

Le courrier du CNRS 72

Auteur(s) : CNRS

Les folios

En passant la souris sur une vignette, le titre de l'image apparaît.

124 Fichier(s)

Les relations du document

Ce document n'a pas de relation indiquée avec un autre document du projet.□

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS 72, 1989-05

Valérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Consulté le 12/01/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/161>

Présentation

Date(s)1989-05

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution - Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).

Editeur de la ficheValérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Information générales

LangueFrançais

CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x

Description & Analyse

Nombre de pages124

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 11/12/2024

RECHERCHES SUR L'ENVIRONNEMENT

VARIABILITÉ NATURELLE

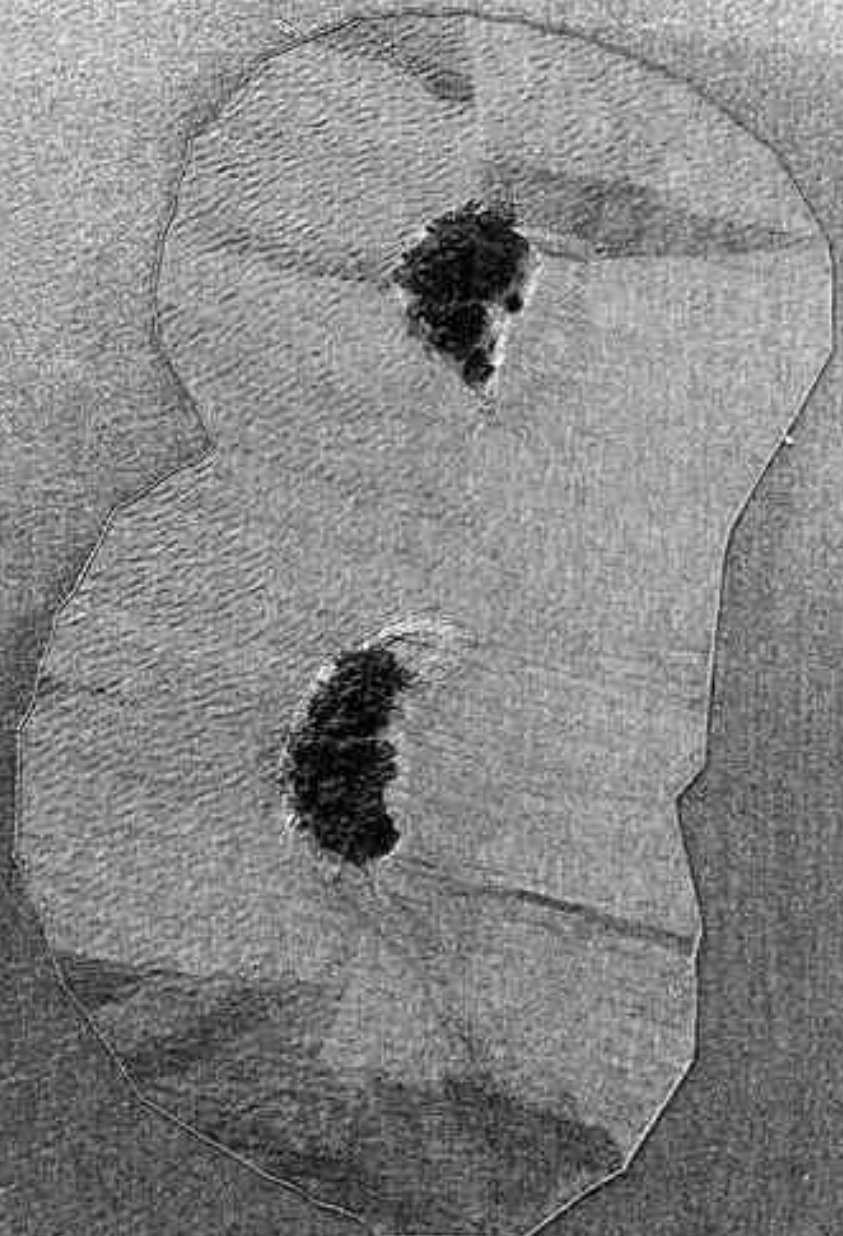
Evénements climatiques
et géophysiques

IMPACT DE L'HOMME

Atmosphère
Océan
Continents

REACTIONS DES ETRES VIVANTS

Animaux et végétaux
Homme et santé
Sociétés humaines



N° 72 - 50 F - MAI 1989

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE GÉOGRAPHIQUE





"Surrounded Islands", par Christo (1983). Biscayne Bay, Floride, U.S.A. (© Rapho, cliché G. Gerster). Est-ce la nature qui a guidé l'homme, est-ce l'homme qui s'est saisi de la nature? Impliquant la terre et l'eau, le végétal et le matériau industriel, le geste de l'artiste, de par son caractère réversible, est ici exemplaire d'une relation douce à l'environnement. L'œuvre n'est restée en place que dix jours. Elle n'en a pas moins soulevé des protestations de la part des défenseurs de l'environnement.

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

Directeur de la publication :
Goéry Delacôte

RÉALISATION :
Atelier de l'Écrit
1, place Aristide-Briand
92195 Meudon Cedex

Direction : Bernard Hagene

Rédacteur en chef : Sylvie Langlois

Rédaction : Fabienne Lemarchand

Secrétariat de rédaction :

Muriel Hourlier,
Jacqueline Leclère

COMITÉ SCIENTIFIQUE :

Zaher Massoud, président,
Roland Muxart, coordinateur,
Robert Barbuault,
Patrick Buat-Ménard,
Marie-Lise Chanin,
Henri Décamps,
Bernard Delay,
Robert Delort,
Riad Fadel,
Olivier Godard,
Antoine Haumont,
Claude Henry,
Marcel Jollivet,
Claude Lalou,
Gérard Mégie,
Yvonne Moulé,
Tatiana Muxart,
Louis Thaler,
Lothaire Zilliox.

COMITÉ DE RÉDACTION :

Georges Chapouthier,
Bernard Dorniy,
James Hiéblot,
Claire Lhuillier,
Sylvie Sahal,
Maryvonne Tissier,
Françoise Tristani.

Ce numéro du *Courrier du CNRS* a été préparé sous la direction du Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement du CNRS (PIREN). Il a été réalisé avec le concours du Secrétariat d'État auprès du Premier ministre, chargé de l'environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs.

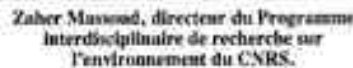
Prix : 50 francs. **Diffusion :** Presses du CNRS, 20-22, rue Saint-Amand, 75015 Paris. **Vente au numéro :** Librairie du CNRS, 295, rue Saint-Jacques, 75005 Paris.

La rédaction remercie les auteurs et les organismes qui ont participé à ce numéro. Les intertitres et les chapeaux introductifs ont été rédigés par elle. Les textes et illustrations peuvent être reproduits sous réserve de l'autorisation du Directeur de la publication.

Coordination : J.O. - Communication, 10, avenue Bourguin, 92130 Issy-les-Moulineaux - tél. : 46 45 37 07.
Direction artistique : Top Conseil, 18, rue Volney, 75002 Paris - tél. : 42 96 14 58.
Impression : Ruto-France-Impression, boulevard de Beaubourg, Emersville, 77300 Trosly - tél. : 60 06 60 00.
Commission paritaire : AD 393
ISSN : 0-153-985-X. **ISBN :** 2-222-04340-9.

© Centre National
de la Recherche Scientifique

Salle conseil Vatin
archivés
r. lardinet



The Earth will not stop to revolve in fifty or hundred years but in what condition will it be?

It is difficult to answer this question. Transformations due to man and his activities superpose on natural past or present changes of geological nature like continental drift, climatical like temperature variations or biological like the

Faire la part des uns et des autres, expliquer les mécanismes qui régissent le fonctionnement et la régulation de notre biosphère et de ses constituants, déceler les dysfonctionnements et les déséquilibres, les expliquer, les prévoir, étudier leurs évolutions futures sont autant de défis qu'essaie de relever la recherche scientifique.

Scientific research is trying to take up the following challenges consisting in taking into consideration different changes, explaining the mechanisms that rule the function and regulation of our biosphere and its components, detecting the dysfunctions and imbalances, explaining, foreseeing and studying their future evolution.

En France, les recherches dans ces domaines et dans de nombreux autres qui constituent le champ de l'environnement sont le fait d'organismes de recherche tels que l'INRA, l'ORSTOM, l'INSERM, le CEA, le CNES, l'IFREMER, le BRGM, le CEMAGREF, le MNHN... et surtout l'ensemble CNRS-universités.

In France, research in these fields and many others making up the field of environment is undertaken by research organizations such as the INRA, ORSTOM, INSERM, CEA, CNES, IFREMER, BRGM, CEMAGREF, MNHN and in particular the CNRS together with the universities.

Le CNRS a mis en place, il y a une dizaine d'années, le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement (PIREN) qui a pour mission de soutenir ces recherches, de les coordonner et de les évaluer.

Some ten years ago, the CNRS installed the interdisciplinary environmental research program PIREN (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement) whose mission is to support, coordinate and evaluate this research.

En consacrant ce dossier scientifique à l'environnement, le CNRS a voulu, d'une part, affirmer l'importance qu'il y attache et, d'autre part, vous informer sous forme de courts articles ou de flashes de certaines activités de recherche dans ce domaine.

By devoting this scientific document to environment, the CNRS wants to confirm the importance attached to it and informs you by means of short articles or flashes about certain research activities in this field.

Qu'il me soit permis de remercier toutes celles et ceux qui ont contribué à la réalisation de ce dossier.

Please let me thank all the people who contributed to the accomplishment of this document.

Editorial

Zaher Massoud

Avant-propos Foreword

Le champ de l'environnement

The field of environment

Zaher Massoud, Robert Barbault

L'environnement, un problème
de sciences sociales

*Environment, a social science
problem*

Olivier Godard

01 La variabilité naturelle de l'environnement *Natural variability of environment*

De la forêt au désert

From forest to desert

Jean-Claude Duplessy, Jean Moyes,
Nicole Petit-Maire, Joël Guiot

06 Faunes et flores fossiles témoins des climats

*Fossil fauna and flora climate
indicators*

Jean-Claude Duplessy, Joël Guiot,
Jean Moyes, Nicole Petit-Maire

Les archives glaciaires

Glacial records

Claude Lorius

Les catastrophes naturelles

Natural catastrophes

François Ramade

L'homme agit sur l'environnement *Man acts on the environment*

La pollution diffuse

Diffuse pollution

François Ramade

Les métaux dans l'environnement

Metals in the environment

Claude Amiard-Triquet, Jean-Claude Amiard

Physico-chimie de l'atmosphère *Physics and chemistry of the atmosphere*

Introduction

Introduction

Gérard Lambert

Bilan radiatif, nébulosité,

climat

*Radiation balance, nebulosity,
climate*

Robert Kandel

Simuler le climat

et ses variations

*Simulating the climate and its
variations*

Hervé Le Treut

L'ozone stratosphérique

Stratospheric ozone

Gérard Mégie, Jean-Pierre Pommerehne

Les ultraviolets et la vie

Ultraviolet radiations

and life process

Jean Chavaudra, Raymond Lataret

Des modèles pour la stratosphère

Models for the stratosphere

Daniel Cariolle

Ozone : les stratégies industrielles

Ozone: industrial strategies

Jean-François Nobl, Sylvie Fautheux

Le gaz carbonique : questions

pour l'avenir

*Carbon dioxide: questions
for the future*

Dominique Raynaud

La pompe à CO₂

The CO₂ pump

André Morel

An english translation
of the headings of the
articles is to be found
on page 116.

Modéliser le cycle du gaz carbonique
Modelling the carbon dioxide cycle
Patrick Monfray

27

Atmosphère et cycles biogéochimiques
Atmosphere and biogeochemical cycles
Jacques Fontan, Patrick Buat-Ménard

27

L'avion de recherche atmosphérique
Atmospheric research aircraft
Patrick Mascart, Michel Ravaut

29

Les aérosols atmosphériques
Atmospheric aerosols
Gilles Bergametti, Pierre Rognon, Geneviève Coudé-Gaussen

30

Programme brouillard
Fog programme
Daniel Guedalla

30

Cycle de l'eau et climat
Water cycle and climate
Jean-Claude André

31

Environnement océanique *Oceanic environment*

Introduction
Introduction
Patrick Buat-Ménard

32

Pollutions en milieu littoral
Pollution in littoral environment
Louis Cabioch

32

Traitement biologique de la pollution
Biological treatment of pollution
Bernard Baleux, Marc Troussellier

34

Traceurs transitoires dans l'océan
Transient tracers in the ocean
Liliane Merlivat

34

Des métaux dans les sédiments
Metals in the sediments
Francis Grousset, Olivier Donard

35

Le Tandétron
The Tandetron
Jean-Claude Duplessy

36

L'épuration sous forme particulière
Biological removal
Patrick Buat-Ménard

37

Simuler l'écosystème marin
Marine ecosystem simulation
Valérie Andersen

37

Les modèles en géochimie des océans
Geochemical ocean models
Jean-François Minster

37

Eaux continentales *Continental waters*

Introduction
Introduction
Henri Décamps

39

L'avenir des eaux continentales
The future of continental waters
Henri Décamps

39

Les fonctions de la végétation riveraine
The functions of riparian vegetation
Gilles Pinay

40

Eaux souterraines et pollution
Ground water and pollution
Philippe Ackerer, Lothaire Zilliox

41

Les grands cours d'eau
Large rivers
Henri Décamps, Albert-Louis Roux

41

Nitrates dans les plaines alluviales
Nitrates in alluvial plains
Elane Fustec

42

Une histoire de saumon en Bretagne
The salmon history in Brittany
Max Thibault

43

Nitrates : quelles stratégies ?
Nitrates : what strategies?
Corinne Larrue

44

Maîtriser la gestion des lacs
Controlling lake management
Roger Pourriot

44

La baie du Mont Saint-Michel
The bay of Mont Saint-Michel
Jean-Claude Lefeuvre

45

Les modèles dynamiques d'écosystèmes lacustres
Dynamic models of lake ecosystems
Jacques Capblancq

47

Ecosystèmes terrestres *Terrestrial ecosystems*

Introduction
Introduction
Jean-François Dobremez

48

La pollution des sols
Soil pollution
Jacques Berthelin, Philippe Adrian

48

La forêt méditerranéenne
The Mediterranean forest
Marcel Barbero, Roger Loisel, Pierre Quézel

50

Aménager un espace moins sensible au feu
Preparing a space less sensitive to fire
Bernard Hubert

51

Le morcellement forestier
Parcelling out of forests
Jacques Langa

52

Forêts résineuses de montagne
Mountain coniferous forests
Jean-François Dobremez

54

La forêt tropicale en quatre volets
The tropical forest through four stages
Pierre Charles-Dominique

54

La savane
The savanna
Luc Abbadie, Jean-Claude Menaut, Carlos Prado

55

La désertification du Sahel
The desertification of the Sahel
Pierre Rognon

56

L'espace rural évolue
Rural space changes
Jean-Claude Lefeuvre

57

L'érosion des terres agricoles
Erosion of agricultural land
Anne-Véronique Auzet

59

Mesurer l'érosion
Measuring erosion
Tatiana Muxart

60

Un observatoire pour l'environnement
An observatory for environment
Marcel Joilivet

60

Milieu urbain Urban environment

- Introduction 61
Introduction
Antoine Haumont
- L'environnement urbain 61
Urban environment
Antoine Haumont
- Les couronnes péri-urbaines 62
Peri-urban borders
Francis Beaucire
- Les comportements en milieu urbain 63
Behaviour in urban environment
André Galinowski, Karim Atroun
- Effets du bruit 63
Effects of ambient noise
Michel Vallet
- La gestion locale des déchets 64
Local waste management
Gérard Bertolini
- Un fleuve dans sa ville 65
A river in the city
Madeleine Fortuné

Origines sociales des impacts Social origins of the impacts

- Introduction 66
Introduction
Olivier Godard
- Milieus et sociétés 66
Environment and societies
Maurice Godellier
- La Camargue n'est pas « naturelle » 68
La Camargue is not "natural"
Bernard Picon
- Environnement et finances publiques 68
Environment and public finances
Claude Henry
- La fiscalité contre l'environnement 70
The financial system towards environment
Robert Hartzog

L'environnement agit sur les êtres vivants Environment acts on living creatures

Animaux et végétaux Animals and plants

- Introduction 72
Introduction
Louis Thaler, Bernard Delay
- S'adapter ou disparaître 72
Adapt or disappear
Louis Thaler, Bernard Delay
- La résistance croissante aux pesticides 74
Increasing resistance to pesticides
Nicole Pasteur
- L'amplification génique 75
Gene amplification
- La réponse des rongeurs aux anti-coagulants 75
Rodents' response to anticoagulants
Guy Lorgue, Karim Nahas
- Comment résiste le moustique 76
How mosquitoes resist
Michel Raymond, Nicole Pasteur
- L'efficacité limitée des herbicides 76
Limited efficiency of herbicides
Jacques Gasquez, Henry Darmency, Michel Dron
- Les réponses génétiques en environnement variable 76
Genetic responses in a variable environment
Isabelle Olivier, Pierre-Henri Gouyon
- Les invasions biologiques 78
Biological invasions
Jacques Lepart
- Processus génétiques associés aux invasions 78
Genetic processes associated with invasions
Pierre-Henri Gouyon, Isabelle Olivier
- Le monde vivant des grottes 79
The live world of the caves
Christian Juberthie
- Particularités biologiques en Antarctique 80
Biological characteristics in the Antarctic
Paul Trahan

- Un monde sans soleil 82
A world without sunshine
Lucien Laubler

Homme et santé Man and health

- Introduction 83
Introduction
Denis Hémon
- Allergies saisonnières 83
Seasonal allergies
Bernard David
- Asthme et pollution chez l'enfant 85
Asthma and pollution in the case of the child
Aline Grinfeld
- L'environnement et la promotion tumorale 86
Environment and tumoral promotion
Charles Frayssinet, Christiane Lafarge-Frayssinet
- Allergies et fausses allergies alimentaires 87
Allergies and false allergies to food
Anne Moneret-Vautrin
- Mycotoxines : danger ! 87
Mycotoxins: danger!
Guy Dirheimer
- Environnement et déterminisme génétique 88
Environment and genetic determinism
Riad Fadel
- Le cas du chlorure de vinyle 89
The vinyl chloride case
Alain Barbin
- Les polluants des locaux 89
Indoor pollution
Claude Molina
- Des envahisseurs sous haute surveillance 90
Invaders under close survey
Joëlle La Mao
- La toxicité du plomb 91
Toxicity of lead
Yves Manuel, Joël Rakotoarivony
- Produits cancérigènes et action publique 91
Carcinogenic products and public action
Jean-Paul Moatti

Influence du bioxyde d'azote et de l'ozone sur la santé publique
Influence of nitrogen dioxide and ozone on human health
Cyr Voisin 93

Notre environnement radioactif
Our radioactive environment
Gérard Lambert 93

Radioactivité et santé
Radioactivity and health
René Coulon 94

Environnement et sociétés humaines *Environment and human societies*

Introduction 95
Introduction
Olivier Godard

L'économie des ressources naturelles épuisables 95
The economy of exhaustible natural resources
Michel Moreaux

La nature disputée 96
Controversy about nature
André Micoud

L'environnement face à la loi 97
Environment facing law
Alexandre Kiss

La notion de dommage écologique pour le droit 98
The notion of ecological damage for the law
Gilles J. Martin

Stratégies énergétiques 99
Energetic strategies
Jean-Charles Hourcade

La modélisation macroéconomique 100
Macroeconomic modelisation
Michel Manuel

De la difficulté d'appliquer le droit 100
Difficulties in bringing law into operation
Michel Prieur

Droit imposé ou négocié ? 101
Imposed or negotiated law?
Pierre Lascoumas

Réglementation européenne et enjeux industriels 101
European regulation and industrial stakes
Philippe Roqueplo

Quel prix pour la nature ? 102
What price for nature?
Patrick Point

Pour un gestion patrimoniale concertée 104
For a bargained patrimonial management
Olivier Godard, Henry Ollagnon

Le risque technologique majeur 105
Major technological risk
Claude Gilbert, Patrick Lagadec

Actions et programmes *Actions and programmes*

Le PIREN 107
The PIREN
Zaher Massoud

Histoire de l'environnement 108
History of environment
Robert Delort

Le programme DEFORPA 108
The DEFORPA programme
Maurice Muller

Les programmes de recherche du SRETIE 110
Research programmes of the SRETIE
Jean-Claude Oppeneau

La recherche environnement de la Communauté européenne 111
Environmental research of the European Community
Philippe Bourdeau

Le programme international Géosphère-Biosphère 112
The international Geosphere-Biosphere programme
Marie-Lise Chanin

Le programme MAB : l'homme et la biosphère 113
The MAB programme: man and biosphere
Gilbert Long

Index des auteurs 115
Authors index

Traduction anglaise des textes d'introduction des articles 116
English translation of the headings of the articles

LE CHAMP DE L'ENVIRONNEMENT



Champs de sarrazin et de pommes de terre à Phortse, l'un des plus hauts villages de l'Himalaya (4250 m),
(Cliché J.F. Dobremez).

Confrontés aux problèmes d'environnement, conséquences dans une large mesure de leurs propres activités, les hommes réagissent en fonction de critères et d'intérêts qui varient selon les groupes sociaux. Il n'en est que plus urgent de développer des perspectives d'ensemble pour structurer nos connaissances.

Zaher Massoud et
Robert Barbault

S'il est un champ de réflexion et d'action, politique ou scientifique, difficile à définir et à délimiter, c'est bien le champ de l'environnement.

Peut-on comparer les changements et bouleversements passés de notre planète Terre – géologiques et climatiques – avec les changements survenus dans les dernières décennies, parfois brutaux, le plus souvent insidieux ?

Peut-on objectivement faire la part entre la variabilité naturelle de notre environnement et celle induite par les activités humaines ?

Peut-on, en fonction des connaissances actuelles sur les mécanismes de fonctionnement des constituants de la biosphère, prévoir leur évolution future ?

Doit-on donner à l'environnement le sens restrictif de l'environnement de l'Homme, ou l'étendre à celui de l'ensemble des espèces animales et végétales et des milieux dans lesquels elles vivent ?

Peut-on assimiler les problèmes environnementaux des sociétés riches à ceux des peuples pauvres, ceux des citadins à ceux des montagnards ou des agriculteurs ?

Peut-on concilier les préoccupations environnementales – dites à tort écologiques – et les impératifs économiques ?

Voilà quelques-unes des questions parmi beaucoup d'autres auxquelles se heurtent les scientifiques. Leur simple énumération illustre, d'une part, l'étendue du champ de recherche dans le domaine de l'environnement et, d'autre part, le caractère interdisciplinaire de ces recherches.

Déjà, au Néolithique...

L'environnement, pour les êtres humains et terrestres que nous sommes, c'est essentiellement la biosphère, cette mince pellicule à la surface de la Terre qui renferme l'ensemble des êtres vivants. Sa dégradation est devenue au cours de cette seconde moitié du XX^e siècle une préoccupation majeure de la plupart des sociétés industrialisées,

mais aussi de bon nombre de pays en voie de développement. Cependant, il s'agit là d'un processus beaucoup plus ancien. Sans remonter à l'apparition de l'espèce humaine sur notre planète, nous pouvons raisonnablement situer à l'aube du Néolithique les premières atteintes à l'équilibre naturel d'un certain nombre d'écosystèmes continentaux. Mais c'est seulement à partir du XVIII^e siècle que l'intensification de l'agriculture, l'explosion démographique et l'industrialisation ont accéléré les transformations et les déséquilibres de la quasi-totalité des écosystèmes.

Une perception des problèmes qui varie selon les groupes sociaux

Ainsi, les problèmes d'environnement qui préoccupent les hommes d'aujourd'hui sont dans une large mesure la conséquence de leurs propres activités, de leur propre développement en tant que population, même si l'on ne saurait négliger la part d'autres processus naturels affectant la planète Terre. Cela explique en partie la complexité des problématiques relatives aux recherches sur l'environnement : les problèmes d'environnement sont ressentis et définis par des sociétés humaines, en fonction de critères et d'intérêts qui peuvent varier selon les groupes sociaux considérés. De plus, ils sont souvent perçus comme extérieurs à elles et rarement dans une perspective d'ensemble qui puisse leur donner une cohérence objective et une réalité saisissable en termes d'objets de recherche.

Aussi, afin d'échapper à l'approche anecdotique, à l'intervention au coup par coup que cela entraîne trop souvent ici ou là, convient-il de développer des perspectives d'ensemble susceptibles de structurer nos connaissances et d'orienter les politiques de recherche ou de prévention.

Deux approches de la relation homme-biosphère

Compte tenu de la dualité fondamentale des problèmes, puisqu'il s'agit pres-

que toujours de relations Homme-Biosphère, on peut distinguer deux grandes perspectives complémentaires. La première, qui prend appui sur la dimension humaine de la question, privilégie les approches sociales et économiques, tandis que la seconde, qui s'attache aux processus et mécanismes mis en œuvre au sein des constituants de la biosphère ainsi qu'aux interactions entre celle-ci et la géosphère, fait prévaloir les approches physico-chimiques et naturalistes.

Toutes deux sont indispensables, voire indissociables, dès lors que l'on se préoccupe de l'environnement dans un sens global.

Dans ce numéro du *Courrier du CNRS* consacré aux recherches sur l'environnement, nous ne pouvons pas présenter la totalité des activités scientifiques de nos chercheurs et de nos laboratoires. Nous avons été contraints de procéder à un choix, au risque d'être parfois arbitraires. Néanmoins, ce choix reflète les points forts des recherches françaises effectuées dans ce domaine. Les contributions ont été regroupées en trois parties : la première est consacrée à la variabilité naturelle de l'environnement, c'est-à-dire aux changements et aux bouleversements climatiques ou géologiques, indépendants des activités humaines. La deuxième partie traite de l'impact de l'Homme sur les différents constituants de la biosphère, atmosphère, océan, écosystèmes aquatiques et terrestres. Enfin, la troisième partie est réservée à l'action de l'environnement sur les êtres vivants y compris l'Homme, ce dernier pris dans sa dimension biologique et sa dimension sociale.

Zaher Massoud, directeur de recherche au CNRS, directeur du PIREN, responsable de l'unité « Adaptation et structure des populations animales et microbiennes du sol » (URA 689 CNRS), 15, quai Anatole France, 75700 Paris.

Robert Barbault, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, directeur du Laboratoire d'écologie de l'École normale supérieure (UA 258 CNRS), 46, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.

