre d'information sur le développement

01 BP 510 - Ouagadougou
tél. 33 58 71

ORSTOM

c / o Billaud - 01 BP 1759
Ouagadougou 01, Burkina Faso

CEDUST

BP 373 - Conakry, Guinée

Projet CIMDET

MAC BP 203 - Nouakchott, Mauritanie

Projet de coopération documentaire

BP 33 - Niamey, Niger

MAC/Doc

BP 91 - Lomé, Togo

Centre d'information sur le développement

BP 416 - Cotonou, Bénin

MAC/Doc

Kinshasa - c/o valise diplomatique
Zaire

Centro franco brasileiro

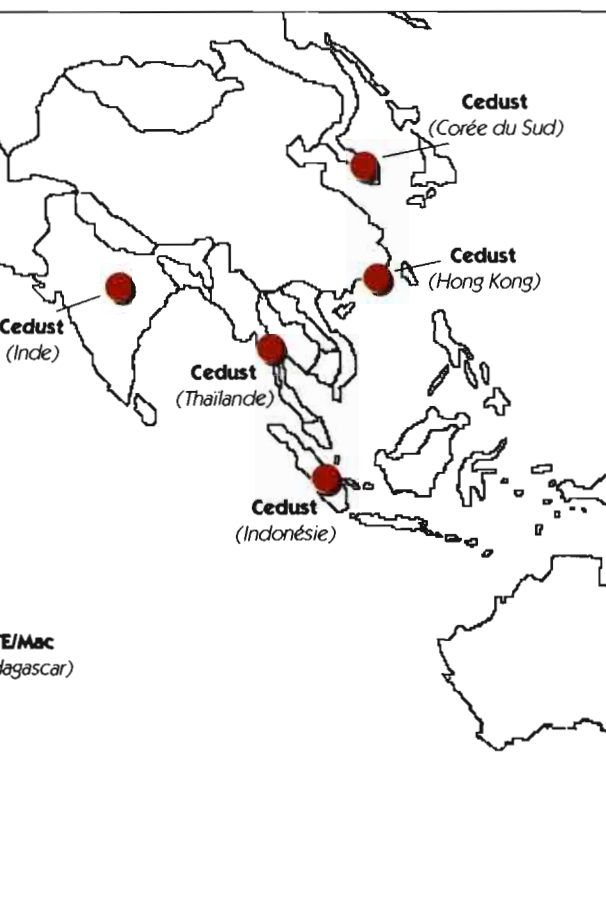
de documentação técnica e científica

(CENDOTEC)

Avenida Waldemar Ferreira, 204
05501 São Paulo, Brésil
Tél. : 212 45 72 - Télex : 1131900+

CEDUST

BP 3929 - Damas, Syrie
Tél. : 33 87 49 - Télex : 410013+FRADMS SY



CEDUST

Université de Khartoum - Faculté de lettres
 PO BOX 321 - Khartoum, Soudan
 Tél. : 75109 - Téléx : 22499+HOME SD

MAC/Doc

BP 534 - Kigali, Rwanda

CITE/MAC

BP 74 - Antananarivo
 Madagascar

CEDUST

2 Aurangzeb Road
 110011 New Delhi, Inde
 Tél. : (3511) 301 4682 - Téléx : 3162262+

CEDUST

29 Thanon Sathorn Tai
 10120 Bangkok - Thaïlande
 Tél. : 287 15 92 8 - Téléx : 20237+COOPFRA

A travers le réseau de ses centres culturels, de ses centres de documentation universitaires scientifiques et techniques (CEDUST) et de ses centres d'information pour le développement (CID), la France donne un large accès à l'information scientifique et technique dans de nombreux points du monde.

CEDUST

Jalan Lembang n° 10
 Jakarta, Indonésie
 Tél. : (6221) 310 37 47 - Téléx : 61439+

CEDUST

LPO BOX 1808
 Séoul, Corée du Sud
 Tél. : 75 92 94 - Téléx : 27368+Frasel

CEDUST

Consulat de France - Admiralty Centre
 Tower II - 25/F - Hong Kong
 Tél. : (852) 5 294 353 - Téléx : 73339+COFRA HX

Les services mis à disposition du public mexicain et des pays latino-américains hispanophones

Documentation : 170 revues et publications scientifiques et techniques, 300 dossiers thématiques, abondante documentation universitaire.

Publications : Interface ciencia y tecnologia de Francia, revue trimestrielle en espagnol, diffusée à 8 000 exemplaires, dont 1 500 dans les pays latino-américains.

Mexico, lettre d'information scientifique et technique bimestrielle, tirée à 1 000 exemplaires à l'intention des industriels français.

Service télématique : 50 terminaux minitel installés à l'ambassade, 35 à l'extérieur, sont alimentés par serveur Minimex et assurent la promotion des bases de données scientifiques et techniques françaises. Les sessions de formation, démonstrations et consultations sont organisées à la demande des organismes mexicains et latino-américains.