L'environnement, un problème de sciences sociales

Le champ de l'environnement est un champ relationnel, défini par l'interaction entre l'homme et la biosphère. Les sciences sociales contribuent de manière essentielle à faire comprendre l'amont et l'aval de cette relation.

■ Olivier Godard

Encore insuffisamment développée, la présence des sciences sociales dans le champ des recherches sur l'environnement résulte d'une nécessité. Car faire des recherches sur l'environnement, c'est faire quelque chose de plus et aussi, d'une certaine manière, quelque chose d'autre que des recherches sur la nature ou sur la biosphère. Comme la théorie des systèmes l'a montré, la notion d'environnement désigne un milieu dans sa relation à un système de référence ; c'est cette relation qui définit les contours de l'objet considéré et l'intérêt qu'on lui porte. En l'occurrence, ce qu'on appelle le champ de l'environnement se définit par les interactions entre la biosphère et l'homme biologique et social.

Étudier l'environnement, c'est ainsi prendre au sérieux la concomitance d'une appartenance (l'homme appartient à la nature) et d'une distinction (l'homme se distingue de la nature, principalement par son accès au symbolique, par son organisation économique et sociale, par sa capacité technique). Il y a là une structure génératrice d'une dynamique d'interactions et de transformations où se mêlent les projets intentionnels et les conséquences non voulues, ni même imaginées.

L'homme se trouve à la fois en amont et en aval de l'environnement. En amont, parce que ses actions sont devenues à notre époque un facteur majeur de la transformation et de l'évolution du milieu qu'on appelle encore « naturel », si bien qu'il n'y a plus guère d'écosystèmes qui n'aient été affectés par l'homme. En prendre conscience impose d'identifier et de comprendre les mécanismes de ces actions, les représentations mentales et sociales et les motiva-

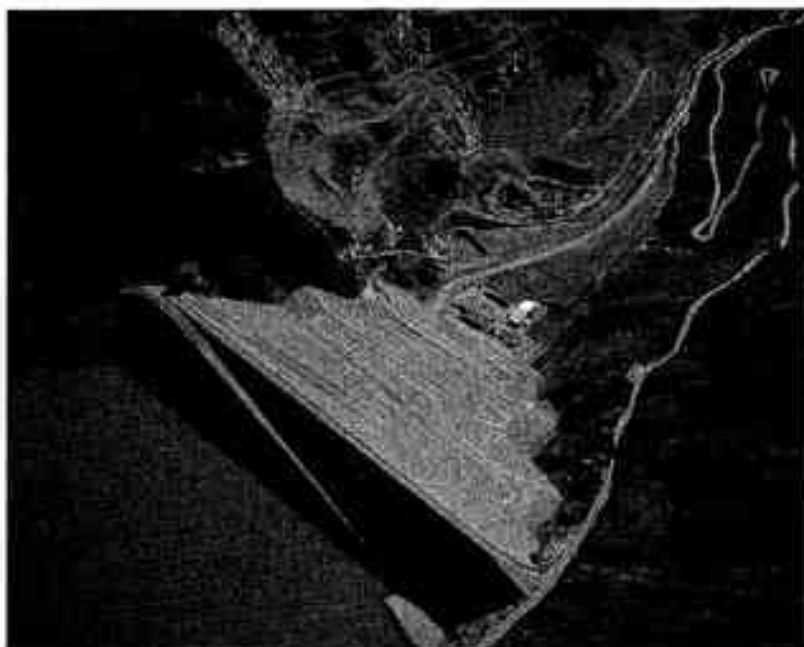
tions qui les inspirent ainsi que les dispositifs sociaux les provoquant, les encadrant ou les régulant.

Mais l'homme se trouve aussi en aval : c'est lui qui donne sens à cet environnement peu ou prou transformé. Ce sens, on doit chercher à en saisir les multiples dimensions, comme on doit s'efforcer de comprendre les enjeux sociaux sous-jacents. Il y a là autant de filtres différents à partir desquels la réa-

lité de l'environnement se trouve socialement construite : on parlera de la découverte ou de l'altération de ressources naturelles susceptibles d'une mise en valeur économique, des contraintes nécessitant un changement de techniques de production, de la place de la nature dans les conditions d'habitat, de l'apparition de nouveaux problèmes de santé, etc. On observera l'expression de nostalgies du passé ou d'inquiétudes pour l'avenir, la formation de mouvements sociaux, l'introduction de nouvelles normes juridiques et sociales de comportements, la création d'institutions, tout cela pouvant se combiner pour infléchir des dynamiques économiques et sociales de développement.

De ce double point de vue, la question de l'environnement ouvre un large champ pour les recherches en sciences sociales (anthropologie, économie, droit, géographie, sciences du politique, sociologie, ...) qui visent à comprendre l'environnement comme problème pour l'homme et comme objet de représentation, d'action et de gestion.

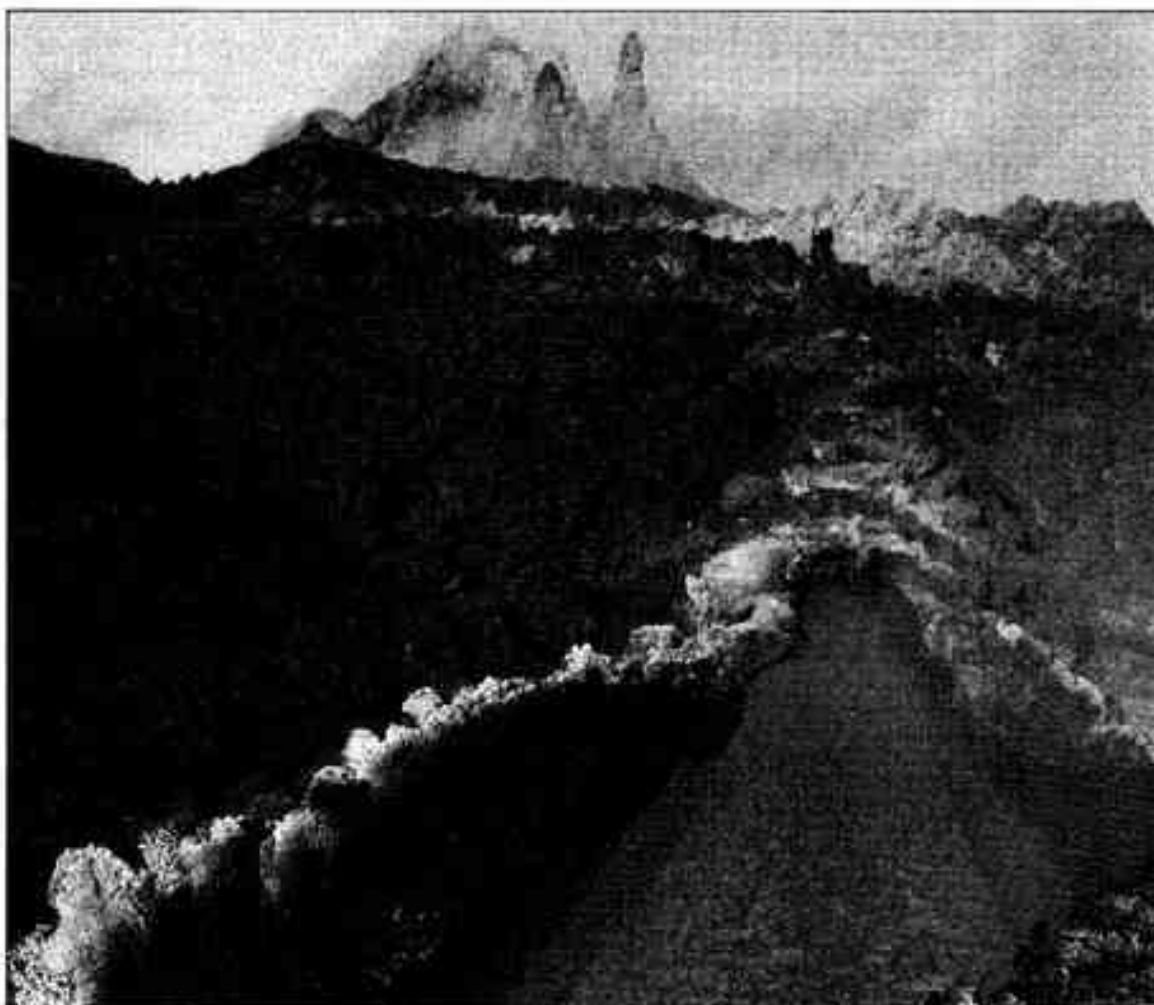
Olivier Godard, chargé de recherche au CNRS, chargé de mission au PIREN, Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (UA 940 CNRS), Ecole des hautes études en sciences sociales, 1, rue de 11-novembre, 92120 Montrouge.



Aménagement hydraulique de Grandmaison (Isère). L'action de l'homme est un facteur majeur de la transformation du milieu « naturel ». Parmi les premiers enjeux sociaux sous-jacents figure la mise en valeur économique des ressources naturelles. (© SODEL-EDF, diffusion La Documentation française, cliché Brigaud).

LA VARIABILITE NATURELLE DE L'ENVIRONNEMENT

**La planète Terre n'a pas cessé d'évoluer depuis sa formation.
C'est à l'intérieur de cette variabilité naturelle,
qu'elle soit cyclique ou non, qu'il faut situer
les modifications aujourd'hui observables de l'environnement.**



Tunnel de lave sur l'Etna, près du Piccolo Rifugio, pendant l'éruption de mars 1985. (Cliché P. Briole).

De la forêt au désert

Une forêt amazonienne réduite à une forêt galerie, une Côte d'Azur plutôt fraîche et Paris au cœur d'une maigre steppe froide, un désert africain en expansion... il y a vingt mille ans, le climat glaciaire n'était guère propice à l'épanouissement des hommes.

Jean-Claude Duplessy,
Jean Moyes, Nicole Petit-Maire
et Joël Guiot

Au cours des quelques millions d'années qu'il a passées sur la Terre, l'homme a modifié et aménagé son environnement pour en tirer le maximum de nourriture et de bien-être. Ce faisant, il est progressivement devenu l'esclave et la victime potentielle des moindres bouleversements du milieu, le récent tremblement de terre d'Arménie ou la catastrophe du lac Nyos en sont les preuves à une échelle locale. Plus terribles encore, quoique plus insidieuses, sont les modifications du climat qui peuvent amener la famine sur tout un continent. La sécheresse du

Sahel ne nous donne qu'un avant-goût des problèmes qui se posent à l'humanité si la mousson vient à manquer plusieurs années de suite.

Pour évaluer l'ampleur des perturbations auxquelles les hommes risquent d'être soumis, il est donc indispensable de documenter la variabilité naturelle de notre environnement. Ce problème a constitué un des grands axes de recherche des dix dernières années, tant en France qu'à l'étranger. L'analyse isotopique et micropaléontologique des sédiments marins, l'étude des restes fossiles contenus dans les séries continentales prélevées dans les tourbières ou les dépôts lacustres, et l'analyse isotopique et chimique des forages effectués dans les calottes glaciaires du Groënland et de l'Antarctique ont constitué les princi-

les sources de documentation des environnements passés. L'originalité de l'approche des équipes françaises tient à la mise en œuvre de méthodes permettant d'estimer quantitativement les paramètres climatiques ou la composition chimique de l'atmosphère dans le passé, et à son accès privilégié à des zones très sensibles au plan climatique, comme les déserts africains ou les zones polaires australes.

Des variations abruptes

Ces travaux ont montré que, dans le passé, notre environnement a été sujet à des variations d'une amplitude insoupçonnée. Il s'agit de véritables bouleversements, qui ne peuvent s'expliquer que par des mécanismes complexes de rétroaction entre l'utilisation du rayonnement solaire reçu par la Terre, la physico-chimie de l'atmosphère, la chimie océanique, et le comportement des écosystèmes continentaux et marins. Ces mécanismes doivent être compris et pris en compte pour évaluer l'influence des activités humaines sur notre environnement futur. En outre, la possibilité de dater avec précision les enregistrements paléoclimatiques a fait apparaître que le climat et



TROIS ETAPES DU DEVELOPPEMENT DU SAHARA :

A. Le Sahara il y a 18 000 ans : alors que règne un climat froid et sec aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, des conditions arides se développent sous les tropiques. Les vents alizés et l'harmattan sont plus violents qu'actuellement. Le désert saharien s'étend quatre cents kilomètres plus au sud qu'aujourd'hui, ainsi qu'en témoignent les dunes que l'on retrouve au nord du Nigeria, du Ghana, du Cameroun, du Sénégal et dans le sud du Soudan. Plus au sud, les précipitations sont plus faibles qu'aujourd'hui et la forêt équatoriale beaucoup moins dense. Au nord, le Maghreb est modérément humide parce qu'il reçoit les pluies apportées par les dépressions d'origine atlantique.

B. Le Sahara il y a 8 000 ans : à la fin de la glaciation, tous les glaciers qui recouvraient le Canada et le nord de l'Europe ont fondu, le climat de la Terre est passé par un optimum, plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui. Le Sahara est jalonné de vastes marécages et de lacs alimentés par des pluies parfois cinquante fois plus intenses qu'aujourd'hui. Des populations humaines vivent de la pêche et de la chasse sur leurs rives. Cette phase humide s'est terminée assez brutalement il y a environ 4 500 ans, les hommes et les animaux ont fui vers des zones où la vie était encore possible et le désert est revenu.

C. Le Sahara actuel : le domaine climatique saharien couvre près de dix millions de kilomètres carrés et reçoit en moyenne moins de 100 mm d'eau par an, mais les années sans pluies sont fréquentes. D'immenses zones hyperarides ($P < 50$ mm) s'étendent sur un cinquième de sa surface, aux latitudes proches du tropique. Le Sahara est limité au sud par la zone sahélo-saharienne et au nord par un domaine méditerranéen dégradé. (Dessin M. Decobert).

l'environnement sont susceptibles de variations abruptes, parfaitement sensibles à l'échelle d'une vie humaine.

Alors que l'existence de grandes glaciations à la surface de la planète était connue depuis plus d'un siècle, les études de paléoclimatologie marine ont permis de montrer que le climat dont nous bénéficions aujourd'hui est tout à fait exceptionnel à l'échelle du dernier million d'années : dans l'ensemble, ce sont les climats glaciaires qui sont les plus fréquents, tandis que des conditions interglaciaires, comme celles de maintenant, ne se produisent que pendant moins de 10 % du temps. Les hommes ont donc vécu le plus souvent dans un environnement complètement différent de celui que nous observons. A titre d'exemple, il y a vingt mille ans seulement, le Canada et le nord de l'Europe étaient recouverts de gigantesques calottes glaciaires hautes de quatre mille mètres environ. L'eau ainsi gelée provenait de la mer, dont le niveau était environ cent mètres plus bas qu'aujourd'hui. Il faisait froid sur la France : Paris était au cœur d'une maigre steppe froide, les températures de la mer au large de la Bretagne ne dépassaient guère 6 °C l'été et les baigneurs les plus courageux devaient sans doute rejoindre la Côte d'Azur, où la température des eaux pouvait atteindre 15 °C les belles années.

Il faisait toujours chaud à l'équateur et sous les tropiques. Il ne faut pas croire pour autant que c'était le paradis, car les pluies étaient rares. Le domaine de la forêt équatoriale était considérablement réduit sur tous les continents et la forêt amazonienne était restreinte à une forêt galerie. La mousson indienne ne faisait pas exception et il pleuvait deux fois moins qu'aujourd'hui sur l'Inde. Partout, les déserts gagnaient, notamment en Afrique (voir figure). Le climat glaciaire n'était guère propice à l'épanouissement des hommes.

La remontée de la mer

Les glaces ont fondu il y a 15 000 à 9 000 ans, en réponse à l'augmentation d'insolation tombant l'été sur l'hémisphère nord. Cette fonte n'a pas été régulière, mais au contraire marquée d'à-coups, certains très brutaux. La remontée de la mer s'est alors effectuée à un rythme dépassant deux mètres par siècle. Les populations qui vivaient sur ses rives, malgré leur faible longévité, ont vu les eaux envahir leur territoire et ont dû reculer devant la mer. Dans le même temps, les pluies sont revenues, les forêts ou les savanes avec elles, et les déserts ont disparu. C'est le moment de l'optimum climatique, datant de neuf à six mille ans, qui a permis aux hommes

d'inventer l'agriculture. Le paradis est toujours éphémère. L'insolation d'été sur l'hémisphère nord diminuant, les pluies ont abandonné les tropiques et le désert a gagné sans avoir encore atteint aujourd'hui son extension maximale. Les températures ont commencé à baisser sur l'Europe et l'Amérique du Nord et le climat a repris son inexorable progression vers une nouvelle glaciation. Seul l'impact des activités humaines risque d'entraver son cours, mais est-ce pour nous préparer un avenir meilleur ?

■ Jean-Claude Duplessy, directeur de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (LP 2101 CNRS, laboratoire mixte CNRS/CEA), avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex

■ Jean Moyes, professeur à l'université de Bordeaux I, directeur du département de géologie et océanographie (UA 197 CNRS), université de Bordeaux I, 351, cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

■ Nicole Petit-Maire, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie du quaternaire (LP 1201 CNRS), Centre universitaire de Marseille, A. Luminy, case 907, 13288 Marseille Cedex 9

■ Joël Guiot, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de botanique historique et palynologie, Faculté des sciences Saint Jérôme, avenue de l'Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex

Faunes et flores fossiles témoins des climats

Les sédiments continentaux et marins contiennent des fossiles, animaux ou végétaux, qui permettent de reconstituer le régime des températures et des précipitations des millénaires passés.

■ Jean-Claude Duplessy, Joël Guiot, Jean Moyes et Nicole Petit-Maire

Les sédiments continentaux et marins contiennent des fossiles, animaux ou végétaux, qui permettent de reconstituer les environnements passés parce que la répartition géographique des flores et des faunes est sous l'étroite dépendance du climat. Les foraminifères, animaux à coquille calcaire, sont parmi les plus abondants fossiles présents dans les sédiments océaniques. L'analyse des variations de leur rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ permet d'accéder à

un paramètre climatique global : le volume des glaces gelées sur les continents. En effet, les glaces polaires sont constituées de l'accumulation de neiges très pauvres en ^{18}O . Aussi, lorsque de gigantesques calottes glaciaires se développent sur les hautes latitudes de l'Europe et de l'Amérique, une fraction importante de l'eau océanique est transférée sur les continents. Le niveau de la mer baisse et le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'eau restée dans l'océan augmente. Cette augmentation est intégralement enregistrée dans la composition isotopique de l'oxygène des foraminifères.

Le développement des diverses espèces de foraminifères dépend de la tem-

pérature de l'eau de mer. On ne trouve donc pas les mêmes faunes dans des eaux froides, tempérées ou chaudes. Moyennant un étalonnage effectué sur les conditions actuelles, des fonctions de transfert permettent d'estimer avec une précision de $\pm 1,5$ °C les variations saisonnières de la température des eaux de surface de l'océan à partir des changements de composition des faunes fossiles dans les sédiments.

Il a ainsi été possible de montrer que l'océan Atlantique nord a été particulièrement froid pendant le dernier maximum glaciaire, avec des températures proches de 0 °C pendant l'hiver et des icebergs qui dérivèrent au large des côtes françaises. La transition vers le climat actuel a été marquée par des oscillations de température de grande amplitude, particulièrement brutales (figure). Grâce aux datations par accélérateur (voir l'article de J.-C. Duplessy sur le Tandém), il a été possible de mettre en évidence des variations de température pouvant atteindre la dizaine de degrés en moins de cinq siècles. Le système climatique ne répond pas linéairement aux variations de l'insolation tombant sur les hautes latitudes et

► il est sujet à des variations rapides et de grande ampleur.

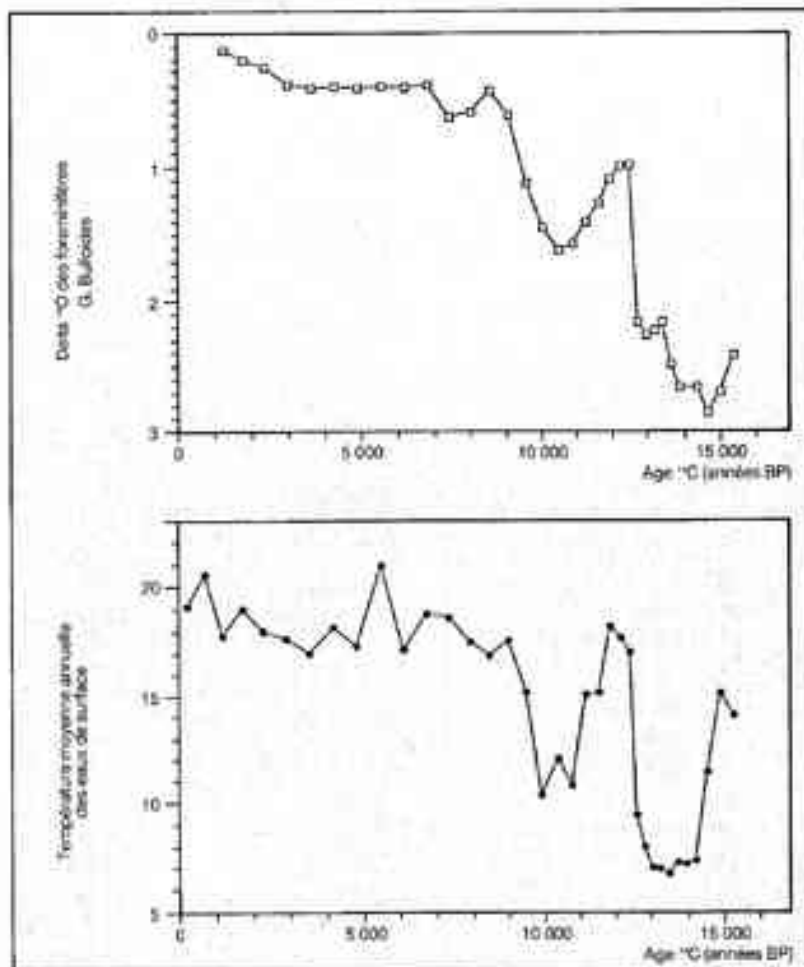
Des variations aussi importantes ont été mises en évidence sur le continent européen. Les pollens que l'on retrouve dans les tourbières et les sédiments lacustres permettent de reconstituer les grands traits de la végétation locale et, par comparaison avec les conditions actuelles, d'estimer le régime des températures et des précipitations en domaine continental. Une reconstitution pour les 140 000 dernières années, obtenue aux Eichets près de Lyon, montre l'existence de variations de température dépassant 12 °C et de précipitations variant entre 300 mm et 900 mm, l'aridité étant associée aux périodes glaciaires. La fin des périodes chaudes et l'entrée dans une glaciation s'accompagnent d'une augmentation de la pluviosité continentale, indispensable pour apporter les neiges qui constitueront les calottes glaciaires. L'analyse des pollens transportés dans les sédiments marins a d'ailleurs montré qu'une phase tempérée humide se maintient sur l'Europe pendant tout le temps où les calottes glaciaires commencent à croître sur le Canada.

■ Jean-Claude Duplessy, directeur de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (LP 2101 CNRS, laboratoire mixte CNRS/CEA), avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.

■ Joël Guiot, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de botanique historique et palynologie, Faculté des sciences Saint Jérôme, avenue de l'Escadrille Normandie-Niémen, 13397 Marseille Cedex.

■ Jean Moyes, professeur à l'université de Bordeaux I, directeur du département de géologie et océanographie (UA 197 CNRS), université de Bordeaux I, 351, cours de la Libération, 33405 Talence Cedex.

■ Nivio Petit-Maire, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie du quaternaire (LP 1201 CNRS), Centre universitaire de Marseille, A. Luminy, case 907, 13288 Marseille Cedex 9.



Variations de la composition isotopique des foraminifères planctoniques et de la température des eaux de surface au large du Portugal durant la dernière déglaciation. La fonte des glaces commence antérieurement à 14 000 ans dans un contexte climatique froid. Le premier réchauffement des eaux est tardif et date d'environ 12 500 ans. Il s'accompagne d'une augmentation des températures voisine de dix degrés en quelques siècles seulement, ce qui montre l'extrême rapidité de certains changements climatiques. Un coup de froid, presque aussi brutal, survient vers 10 500 ans et sera suivi, quelques siècles plus tard, par le retour définitif des eaux chaudes.

Les archives glaciaires

Les variations de l'environnement atmosphérique au cours du dernier cycle climatique sont archivées avec une grande précision dans les couches de neige successivement déposées sur les calottes glaciaires.

■ Claude Lorius

Parmi les différentes sources d'information qui permettent de reconstituer les climats passés, les archives glaciaires occupent une place

privilegiée puisqu'elles donnent accès à la fois à des paramètres physiques du climat et à des données chimiques caractérisant l'atmosphère. Ainsi, l'abondance relative des isotopes lourds (deutérium et oxygène 18) dans les

molécules H₂O constitutives de la glace est un indicateur de température de l'atmosphère au moment où s'est formée la précipitation, alors que l'analyse des différentes impuretés présentes dans les couches de neige permet de caractériser la charge de l'atmosphère en aérosols d'origine naturelle ou liée à l'activité humaine. De plus, des échantillons d'air sont directement emprisonnés dans la glace sous forme de bulles.

Des difficultés techniques et logistiques font que seuls quelques carotages profonds ont été réalisés dans les calottes polaires (Antarctique et Groën-

land). Parmi eux, celui réalisé à la station de Vostok, sur plus de 2 200 mètres de profondeur (Fig. 1) permet de décrire les variations de l'environnement atmosphérique au cours du dernier cycle climatique (150 000 ans).

Le dernier cycle climatique

L'analyse des impuretés solubles et insolubles contenues dans la glace a conduit à des résultats surprenants concernant la charge de l'atmosphère en aérosols. Durant les minima glaciaires on observe, par rapport aux conditions interglaciaires, des concentrations en aérosols marins et en poussières d'origine continentale beaucoup plus élevées, respectivement de 5 et 30 fois. Ces trois fortes teneurs ont été interprétées comme liées à une intensification des sources et du transport atmosphérique méridien, à l'existence de zones arides plus étendues sur les continents voisins de l'Antarctique et à la mise à nu des plateaux continentaux provoquée par une baisse importante (plus de 100 m) du niveau des mers. La détermination des différentes sources des sulfates atmosphériques suggère un apport marin d'origine biogénique pouvant traduire une variation de productivité liée au climat et montre qu'il n'existe pas de corrélation entre variations climatiques et concentrations en aérosols d'origine volcanique. Mais les résultats les plus importants portent sur la

très bonne corrélation entre variations de température et concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre, CO_2 et CH_4 . L'enregistrement direct des teneurs en CO_2 sur l'ensemble du dernier cycle climatique montre une augmentation de 40 % entre minima glaciaires et maxima interglaciaires. Pour CH_4 , les teneurs varient d'un facteur 2. Pour la première fois on met ainsi en évidence l'étroite interaction qui existe entre cycles biogéochimiques et variations climatiques.

Environnement atmosphérique et paléoclimats

L'explication d'un forçage astronomique, lié aux caractéristiques des mouvements de la Terre autour du Soleil, pour rendre compte de la succession des cycles glaciaire-interglaciaire a reçu un support certain avec la mise en évidence dans les séries paléoclimatiques, y compris celle de Vostok, de périodes caractéristiques de ce mouvement. On considère généralement que ce forçage astronomique est amplifié par le développement et la disparition de grandes calottes glaciaires sur les continents de l'Hémisphère Nord.

Les résultats de l'analyse de la carotte de Vostok, obtenus depuis moins d'un an, apportent dans ce domaine un éclairage nouveau. Tout d'abord en mon-

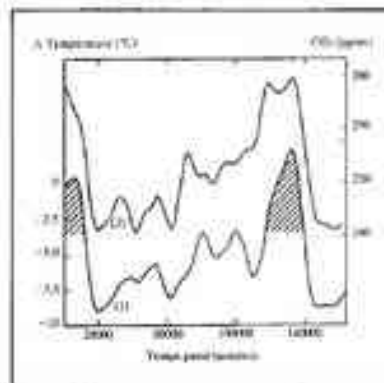


Fig. 2. Variations du climat et de l'environnement atmosphérique déduites de l'étude de la carotte de Vostok (Antarctique) au cours du dernier cycle climatique (150 000 ans).

(1) température de l'atmosphère obtenue à partir de l'analyse isotopique de la glace, il faut remonter à plus de 100 000 ans dans le temps pour retrouver les conditions interglaciaires que nous connaissons actuellement. La période glaciaire est marquée par trois minima de température séparés par deux interstades un peu moins froids. En Antarctique, l'importance des précipitations est directement liée à la température, ce qui permet d'évaluer un taux de précipitations environ deux fois plus faible qu'actuellement durant les minima glaciaires. C'est aussi ce qu'indique la mesure des concentrations de la glace en ^{18}O .
(2) concentration de l'atmosphère en CO_2 obtenue par l'analyse des bulles contenues dans la glace.



Fig. 1. Carottage en Antarctique. Les forages profonds dans la glace posent des problèmes spécifiques, il faut utiliser un fluide pour éviter la fermeture du trou et contrôler de nombreux paramètres à distance. Une campagne nécessite le transport de dizaines de tonnes à des centaines de kilomètres des stations d'appui côtières, dans un milieu particulièrement inhospitalier. À la station Vostok, située à 3 500 m d'altitude, la température moyenne annuelle est de -56°C .

trant la très grande variabilité naturelle des caractéristiques chimiques de notre atmosphère et en mettant en évidence le concept d'une Terre dont l'environnement, au sens large du terme, résulte d'un ensemble complexe d'interactions physiques, chimiques et biologiques. Ensuite en suggérant que les variations de composition de l'atmosphère, quelles qu'en soient les causes, ont pu contribuer de façon significative à l'amplitude des variations climatiques glaciaire-interglaciaire. L'évaluation d'une telle contribution est importante pour estimer l'impact futur des activités humaines.

■ Claude Lorius, directeur de recherche au CNRS, responsable du programme « Paléoclimatique hautes latitudes », Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LP 5151 CNRS), BP 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

Les catastrophes naturelles

Explosion démographique, planification environnementale inexistante, déforestation inconsidérée : autant de facteurs susceptibles d'accroître l'impact humain des catastrophes naturelles.

1990 François Ramade

Les dernières décennies ont été marquées par un accroissement spectaculaire et continu de la fréquence des catastrophes naturelles ayant un impact à la fois direct (mortalité) et indirect (dommages économiques, destruction de ressources naturelles) sur les populations humaines. L'éruption du Nevado del Ruiz (1985), les tremblements de terre de Mexico (1985) et d'Arménie (1988), les inondations récurrentes du Bangla Desh ou les sécheresses d'Amérique du Nord et de Chine en 1988 en fournissent la preuve.

En réalité, la fréquence absolue des catastrophes « géophysiques » (sismicité, volcanisme, raz de marée) ou climatiques, n'a pas augmenté au cours de la période récente, seul leur impact humain s'est accru. Cela tient à deux raisons : l'explosion démographique du Tiers-Monde et l'absence de planification environnementale dans le développement économique des pays industrialisés. En conséquence, on a assisté à l'extension d'immenses cités parfois construites sur des failles sismiquement actives, que ce soit en Californie (Los Angeles) ou dans les faubourgs populaires de Mexico ! De même, certaines populations démunies des Andes, d'In-

donésie ou des Philippines ont été amenées à s'installer dans des zones géologiquement dangereuses, voire même à défricher les pentes de volcans actifs.

La déforestation inconsidérée est également la cause première de l'accroissement des catastrophes réputées « naturelles » comme les avalanches, les glissements de terrain ou les inondations. Ainsi en est-il des inondations catastrophiques du Bangla Desh en septembre 1988 qui résultent non pas du manque de barrages et d'aménagements mais de la déforestation forcée infligée aux bassins versants du Gange et du Brahmapoutre. Couvert de forêts depuis son piémont jusqu'à la limite inférieure de la zone alpine au début des années 50, l'Himalaya a depuis été totalement déboisé jusqu'à 2 000 m d'altitude et c'est seulement à partir de 3 000 m que s'observe aujourd'hui une couverture forestière dans ces montagnes !

Il est inutile de rappeler le rôle protecteur joué par la forêt en tant que barrière dans les zones avalancheuses ou dans la fixation des terrains meubles en forte pente. Ainsi, la coupe de forêts de montagne a joué un rôle déterminant dans la genèse de l'avalanche qui détruisit la ville de Yeongay au Pérou en 1962, provoquant la mort de plus de 20 000 personnes.



La caldeira du volcan Batur et le Mont Agung à Bali. Plusieurs villages se sont installés dans la caldeira de ce volcan actif par suite de la quête incessante de terres cultivables dans cette île peuplée par plus de 700 habitants au km². Qu'advient-il lorsque se produira une puissante éruption comparable à celle de 1962 ? (Cliché F. Ramade).

Comment prévenir les catastrophes « naturelles » ?

En sus de la mise en œuvre urgente de plans d'action destinés à protéger les populations vivant dans les zones à risque, cela implique aussi la réponse à un important besoin en recherche fondamentale et appliquée dans ce secteur.



La déforestation constitue une cause importante de catastrophes réputées à tort « naturelles ». Cette photographie aérienne montre la forêt tropicale de Bornéo en train d'être ravagée par le plus grand incendie de forêt jamais observé de mémoire d'homme. Il a détruit, entre juillet 1982 et mai 1983, pour la seule partie orientale de Kalimantan (partie indonésienne de l'île de Bornéo) une surface équivalente à celle de la Suisse soit quelque 40 000 km². (Cliché E. Dutrieux).

Faut-il rappeler combien l'on est encore démuné dans le domaine de la prévision sismique ? Si la science de la volcanologie est plus avancée, il n'en reste pas moins qu'un substantiel effort de recherche et de développement reste à faire afin de mettre en place un réseau mondial de surveillance.

Les sciences écologiques ont également un rôle déterminant à jouer dans la prévision des catastrophes naturelles. Il s'agit certes d'appliquer les modèles écologiques à l'aménagement de l'espace et de développer la planification environnementale tant en zone urbaine que rurale. Mais surtout, il devient essentiel de mettre en œuvre une stratégie mondiale pour l'utilisation rationnelle et la conservation des ressources de la biosphère.

Cela constitue l'un des enjeux scientifiques majeurs en cette fin de siècle car il devient chaque jour plus évident qu'en l'absence de conservation de la nature et de ses ressources, il n'y aurait pas pour l'humanité de développement durable.

1990 François Ramade, professeur à l'université Paris-Sud, directeur du Laboratoire de zoologie et d'écologie de l'université Paris-Sud, responsable de l'unité Entomologie des pesticides (URA 20 CNRS), université Paris-Sud, bâtiment 442, 91405 Orsay Cedex.

L'HOMME AGIT SUR L'ENVIRONNEMENT

**Atmosphère, continents, océans : par ses activités,
l'homme marque la Terre, laissant des traces dont il importe
de mesurer l'importance et d'évaluer les conséquences.**



"Trump Tower" sur la Cinquième avenue à New York. (Cliché J. Copreaux).

La pollution diffuse

L'augmentation croissante de molécules organiques de synthèse pose d'énormes problèmes écotoxicologiques. La disparition d'espèces vivantes ou l'apparition de déséquilibres au niveau des chaînes trophiques en sont les conséquences immédiates.

■ François Ramade

Les trois dernières décennies ont été marquées par un accroissement considérable de la pollution diffuse de l'environnement par une multitude de composés organiques persistants.

L'industrie chimique moderne élabore en effet un nombre croissant de molécules de synthèse dont la plupart sont commercialisées à grande échelle et ce, sans avoir été préalablement l'objet d'une évaluation de leur impact

écotoxicologique potentiel. En 1987, seulement 25 % des quelque 70 000 molécules organiques de fabrication industrielle ont été testés.

Les différentes familles chimiques présentent une importance variée dans la pollution de la biosphère. Parmi elles, les composés organohalogénés jouent un rôle majeur à la fois par l'importance des tonnages produits, la diversité des substances synthétisées et leur forte toxicité.

Une répartition inquiétante

La présence des composés organohalogénés a été notée dans l'ensemble des communautés vivantes propres aux divers écosystèmes terrestres et marins et cela même dans les zones les plus reculées de la biosphère, telles les zones benthiques profondes qui bordent le talus continental antarctique.

De nombreuses molécules organochlorées soulèvent de redoutables problèmes écotoxicologiques par suite de leur stabilité chimique et d'une impor-

tante toxicité à long terme. En conséquence, elles peuvent subir une forte bioamplification dans les réseaux trophiques. A titre d'exemple, leur bioamplification dans les biocénoses terrestres a soulevé d'importants problèmes d'hygiène alimentaire. Au début des années 80, dans de nombreux pays, les lipides contenus dans le lait maternel renfermaient des concentrations en DDT ou en PCB (polychlorobiphényle) supérieures à la concentration maximale admissible par l'OMS dans l'alimentation humaine. De ce fait, en application de cette norme, le lait de femme, s'il n'avait été que du simple lait de vache, aurait été interdit de vente !

Autre conséquence écotoxicologique de la contamination par les composés organochlorés, diverses espèces prédatrices de mammifères et d'oiseaux ont vu leurs populations s'effondrer, voire être conduites aux frontières de l'extinction, au cours de la période 1960-1980. Tel fut le cas des bélugas du golfe du Saint-Laurent stérilisés par ces substances.

Bien que le déclin de certaines de ces espèces ait été enrayé par l'interdiction des insecticides organochlorés et des PCB, d'autres menaces sont apparues, liées à l'ubiquité des dioxines. En effet, celles-ci se rencontrent dans nombre de biocénoses, tant en Europe que sur le continent américain où elles contaminent divers poissons des grands lacs. Plus récemment, un nouveau type de contaminants, les chlorodibenzofurans, a été découvert dans l'organisme de cétacés capturés dans des zones reculées de l'océan mondial.

Que conclure ? Tout d'abord qu'une révision déchirante s'impose quant aux divers types de composés organochlorés. Les usages dispersifs de composés organiques persistants devraient être systématiquement interdits, le recyclage et la destruction des produits usagés rendus obligatoires en milieu industriel. En outre, un effort doit être réalisé en ce qui concerne la surveillance permanente de l'environnement et la mise au point de nouvelles méthodes d'évaluation *in situ* afin d'estimer de façon réaliste l'impact écologique potentiel des nouveaux produits chimiques. En effet, les méthodes actuelles fondées sur des tests monospécifiques ou des « chaînes alimentaires » artificielles sont tellement éloignées de la réalité des écosystèmes que leur prédictibilité est des plus discutables.



Ce lac du comté de Catlin dans l'Etat de New York, à l'image d'innombrables autres étendues d'eau situées dans les régions les plus industrialisées d'Amérique du Nord, présente une telle contamination par des composés organiques persistants (insecticides organochlorés et PCB) que la pêche des poissons y vivant est uniquement autorisée à titre récréatif mais leur consommation interdite par l'administration responsable de l'hygiène publique. (Cliché F. Ramade).

■ François Ramade, professeur à l'université Paris-Sud, directeur du Laboratoire de zoologie et d'écologie de l'université Paris-Sud, responsable de l'unité Ecotoxicologie des pesticides (URA 20 CNRS), université Paris-Sud, bâtiment 442, 91405 Orsay Cedex.

Les métaux dans l'environnement

Hors du milieu industriel, les effets des métaux sur la santé sont encore mal estimés, sauf en ce qui concerne quelques exemples d'intoxication à travers les sources alimentaires.

■ Claude Amiard-Triquet
et Jean-Claude Amiard

Les métaux sont naturellement présents dans la croûte terrestre. Des phénomènes naturels (érosion, volcanisme...) les disséminent dans tous les milieux. Par ses activités, l'homme modifie leurs cycles biogéochimiques en faisant varier leurs flux naturels entre les compartiments et en transformant leur forme physico-chimique.

Concentrés dans les zones fortement urbanisées et industrialisées, les métaux sont également dispersés à l'échelle mondiale, conduisant à une pollution diffuse se traduisant, par exemple, par la présence de plomb dans les glaces arctiques et l'existence de niveaux élevés de mercure et de cadmium chez des oiseaux de mer pélagiques de l'océan Antarctique ou chez des mammifères marins de l'Atlantique Nord.

La relation entre la concentration d'un métal donné dans un organisme et son niveau dans le milieu, très variable, est fonction de sa forme physico-chimique dans le milieu physique ou la nourriture qui conditionne sa biodisponibilité (ce qui explique le développement des recherches de spéciation chimique) et des caractéristiques de métabolisation propre à chaque espèce ou groupe taxonomique. Fréquemment les organismes les plus évolués sont les meilleurs régulateurs, et les métaux essentiels, indispensables à la vie mais qui peuvent devenir toxiques à forte dose, tels que le zinc et le cuivre, sont mieux régulés que les métaux non essentiels, spécialement le mercure.

Les effets sur les animaux

Certains effets néfastes des métaux sur les organismes, les populations et les écosystèmes ont été mis en évidence en milieu expérimental à des concentrations susceptibles d'être rencontrées dans les environnements pollués mais, *in situ*, il est rare que de tels effets puissent être attribués avec certitude aux seuls métaux. La variabilité naturelle, très élevée, de la structure des populations et des écosystèmes masque géné-

ralement les perturbations. Quelques exceptions notables peuvent être citées, comme les effets toxiques du tributyl-étain des peintures anti-salissures sur l'huître notamment, et les mortalités importantes de canards attribuées, aux Etats-Unis, à l'intoxication par les plombs de chasse. Une vaste étude est actuellement lancée pour examiner les taux d'intoxication par le plomb de la faune avienne de réserves naturelles européennes.

L'extrapolation des données toxicologiques expérimentales aux conditions naturelles est délicate, car certaines espèces sont susceptibles de détoxifier les métaux et même, dans quelques cas, d'acquiescer une adaptation au milieu pollué, tandis que les propriétés des métaux peuvent être exaltées ou limitées par les interactions entre polluants et avec divers facteurs naturels. Des recherches en cours sur les bases biochimiques de la détoxification, sur la résistance aux métaux et sur les phénomènes de synergie et d'antagonisme entre métaux devraient permettre d'améliorer notre compréhension des régulations intervenant *in situ*.

Les effets sur l'homme

Les effets des métaux sur la santé humaine sont bien répertoriés en milieu

industriel, mais des niveaux plus faibles de métaux dans l'atmosphère urbaine ou l'alimentation constituent un risque mal estimé. Toutefois, il est pratiquement avéré que le plomb lié aux poussières peut exercer des effets néfastes sur la croissance, le comportement et les facultés intellectuelles des enfants. En ce qui concerne la source alimentaire, les populations à risque sont celles dont la consommation est peu variée et privilégie un aliment riche en un élément toxique: la maladie de Minamata a atteint des pêcheurs se nourrissant de poissons contaminés par le mercure et la maladie Itai-Itai, des Japonais consommateurs de riz contaminé par le cadmium.

Ces accidents ont focalisé l'attention sur les risques d'amplification biologique dans les chaînes alimentaires, mais seul le mercure, et plus particulièrement le méthyl-mercure, semble effectivement donner lieu à un tel phénomène.

■ Claude Amiard-Triquet, chargée de recherche au CNRS, Service d'écotoxicologie de l'université de Nantes.

■ Jean-Claude Amiard, directeur de recherche au CNRS, responsable du Service d'écotoxicologie de l'université de Nantes, Faculté des Sciences pharmaceutiques, 1, rue Gaston Veil, 44035 Nantes Cedex.



Globicéphale noir évoluant dans un fjord des îles Féroé où cette espèce donne lieu à des chasses traditionnelles.

Il a été montré que les concentrations dans le foie pouvaient atteindre assez fréquemment quelques centaines de mg de mercure par kg de tissu et une centaine de mg de cadmium par kg, les valeurs moyennes étant (sur 132 individus appartenant à cinq troupeaux) d'une soixantaine de mg/kg. La consommation de viande de globicéphale par la population féroéenne entraîne un dépassement des doses hebdomadaires tolérables temporaires conseillées par l'OMS pour ces deux métaux. (Cliché P. Jean).

Physico-chimie de l'atmosphère

Si l'on excepte quelques bactéries, le premier besoin de tous les êtres vivants est de respirer. Nous sommes bien adaptés à l'air qui nous entoure composé d'azote (78 %), d'oxygène (21 %), et d'un peu d'argon (1 %).

Mais il se trouve que les caractéristiques climatiques ne dépendent presque pas de ces trois molécules. Ce qui fait le climat, ce sont deux parties pour mille de vapeur d'eau, un rayonnement solaire parvenant au sol amputé de sa fraction ultraviolette par quelques parties par million d'ozone, c'est enfin la réabsorption du rayonnement infrarouge émis par le sol par des traces de gaz carbonique, de méthane et de quelques au-

tres gaz s'ajoutant à la vapeur d'eau. Les activités humaines ont déjà perturbé ce bel équilibre en introduisant dans l'atmosphère quelques polluants nocifs, et la composition de l'air en gaz en traces et aérosols est déjà bien altérée. On s'interroge sur les conséquences climatiques possibles de ces changements au regard de ce que l'on sait reconstituer des grandes périodes climatiques passées, et en construisant des modèles numériques censés décrire notre avenir.

Ce sont ces problèmes qui seront, parfois succinctement, évoqués dans les pages qui suivent.

Gérard Lambert

Bilan radiatif, nébulosité, climat

La répartition des nuages en altitude et en localisation géographique est intimement liée aux transports d'énergie dans l'atmosphère ; elle joue un rôle majeur dans la variabilité naturelle ou anthropogène de l'environnement.

■ Robert Kandel

Le « système climatique » fonctionne en dégradant et en redistribuant la fraction non réfléchie (70 %, soit 240 Wm^{-2} en moyenne globale) du flux de rayonnement solaire

incident sur notre planète. Ce flux énergétique absorbé dans l'atmosphère et à la surface de la terre est réémis vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. L'activité humaine perturbe ces échanges radiatifs en modifiant la

composition et donc l'opacité de l'atmosphère. Les conséquences climatiques dépendent de la réponse des nuages qui jouent un rôle majeur dans le climat actuel et dans sa variabilité naturelle.

Rétroaction de la nébulosité

Les nuages sont de bons réflecteurs du rayonnement solaire, avec un *albédo* (c'est-à-dire la fraction du rayonnement solaire réfléchi) supérieur à celui des surfaces sous-jacentes, sauf pour la neige. Si un réchauffement climatique, avec intensification du cycle hydrologique, conduit à une augmentation de la nébulosité (en particulier au-dessus des océans ou des forêts), l'effet d'écran de la nébulosité augmentera, diminuant le flux solaire absorbé dans le système. De ce point de vue, l'effet des nuages est stabilisateur, sa rétroaction est négative. Mais, en sens inverse, étant souvent opaques dans l'infrarouge thermique, les nuages bloquent le transfert du rayonnement tellurique vers l'espace. D'où un effet de serre d'autant plus fort que l'altitude du nuage est plus élevée. En faisant le bilan, il y a une compensation partielle entre les deux effets, l'effet d'écran solaire étant dominant en moyenne globale.

La rétroaction des nuages sur le bilan radiatif dépend des changements dans leurs propriétés optiques et dans leur répartition en altitude et en localisation géographique. Ainsi, si un réchauffement climatique conduit à augmenter la nébulosité élevée aux dépens de la nébulosité basse, l'effet net peut être une rétroaction positive, c'est-à-dire un facteur de déstabilisation climatique. D'autres scénarios (ex. : l'augmentation du contenu en eau liquide et donc de l'albédo des nuages, sans changement d'altitude) peuvent conduire à une rétroaction négative. Ces différents processus sont à paramétrer dans les modèles (voir l'article de H. Le Treut).

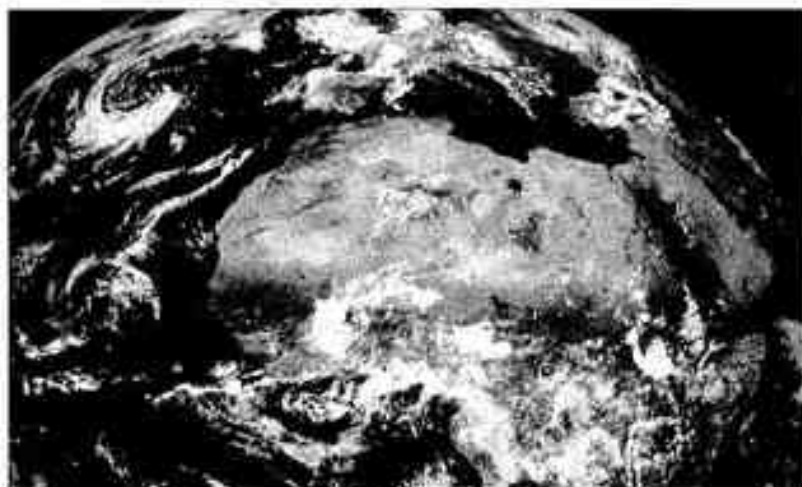


Image Météosat dans le canal visible (12/6/79, 11 h TU). On voit bien que les principaux réflecteurs du flux solaire sont les nuages (albédos allant jusqu'à 75 %) et les déserts du Sahara et d'Arabie (albédos de 25 à 50 %). (ESA).

Observer depuis l'espace

Des satellites météorologiques existent depuis 1960 : à partir de 1983 un effort systématique a été fourni pour produire une climatologie globale de la nébulosité à partir des données fournies (voir figures). Depuis quelques années, les lidars (au sol, aéroportés, bientôt en orbite) permettent de mieux déterminer, à distance, l'altitude des couches nuageuses, et en même temps on continue à améliorer les mesures *in situ* (ballons, avions). Ces progrès dans nos connaissances sur la répartition spatiale et temporelle de la nébulosité et de ses

propriétés optiques sont à relier à l'observation du bilan radiatif.

Le bilan radiatif du système climatique n'est observable que depuis l'espace : il faut une radiométrie précise avec des instruments sensibles sur l'ensemble du spectre. La série de missions Nimbus/ERB de la NASA a confirmé qu'en moyenne annuelle, le bilan radiatif global est équilibré (à 3 Wm^{-2} près) avec un cycle annuel d'amplitude 10 Wm^{-2} correspondant surtout à des stockages de chaleur dans le Pacifique sud. Il y a une grande variabilité des termes du bilan radiatif sur le Pacifique équatorial, les anomalies dues aux variations de la nébulosité pendant l'événement ENSO (El Niño/Oscillation Australe) de 1982-1983 ayant atteint plusieurs dizaines de Wm^{-2} . A présent, on analyse, en France et en RFA comme aux États-Unis, les données sur le bilan radiatif fournies depuis la fin de 1984 par les satellites de la mission ERBE (Earth Radiation Budget Experiment) de la NASA. Pour l'avenir, on prépare l'instrument franco-soviétique ScaRaB (Skanner Radiacionnogo Balansa) qui doit être embarqué sur le satellite soviétique Météor dès 1991. A plus long terme (1997 ?), de grands projets de surveillance du système climatique à partir d'un système international de « plates-formes polaires » sont en cours d'étude.

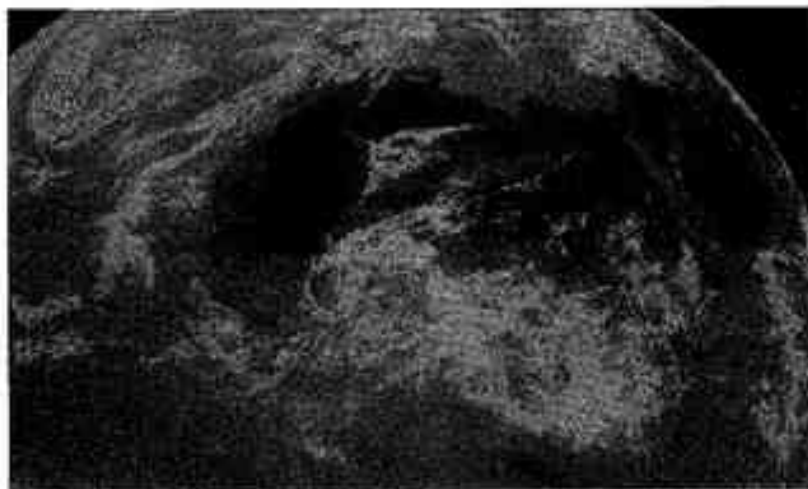


Image fausses couleurs donnant approximativement le flux thermique émis, obtenue à partir des données Météosat dans les canaux infrarouges « fenêtre » (11 μm) et « vapeur d'eau » (6,3 μm) (12/6/79, 11 h TU). L'échelle va de 65 Wm^{-2} (bleu clair, correspondant à des nuages élevés très froids) à près de 400 Wm^{-2} (violet) sur les points les plus chauds du Sahara. (LMD).