Service : manifestations extérieures

Conçoit et réalise des expositions thématiques (hautes technologies françaises, eau, transport, déchets urbains, télédétection) diffusées au Mexique. Une tournée en Amérique latine est prévue en 1991. Le service gère également une filmothèque (80 films 16mm et 40 vidéo-cassettes).

Principaux Organismes de Recherche Français

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

27, rue Louis Vicat - 75015 Paris
tel : (1) 47 65 20 00 - fax : (1) 46 45 52 26

ANVAR

Agence Nationale de Valorisation de la Recherche

43, rue Caumartin - 75436 Paris cedex 09
tel : (1) 40 17 83 00 - fax : (1) 42 66 02 20

BRGM

Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Siège : Tour Mirabeau
39/43 quai André Citroën - 75739 Paris cedex 15
tel : (1) 40 58 89 00
Services centraux :
1, avenue de Concy - La Source BP 6009
45060 Orléans cedex 2
tel : (16) 38 64 34 34 - fax : (16) 38 64 35 18

CEA

Commissariat à l'Énergie Atomique

31-33, rue de la Fédération - 75752 Paris cedex 15
tel : (1) 40 56 10 00 - fax : (1) 40 56 29 70

CEMAGREF

Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Parc de Tourvoie - 92180 Antony
tel : (1) 40 96 61 21 - fax : (1) 46 66 37 44

CIRAD

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

42, rue Schoffer - 75116 Paris
tel : (1) 47 04 32 15 - fax : (1) 47 55 15 30

CNES

Centre National d'Études Spatiales

Siège : 2, place Maurice Quentin - 75039 Paris cedex 01
tel : (1) 45 08 75 00 - fax : (1) 45 08 76 76

CNET

Centre National d'Études des Télécommunications

38-40, rue du Général Leclerc - 92131 Issy-les-Moulineaux
tel : (1) 45 29 44 44 - fax : (1) 46 29 33 64

CNRS

Centre National de la Recherche Scientifique

15, quai Anatole France - 75700 Paris
tel : (1) 47 53 15 15 - fax : (1) 45 51 73 07

CSI

Cité des Sciences et de l'Industrie

30, avenue Corentin Cariou - 75930 Paris cedex 19
tel : (1) 40 05 70 00 - fax : (1) 40 05 72 22

CSTB

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

4, avenue du Recteur Poincaré - 75782 Paris cedex 16
tel : (1) 40 50 28 28 - fax : (1) 45 25 61 51

IFREMER

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer TECHNOPOLIS 40

155, rue Jean-Jacques Rousseau
92138 Issy-les-Moulineaux cedex
tel : (1) 46 48 21 00 - fax : (1) 46 48 22 96

IGN

Institut Géographique National

136 bis, rue de Grenelle - 75700 Paris
tel : (1) 43 98 80 00 - fax : (1) 43 98 84 00

INED

Institut National d'Études Démographiques

27, rue du Commandeur - 75675 Paris cedex 14
tel : (1) 43 20 13 45 - fax : (1) 43 27 72 40

INRA

Institut National de la Recherche Agronomique

147, rue de l'Université - 75338 Paris cedex 07
tel : (1) 42 75 90 00 - fax : (1) 47 05 99 66

INRETS

Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

2, avenue du Général Malleret-Joinville
94114 Arcueil cedex
tel : (1) 47 40 70 00 - fax : (1) 45 47 56 06

INRIA

Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

Domaine de Voluceau - Rocquencourt BP 105
78153 Le Chesnay
tel : (1) 39 63 55 11 - fax : (1) 39 63 58 88

INSERM

Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

101, rue de Tolbiac - 75654 Paris cedex 13
tel : (1) 44 23 60 00 - fax : (1) 45 85 68 56

INSTITUT CURIE

26, rue d'Ulm - 75231 Paris cedex 05
tel : (1) 43 29 96 67 - fax : (1) 43 25 52 71

INSTITUT PASTEUR

25-28, rue du Docteur Roux - 75724 Paris cedex 15
tel : (1) 45 68 80 00 - fax : (1) 43 06 98 35

LCPC

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LCPC - Paris - 58, bd Lefebvre - 75732 Paris cedex 15
tel : (1) 40 43 50 00 - fax : (1) 40 43 54 98
LCPC - Centre de Nantes
route de Pornic BP 19 F - 44340 Bouguenais
tel : (16) 40 84 58 00 - fax : (16) 40 84 59 99

ONERA

Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

29, avenue de la Division Leclerc
92320 Châtillon cedex
tel : (1) 46 73 40 40 - fax : (1) 46 73 41 41

ORSTOM

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Déve- loppement en Coopération

213, rue La Fayette - 75480 Paris cedex 10
tel : (1) 48 03 77 77 - fax : (1) 48 03 08 29

TAAF

Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises

34, rue des Renaudes - 75017 Paris
tel : (1) 47 66 92 41 - fax : (1) 47 66 91 23
téléc : 640 980 F

Service de l'Information et de la Communication

1, rue Descartes • 75231 Paris Cedex 05

Tél. (1) 46 34 35 41