Robert Kandel, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de météorologie dynamique (LP 1211 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05 et Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

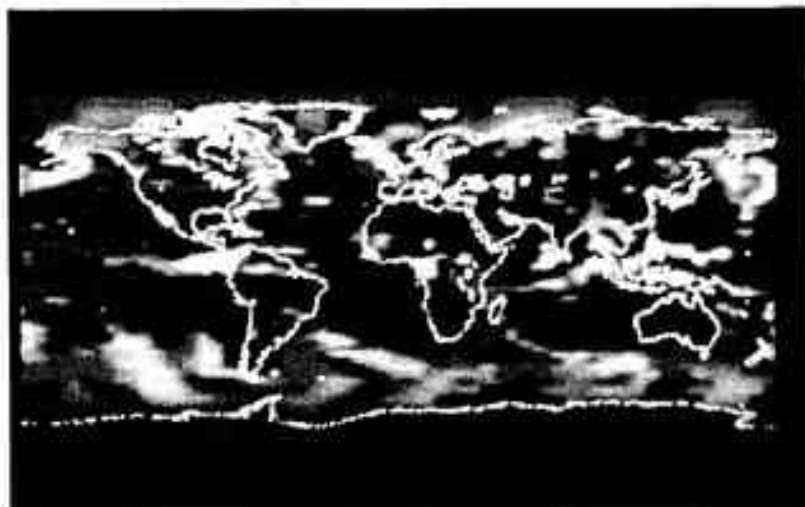
Simuler le climat et ses variations

Les modèles numériques qui permettront de prédire l'évolution du climat devront tenir compte de quelques processus encore mal compris, et surtout inclure l'océan et la glace marine.

Hervé Le Treut

Prédire l'évolution du système climatique en réponse à une perturbation de ses conditions aux limites (déforestation, modification de la composition chimique de l'atmosphère) est une tâche ardue du fait de la nature complexe et interactive de notre environnement.

Le seul espoir de parvenir à maîtriser l'ensemble des phénomènes qui entrent en jeu (voir les exemples décrits par P. Montray et R. Kandel) réside dans le développement de modèles numériques complexes. De tels modèles ont d'abord été mis au point pour l'atmosphère et sont aussi utilisés à des fins de prévision météorologique. Ils intègrent les équations de la circulation atmosphérique sur une grille de discrétisation dont le pas varie de un à quelques degrés. La représentation des échelles non résolues, la détermination des sources de chaleur ou d'humidité, impli-



Champ d'eau liquide nuageuse prédit par le modèle de circulation générale atmosphérique du Laboratoire de météorologie dynamique pour la journée du 12 juin 1979.

quent la représentation paramétrique d'un grand nombre de phénomènes physiques : transferts radiatifs, physique et dynamique des systèmes nuageux, hydrologie des sols et de la végétation, processus dissipatifs.

L'utilisation de ces modèles à des fins climatiques plutôt que météorologiques pose un certain nombre de problèmes : elle implique, en particulier, de bien maîtriser l'équilibre à long terme entre les sources de chaleur et la dynamique, ce qui signifie un effort de paramétrisation plus précis sur des processus encore imparfaitement compris, mais qui jouent un rôle particulièrement important dans l'évolution de l'atmosphère à l'échelle de plusieurs années ou décennies, tels que l'effet des nuages ou celui

de la végétation. Par ailleurs, il est important de comprendre de quelle manière est maintenue la variabilité interne du système climatique et donc, l'occurrence de situations météorologiques extrêmes. Au-delà de ces problèmes, l'un des grands objectifs des années futures est sans aucun doute la mise au point de modèles climatiques incluant l'océan et la glace marine, dans leurs effets thermodynamiques ou dynamiques.

Hervé Le Treut, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de météorologie dynamique (LP 1211 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05 et Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

L'ozone stratosphérique

Le « trou » d'ozone apparu au-dessus du continent antarctique est la première manifestation spectaculaire de l'effet des activités humaines sur les équilibres physico-chimiques globaux de l'atmosphère.

Gérard Mégie et Jean-Pierre Pommerehne

L'une des conséquences de la modification de la composition chimique de l'atmosphère liée aux activités humaines concerne directement les équilibres de la stratosphère et notamment celui de l'ozone O_3 , qui

joue un rôle primordial en tant que principal absorbant du rayonnement solaire ultraviolet entre 80 km d'altitude et le sol. Bien que très minoritaire dans l'atmosphère, l'ozone permet le maintien de la vie animale et végétale en éliminant les courtes longueurs d'onde (240-300 nm) susceptibles de détruire les cellules et d'inhiber la photosynthèse. L'ozone est également responsable

de l'équilibre radiatif et thermique de l'atmosphère et permet notamment l'existence, aux altitudes supérieures (20-50 km), d'une région présentant un gradient positif de température avec l'altitude et donc une grande stabilité vis-à-vis des échanges verticaux (stratosphère).

Espèces « sources » et espèces « puits »

Le comportement des constituants chimiquement actifs qui déterminent l'équilibre de l'ozone est régi par un cycle qui fait intervenir des espèces « sources » (méthane CH_4 , vapeur d'eau H_2O , protoxyde d'azote N_2O , chlorofluorocarbones ou CFC) émises au ni-

veau du sol et inactives chimiquement dans la troposphère. Lorsqu'elles parviennent par diffusion dans la stratosphère, celles-ci sont détruites par le rayonnement solaire intense et conduisent alors à la production d'espèces radicalaires (HO_x , NO_x , ClO_x) qui réagissent rapidement avec l'ozone. Leur élimination de la stratosphère se fait par l'intermédiaire d'espèces « puits », solubles dans l'eau et constituées essentiellement par les formes acides (peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , acide nitrique HNO_3 , acide chlorhydrique HCl). On conçoit alors que l'augmentation des espèces radicalaires, conséquence de celle des constituants sources (CH_4 , N_2O , CFC), puisse entraîner une diminution de la concentration locale d'ozone. Les calculs théoriques montrent ainsi

qu'une augmentation du contenu en équivalent-chlore total de 3,0 ppbv (valeur actuelle dans la stratosphère) à 8 ppbv entraîne une variation de la colonne intégrée d'ozone de $-5,7\%$ correspondant à une diminution maximale de 50 % à 40 km d'altitude. Comme dans cette région de l'atmosphère l'ozone couple étroitement entre eux les processus chimiques, radiatifs et dynamiques, c'est en fait l'équilibre global de la stratosphère qui sera perturbé avec ses conséquences potentielles sur les équilibres climatiques des régions inférieures. Notre connaissance de ces processus a largement progressé au cours de ces dernières années grâce d'une part aux méthodes expérimentales qui allient mesures satellitaires, mesures sur ballon et avion et mesures depuis le sol (voir figures), et d'autre part au développement d'outils de simulation permettant d'intégrer les différents processus de couplage dans des modèles multidimensionnels de l'atmosphère.

Toutefois, à l'heure actuelle et malgré ces efforts expérimentaux et théoriques, seule l'augmentation rapide sous l'effet des activités humaines des constituants sources ou polluants primaires (méthane, N_2O , CFC) a été clairement

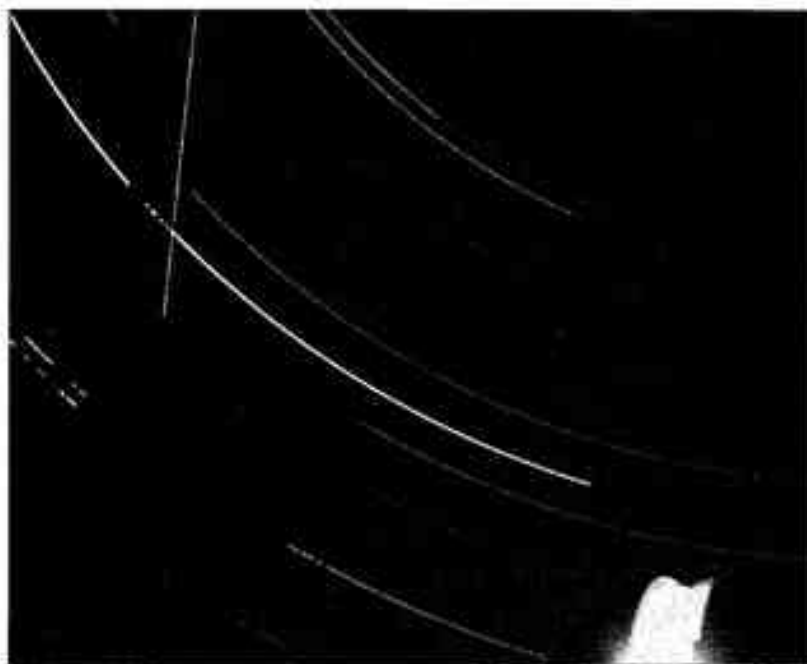
mise en évidence expérimentalement. Si les mesures de la quantité d'ozone effectuées depuis 1960 pour le réseau sol et depuis 1969 pour les observations satellitaires ont permis de détecter des dérives globales de l'ordre de quelques pour cent, la contribution anthropogénique est difficile à distinguer du fait de la variabilité naturelle (cycle solaire, effets climatiques) et des incertitudes expérimentales.

Un équilibre perturbé

Cependant, un phénomène récent, de beaucoup plus grande ampleur, l'apparition d'un « trou d'ozone » au-dessus du continent Antarctique, localisé entre 16 et 23 km d'altitude, semble pour la première fois établir un lien entre les activités humaines et une modification importante des équilibres atmosphériques. Il correspond à une diminution de plus de 50 % de la quantité intégrée d'ozone entre 1979 et 1987 au cours des mois de septembre et d'octobre (fin de l'hiver, début du printemps) au-dessus des régions antarctiques et présente ainsi un caractère local et saisonnier. Plusieurs explications ont été formulées faisant appel à la fois aux



Les nombreuses campagnes d'intercomparaison de capteurs embarqués sur ballon pour l'étude des constituants de l'atmosphère ont conduit à une première sélection des instruments dont la précision et la reproductibilité constitueront un atout essentiel dans les futurs programmes de validation des modèles photochimiques. Le programme français, grâce à la maîtrise acquise par le CNRS pour le lancement des ballons (ici un lâcher de ballon stratosphérique), constitue une contribution importante à ces objectifs. Les campagnes internationales, organisées en France en 1983 et 1985, ont notamment permis d'étudier l'ozone et les composés azotés. (© CNRS, Service d'aéronomie).



Le développement de moyens de télédétection à partir du sol (lidar, spectromètres ultraviolet, visible, infrarouge et micro-ondes) ouvre de nouvelles perspectives dans l'optique d'une surveillance continue de l'ozone, des constituants mineurs et de la structure physique de la stratosphère. La communauté française joue ici un rôle majeur au plan international grâce à la Station d'observation géophysique mise en place à l'Observatoire de Haute-Provence (ici, observations par sondage laser de l'atmosphère moyenne) et au développement d'observations similaires à la base antarctique française de Dumont d'Urville. (© CNRS, OHP).

processus dynamiques et photochimiques. Les mesures les plus récentes montrent que la composition chimique de la stratosphère polaire est très largement perturbée puisque la concentration des espèces chlorées actives est multipliée par 500 alors que celle des espèces azotées est inférieure d'un facteur 10 aux valeurs observées aux latitudes moyennes. Ce déplacement des équilibres chimiques, qui se produit dans des conditions extrêmes de température (-90°C), serait dû notamment à la présence de nuages de très haute altitude (20 km) constitués de cristaux de glace et d'acides nitrique et chlorhydrique dessous; connus sous le nom de nuages stratosphériques polaires. Mais de nombreuses incertitudes subsistent encore dans notre compréhension de ces processus et seule la responsabilité des constituants chlorés d'origine anthropique peut aujourd'hui être considérée comme acquise. Le fait que la première manifestation spectaculaire de l'effet des activités humaines sur les équilibres physicochimiques de l'atmosphère se soit produite dans une région *a priori* protégée des émissions anthropiques, démontre parfaitement d'une part la nature globale des atteintes de l'homme à l'environnement, d'autre part les limites actuelles de notre compréhension des interactions complexes entre l'atmosphère, les océans et la biosphère.

L'étude de l'atmosphère moyenne (10-80 km) est donc aujourd'hui étroitement liée au problème de l'équilibre de la couche d'ozone et de son éventuelle modification sous l'influence des activités humaines industrielles et agricoles. La mise en évidence d'une telle évolution implique un effort accru de recherche afin de pouvoir disposer d'un ensemble d'observations précises à des échelles de temps et d'espace très inférieures à celles des tendances envisagées, de façon à pouvoir extraire la variabilité naturelle. C'est tout l'enjeu des grandes expériences de la prochaine décennie, telle que l'expérience UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) en 1991 ou le programme des plates-formes polaires à partir de 1996, auxquels la communauté française participe très activement.

■ Gérard Mégie, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, directeur adjoint du Service d'aéronomie (LP 3501 CNRS), université Paris VI, tour 15, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

■ Jean-Pierre Pommerehne, chargé de recherche au CNRS, Service d'aéronomie (LP 3501 CNRS), BP 3, 91371 Verrières-le-Buisson.

Les ultraviolets et la vie

La vie s'est développée en présence du rayonnement solaire. Le rôle fondamental pour la biosphère des radiations appartenant à la partie infrarouge et visible du spectre solaire est notoire. Cette notoriété n'était pas aussi marquée pour les radiations ultraviolettes avant que le problème de l'ozone atmosphérique les porte à l'attention du grand public, bien que l'un de nous ait établi dès 1935 les premières relations quantitatives entre l'ozone atmosphérique et l'intensité de l'action du rayonnement UV solaire au niveau du sol sur la peau humaine.

L'importance des variations de la couche d'ozone atmosphérique pour la biosphère provient d'une coïncidence : les radiations solaires les plus absorbées par les acides nucléiques et par les protéines, et de ce fait les plus biologiquement actives, sont précisément celles de l'extrémité ultraviolette du spectre solaire au niveau du sol les plus influencées par les variations de l'ozone.

De nombreuses études ont été publiées depuis les années soixante-dix à propos de l'évaluation des conséquences biologiques d'une diminution de l'ozone de quelques pour cent, essentiellement l'intensification d'effets tels que l'effet abiotique et mutagène sur les microorganismes, l'effet inhibiteur de la photosynthèse, l'effet érythémal et cancérogène chez l'homme... Certaines de ces conséquences peuvent être considérées comme nocives dans une situation impliquant l'ensemble de la biosphère. En revanche, d'autres effets tels que l'intensification de la synthèse de vitamine D dans la

peau peuvent être considérés comme bénéfiques pour certaines populations.

En ce qui concerne l'effet le plus souvent évoqué chez l'homme, l'effet érythémal (« coup de soleil »), généralement considéré comme sans gravité, est cependant révélateur des lésions de l'épiderme. L'effet cancérogène paraît répondre à un spectre d'action voisin de celui de l'érythème et il existe une corrélation entre l'importance de l'exposition au rayonnement UV et l'incidence des cancers de la peau. Pour des latitudes moyennes, des modèles raisonnables permettent d'estimer qu'une diminution de l'ozone de 5 % devrait entraîner un accroissement de la dose cancérogène de l'ordre de 10 %, et en conséquence une augmentation de la morbidité par cancers cutanés de l'ordre de 10 à 30 %. Cette large incertitude est liée à la complexité des phénomènes considérés et aux difficultés de modélisation. Remarquons que l'effet le plus important peut-être est celui qui pourrait conduire à la disparition des micro-organismes à l'origine de la chaîne alimentaire. On manque cependant de données sur l'équilibre de ces populations et les conséquences réelles d'une diminution modérée de l'ozone.

■ Jean Chavaudra, professeur associé à la faculté de Médecine (Paris XI), chef du Service de physique de l'Institut Gustave Roussy, 53, rue Camille Desmoulins, 94805 Villejuif Cedex.

■ Raymond Latarjet, directeur honoraire de l'Institut Curie, membre de l'Académie des Sciences, Institut Curie, 26, rue d'Ulm, 75005 Paris.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide Briand 92195 Moulon Cedex

ELLE TOURNE, ELLE VIT

A partir d'images issues de la télédétection, le film montre les échanges thermiques et hydriques qui se déroulent sur la terre et qui en font un organisme vivant. Des satellites géostationnaires ou à défilement permettent de suivre l'évolution de ces phénomènes.

Réalisateur: Luc ESPIE

Auteurs / Conseillers scientifiques: Gilbert SAINT, Laboratoire d'études et de recherches en télédétection spatiale (LERTS) - CNES-CNRS -

Aline CHABREUIL, CNES - Luc ESPIE

1987, 23 minutes, format: film 16 mm couleur, vidéo 3/4 U-MATIC VHS

Des modèles pour la stratosphère

Les supercalculateurs permettent d'envisager enfin l'élaboration d'un modèle tridimensionnel de la stratosphère et l'interprétation des prochaines mesures satellitaires.

Daniel Cariolle

Une modélisation complète de la stratosphère doit mettre en jeu des processus radiatifs, dynamiques et photochimiques. En effet, les nombreuses réactions qui déterminent en dernière étape les concentrations des espèces minoritaires et de l'ozone dépendent de la température. Celle-ci résulte principalement de l'équilibre entre l'absorption de l'énergie solaire dans les courtes longueurs d'onde par l'ozone, et le refroidissement dû à l'émission du gaz carbonique dans l'infrarouge. De plus, la dynamique de la stratosphère dépend du champ de température et conduit au transport de l'ozone et de toutes les espèces minoritaires.

La traduction mathématique de ces processus physiques conduit à résoudre un système complexe d'équations. La loi de Newton, la loi de conservation de la masse et le premier principe de la thermodynamique traduisent l'application au fluide atmosphérique des lois de la mécanique. L'énergétique du système doit aussi prendre en compte les apports extérieurs de chaleur.

Ce système doit également inclure le calcul de la concentration d'ozone et de toutes les espèces (environ une trentaine) qui jouent un rôle dans les processus photochimiques stratosphériques. On doit donc prendre en compte une équation de continuité par constituant, avec le calcul explicite des vitesses de réactions et des fréquences de photodissociation.

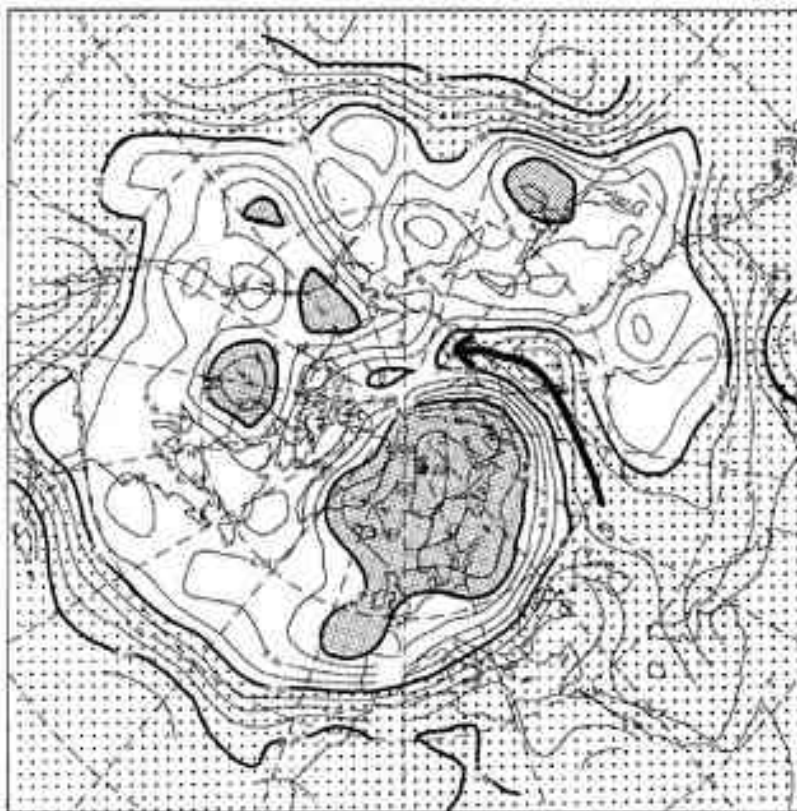
Jusqu'à la fin des années 85, il était inconcevable, faute de moyens de calculs adéquats, de vouloir traiter numériquement l'ensemble des équations de la dynamique et de la photochimie. Afin d'évaluer l'évolution de la couche d'ozone stratosphérique, des simplifications portant notamment sur la représentation du transport des espèces ont été introduites dans les modèles. Cependant, les incertitudes sur ces résultats sont encore assez importantes et, pour les réduire, il importe de bien valider ces modèles par la comparaison des concentrations des espèces mineures stratosphériques calculées et mesurées.

Depuis 1985, la puissance de calcul et la taille mémoire des supercalculateurs a permis d'envisager la modélisation tridimensionnelle des phénomènes. En France, un modèle de circulation générale englobant la troposphère, la stratosphère et la mésosphère est en cours d'élaboration au Centre national de recherches météorologiques en collaboration avec des chercheurs du Service d'aéronomie et du Laboratoire de phy-

sique et chimie de l'environnement. Outre les calculs dynamiques qui sont effectués sur la sphère, ce modèle permet la gestion de l'ozone et d'un nombre important de traceurs. Les prochaines simulations permettront le calcul des variations saisonnières de la distribution du CH_4 , de N_2O et des chlorofluorocarbones, ou de celles des oxydes d'azote NO_2 , NO , NO_3 , N_2O_5 et de HNO_3 . L'objectif: disposer d'un outil performant pour l'interprétation des mesures obtenues lors des prochaines expériences satellitaires, ATLAS, SAGEII et UARS en particulier.

Daniel Cariolle, ingénieur de la Météorologie, chef de l'Equipe de recherche sur l'atmosphère moyenne (Direction de la météorologie nationale et GS 61 CNRS), Centre national de recherches météorologiques, 42, avenue Coriolis, 31057 Toulouse.

RAPPORT DE MELANGE D'OZONE (ppmv)



Projection stéréographique polaire nord du champ d'ozone au niveau 10 hPa lors d'une intégration du modèle tridimensionnel de l'EERM (Etablissement d'études et de recherches météorologiques). La situation correspond à l'apparition d'un « réchauffement soudain » polaire avec l'enroulement de masses d'air équatoriales riches en ozone (matérialisé par la flèche) autour du vortex polaire. L'air polaire à faible contenu en ozone (en gris serré) est rejeté vers le nord de l'Europe ou se fragmente en parcelles qui se diluent dans la région du Pacifique. Une situation très perturbée qui seule une modélisation tridimensionnelle permet de décrire !

Ozone: les stratégies industrielles

Face à la nécessité de réduire l'emploi des chlorofluorocarbones, leurs producteurs industriels ont adopté des stratégies contrastées, allant de la passivité à l'anticipation.

Jean-François Noël
et Sylvie Faucheu

Un consensus s'établit actuellement chez les scientifiques sur la responsabilité de composés chlorés (les chlorofluorocarbones ou CFC) ou bromés (les halons) dans la diminution globale de la couche d'ozone stratosphérique et dans l'apparition d'un « trou » saisonnier de l'ozone antarctique.

Le protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone, adopté le 16 septembre 1987, vise à obtenir en 1999 une réduction de l'emploi des CFC de 50 % par rapport à 1986 et un gel de celui des halons. Déjà, au cours de sa négociation, les intérêts industriels ont été aussi présents que les considérations écologiques. Il en est de même depuis.

Les producteurs de CFC ont adopté des stratégies contrastées.

Les plus grands, tels Du Pont ou ICI, ont anticipé et ont entamé dès 1974 des efforts de recherche et développement sur les substituts. Les autres ont adopté des stratégies d'adaptation, commençant leurs recherches au moment où la réglementation s'avérait inéluctable, ou attendant le protocole pour réagir. Ces réactions vont d'un effort tardif de recherche et développement, au besoin en s'alliant à d'autres groupes, à l'attentisme pur et simple. Des programmes internationaux sur la toxicité des substituts sont néanmoins poursuivis en commun par les plus importantes firmes.

Les substituts envisagés sont de deux types : soit des produits existants mais ne présentant pas les qualités des CFC,

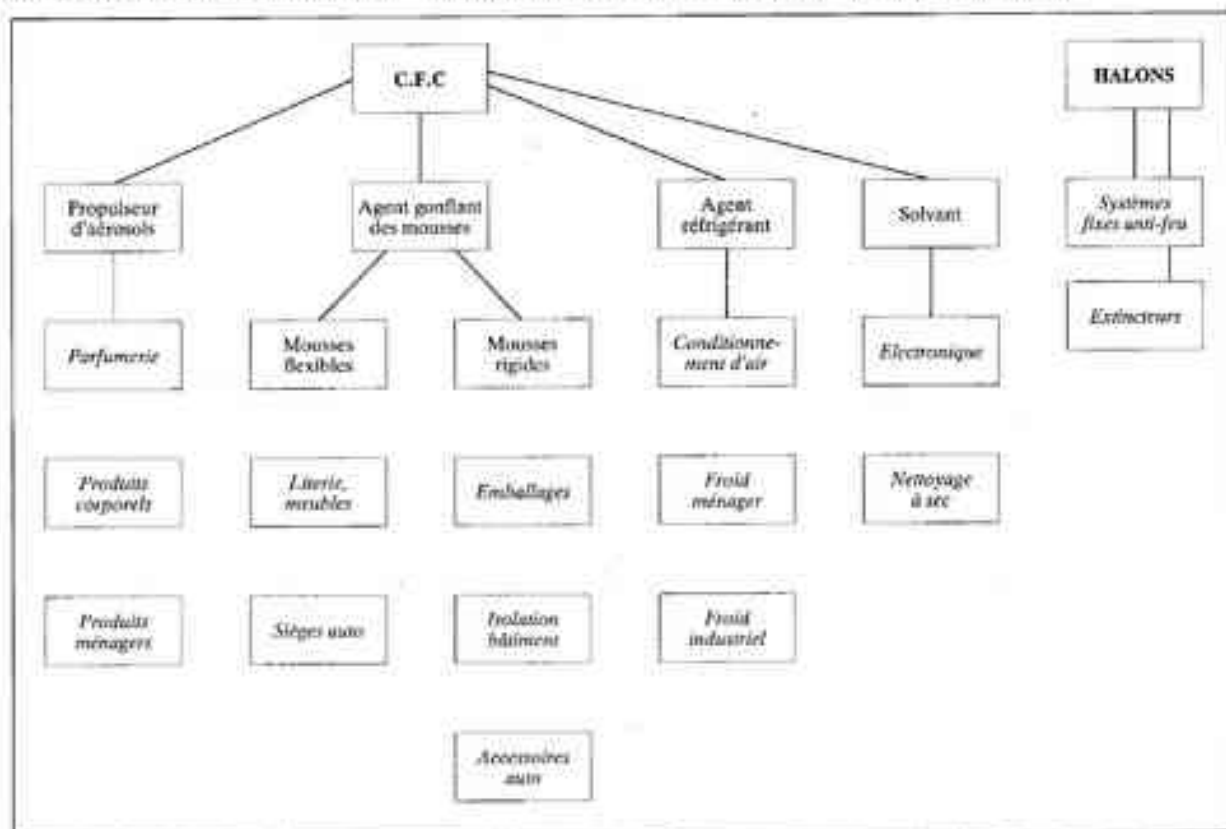
soit de « nouveaux CFC », sans risque pour la couche d'ozone, mais dont le développement s'avère lent et coûteux et qui posent des problèmes toxicologiques.

Les perspectives diffèrent suivant la branche utilisatrice. Si dans les aérosols le recours à des pompes (en parfumerie) ou à des propulseurs conventionnels, semble pouvoir résoudre le problème, dans le froid et dans les mousses, les solutions sont plus variées. En revanche le remplacement du CFC113 dans l'électronique s'avère problématique. De même les halons n'ont pas pour l'instant de substitut.

Si le secteur amont (producteurs) affirme actuellement sa volonté d'appliquer pleinement le protocole, le secteur aval (utilisateurs) est caractérisé, du moins en France, par une grande passivité.

Jean-François Noël, maître-assistant à l'Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Centre économie-espace-environnement (UA 920 CNRS).

Sylvie Faucheu, responsable du département environnement du CNRS, Centre économie-espace-environnement (UA 920 CNRS), université de Paris I, bureau C15 04, Centre Pierre Mendès-France, 90, rue de Tolbiac, 75634 Paris Cedex 13.



Les secteurs utilisateurs de chlorofluorocarbones et de halons.

Le gaz carbonique : questions pour l'avenir

Fait d'observation, l'augmentation du gaz carbonique d'origine anthropique appelle de nombreuses questions : quel est son impact climatique ? comment répond la biosphère ? quelle sera l'évolution future ?

■ Dominique Raynaud

On observe depuis 1958 une augmentation globale de 0,5 % par an de la teneur en CO_2 de l'atmosphère, cette augmentation étant essentiellement d'origine anthropique. Mais, alors que les activités humaines injectent chaque année dans l'atmosphère 20 milliards de tonnes (20 Gt) de CO_2 , soit environ 5 Gt de carbone, les mesures montrent qu'il ne reste que 3,3 Gt de carbone dans l'atmosphère. Ceci implique que le milieu naturel océan-biosphère continentale absorbe 2,2 Gt de carbone par an et constitue ainsi un puits important.

Or, le CO_2 absorbe dans les basses couches de l'atmosphère le rayonnement infra-rouge émis par la surface de la Terre. Une augmentation de la teneur en CO_2 doit ainsi conduire, par effet direct, à un réchauffement de la troposphère et donc à des modifications climatiques. En outre la croissance des végétaux est, elle aussi, fonction de la concentration en CO_2 atmosphérique.

Des efforts croissants de recherche ont donc été entrepris au cours des dix à quinze dernières années dans de nombreux pays pour tenter de répondre aux questions suivantes : peut-on prévoir l'évolution future du CO_2 atmosphérique au cours des décennies à venir ? C'est-à-dire peut-on prédire le flux vers l'atmosphère de CO_2 dû à l'activité humaine (énergies fossiles, cimenteries, modifications de la végétation) et connaître les mécanismes d'échanges du CO_2 de l'atmosphère, d'une part avec l'océan et, d'autre part, avec la biosphère continentale et les sols ? Enfin, quel sera l'impact d'une telle évolution sur le climat et la végétation ?

En ce qui concerne l'impact climatique, la contribution de la recherche française a essentiellement porté sur l'étude de la relation CO_2 -climat au cours du dernier cycle climatique (voir le texte de C. Lorius). Par ailleurs, un effort est entrepris pour participer de façon originale à la modélisation de l'impact possible d'un doublement du CO_2 .

Les paragraphes qui suivent illustrent

quelques aspects de la contribution française à la connaissance du cycle du CO_2 .

Une île modèle

Un réseau de mesures du CO_2 atmosphérique s'est progressivement développé dans les deux hémisphères. La France a pour sa part implanté, depuis 1980, une installation d'enregistrement sur l'île d'Amsterdam au milieu de l'océan Indien, ce qui a permis d'obtenir des résultats originaux.

Les variations saisonnières du CO_2 à l'île d'Amsterdam s'étant révélées particulièrement faibles en raison d'une compensation entre les effets inverses de la biomasse continentale et de l'océan, il y est plus facile qu'ailleurs d'y mesurer le taux moyen d'accroissement du CO_2 . C'est ainsi qu'on a pu signaler le doublement, sur une période d'un an, du taux de croissance du CO_2 (2 au lieu de 1 ppmv par an) lié à l'événement El Niño de 1982-83. Enfin, la comparaison des variations saisonnières sur cette île avec celles relevées dans les stations relativement proches d'Australie et de Nouvelle-Zélande révèle l'existence d'un effet de longitude. Un effort paral-

lèle de modélisation du cycle du carbone est engagé pour simuler les variations observées.

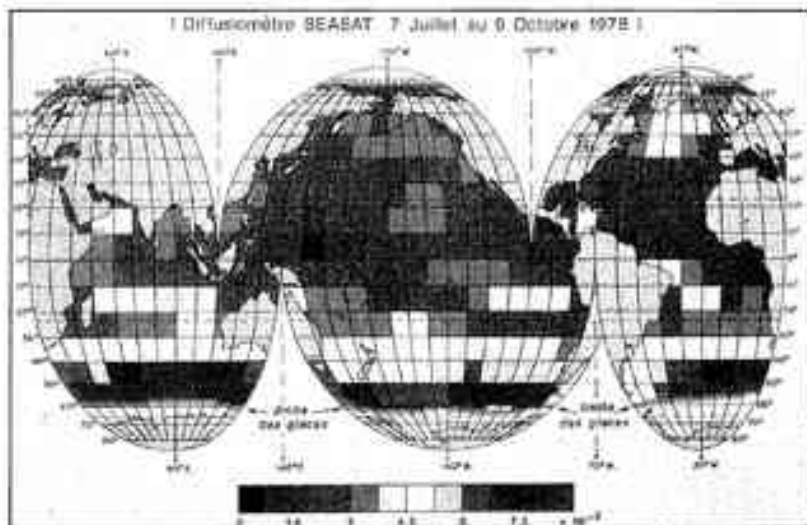
Entre air et mer : des échanges permanents

En absorbant une partie du CO_2 relâché vers l'atmosphère, l'océan joue un rôle modérateur vis-à-vis de son augmentation liée à l'activité humaine. Mais quelle quantité de CO_2 peut-il absorber ?

Pour répondre à cette question, une première carte mondiale de la vitesse de transfert du CO_2 entre la mer et l'atmosphère a été établie. Il s'agit de données indirectes obtenues à partir de la vitesse du vent à la surface de la mer (voir figure). Pour déterminer le flux net de CO_2 échangé entre l'océan et l'atmosphère, il faut combiner cette carte à celle du gradient de concentration de CO_2 entre l'air et l'eau. Une telle carte n'est pas actuellement disponible et seule existe une estimation très grossière de sa moyenne annuelle.

On a alors déterminé un ordre de grandeur du flux échangé en combinant la carte de vitesse de transfert citée plus haut à cette estimation du gradient de concentration. C'est ainsi qu'on a calculé une absorption par l'océan de 1,2 Gt de carbone par an soit seulement une fraction des 2,2 Gt absorbées par le système océan-biosphère continentale.

La variabilité spatio-temporelle tant de la vitesse de transfert que du gradient de concentration de CO_2 est très importante, aussi ces premiers résultats doivent-ils être pris comme une estimation. Ainsi des mesures de pénétration du CO_2 atmosphérique dans l'ouest de



Carte mondiale. Coefficient d'échange du gaz carbonique. Diffusiomètre SEASAT, 7 juillet au 9 octobre 1978. (© CNRS-LODYC).

» l'océan Indien comme dans le secteur antarctique correspondant indiquent une très grande variabilité spatio-temporelle du gradient de concentration du CO_2 à l'interface air-mer.

Une biosphère continentale qui répond...

Les échanges de CO_2 entre la biosphère continentale et l'atmosphère sont régulés par la photosynthèse pendant la saison de croissance et par la respiration. Chez les arbres comme

chez les plantes annuelles, un doublement de teneur en CO_2 entraîne une stimulation de production de 20 à 50 %, une diminution de transpiration ainsi qu'une baisse de teneur en éléments minéraux dans la biomasse. Cet accroissement de production est réparti de façon variée selon les espèces. Par exemple, chez le châtaignier, ce sont uniquement les racines qui bénéficient du surplus de carbone conséquence du doublement de la teneur en CO_2 . La croissance de la partie aérienne est plutôt réduite par un arrêt précoce du fonctionnement du

bourgeon terminal. À l'inverse, la croissance aérienne du peuplier est fortement stimulée en raison d'une augmentation spectaculaire de la surface des feuilles. Ces résultats sont à généraliser à d'autres espèces et à l'échelle de l'écosystème.

■ Dominique Raynaud, directeur de recherche au CNRS, responsable de la partie CO_2 du Programme national d'étude de la dynamique du climat, responsable de l'Equipe « climat » du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (UP 05151 CNRS), BP 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

LA POMPE A CO_2

La prairie phytoplanctonique qui occupe la partie supérieure de l'océan, joue le rôle de pompe à CO_2 . Alors que les peuplements végétaux terrestres renferment 560 gigatonnes de carbone contre 3 gigatonnes pour la phytosphère océanique, une activité incomparablement plus importante contrebalance cette disproportion. En effet, la fixation photosynthétique du CO_2 s'effectuerait avec des taux nets comparables dans les deux milieux : 55 gigatonnes/an pour les continents et 40 gigatonnes/an pour l'océan. Cette fixation constitue une « pompe » d'énergie solaire très efficace, dont les consommateurs secondaires profitent tout en régénérant le CO_2 (oxydation, respiration).

Le pompage biologique du CO_2 atmosphérique vers l'océan est de ce fait beaucoup moins efficace puisque le matériel organique est quasi

totalelement utilisé dans la colonne d'eau et par la vie benthique au niveau du sédiment. Toutefois et compte tenu des flux mis en jeu, de faibles dérèglements dans la production primaire océanique peuvent induire des effets non négligeables sur le bilan net (ceci est constaté, par exemple, lors d'événements El Niño).

Cette image satellitaire (capteur « couleur de l'océan » de NIMBUS 7) montre les côtes de Mauritanie depuis le cap Bojador (N) jusqu'au cap Blanc (S) ; la dimension de la scène est 800 × 800 km. À gauche, thermographie obtenue par le canal IR ; la température est codée du bleu sombre (15-5) au rouge (20 °C). À droite est visualisée la teneur en chlorophylle, décroissant du vert (>3 mg/m³) au bleu sombre (<0,3 mg/m³) ; les eaux turbides côtières sont figurées en noir. La terre, à l'est, et le banc de nuages, à

l'ouest, sont en blanc dans les deux images. (Dépouillement et visualisation réalisés au Laboratoire de physique et chimie marines de Villefranche-sur-Mer).

Les alizés induisent une remontée d'eaux froides le long de la côte. Une fois exposées au rayonnement solaire, ces eaux riches en éléments nutritifs (régénérés dans les couches profondes) sont le siège d'une intense production primaire, c'est-à-dire d'une production de matière organique à partir du CO_2 dissous, comme en témoignent les fortes teneurs en chlorophylle contenues dans les algues unicellulaires peuplant la couche superficielle éclairée de l'océan.

■ André Morel, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, directeur du Laboratoire de physique et chimie marines (UA 355 CNRS), BP 8, 06230 Villefranche-sur-Mer.



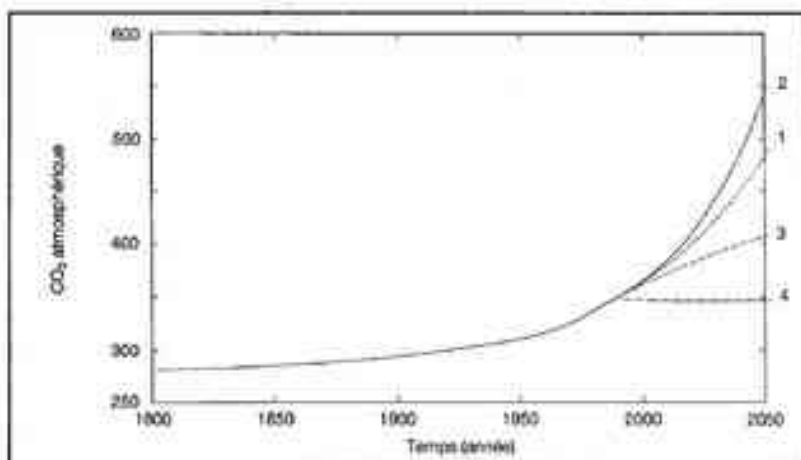
Modéliser le cycle du gaz carbonique

L'impact de l'homme sur le cycle du CO₂ est clair. L'évolution de la perturbation climatique qui risque d'en découler dépendra en premier lieu de la politique énergétique mondiale suivie.

Patrick Monfray

Seule la modélisation du cycle global du carbone peut permettre d'estimer l'évolution future du CO₂ atmosphérique. Toutefois, il faut savoir et dire que le principal responsable de l'évolution future du CO₂ atmosphérique sera la politique énergétique choisie par l'homme : avec ou sans pétrole, gaz, charbon ? La sensibilité aux rejets anthropiques et biogéniques du CO₂ atmosphérique est clairement montrée sur la figure :

- Un doublement des rejets est probable, soit tous les 40 ans (courbe 1), soit tous les 30 ans (courbe 2). Ce dernier scénario conduit à un doublement du CO₂ vers 2050. Au-delà, des phénomènes non-linéaires, non pris en compte ici, apparaissent et peuvent être ca-



Variations du CO₂ atmosphérique entre 1800 et 2050 selon quatre scénarios de rejets anthropiques et biogéniques. Cette étude est basée sur un modèle océanique en 13 boîtes et 20 couches dont la circulation a été calibrée par le carbone 14.

tastrophiques : le réchauffement du climat par effet de serre (du CO₂ notamment) conduit à l'échauffement des océans et à un dégazage en CO₂, mais peut-être aussi à une perturbation de la circulation océanique elle-même et indirectement de toute la biomasse marine, dernier facteur clé de l'équilibre en CO₂ de l'océan.

- Une stabilisation de la consommation du carbone fossile sur l'indice des années 1980, avec une biomasse terrestre neutre, permettrait de limiter l'augmentation du CO₂ (courbe 3).

- Une diminution par un facteur 3 des rejets (courbe 4), seule, pourrait stabiliser le CO₂ : ceci nécessiterait de

passer soit à une production énergétique à 2/3 nucléaire ou solaire (?), soit à la reforestation tous les 30 ans d'une surface égale à celle de l'Australie, soit enfin à une économie systématique de l'énergie... Ces scénarios restant improbables en matière de politique mondiale, il est urgent de savoir quelle perturbation climatique est induite par un doublement ou plus du CO₂ en moins d'un siècle.

Patrick Monfray, chargé de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (L'P 210) CNRS, Laboratoire mixte CNRS/CEA, avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.

Atmosphère et cycles biogéochimiques

Les cycles biogéochimiques naturels ont été considérablement modifiés par les activités humaines. Leur modélisation à des fins prédictives sur le climat devrait voir le jour au cours de la prochaine décennie.

Jacques Fontan
et Patrick Buat-Ménard

L'atmosphère constitue un maillon essentiel des cycles biogéochimiques du soufre, du carbone et de l'azote puisqu'elle représente la principale source d'approvisionnement en ces éléments pour de nombreux écosystèmes terrestres et aquatiques. Mis à part CO₂ et N₂, les différents composés présents sous forme gazeuse et particulaire sont physiquement et chimiquement actifs. Leur abondance naturelle

est en grande partie régulée par des processus biologiques responsables de l'émission dans l'atmosphère de gaz réducteurs. Ces gaz sont oxydés plus ou moins rapidement par des réactions photochimiques contrôlées en grande partie par la présence de radicaux OH, formés principalement par photolyse de l'ozone. Dans la troposphère, la teneur en ozone contrôle ainsi l'abondance de nombreux composés du soufre, du carbone et de l'azote dont les cycles sont de ce fait interdépendants. Certains de ces composés comme les oxydes d'azote, les hydrocarbures, le monoxyde de carbo-

ne interviennent à leur tour dans les réactions chimiques qui, sous l'action du rayonnement solaire, vont produire de l'ozone et des radicaux OH.

Cet équilibre chimique complexe est de plus en plus altéré par les activités humaines et ce, de façon variable dans l'espace et dans le temps. Alors que l'on prévoit une diminution de la couche d'ozone stratosphérique, la concentration de l'ozone dans la troposphère de l'hémisphère Nord a doublé depuis le début du siècle en raison de l'augmentation des émissions d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures dans l'atmosphère. Cette augmentation résulte à la fois des pratiques agricoles et des combustions industrielles. Ainsi, l'utilisation d'engrais accroît l'émission d'oxydes d'azote produits naturellement dans les sols, ►

PHYSICO-CHEMIE DE L'ATMOSPHERE

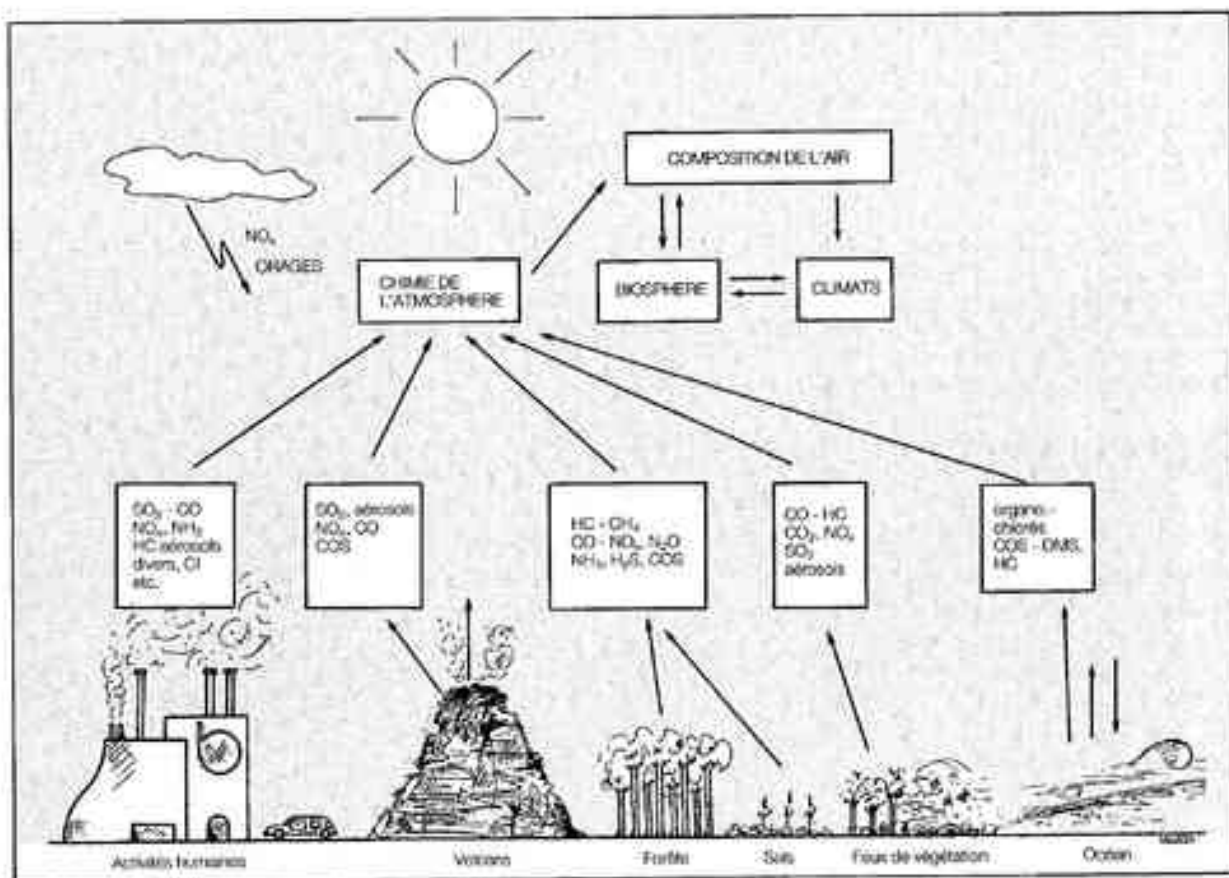
» sous forme de NO et N_2O , lors des processus de nitrification et de dénitrification par des bactéries. Quant au méthane, l'hydrocarbure dont la proportion est la plus importante, sa concentration a plus que doublé depuis le début de l'ère industrielle et augmente actuellement de 1 % par an, au même rythme que la population mondiale. Ceci est en grande partie dû à une intensification des émissions, liées principalement à certaines décompositions anaérobies de la biomasse, en raison de l'extension des cultures inondées (rizières), et à un accroissement du nombre des animaux domestiques (ruminants). Un autre facteur serait la diminution de la concentration des radicaux OH qui détruisent le méthane dans l'atmosphère. Rappelons que ce gaz joue un rôle majeur dans l'atmosphère : outre son influence sur le bilan de l'ozone, il contribue directement à l'effet de serre.

Les sols continentaux et les océans émettent des composés comme le disulfure de carbone, le sulfure de diméthyl,



le sulfure de carbonyl, tandis que les combustions industrielles injectent principalement du dioxyde de soufre dans l'atmosphère. Avec principalement le radical OH , ces composés conduisent à la formation de sulfates et d'acide sulfurique, source de noyaux de condensation dans l'atmosphère, que l'on retrouve sous forme de pluies acides. Le sulfure de carbonyl, peu réactif dans la troposphère, diffuse dans la stratosphère où il contribue, tout

Les sources de composés en traces sont diverses : activités de l'homme, volcanisme, émission des sols et de la végétation, feux de brousse en particulier en région intertropicale, érosion éolienne et marine, sources marines gazeuses, orages. Ces composés réagissent entre eux dans l'atmosphère, sous l'action du rayonnement solaire. La composition de l'air interagit avec la biosphère et les climats de façon complexe.



Mesure à l'aide d'un ballon captif de la concentration d'ozone et des paramètres thermodynamiques de l'atmosphère, au cœur de la forêt tropicale humide à Imbondo au Nord Congo lors de l'expérience DECAFE (Dynamique et chimie de l'atmosphère en forêt équatoriale). Les feux de végétation dans les régions de savane, les émissions naturelles de la forêt entraînent une chimie de l'atmosphère très active avec formation d'oxydants, d'acides. Les précipitations ont un pH moyen de 4,3. L'acidité provient principalement d'acides organiques et d'acide nitrique.

comme le volcanisme explosif, à la formation d'une couche d'aérosols de sulfate vers 20 km d'altitude.

S'il est certain que les activités humaines ont considérablement modifié les cycles biogéochimiques naturels du carbone, de l'azote et du soufre, nous ne sommes pas encore capables d'en prédire les effets avec certitude, principalement en raison de notre méconnaissance de l'intensité des variations naturelles. Nous ne savons pas non plus prédire l'extension spatiale future de

l'acidité atmosphérique (acides nitrique, sulfurique et organiques) car nous ignorons encore les cinétiques de certaines réactions en phase aqueuse. L'effort des recherches actuelles, tant au niveau national qu'international, tend à associer de plus en plus étroitement les approches expérimentales au laboratoire et sur le terrain et la modélisation des systèmes chimiques troposphériques. Ceci devrait permettre, au cours de la prochaine décennie, le développement de modèles prédictifs de

l'évolution de la composition globale de l'atmosphère et de ses conséquences sur les changements du climat.

■ Jacques Fontan, professeur à l'université Paul Sabatier, Laboratoire d'aérodynamique (UA 354 CNRS, Laboratoire mixte CNRS/CEA), 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

■ Patrick Best-Ménard, directeur de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (LP 2101 CNRS, Laboratoire mixte CNRS/CEA), avenue de la Terrance, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.

L'avion de recherche atmosphérique

L'avion de recherche atmosphérique et de télédétection (ARAT) est un moyen de recherche commun à l'Institut national des sciences de l'univers, au Centre national d'études spatiales, à la Météorologie nationale et à l'Institut géographique national qui est propriétaire et maître d'œuvre de l'exploitation de l'avion.

En plus d'une instrumentation

traditionnelle pour les recherches atmosphériques et la télédétection, l'équipement scientifique de l'ARAT comporte deux instruments avancés: le radar imageur ventral VARAN (programme CNES) et le lidar météorologique LEANDRE (programme CNRS-CNES). Il est équipé d'une perche porte-capteurs et d'instruments de mesures de microphysique fixés autour du fuselage. L'ARAT sera

opérationnel en septembre 1989.

■ Patrick Mascart, physicien à l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand, Laboratoire de météorologie physique (URA 679 CNRS), université Blaise Pascal, 12, avenue des Landaux, 63000 Clermont-Ferrand.

■ Michel Raynaud, ingénieur, chef de la Division technique à l'INSU, 77, avenue Denfert Rochereau, 75014 Paris.



L'ARAT (avion Fokker 200) lors de sa sortie de chantier de modification. (Cliché SECA, aérodrôme du Bourget).

Les aérosols atmosphériques

Aux poussières provenant de sources naturelles s'ajoutent, dans l'atmosphère, celles qu'engendre l'activité humaine. Quelles sont-elles exactement, où vont-elles ? Les conséquences d'une migration...

Gilles Bergametti,
Pierre Rognon,
et **Geneviève Coudé-Gaussen**

L'atmosphère n'est pas seulement un mélange gazeux. Outre l'eau des nuages, les particules solides ou liquides en suspension dans l'air représentent une masse de l'ordre du milliard de tonnes. Jusqu'à ces derniers siècles, ces aérosols provenaient uniquement de sources naturelles telles que les embruns marins, les particules provenant des émissions biogéniques gazeuses, l'érosion des sols désertiques et l'activité volcanique. Ils contrôlaient en partie les transferts de matière entre continents et océans, et leur histoire peut être retracée à partir de dépôts loessiques, des sédiments océaniques ou des archives glaciaires. Depuis la révolution industrielle sont apparues de nouvelles émissions d'aérosols dont les caractéristiques physico-chimiques sont notablement différentes de celles des particules naturelles. Ces aérosols sont principalement constitués de carbone, de soufre, de métaux toxiques, voire de composés organiques mutagènes. Actuellement, ces émissions anthropogéniques représentent 20 % environ de la masse des particules émises chaque année à l'échelle globale. Les cycles de certains éléments en traces en ont été fortement affectés. Ainsi, les retombées de plomb d'origine atmosphérique, lequel provient principalement des additifs anti-détonants des carburants, ont perturbé complètement le cycle de cet élément dans les océans.

L'érosion éolienne

Parallèlement, le développement des activités agricoles, lié à la mécanisation, à la pression démographique et à l'intensification des feux de brousse, a notablement accru la surface des sols érodables. La mise en culture intensive a conduit à de nouvelles régions-sources importantes, comme les grandes plaines du Middle-West ou les régions semi-arides soumises à une intense déflation (érosion éolienne) saisonnière, dont les émissions sont difficilement dissociables de celles provenant des zones désertiques.

Dans ces sols, les transferts de particules portent essentiellement sur leur fraction fine, la plus importante en terme de fertilité. Ils se traduisent généralement par un appauvrissement des sols dans les régions de déflation et par un enrichissement en éléments fertilisants dans les zones de retombées, jusqu'en forêt équatoriale. En bordure des déserts, ils peuvent même aboutir à d'importantes modifications minéralogiques et chimiques des formations superficielles, telle la calcification de surface sur des roches siliceuses dans le Sud-marocain ou sur des substrats volcaniques aux Canaries. Des travaux récents montrent également que ces retombées d'aérosols approvisionnent le milieu océanique en éléments nutritifs (comme le fer) présents en quantité limitée et pourraient influencer dans certaines régions marines sur la production primaire.

Dans le milieu atmosphérique, ces aérosols, selon leur concentration et leur taille, affectent le bilan radiatif par leur rôle d'écran vis-à-vis des radiations solaires directes ou indirectes. Il en résulte une modification du gradient thermique entre les basses couches atmosphériques refroidies et les couches moyennes réchauffées, défavorable à la convection et aux précipitations. À l'inverse, les aérosols solides servent de noyaux de condensation et sont donc indispensables à la formation de nuages. Une grande disparité existe en ce qui concerne la répartition géographique des émissions d'aérosols. Ainsi, les zones arides les plus productives et l'essentiel de l'activité industrielle se trouvent concentrés dans l'hémisphère Nord. La faible durée de vie des aérosols atmosphériques (de l'ordre de la semaine), en liaison avec cette hétérogénéité spatiale des sources, empêche une homogénéisation des concentrations d'aérosols à l'échelle globale. Aussi, les conséquences de cette augmentation des émissions d'aérosols ne peuvent être réellement appréciées qu'à travers des approches à caractère régional. Par exemple, l'Atlantique Nord-Ouest constitue un réceptacle privilégié des apports de polluants en provenance d'Amérique du Nord tandis que l'Atlantique Nord Tropical reçoit la majeure partie des émissions en provenance

Programme brouillard

Le brouillard se forme lors de la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère proche du sol sous la forme de fines gouttelettes d'eau liquide. Nuisance importante pour les transports, il est nécessaire d'en établir une bonne prévision quantitative (où ?, quand ?, quelle durée ?), ce qui exige à la fois des recherches à caractère fondamental et des recherches opérationnelles de prévision. Le Groupement scientifique brouillard (CNRS, Météorologie nationale, Région Nord-Pas-de-Calais) a été créé dans ce but. Un modèle, baptisé COBRA, a été développé, et les expériences numériques déjà réalisées ont permis de mettre en évidence les principaux paramètres intervenant sur la formation des brouillards denses : vitesse du vent, taux de refroidissement de l'atmosphère, nombre de noyaux de condensation... Parallèlement, un programme intensif de collecte de données expérimentales (qui seront accessibles sous forme de banque de données) est en cours sur le site expérimental de Camin, près de Lille, véritable observatoire du brouillard. Ce site restera en fonctionnement de manière permanente six mois par an jusqu'en 1991.

Daniel Guédalia, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'aérodynamique (UA 354 CNRS), université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

ce des régions arides et semi-arides d'Afrique.

Gilles Bergametti, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de physico-chimie de l'atmosphère (UA 717 CNRS), université Paris VII, 2, place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05.

Pierre Rognon, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, directeur du Laboratoire de paléoclimats et paléoenvironnements en régions arides (UA 722 CNRS), Département de géodynamique des milieux continentaux, université Paris VI, tour 16, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Geneviève Coudé-Gaussen, maître de conférences à l'université de Picardie (UA 722 CNRS), université de Picardie, rue Soliman Mahlangi, 80025 Amiens.

Cycle de l'eau et climat

L'évaporation des sols et la transpiration des plantes modulent le cycle de l'eau et interagissent avec les phénomènes climatiques.

Jean-Claude André

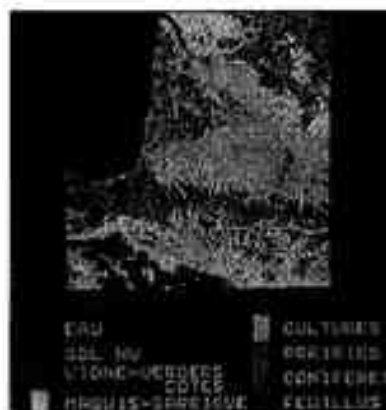
L'évaporation au-dessus des surfaces continentales est un maillon important du cycle de l'eau : 15 % de l'eau transitant entre la surface et l'atmosphère proviennent de l'évaporation des sols et de la transpiration de la végétation. Les 10 000 gigatonnes d'eau par heure que cela représente contrôlent les réserves en eau et l'alimentation de la biosphère terrestre. La caractérisation fine de l'interface sol-atmosphère s'impose donc à la fois pour les météo-climatologues, les hydrologues et les agronomes.

Pendant un an, le Sud-Ouest de la France a été le siège d'une vaste opération expérimentale menée en coopération internationale (USA, Grande-Bretagne et France). La mesure des précipitations par une centaine de postes et du stockage en eau du sol superficiel par un réseau de quatorze stations de son-

sation hydrologique calée sur une cinquantaine de points de mesure du débit des fleuves et rivières ont été réalisées. Ces données ont permis de déterminer le bilan en eau de cette zone d'un million d'hectares. En outre, des mesures atmosphériques directes, réalisées par un réseau d'une douzaine de stations automatiques et par un avion équipé pour la mesure des flux turbulents, ont rendu possible la quantification des variations fines de l'évapotranspiration.

Le flux d'évapotranspiration

Maintenant, se trouve disponible la banque de données la plus complète jamais rassemblée sur la variation spatio-temporelle de l'évapotranspiration. Ces données sont essentielles pour tester et valider les méthodes d'estimation et les schémas de paramétrisation du flux d'évapotranspiration nécessaires à la fois en télédétection spatiale et en modélisation tridimensionnelle de la dynamique des climats.



La cartographie de la surface à partir de mesures radiométriques satellitaires différentielles (indice de végétation) permet de caractériser la structure spatiale de l'interface entre le sol continental et l'atmosphère, et ouvre à terme la possibilité de déterminer l'évapotranspiration à partir de l'espace.

Le résultat le plus significatif concerne l'influence de l'hétérogénéité des conditions de surface sur le bilan hydrique et les flux d'évapotranspiration. Le parcellaire très morcelé du Sud-Ouest n'induit pas de modulation significative des phénomènes à l'échelle de la centaine de kilomètres : une homogénéité « macroscopique » réapparaît assez nettement à cette échelle grâce aux effets intégrateurs des bassins versants et du mélange turbulent atmosphérique de couche limite. Seule la nette transition entre le parcellaire agricole et les grandes étendues de la forêt des Landes induit des phénomènes spécifiques « visibles » à l'échelle macroscopique. L'atmosphère répond à ce forçage spatial par des circulations à moyenne échelle qui séparent deux régimes pour les processus de surface, l'un au-dessus du patchwork agricole, l'autre au-dessus de la forêt. La difficile prise en compte de ces phénomènes nécessitera le développement de méthodes d'identification de zones macroscopiquement homogènes dans un paysage, puis de description des phénomènes de transition entre ces zones. La collaboration amorcée entre la télédétection spatiale et la modélisation atmosphérique à moyenne échelle semble seule susceptible de répondre actuellement à ces questions.



Paysage de bocage (région du Creusot). Le sol et la végétation (forêt, haies, cultures) stockent une grande masse d'eau dont une part importante retourne à l'atmosphère par évapotranspiration. (© INRA, cliché J. Nioré).

Jean-Claude André, ingénieur en chef de la Météorologie, directeur du Centre national de recherches météorologiques, Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique (URA 1357 CNRS), 42, avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex.

Environnement océanique

« L'eau de mer est le résultat du lavage de toute la surface du globe » écrivait Lavoisier à la fin du XVIII^e siècle. C'est dans l'océan que sont apparues les premières manifestations de vie sur notre Terre et nous savons maintenant que l'équilibre écologique planétaire dépend très étroitement des interactions physiques, chimiques et biologiques entre l'océan, l'atmosphère et la terre solide. Mais nous connaissons encore mal le fonctionnement de cette gigantesque machine.

Aux variations naturelles se surimposent celles d'origine humaine, essentiellement industrielles. A une échelle restreinte, cette activité altère

journallement le milieu marin côtier. A une échelle globale, ce sont les eaux marines de tout un hémisphère qui portent la marque de l'impact de l'homme.

Comprendre et gérer l'environnement océanique signifie, entre autres, être capable de décrire la circulation océanique, les échanges d'énergie et de matière entre océan, atmosphère et continent, interpréter la dynamique des écosystèmes marins... Les pages qui suivent tentent de donner un aperçu de ce caractère pluridisciplinaire et de la grande diversité des approches tant théoriques que méthodologiques.

Patrick Buat-Ménard

Pollutions en milieu littoral

L'étude de la dynamique des systèmes estuariens et marins est un premier pas vers la compréhension de la pollution des systèmes côtiers et de ses conséquences.

== Louis Cabioch

Zones de contact entre le système océanique et les continents, les mers côtières sont particulièrement productives : près de 90 % des res-

sources marines vivantes en sont extraites. Mais elles subissent aussi le plus immédiatement les perturbations exercées par les activités anthropiques.

Les estuaires sont les voies les plus apparentes d'introduction de polluants

dans le milieu marin. Ainsi, l'estuaire de la Seine reçoit les apports d'un bassin fluvial de 75 000 km² portant 30 % de la population de la France, 40 % de son activité industrielle et 20 % de son agriculture. Mais à des échelles dépassant largement celle des estuaires, les apports atmosphériques en polluants métalliques, par exemple, peuvent dominer. De même, les rejets en mer de dragages portuaires constituent localement de fortes sources de contamination. Enfin, la pollution chronique du milieu marin à partir des côtes ou des



Le « Côte de Normandie », navire de la flottille côtière du CNRS-INSU lancé en 1984, contribue à l'étude de la dynamique des polluants en Baie de Seine et en Manche orientale. Longueur : 16,50 m. Surface de travail pont de 25 m², laboratoire sec de 4 m². (Cliché J.P. Auffret).

navires traverse des phases paroxysmales lors de la libération subite en mer de grandes masses de polluants sans dispersion préalable : tel fut le cas lors des grandes marées noires.

Un milieu perturbé

Les polluants se répartissent entre la masse d'eau (phase dissoute), les particules inertes en suspension ou sédimentaires (phase particulaire) et le monde vivant. Il s'y ajoute la phase atmosphérique. Connaître leur devenir et leurs effets suppose d'abord que l'on étudie les transferts entre phases et les réactions chimiques qui interviennent au cours de leur cheminement dans l'espace estuarien et côtier. Dans le cas de la Gironde, par exemple, les expulsions de zinc, de plomb et de cuivre vers l'océan sous forme particulaire sont cinq à dix fois plus faibles que les apports fluviaux à l'estuaire dans la même phase ; 80 % des sorties se font à l'état dissous. Il existe d'autres types de comportement et un ensemble très complexe de réactions possibles et de formes chimiques résultantes.

La perturbation du milieu s'apprécie en termes de concentration, de stockage, de temps de résidence des polluants

et surtout d'impact sur le monde vivant. Bioaccumulation et toxicité provoquent chez la faune marine des transferts à travers les chaînes alimentaires, des lésions somatiques, des anomalies physiologiques ou des mortalités. La forme chimique des polluants, leur concentration, les synergies ou leurs antagonismes interviennent dans ces effets dont l'étude est l'objet de l'écotoxicologie marine. A cela s'ajoutent les répercussions de ces altérations sur la dynamique des populations et des communautés d'espèces estuariennes et marines. On peut citer aussi, à l'opposé, les conséquences néfastes de biostimulations telles que la multiplication excessive d'algues uni- ou pluricellulaires à la suite de surcharges côtières en sels nutritifs.

Pollutions et dynamique côtière

Intensité des gradients et de la dynamique et forte variabilité dominent les systèmes côtiers. Il en résulte qu'on ne peut espérer obtenir des réponses réellement représentatives des perturbations à partir d'observations trop ponctuelles et sans la connaissance approfondie de la dynamique estuarien-

ne et côtière dans toutes ses composantes et à des échelles d'espace variées, atteignant la mésoéchelle (de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres).

Ainsi a-t-on récemment montré que le cheminement des particules polluantes issues du Rhône les fait aboutir au domaine abyssal après une dérive vers le sud-ouest sous l'effet du courant liguro-provençal et un transit par des canyons sous-marins. En Manche orientale, la dispersion très intense des apports de la Seine par la dynamique de marée en atténue l'impact au voisinage de l'estuaire. Mais à une plus large échelle d'observation, d'autres effets de ce même régime de marée tendent à canaliser le long des côtes les masses d'eau contaminées, qui s'écoulent vers la mer du Nord en un « fleuve côtier ». Paradoxalement, le marquage des eaux par les pollutions en fait un outil pour appréhender la dynamique des mers côtières.

■ Louis Cabioch, directeur de recherche au CNRS, responsable du Groupement de recherche « Manche » (GR0019 CNRS). Station biologique, 29211 Roscoff.

Traitement biologique de la pollution

En 1986, 3,8 % de l'ensemble des coquillages commercialisés ne respectaient pas les normes de consommation et 0,4 % contenaient des *Salmonella*, agent des fièvres typhoïdes. Pour protéger les 24 000 ha du littoral français où sont implantés les élevages de coquillages (conchyliculture) de la pollution urbaine estimée en été à 8 10⁶ équivalents/habitant (un équivalent/habitant = 90 g de matières en suspension, 57 g de matières oxydables, 15 g d'azote organique et ammoniacal, 4 g de phosphore total; il permet d'estimer le niveau de pollution par rapport à celle émise quotidiennement par un habitant), l'homme peut utiliser, recopier, voire amplifier les processus d'auto-épuration des milieux naturels. Ces derniers sont basés sur la dégradation de la matière organique par les microorganismes et sur l'ac-



Épuration des eaux usées par lagunage et protection des coquillages destinés à la consommation (Étang de Thau, Hérault). 1 : eaux usées, 2 : eaux usées en cours d'épuration dans les bassins de lagunage, 3 : zone de conchyliculture.

tion bactéricide de différents facteurs physiques, chimiques et biologiques.

A titre d'exemple, la ville de Mèze (7 500 habitants) implantée sur le bassin versant de l'étang de Thau (7 500 ha, production de 20 % de la consommation de coquillages en France) épure ses eaux usées par lagunage : transformation de la pollution en biomasse et diminution de la contamination bactérienne d'un facteur 1 000 à 10 000. Ce procédé d'épuration biologique limite ainsi la pollution des eaux de l'étang et permet de

récupérer environ 30 tonnes de phytoplancton et 2 tonnes de zooplancton par an.

■ Bernard Baleux, ingénieur de recherche au CNRS, responsable de l'Équipe «écologie bactérienne des milieux aquatiques», Laboratoire d'hydrobiologie marine et continentale (URA 1355 CNRS).

■ Marc Troussellier, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'hydrobiologie marine et continentale (URA 1355 CNRS), université des sciences et techniques du Languedoc, 34060 Montpellier Cedex.

Traceurs transitoires dans l'océan

L'homme a injecté dans l'atmosphère des traceurs isotopiques et chimiques qui pénètrent ensuite dans l'océan. Leur histoire permet d'étudier la pénétration du gaz carbonique dans l'océan mondial.

■ Liliane Merlivat

Si l'activité humaine a pour effet de modifier l'environnement en causant une perturbation de la composition de l'atmosphère, l'océan sous-jacent joue un rôle majeur dans la mesure où il régule le devenir de la distribution de certains constituants atmosphériques. C'est en premier lieu le cas pour le gaz carbonique. C'est en effet

par échange gazeux à travers l'interface océan-atmosphère que le CO₂ pénètre dans l'océan, au sein duquel il est ensuite distribué en suivant les lois qui gouvernent la circulation océanique. Cette dernière est à ce jour encore bien incomplètement comprise au plan quantitatif. Le message est tel qu'un programme international destiné à échantillonner puis modéliser le comportement de l'océan mondial a été décidé (programme WOCE).

Toutefois, nous disposons à ce jour d'un ensemble d'informations qui permettent déjà d'illustrer le rôle de l'océan face à une modification de l'environnement atmosphérique due à l'action de l'homme. La figure montre la répartition du tritium le long d'une section dans l'ouest du bassin nord-atlantique.

Le tritium est l'isotope radioactif de l'hydrogène. Sa demi-vie est de 12,4 ans. Il a été injecté dans la haute atmosphère lors des explosions thermonucléaires à partir de la fin des années 50 et dans l'hémisphère Nord.

L'Atlantique

La distribution du tritium dans l'Atlantique n'est pas du tout uniforme. En outre, une invasion très nette aux latitudes moyennes en profondeur entre les deux «prises de vue» 1972 et 1981 est apparente. Si les grands traits de cette distribution sont bien compris,

s'agissant d'une part de la formation d'eaux profondes vers 70°N, d'autre part de l'existence d'une forte stratification dans les basses latitudes, l'interprétation quantitative de la variabilité spatio-temporelle de la distribution du traceur n'est pas accessible à ce jour. Les données sont en nombre insuffisant et les modèles dont nous disposons pas assez réalistes pour interpréter les observations.

Ces deux limites pourront être repoussées. En ce qui concerne la modélisation, la disponibilité de calculateurs de plus en plus puissants devra permettre la mise au point d'outils de plus en plus performants.

Si l'on a choisi d'illustrer le potentiel que représente l'analyse de la distribution du tritium dans l'océan Atlantique, il ne faut surtout pas oublier que le tritium n'est pas le seul traceur dont la distribution est en régime transitoire dans l'océan. Ainsi les explosions ther-

monucléaires ont également été responsables d'une injection de carbone 14 qui, sous forme de $^{14}\text{CO}_2$, représente un analogue bien utile pour suivre la pénétration du CO_2 anthropique dans l'océan.

L'industrie chimique est, quant à elle, responsable depuis le début des années 40 d'une injection régulière de chlorofluorocarbones qui eux aussi pénètrent dans l'océan. L'ensemble de ces traceurs ayant des fonctions d'entrée spatiales et temporelles différentes dans l'atmosphère, leur analyse conjointe dans l'océan permet de contraindre efficacement l'étude d'un certain nombre de processus océaniques.

■ Lilliane Merlivat, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'océanographie dynamique et de climatologie (UA 1206 CNRS), université Pierre et Marie Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Des métaux dans les sédiments

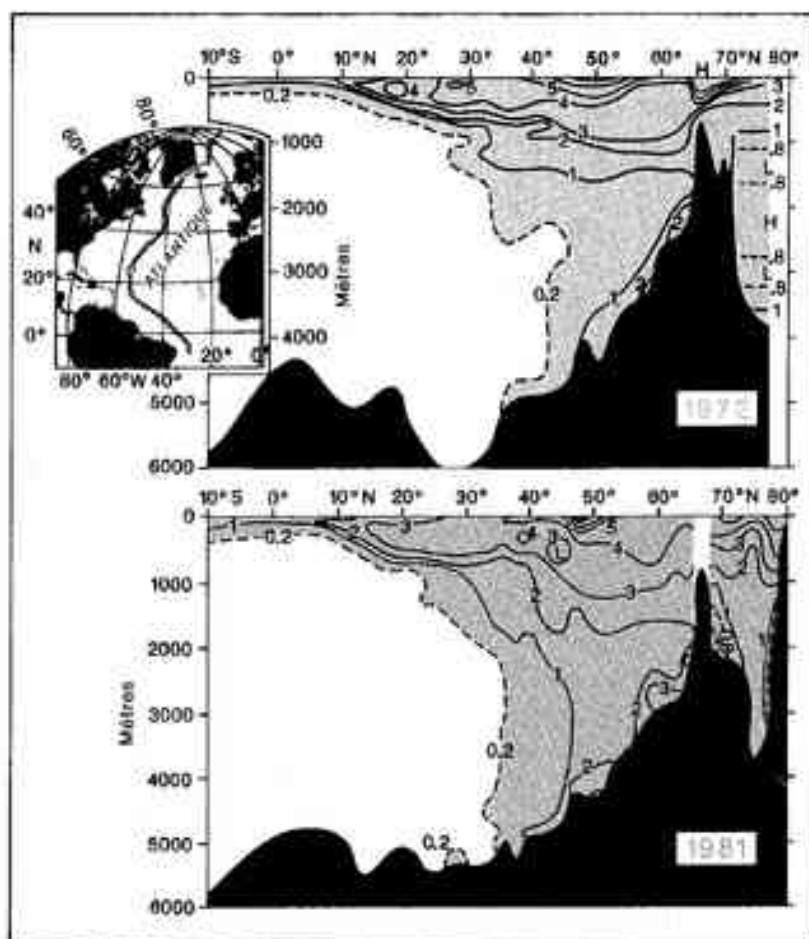
Bien que son intensité soit encore réduite, la pollution anthropogénique par les métaux a d'ores et déjà atteint les sédiments superficiels de l'ensemble de l'océan profond.

■ Francis Grousset et Olivier Donard

L'immensité de l'océan nous donne l'impression que les rejets des activités humaines seront « gommés » par l'énorme capacité de dilution de cet écosystème. Ces apports se font essentiellement par les fleuves ou la voie atmosphérique.

Si la pollution par les hydrocarbures est bien connue, car visible et spectaculaire, celle qui résulte de l'activité humaine en général peut également être à l'origine de contaminations plus sournoises, mais aussi plus alarmantes. Ainsi, des pesticides ont été décelés par 3000 mètres de fond, au large de la côte des États-Unis ! Selon un article récent paru dans la revue *Nature*, le danger représenté par la contamination des milieux aquatiques par les métaux lourds anthropogéniques est – du fait des problèmes de toxicité qu'ils peuvent engendrer – très largement supérieur à celui que représentent les rejets d'hydrocarbures ou même d'éléments radioactifs.

Peut-on considérer à l'heure actuelle que la pollution par les métaux a atteint les sédiments marins profonds ? Avant d'atteindre les fonds marins, ces métaux traversent les masses d'eaux sous des formes dissoutes et particulière : ils peuvent de ce fait être assimilés et concentrés par les organismes vivants. Leur devenir dans les sédiments profonds est encore peu connu. En effet, jusqu'aux années 80, on s'est heurté au problème technique qui consiste à prélever les dépôts superficiels profonds, sans les perturber ni les contaminer. De plus, leur concentration étant généralement extrêmement faible, leur quantification précise n'a pu être réalisée qu'après d'importants progrès analytiques récemment accomplis.



Pénétration du tritium d'origine thermonucléaire en 1972 puis 1981 dans l'océan Atlantique nord-ouest. Les isolignes sont exprimées en unités tritium. Une unité tritium correspond à un rapport du nombre des atomes de tritium et d'hydrogène dans l'eau égal à 10^{-18} .

Le Tandétron

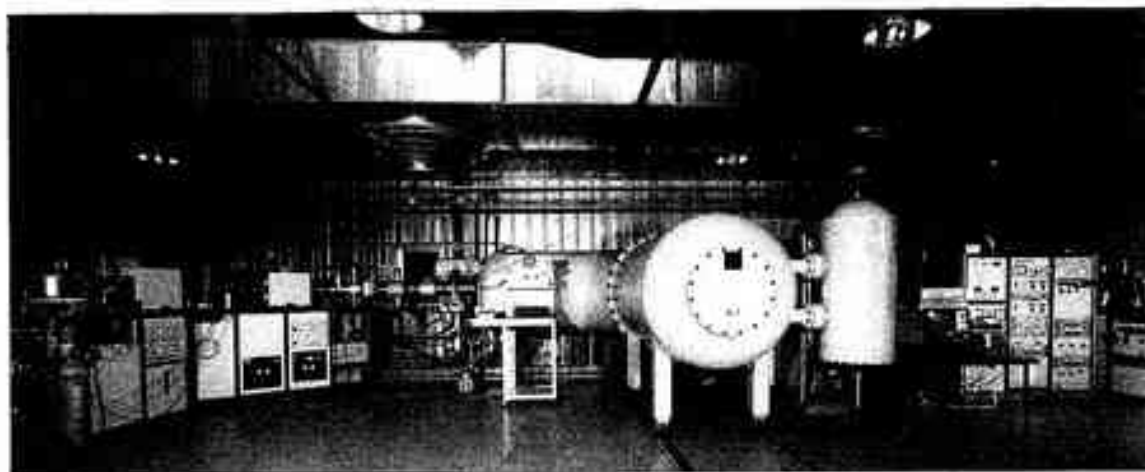
Le Tandétron est un spectromètre de masse couplé à un petit accélérateur tandem. La possibilité de communiquer aux ions une énergie de plusieurs MeV permet de remplacer les détecteurs aveugles présents dans les spectromètres de masse courants par des détecteurs utilisés en physique nucléaire, qui discriminent les ions en fonction de leur masse et de leur numéro atomique. Alors que les spectromètres de masse conventionnels ne permettent guère de mesurer des rapports isotopiques

inférieurs à 10^{-9} , l'emploi de l'accélérateur permet de repousser cette limite à des valeurs voisines de 10^{-15} . Le Tandétron de Gif-sur-Yvette, acquis conjointement par le CNRS et le CEA, permet de mesurer l'abondance de cosmogéniques comme ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C et ^{26}Al (cf. l'article de C. Lorin).

Appliquée à la mesure du carbone 14, cette méthode autorise la mesure de rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ sur des échantillons contenant seulement 1 milligramme de carbone, alors que la mesure traditionnelle de radioactivité β nécessite des quantités mille fois plus importantes. Outre les mesures d'âge sur les sédiments marins (cf. l'article de J.C.

Duplessy et al.), le Tandétron permet maintenant de mesurer la teneur en ^{14}C de l'eau de mer sur des échantillons dont le volume ne dépasse pas 100 cm³, et qui peuvent être collectés facilement au cours des campagnes océanographiques. L'emploi du ^{14}C comme traceur de la circulation océanique va donc se généraliser au cours des prochaines années et notamment pendant le programme WOCE (World Ocean Circulation Experiment).

Jean-Claude Duplessy, directeur de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (LP 2101 CNRS, Laboratoire mixte CNRS/CEA), avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.



Le Tandétron de Gif-sur-Yvette : l'installation.

► Citons le cas particulier du plomb. Il est apporté au milieu marin principalement par voie atmosphérique. Sa descente dans la colonne d'eau jusqu'aux sédiments profonds s'effectue rapidement : moins de dix ans. Par 4000 mètres de fond, sa teneur dans les premiers millimètres des dépôts est par endroit cinq fois plus forte (15 à 20 µg/g) que celle des sédiments pré-industriels (3 à 5 µg/g). La pénétration du plomb anthropogénique peut atteindre alors une profondeur de dix centimètres, du fait de la présence d'organismes fouisseurs. L'étude par spectrométrie de masse de la signature isotopique du plomb en excès a permis d'en préciser l'origine. Dans l'Atlantique Nord, ce plomb provient des rejets industriels, et de la combustion des essences automobiles utilisant le plomb tétra-éthyle comme additif anti-détonant, tant en Europe qu'en Amérique du Nord.

L'impact des métaux a été mis en évidence dans l'hémisphère Nord, mais du fait de leur mode de transport par voie atmosphérique et par les courants marins, il concerne vraisemblablement l'ensemble de l'océan mondial. C'est donc un problème qu'il convient de documenter rapidement, notamment pour d'autres métaux et métalloïdes « sensibles » (mercure, étain, cadmium, sélénium, arsenic), qui sont rejetés massivement dans le milieu aquatique par l'activité humaine. La plupart de ces éléments peuvent se méthyliser sous l'action de processus chimiques ou biologiques, augmentant généralement leur toxicité et modifiant leur comportement géochimique.

Les niveaux de pollution observés dans l'environnement abyssal restent toutefois suffisamment faibles pour que l'on considère qu'ils ne sont pas alarmants. Néanmoins, le fait d'enregistrer

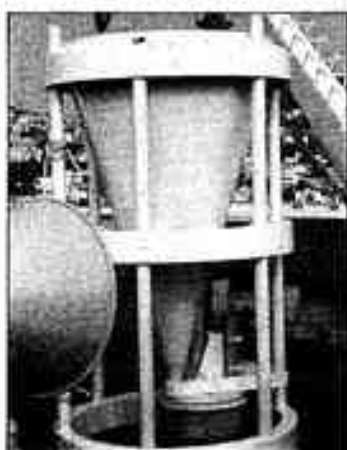
leur présence dans les zones profondes, en dépit de l'effet diluant du réservoir océanique, souligne l'importance des émissions anthropogéniques. Il importe donc d'approfondir la connaissance de leurs cycles biogéochimiques, afin d'évaluer leur toxicité et prédire l'évolution probable de la pollution de l'océan profond.

Francis Grousset, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie et océanographie (UA 197 CNRS), Université Bordeaux I et Laboratoire « Mouette » (UM 39 CNRS), Groupe de recherche en géodésie spatiale, CNES, 18, avenue Edouard-Belin, 31055 Toulouse Cedex.

Olivier Donard, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de photophysique et photochimie moléculaires (UA 348 CNRS), Université Bordeaux I, 351, cours de la Libération, 33405 Talence Cedex.

L'épuration sous forme particulaire

Des collecteurs automatiques de particules ont permis d'étudier l'épuration des eaux méditerranéennes à la suite des retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl. Il aura fallu moins de huit jours pour les entraîner à 200 m de profondeur.



Purge à particules marines PPSS construit par la société Technicap : surface 1 m², collection séquentielle de 24 échantillons, autonomie 18 mois. Cet appareil sera utilisé dans le cadre du Programme « flux océaniques » de l'INSU. (Cliché A. Vigot).

Cet effet de « vidange » rapide des eaux superficielles est dû à l'ingestion des radioéléments (césium, cérium, etc.) par le zooplancton et à leur transport vers le fond via ses excréments solides (pelotes fécales dont la taille est de l'ordre de quelques dixièmes de mm). Ces résultats illustrent l'utilité d'observations en continu du milieu marin pour comprendre comment l'intervention des êtres vivants régule la composition de l'eau de mer, les transferts de matière entre les différents compartiments du milieu marin, ainsi que l'impact des activités humaines.

Patrick Beut-Ménard, directeur de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (LP 2101 CNRS, Laboratoire mixte CNRS/CEA), avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.

Simuler l'écosystème marin

Le modèle est un outil indispensable pour appréhender la complexité de l'écosystème marin et simuler ses réponses à des perturbations.

Valérie Andersen

Actuellement la modélisation de l'écosystème marin concerne surtout les eaux superficielles. Selon les objectifs et le problème à étudier, le modèle et ses compartiments ont un degré de complexité plus ou moins grand.

Les modèles de chaînes alimentaires distinguent généralement plusieurs classes de sels nutritifs, phytoplancton et zooplancton. Depuis quelques années ils décrivent le flux vertical de matière organique, dont la majeure partie est constituée de particules biogéniques

(pelotes fécales, cadavres d'organismes...). Couplés à des mesures *in situ*, ils servent de test à diverses hypothèses, comme, par exemple, celles qui visent à expliquer le cycle des éléments en traces incorporés dans les particules qui sédimentent.

Les modèles de dynamique de population cherchent à représenter le cycle biologique de certaines espèces, choisies pour leur intérêt scientifique ou commercial. Ils permettent d'apprécier l'influence des facteurs de l'environnement sur la dynamique interne de la population et sur son renouvellement à chaque génération, et aussi de comparer des espèces à stratégies de reproduction différentes.

Les modèles d'écosystèmes couplés à des modèles hydrodynamiques facilitent, par exemple, l'interprétation du comportement d'un système soumis à des perturbations (rejets d'émissaire, cours d'eau...). Ils devraient permettre la prédiction des ordres de grandeur et des échelles de temps des phénomènes.

Valérie Andersen, chargée de recherche au CNRS, Centre d'études et de recherches océanographiques de Villefranche-sur-Mer (UA 716 CNRS), Station zoologique, BP 28, 06230 Villefranche-sur-Mer.

Les modèles en géochimie des océans

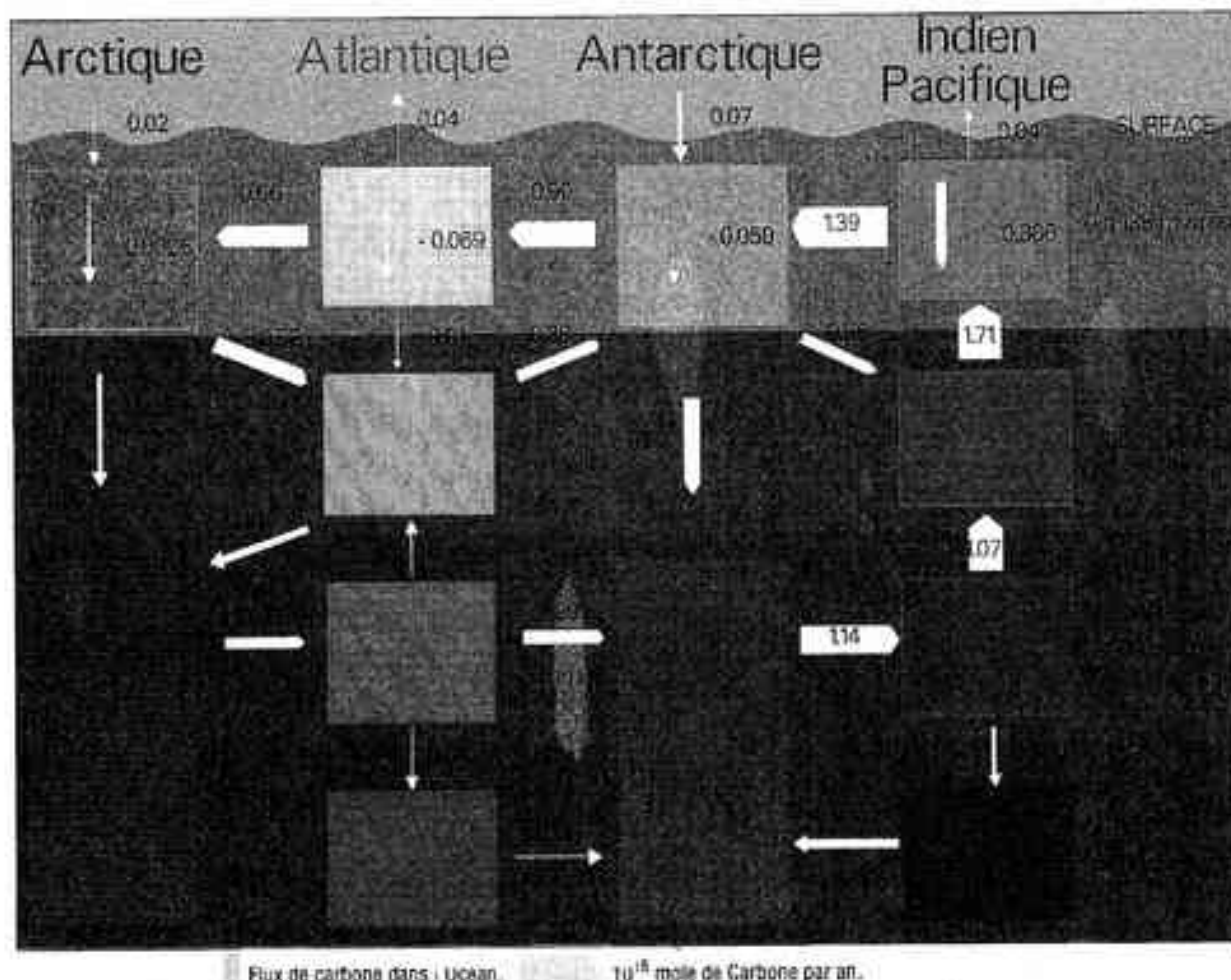
Composante importante des grands programmes de recherche, les modèles qu'élaborent les équipes de géochimie des océans se situent maintenant à un niveau de complexité nécessitant des moyens de calcul lourds.

Jean-François Minster

Comme toute modélisation, les modèles en géochimie des océans sont destinés à paramétrer les processus qui contrôlent les divers éléments et leurs composés (par exemple, sous forme de coefficients de diffusion turbulente pour les processus de mélange), à estimer des facteurs non directement mesurables (par exemple, les flux de transports par les courants) et à fournir un cadre général où restituer les résultats particuliers (par exemple, les modèles de cycles des métaux dans l'océan). Ils doivent évidemment permettre d'identifier l'importance relative des études à mener : par exemple, à quelle précision doit-on estimer les flux

de carbone particulaire dans l'océan pour éventuellement évaluer les variations pouvant résulter de l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère.

La plus grande partie des modèles utilise des équations de conservation des espèces, sous forme différentielle (modèles d'advection-diffusion, par exemple, pour l'eau interstitielle des sédiments) ou sous forme intégrale (modèles en boîte, par exemple pour le transport de carbone dissous tel que représenté sur la figure). De plus en plus, ces systèmes d'équations sont couplés d'une part à des modèles décrivant les réactions chimiques dans le système (en particulier pour la redissolution des particules, ou pour la diagenèse précoce



Flux de carbone dans l'océan. 10^{18} mole de carbone par an.

des sédiments), d'autre part à des modèles décrivant la dynamique des transports (par exemple, des modèles dynamiques des courants) et enfin avec des modèles du réseau trophique pour la biologie de surface. Bien sûr, ces modèles couplés sont en régime non stationnaire et permettent de prendre en compte l'évolution du système, que ce soit à l'échelle diurne, à l'échelle saisonnière ou à celle de la dizaine de milliers d'années (pour les transports dissous à grande échelle et pour les modèles de

paléo-océanographie).

On trouve en France des développements de modélisation sur tous ces problèmes. Ils constituent une composante importante des grands programmes de recherche : problème du gaz carbonique, paléoclimatologie, expériences internationales WOCE (World Ocean Circulation Experiment) et JGOF (Joint Global Ocean Flux Study). Cependant, ces modèles, relativement simples jusqu'à ces dernières années, nécessitent des compétences numéri-

ques et des moyens de calcul de plus en plus lourds, que les équipes de géochimie ne maîtrisent pas encore. La modélisation en géochimie des océans « encore de beaux jours devant elle ».

Jean-François Minster, physicien à l'Observatoire Midi-Pyrénées, directeur du Laboratoire « Mouton » (UM 39 CNRS/CNRS), Groupe de recherche en géodésie spatiale, 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 92195 Meudon Cedex

JARDIN DE CORAIL

Une promenade sous-marine dans les merveilleux récifs de madréporaires de la région de Dzhirga. Les images de colonies coralliennes aux formes variées illustrent la biologie des coraux. La caméra se déplace entre les massifs vivants et découvre, sans les déranger, les invertébrés et les poissons qui se réfugient dans les récifs. Des vues de zones appauvries mettent en évidence la menace qui pèse sur le jardin de corail.

Réalisateur : Yves ZEAU, Observatoire de Meudon
Auteur / Conseiller scientifique : Annick TOULMONT, Institut Océanographique
1986, 17 minutes, format : film 16 mm couleur, vidéo 34 U-MATIC VHS

Eaux continentales

Avec 8 millions de km³ inégalement répartis dans l'espace et dans le temps, les eaux continentales n'atteignent que 0,6 % de la quantité globale d'eau dans la biosphère.

Pourtant, ces écosystèmes représentent non seulement un élément essentiel de la dynamique des paysages mais aussi une ressource aux usages multiples en agriculture, dans l'industrie, le transport, la pêche, la santé, les loisirs... Eaux souterraines, lacs, marais, rivières et fleuves constituent donc autant de milieux naturels à protéger.

Prévoir les effets cumulatifs, réhabiliter les milieux dégradés, quantifier

les interactions entre les différents écosystèmes, comprendre et aménager la variabilité, conserver certains systèmes aquatiques dans un état proche de conditions naturelles, autant de grands défis dont dépend l'avenir des eaux continentales.

L'intégration d'approches convergentes s'impose comme un moyen indispensable pour relever ces défis. Aussi, depuis près de dix ans, le PIREN s'efforce-t-il de regrouper sur des problèmes précis des disciplines relevant des sciences physico-chimiques, des sciences de la vie et des sciences de l'homme.

Henri Décamps

L'avenir des eaux continentales

La gestion des eaux continentales pose aujourd'hui cinq grands défis que la recherche doit relever de toute urgence au risque de ne pouvoir sauvegarder ces milieux naturels.

Henri Décamps

Cinq grands défis sont actuellement posés à la recherche dans le domaine des eaux continentales.

Le premier concerne les effets cumulatifs des impacts. Nous savons prévoir sur le court terme quels seront les effets par exemple d'une surcharge en phosphore, d'une élévation de la température des eaux, d'une diminution des débits. Nous savons aussi, toujours sur le

court terme, quels effets aura tel ou tel rejet toxique dans les milieux aquatiques. Mais nous ignorons encore comment des systèmes aussi complexes que les écosystèmes aquatiques continentaux réagiront sur le long terme à des perturbations répétées, d'intensités variables. Ici, l'exploitation passée ou actuelle d'une ressource comme les gravières affecte l'utilisation possible d'autres ressources potentielles dans l'avenir. Ailleurs, le mélange de périodes d'incubation, de tendances réversi-

bles et irréversibles, de discontinuités et de ruptures complique les prévisions à l'échelle d'une ou deux décennies.

Un deuxième défi est celui de la réhabilitation des milieux dégradés. Qu'est-ce que réhabiliter ? Par quelles méthodes y parvenir et comment mesurer les résultats ? Qu'est-ce en fait qu'une dégradation du milieu naturel ? Historiquement, les activités humaines ont tant influencé la dynamique des écosystèmes aquatiques qu'à leur égard, la définition même de milieu naturel pose problème. Restent cependant les succès obtenus pour mesurer la qualité des eaux courantes par une connaissance détaillée de leurs peuplements en invertébrés. Restent aussi les expériences de réhabilitations réussies, telle celle du lac d'Annecy guéri de l'eutrophisation, telles les opérations rivières propres, dont le « Lot - rivière claire ». Expériences engagées sous la pression de l'opinion pu-

► blique, menées à bien grâce à une compréhension des mécanismes du fonctionnement d'écosystèmes aquatiques perturbés, mais expériences qui n'ont abouti que lorsqu'il existait une volonté d'aménagement pour le long terme. Toute une problématique se développe à ce sujet, y compris une réflexion fondamentale sur la notion de perturbation aux différentes échelles d'espace et de temps.

Le troisième défi posé à la recherche dans le domaine des eaux continentales dépasse justement le domaine précis des eaux continentales. Les milieux aquatiques font en effet partie des paysages ; ils participent à leur structure. Il est important de comprendre comment s'organisent les mosaïques qui composent ces structures et surtout d'identifier les mécanismes par lesquels les éléments de ces mosaïques interagissent pour produire un environnement en bonne santé. Les eaux souterraines, lacs, marais, rivières et fleuves constituent de tels éléments de mosaïque. Ils sont liés aux autres éléments de leur environnement terrestre selon des interfaces – les écotones – dont le rôle apparaît comme de plus en plus indispensable à prendre en compte dès lors qu'il s'agit d'expliquer les ressorts de la dynamique de systèmes interactifs complexes, tels qu'un lac dans son bassin versant ou un fleuve dans sa plaine inondable. Des recherches se développent actuellement sur le rôle de ces écotones riverains, notamment à propos des flux et des transferts, mais aussi de la biodiversité, de la résistance aux perturbations, de la résilience des systèmes écologiques.

Le quatrième défi est de comprendre et d'aménager la variabilité. Traditionnellement, l'aménagement des écosystèmes aquatiques a consisté à maintenir la stabilité, à fixer des équilibres. Or, comme tout écosystème, les écosystèmes aquatiques sont naturellement instables, ils évoluent et les activités humaines contribuent à ces évolutions, soit qu'elles en ralentissent le rythme ou l'accélèrent, soit qu'elles les transforment profondément. Toute la gestion des milieux aquatiques doit être ainsi comprise en termes de variabilité. Concernant les eaux continentales, cette variabilité porte autant sur les systèmes physico-chimiques et biologiques que sur les systèmes socio-économiques. Elle est marquée par des événements extrêmes, rares, voire uniques. Elle s'exerce à différentes échelles d'espace et de temps, selon des emboîtements dont on commence seulement à démontrer le mécanisme.

Se pose enfin le cinquième défi : la conservation de certains systèmes aqua-

tiques dans un état proche de conditions naturelles. Tout un arsenal tend en principe possibles de telles protections, depuis les Parcs naturels jusqu'aux réserves de la biosphère. Tout un ensemble de raisons existe : préserver les ressources génétiques et les écosystèmes, transmettre un capital aux générations futures, maintenir des sites qui permettent à la fois l'éducation et la recherche, qui permettent aussi de comprendre la dynamique de systèmes naturels et, par comparaison, les changements induits par l'homme et la société. Cependant, la réalisation pose toujours d'immenses problèmes, à la fois théoriques et pratiques. Il faut d'abord définir ce qu'on veut conserver : habitat, espèce, processus ; il faut ensuite décider des superficies nécessaires, des relations avec les milieux terrestres environnants, du maintien ou non d'activités humaines ; il faut aussi prendre en compte les retom-

bées des changements qui s'exercent au niveau de surfaces plus vastes.

Relever ces défis constitue pour la recherche une tâche urgente, capitale. Les problèmes posés par la gestion des eaux continentales concernent en effet l'ensemble de la planète. Les pollutions des eaux n'affectent pas que les pays industrialisés, et pour les autres s'ajoutent, selon les endroits : le manque d'eau, le tarissement des nappes et la désertification, les crues aggravées par la déforestation des bassins versants et les inondations meurtrières. La recherche dans le domaine des eaux continentales apparaît de plus en plus comme l'une des priorités pour les prochaines décennies.

■ Henri Décamps, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre d'écologie des ressources renouvelables (LP 8211 CNRS), 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse Cedex.

Les fonctions de la végétation riveraine

La végétation riveraine, le plus souvent composée de boisements tels que saulaies, aulnaies, frênaies, forme un élément essentiel des paysages fluviaux. Elle stabilise les berges et les protège contre l'érosion ; elle apporte au milieu aquatique de grandes quantités de matière organique sous forme de litière. Cette végétation riveraine occupe ainsi une position clé vis-à-vis des transferts entre terre et eau. Située à l'interface entre les deux milieux, elle assure d'une part une rétention des substances nutritives entraînées depuis l'amont des réseaux hydrographiques, elle oppose d'autre part un filtrage aux pollutions consécutives, par exemple, à l'épandage

d'engrais azotés drainés depuis les terrains environnants. Dans la vallée de la Garonne, il a été montré qu'une circulation des eaux souterraines d'une trentaine de mètres sous un bois riverain pouvait suffire à épurer ces eaux de leur surcharge en nitrates. Les conditions d'engorgement régnant dans les sols des zones riveraines favorisent en effet le déroulement du processus de dénitrification des nitrates (NO_3^-) en azote moléculaire gazeux (N_2).

■ Gilles Pinay, chargé de recherche au CNRS, Centre d'écologie des ressources renouvelables (LP 8211 CNRS), 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse Cedex.



Ripisylves le long de la Garonne entre Toulouse et Moirac (Verdun-sur-Garonne). (© CNRS, cliché J. Joachim).

Eaux souterraines et pollution

Quantifier et simuler le transport des polluants dans les eaux souterraines suppose une connaissance précise des processus réactionnels intervenant dans la dynamique de la pollution.

Philippe Ackerer
et Lothaire Zilliox

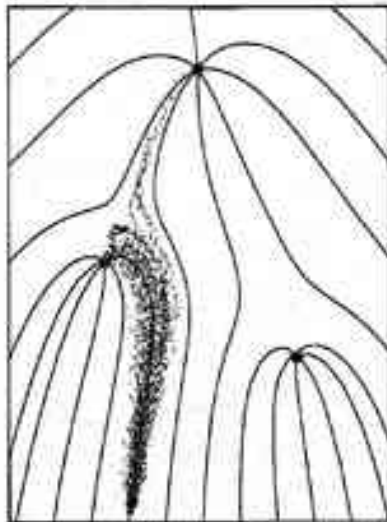
Ce qui différencie les problèmes des eaux souterraines de ceux des eaux de surface est, en première ligne, l'échelle de temps. Les manifestations différées d'une contamination comme la notion de filtre efficace attribuée aux alluvions sont évocateurs d'une sécurité qui n'est qu'apparente.

La protection de la nappe alluviale rhénane constitue un objectif majeur du fait même de ses échanges importants avec les cours d'eau et de ses positions d'affleurement. Les dangers ont en effet été amplifiés en fonction des développements technologiques, industriels et agricoles, multipliant les risques de pollution à partir d'aires de dépôts de déchets ou à la suite d'accidents lors du stockage ou du transport de produits toxiques. L'arrivée continue sur le marché de produits manufacturés nouveaux (solvants, colorants, pesticides, engrais...), dont on ignore pratiquement les effets sur les écosystèmes, ajoute à l'acuité et à la complexité des problèmes de protection. De nombreuses substances minérales ou organiques peuvent, même à l'état de traces, rendre l'eau impropre à la consommation.

De l'analyse des phénomènes de transport...

Dans la dynamique d'une pollution en aquifère poreux, la « superposition » de la convection (déplacement moyen) et de la dispersion apparente (diffusion moléculaire et « brassage » mécanique dus aux fluctuations de la vitesse réelle autour de la vitesse moyenne) représente la composante mécanique du transport de polluant ; le couplage des phénomènes physico-chimiques et biochimiques constitue l'ensemble des réactions d'échange.

Ces processus réactionnels, plus intenses dans le domaine aéré du réservoir aquifère, sont sous l'influence de nombreux facteurs « environnants » (pH, température, présence d'autres



Modélisation du transport d'un polluant : la propagation d'un polluant (points rouges) issu d'une source ponctuelle au voisinage de trois puits (points verts) est simulée ici par une approche particulière de type « marche au hasard ». Les lignes noires représentent les trajectoires de « molécules d'eau » soumises au déplacement moyen. A ce déplacement moyen se superpose la dispersion (nuage de points) pour le polluant.

substances...). Les échanges peuvent être réversibles ou non ; les cinétiques également sont différentes et liées aux conditions de déplacement (vitesses de circulation). Les effets d'interactions et/ou de synergie, pratiquement inconnus, entre contaminants et milieu environnant modifient leurs comportements. Comme illustration, on peut citer la dissolution sélective d'hydrocarbures à partir d'un produit pétrolier infiltré dans le sol ou l'action d'ions chlorures pour remobiliser le mercure (par complexation) accumulé dans des sédiments.

La prise en compte de processus réactionnels souvent complexes dans la dynamique de la pollution laisse ouvert un champ de recherche pluridisciplinaire depuis l'analyse sur le terrain et au laboratoire jusqu'à l'élaboration de modèles.

... à leur représentation par modèles.

Quantifier et simuler le transport nécessite d'introduire une hiérarchisation dans les mécanismes physiques et les

processus réactionnels chimiques et biologiques qui le gouvernent. Il est illusoire, comme l'ont montré de nombreuses études de cas, de vouloir aboutir à un modèle d'évolution applicable en tout lieu, pour toute forme de pollution et quel que soit le polluant.

Dans le cas de contaminations accidentelles à l'échelle locale, et ce dans pratiquement chacune des situations créées, les conditions de circulations hétérogènes et les caractéristiques physico- et biochimiques du milieu ne sont connues que « ponctuellement ». La géostatistique permet d'aborder la modélisation du transfert de polluant dans un cadre probabiliste par l'extension dans l'espace de mesures ponctuelles. La réponse du modèle ne sera plus une valeur de concentration en un point mais une estimation au sens statistique (moyenne et écart-type).

Philippe Ackerer, chargé de recherche au CNRS, PIREN Eau-Alsace, Laboratoire d'hydrodynamique des milieux poreux, Institut de mécanique des fluides (URA 854 CNRS).

Lothaire Zilliox, directeur de recherche au CNRS, PIREN Eau-Alsace, directeur de l'Institut de mécanique des fluides (URA 854 CNRS), université Louis Pasteur, 2, rue Bous-singault, 67083 Strasbourg Cedex.

Les grands cours d'eau

Après trois siècles d'aménagements humains, la diversité biologique et la dynamique écologique des systèmes fluviaux sont aujourd'hui atténuées, voire supprimées, entraînant nombre de conséquences quant à leur gestion.

Henri Décamps
et Albert-Louis Roux

La diversité biologique d'un système fluvial tient à l'existence d'une mosaïque de milieux plus ou moins directement liés au chenal principal d'écoulement. Ces milieux, aquatiques, semi-aquatiques ou terrestres, s'étalent au sein des plaines inondables. Ils communiquent entre eux et avec le cours principal du fleuve par les eaux souterraines ainsi que lors de crues de fréquences et d'intensités variables. La

La dynamique écologique de l'ensemble résulte de ces interactions qui se développent entre chenal principal, bras secondaires actifs, bras morts partiellement ou totalement isolés, marais, prairies et forêts alluviales.

Les systèmes fluviaux sont donc caractérisés à la fois par leur hétérogénéité dans l'espace et par leur variabilité dans le temps. Or, au fil des siècles, les actions entreprises pour aménager les fleuves ont eu pour effet d'atténuer, voire de supprimer ces deux caractéristiques. Les cours multiples ou divagants ont été ramenés à un chenal unique et rectiligne, isolé par des digues, les niveaux des nappes phréatiques ont été abaissés et provoquent l'enfoncement des lits mineurs. En Loire, cet enfoncement atteint 1,73 m de 1830 à 1980 sous le pont d'Orléans; en Garonne, il menace d'assèchement certaines peupleraies; joint aux effets des endiguements, il oriente l'évolution de certaines forêts alluviales du Rhin et du Rhône vers des groupements de type collinéen. L'examen de la dynamique des systèmes fluviaux au cours des trois derniers siècles conduit à reconnaître deux impératifs d'aménagement pour les grands cours d'eau et leurs vallées.

Rétablir des connexions

Les recherches des vingt dernières années ont montré le rôle capital des échanges qui s'établissent entre les différents milieux au sein des systèmes fluviaux. Aussi s'efforce-t-on de rétablir les connexions longitudinales le long des fleuves dans le cadre du plan saumon visant à ramener les grands migrants vers leurs frayères. De même raccorde-t-on certains bras morts aux

fleuves: zones de reproduction et d'abri pour les poissons, ils constituent également des zones d'épuration et de recharge des nappes phréatiques. Quant aux boisements riverains naturels situés à l'interface terre-eau, ils constituent un élément-clé de tous les processus qui organisent les interactions entre un fleuve et sa plaine inondable.

Assurer des réversibilités

Dans des conditions naturelles, les fleuves remanient leurs plaines inondables lors des crues. Ces remaniements favorisent le développement de mosaïques aquatiques et forestières à dynamique rapide: bras morts aux eaux calmes mais oligotrophes propices aux salmonides, saulaies, aulnaies, frênaies soumises aux alternances de sédimentation et d'érosion. Le retour à des communautés pionnières est fréquent. Ainsi se créent des espaces propices à la réversibilité des successions végétales du bord des eaux. Tout ce qui peut isoler un fleuve de sa plaine inondable (chenalisation, endiguement, enfoncement du lit mineur, ...) fige ces évolutions. Il est nécessaire de maintenir le libre jeu des processus qui permettent une réversibilité de la dynamique des paysages fluviaux.

Hervé Décamps, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre d'écologie des ressources renouvelables (LP 8211 CNRS), 29, rue Jeanne Murvig, 31055 Toulouse Cedex.

Albert-Louis Roux, professeur à l'université Claude Bernard, directeur du Laboratoire d'écologie des eaux douces (UA 367 CNRS), université Lyon 1, 43, boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex.



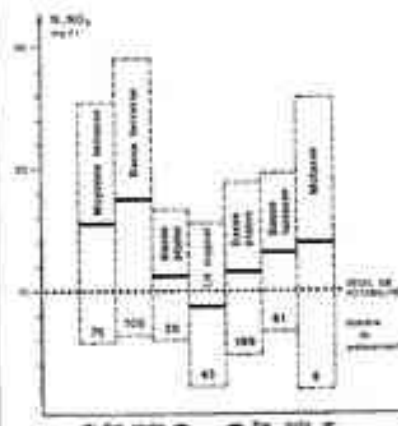
La complexité d'un système fluvial: le Rhône et ses annexes dans le secteur de Branguet, 90 km en amont de Lyon. (© IFR, IGN, PIREN Rhône).

Nitrates dans les plaines alluviales

L'augmentation continue des teneurs en nitrates dans les eaux superficielles et souterraines constitue un problème majeur partout où se développe une agriculture et un élevage intensifs.

Eliane Fustec

Les plaines alluviales sont des zones à haut risque de pollution par les nitrates, car elles reçoivent des eaux qui drainent de vastes bassins versants et sont elles-mêmes soumises à une agriculture de plus en plus intensive. Les transports d'azote vers les eaux souterraines et vers les cours d'eau peuvent y être importants et rapides.



Moyennes et écarts-types des teneurs en nitrates ($N-NO_3$) dans les nappes de la vallée de la Garonne, par type d'unité géomorphologique.

Des relations nettes et systématiques ont pu être établies entre les types d'occupation des sols et la qualité des eaux souterraines. L'établissement de modèles a cependant mis en évidence des variations dans les vitesses de transfert sol-nappe et de propagation des nitrates dans les nappes. Ces variations sont liées aux contextes géomorphologiques et hydrologiques des différents systèmes fluviaux. Certaines modifications des pratiques culturales, telles qu'engrais verts et irrigations fertilisantes, paraissent susceptibles de réduire les transferts de nitrates vers la nappe. Les

zones humides en bordure des cours d'eau peuvent jouer un rôle épurateur important en raison de conditions favorables à une dénitrification biologique intense.

Eliane Fustec, directeur de recherche au CNRS, Centre d'écologie des ressources renouvelables (LP 6211 CNRS), 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse Cedex.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristote-Bernard 92195 Meudon Cedex

LE RADEAU DES CIMES

L'accès de la canopée (voûte forestière) a de tous temps posé de très grands problèmes aux chercheurs. Grâce au "Radeau des Cimes", la Communauté scientifique dispose enfin d'un outil permettant cette exploration.

Octobre 1986: certaines forêts primaires n'ont plus que quinze ans d'existence; est-il encore temps de les étudier? Est-il encore temps de les sauver?

Ce film relate la première campagne d'essai de ce radeau en forêt tropicale de Guyane Française.

Réalisateur: Alain DEVEZ,
ECOTROP, CNRS

Auteurs, Conseillers scientifiques:
Francis HALLÉ, Institut des
Sciences de l'Évolution, Montpellier

Alain DEVEZ,
ECOTROP, CNRS

1987, 26 minutes,
format: film 16 mm couleur,
vidéo 3/4 U-MATIC VHS

LES ETANGS LITTORAUX DU LANGUEDOC- ROUSSILLON

Le rôle et l'importance des étangs en Roussillon.

Plusieurs espèces de poissons méditerranéens remontent des zones lagunaires vers les étangs où ils passent une partie de l'année. Ce document étudie leurs conditions de vie et les dangers qui les menacent.

Réalisateur: Jean LECOMTE,
Laboratoire ARAGO,
Banyuls-sur-Mer

Auteur, conseiller scientifique:
Jacques BRUSLE, Laboratoire
de Biologie marine,
Université de Perpignan

1984, 38 minutes,
format: film 16 mm couleur,
vidéo 3/4 U-MATIC VHS

Une histoire de saumon en Bretagne

Au milieu du XVIII^e siècle, le saumon atlantique fréquentait la quasi-totalité des cours d'eau français se jetant en mer du Nord, dans la Manche et l'océan Atlantique. Il a progressivement disparu de la plupart des grands fleuves français, surtout depuis le milieu du XIX^e siècle. C'est en Bretagne que la situation est restée la plus stable: environ 20 rivières sont régulièrement fréquentées actuellement. C'est aussi en Bretagne qu'une estimation faite en 1902 chiffrait à 4 000 tonnes la récolte annuelle de saumon pour la fin du XVIII^e siècle. Cette estimation donna corps à l'idée d'une abondance passée extraordinaire.

L'évolution des populations de saumon atlantique en Bretagne au cours des deux derniers siècles a pu être déterminée. En effet, les juvé-

niles fréquentent les zones rapides, à fond caillouteux et vitesse de courant élevée, essentiellement dans les cours principaux des rivières. Ces zones sont surtout situées en aval des barrages des moulins à eau. Une carte du cours d'eau combinée aux densités de populations juvéniles permet donc d'estimer les nombres totaux sur l'ensemble du réseau hydrographique.

Un inventaire des barrages de moulins à eau a été réalisé, par demi-siècle, en remontant de 1980 à la fin du XVIII^e siècle, à partir des fiches de barrages, des archives départementales, du cadastre du début du XIX^e siècle et de la carte de Cassini. Les surfaces de production des juvéniles ont ainsi été évaluées par récurrence.

Il apparaît que les potentialités de production en saumon dans cette région sont restées du même ordre de grandeur sur toute la période étudiée. Ceci contredit le mythe de l'âge d'or du saumon atlantique sous l'ancien régime en Bretagne.

Max Thibault, directeur de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique, directeur du Laboratoire d'écologie hydrobiologique, 65, rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex.



Extrait de la carte de Cassini (entreprise au XVIII^e siècle par César-François Cassini de Thury, à l'échelle 1/86 400).

Nitrates : quelles stratégies ?

La politique de lutte contre la pollution par les nitrates repose sur un consensus entre tous les acteurs concernés. Cette stratégie, bien qu'efficace dans l'immédiat, comporte des limites à plus long terme.

■ Corinne Larrue

Encore récente, la politique de lutte contre la pollution par les nitrates s'appuie au niveau national sur un consensus entre toutes les parties intéressées et en premier lieu la profession agricole. Cette concertation conduit à privilégier les actions informatives et incitatives auprès des agriculteurs (conseils agronomiques, subventions) ; par contraste les instruments réglementaires plus conflictuels, telle la



Epandage d'engrais azoté solide. (© INRA, cliché J.-M. Machet).

législation des installations classées, sont moins développés.

Ce choix du consensus traduit un double pari : d'une part, les orientations nationales seront bien relayées au niveau local ; d'autre part, le problème des nitrates pourra être résolu par une

correction « à la marge » des pratiques agricoles actuelles.

Le premier pari est bien engagé : jusqu'à présent, cette stratégie est apparue efficace pour sensibiliser les acteurs locaux, et plus précisément agricoles. La concertation est présente au niveau local, même si les actions mises en œuvre restent limitées aux zones de pollution moyenne. Mais il est encore trop tôt pour apprécier son efficacité sur le comportement des agriculteurs.

Le deuxième pari est moins assuré : à plus long terme et dans les régions où la pollution des eaux est très importante, la solution au problème des nitrates requiert une adaptation profonde des modes d'exploitation. La stratégie actuelle devrait alors être considérée comme une première étape de sensibilisation préparant des actions ultérieures plus contraignantes, mais qui seraient mieux acceptées et donc plus facilement mises en œuvre. L'entente régnant actuellement résistera-t-elle à cette évolution ?

■ Corinne Larrue, chargée de recherche au Laboratoire d'observation de l'économie et des institutions locales (L'OEIL), Institut d'urbanisme de Paris, université Paris Val-de-Marne, avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex.

Maîtriser la gestion des lacs

Toute modification au niveau du prédateur situé au sommet du réseau trophique peut conduire à la réorganisation du peuplement en algues microscopiques.

■ Roger Pourriot

Dans les lacs tempérés moyennement ou très riches en matières organiques, les successions saisonnières de peuplements phytoplanctoniques suivent un schéma général que l'on peut résumer comme suit.

Après une période hivernale marquée par une croissance et des effectifs réduits, l'amélioration des conditions climatiques et la richesse en nutriments (phosphore et azote spécialement) provenant des sédiments et des apports des bassins versants, conduisent à la prolifération de petites espèces d'algues (nanoplankton, < 20 µm) à croissance rapide.

En juin, alors que s'installe un gra-

dient thermique, ce nanoplankton régresse et la transparence des eaux s'accroît : c'est la « phase des eaux claires ». Il lui succède un peuplement estival plus diversifié, en taille et en espèces. La limitation des ressources dans les eaux superficielles isolées par la thermocline favorise le développement des grandes espèces algales (microplancton, > 20 µm) plus compétitives que les petites dans de telles conditions. En fin d'été, ce peuplement est souvent dominé par des Cyanobactéries, capables de fixer l'azote atmosphérique et de supplanter plus ou moins durablement les autres espèces. Concentrées en surface, elles forment alors des « fleurs d'eaux » peu appréciées des divers utilisateurs. Ces fleurs d'eaux à Cyanobactéries sont l'expression d'un déséquilibre fonction-

nel, ou dystrophie, stade ultime de l'eutrophisation déterminé à l'origine par une surcharge en éléments nutritifs (N et P).

La régression du nanoplankton en juin est due pour une large part à son exploitation par le zooplancton qui trouve là une ressource et des conditions optimales pour son développement. À l'inverse, son impact sur les grandes espèces estivales, peu consommables, sera faible. La phase d'eaux claires est particulièrement marquée lorsque les microcrustacés du genre *Daphnia*, filtreurs efficaces et peu sélectifs, dominent ce zooplancton (cas du lac Léman).

Ce zooplancton « herbivore » est lui-même contrôlé par des prédateurs invertébrés mais surtout vertébrés (poissons planctonophages). De telles interactions entre les peuplements planctonique et piscicole ont été mises en évidence dans un lac de sablière, le lac de Créteil : une production exceptionnelle d'alevins de Perches a profondément modifié la structure du peuplement zooplanctonique en faveur d'espèces de plus petites tailles.



Le lac d'Aydat (Puy-de-Dôme), superficie : 60 ha, profondeur maximale : 15 m. C'est un lac eutrophe, sujet à d'importantes « fleurs d'eau » à Cyanobactéries en période estivale, alors que les apports de nutriments (N et P) par le bassin versant sont très limités et que ces éléments n'existent qu'à l'état de traces dans la zone euphotique. Un modèle de simulation de l'ensemble des processus susceptibles de remonter en zone euphotique les éléments nutritifs accumulés en profondeur est en cours d'élaboration. (© Monestier Nature).

La pression de prédation exercée sur les alevins et les poissons planctonophages par les espèces ichthyophages peut finalement entraîner des réajustements en chaîne au sein du système planctonique pouvant aller jusqu'à une réorientation du statut trophique du lac.

En se fondant sur l'existence de ces interfaces interactives, on peut conclure

que la structure du phytoplancton, donc son évolution saisonnière jusqu'au stade « fleur d'eau », dépend à la fois des apports en nutriments et de l'impact du prédateur situé au sommet du réseau trophique. Cette hypothèse, qui aura besoin d'être confortée par la simulation en modèle écologique de nombreux scénarios, suggère que la maîtrise de la

gestion des lacs concilie à la fois celle de la qualité chimique et biologique des eaux et la gestion piscicole.

Roger Pourriot, directeur de recherche au CNRS, responsable du Groupement de recherches coordonnées « Lacs », Laboratoire d'écologie (UA 238 CNRS), Ecole normale supérieure, 46, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.

La baie du Mont Saint-Michel

L'amplitude des marées y est exceptionnelle, les apports sédimentaires y sont spectaculaires, on y observe des transferts de matière organique originaux... La célèbre baie est un riche objet d'étude.

Jean-Claude Lefevre

Le Mont Saint-Michel se dresse au fond d'une baie de 500 km² située dans l'angle formé par la Bretagne et le Cotentin. L'ensemble est in-

scrit au Patrimoine Mondial.

La Baie est un site unique en Europe tant par l'amplitude exceptionnelle de ses marées (14 m aux marées de vives eaux) que par l'étendue de son estran.

La Baie se trouve divisée en deux en-

tités, un domaine de fond de baie à l'ouest et une zone estuarienne (Sée, Sélune, Couesnon) à l'est.

Son bilan sédimentaire se traduit par des apports annuels de 1 à 1,5 million de m³ provoquant des atterrissements spectaculaires de part et d'autre du Mont (30 ha de progression des prés-salés par an). Un vaste projet de « désensablement » visant à préserver « l'insularité » du site est actuellement à l'étude.

La configuration actuelle de la baie ne représente qu'un stade d'une évolution post-glaciaire marquée par l'accumulation d'un prisme sédimentaire ré-

» sultant d'un processus d'atterrissement naturel lié à la transgression flandrienne. Ce processus a été accentué depuis le Moyen Âge par des travaux d'endiguage, de poldérisation et de drainage ayant mis en place un ensemble de zones humides formé de marais d'eau douce, de marais salés et de polders interconnectés.

La Baie correspond à l'une des plus grandes zones conchylicoles de France, elle joue le rôle de nursery pour les poissons plats de la Manche et de site d'accueil d'intérêt international pour les oiseaux d'eau.

Dans le but de prévoir les conséquences des projets d'aménagement, la Commission des communautés européennes soutient un programme de re-

cherche visant à comprendre le fonctionnement global du « système baie » considéré comme un complexe d'écosystèmes interactifs en évolution.

Les premiers résultats ont permis de mettre en évidence des modalités de transfert de matière organique très particulières. Jusqu'à présent l'explication qui prévalait était basée sur l'exploitation directe, par les organismes marins, de la production primaire des marais salés. Dans ce milieu marin, le plus turbide du golfe normano-breton, la matière organique utilisable par les organismes marins apparaît tributaire des apports de substances nutritives provenant des milieux connexes dulçaquicoles et terrestres. Ces apports sont, au cours du cycle, en partie transformés en

production primaire par le microphytobenthos des vasières.

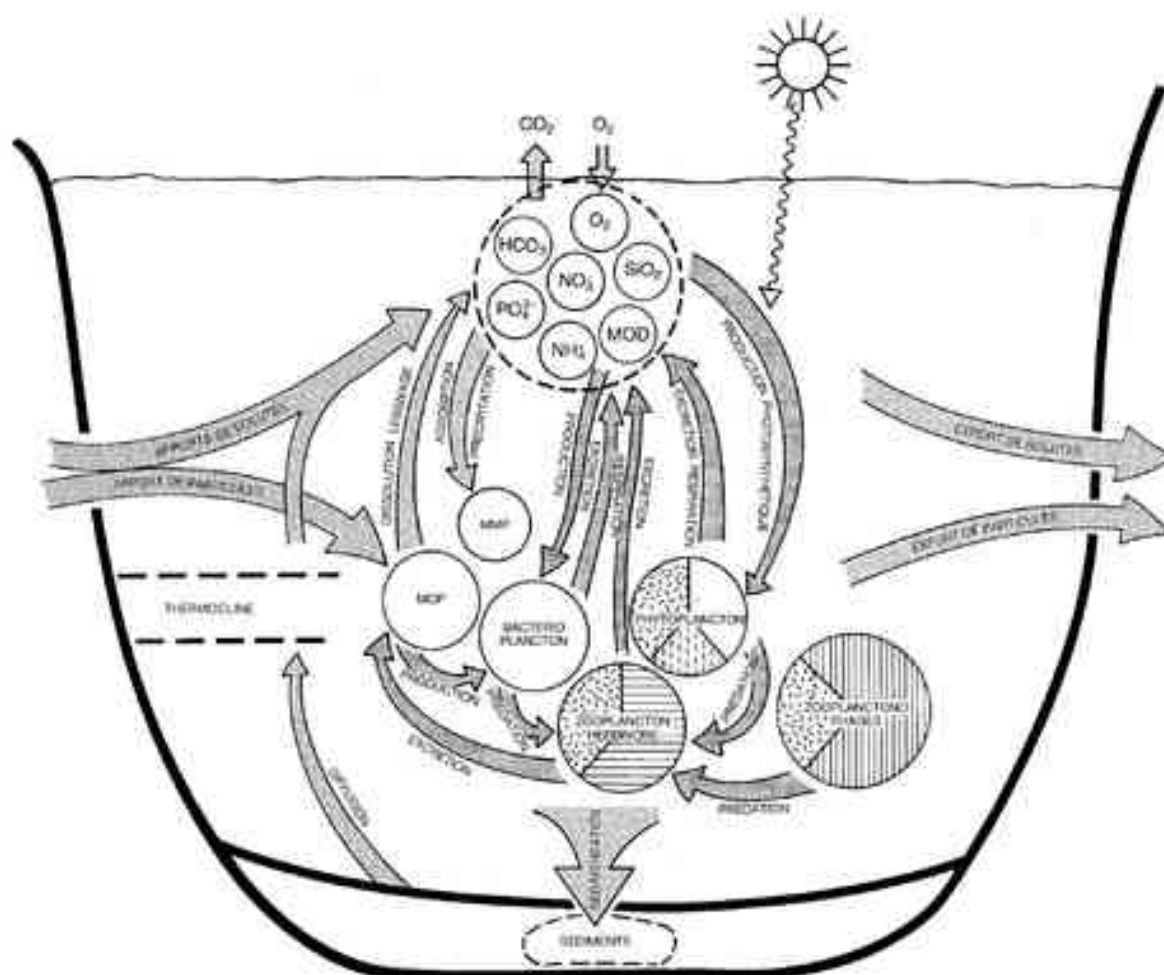
Modèle exceptionnel pour l'étude des transferts et des échanges intersystèmes, la Baie est également, en fonction des connaissances acquises sur la transgression flandrienne et la sédimentation actuelle, un lieu privilégié pour l'analyse des conséquences de l'élévation du niveau des mers sur les zones humides côtières (Programme Global Change).

■ Jean-Claude Lefeuvre, directeur du Laboratoire d'évolution des systèmes naturels et modifiés (UA 696 CNRS), Muséum national d'histoire naturelle, 36, rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris.



Du Mont Saint-Michel, on connaît surtout la situation précaire de son « insularité ». On sait moins que le fonctionnement global de la baie, complexe d'écosystèmes interactifs en évolution, fait l'objet de recherches soutenues par la Commission des communautés européennes. (CNRS, cliché L.M. Guillon).

LES MODÈLES DYNAMIQUES D'ÉCOSYSTÈMES LACUSTRES



L'évolution annuelle des variables chimiques et biologiques qui caractérisent la « qualité des eaux » d'un lac résulte d'un ensemble de processus physiques, chimiques (flèches bleues) et biologiques (flèches rouges) fortement interactifs. Les modèles dynamiques d'écosystèmes lacustres tentent de simuler le comportement de ce réseau fonctionnel en fonction de variables externes au système (composantes climatiques, apports du bassin versant, gestion hydraulique des retenues).

La construction de ces modèles de simulation repose sur une formulation mathématique des flux d'échange (flèches) entre les divers compartiments (cercles) abiotiques et biotiques. La délimitation de ces compartiments constitue la principale difficulté de la modélisation du système biologique. La diversité des organismes appartenant à un même niveau trophique (cercles jaunes) conduit à distinguer des unités fonctionnelles plus homogènes (figurées) correspondant à des groupes systématiques, à des espèces

dominantes, à des types trophiques ou à des classes de taille. La principale limite de cette représentation détaillée est la quantité d'informations nécessaires, chaque variable introduite entraînant une multiplication du nombre de paramètres à identifier.

Jacques Capblancq, professeur à l'université Paul Sabatier, directeur du Laboratoire d'hydrobiologie (UA 695-CNRS), université de Toulouse III, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

Ecosystèmes terrestres

Les recherches écologiques et environnementales ont été longtemps dominées par la référence à un état de stabilité et d'homogénéité concrétisé par la notion idéaliste de climax. Il n'y avait de bon écosystème que naturel, sous-entendu protégé de toute influence de l'homme.

Les forêts, les montagnes, les espaces à faible densité de population, tropiques et hautes altitudes, supposés peu soumis à l'action humaine, ont été les champs d'action favoris des écologistes.

C'était faire bien peu de cas du poids de l'homme et du poids de l'histoire auxquels ont été soumis tous les écosystèmes. Peu à peu cependant se

sont imposés les concepts d'hétérogénéité, de perturbation, d'évolution cyclique... La théorie des catastrophes, la théorie holistique ont été utilisées. Surtout, le temps et l'espace sont pris en compte. La conséquence première est de reconnaître la place de l'homme, de ses activités, des usages dans les recherches environnementales. L'élargissement du champ des préoccupations à l'ensemble des systèmes biologiques ouvre la voie à une réflexion féconde au plan fondamental et d'où ne sont pas absentes les préoccupations de conservation, de gestion et d'aménagement des milieux.

Jean-François Dobremez

La pollution des sols

Le sol est aujourd'hui menacé : les activités humaines introduisent nombre de contaminants minéraux et organiques qui altèrent sa fonction essentielle de filtre actif.

Jacques Berthelin
et Philippe Adrian

Le sol, site privilégié du fonctionnement des écosystèmes terrestres et des cycles biogéochimiques, comprend des constituants (ma-

tières minérales, matières organiques, eau, gaz, organismes vivants), qui en font un filtre efficace mais fragile, garantissant la qualité des eaux et des végétaux (Fig. 1).

Mais les activités humaines (agricoles, industrielles, domestiques) entraînent des contaminations minérales et

organiques dont nous présentons trois exemples.

Les nitrates dans les sols

Sur les 9 millions de tonnes de nitrates apportés (fertilisation) ou produits (minéralisation) par an dans les sols fran-

gais, 7 sont consommés par les plantes. Le reste est entraîné, pour l'essentiel, vers les nappes phréatiques où leur teneur acceptable ne doit pas excéder 50 mg/l sous peine d'occasionner des risques pour la santé par formation de nitrates. Une bonne gestion des apports de nitrates dans les agrosystèmes peut limiter la contamination des nappes. Mais il existe d'autres remèdes, comme l'utilisation des bactéries dénitrifiantes, qui peuvent réduire, *in situ* ou dans des réacteurs biologiques, les nitrates en azote.

Les métaux « lourds » sous surveillance

Des métaux comme le cadmium, introduits dans les sols par les roches, les retombées atmosphériques naturelles ou d'origine anthropique, les épandages de fertilisants et de déchets peuvent être toxiques pour l'homme.

La teneur moyenne en cadmium, inférieure à 2,5 ppm dans les sols non contaminés, atteint 20 ppm en zones industrielles et urbaines. Les contaminations sont en général comprises entre 2 et 25 g/ha/an des zones rurales aux zones industrielles. L'absorption de cadmium par les plantes utilisées pour l'alimentation animale et humaine dépend non pas de sa seule teneur, mais de sa biodisponibilité, liée elle-même au facteur sol. Par exemple, l'absorption par des plantes maraîchères peut être jusqu'à 6 fois plus forte sur sol acide (pH 4,6) que sur sol neutre (pH 6,7).

Dans les systèmes sol-plante, ces métaux vont être soumis à des phénomènes de solubilisation/précipitation et d'adsorption/désorption, qui dépendent de leur teneur, des phases organiques et minérales présentes, du mode d'apport, de l'activité microbienne, de la mycorhization des plantes, dont le rôle doit être précisé pour prévoir les risques de passage aux plantes et aux nappes.

Les pesticides et le risque de contamination diffuse

Chaque année, la production mondiale et l'utilisation de 300 millions de tonnes de composés organiques, dont 1 000 substances nouvelles, entraînent une contamination de l'environnement, donc des sols.

Les grandes voies de transformation de substances xénobiotiques comme les pesticides des traitements phytosanitaires (Fig. 2), et certaines réactions (photoconversion, biodegradation, adsorption, volatilisation), sont relativement bien connues. Il n'en est pas de même pour la formation et le devenir des résidus dans les plantes et les sols dont la formation dépend du nombre et

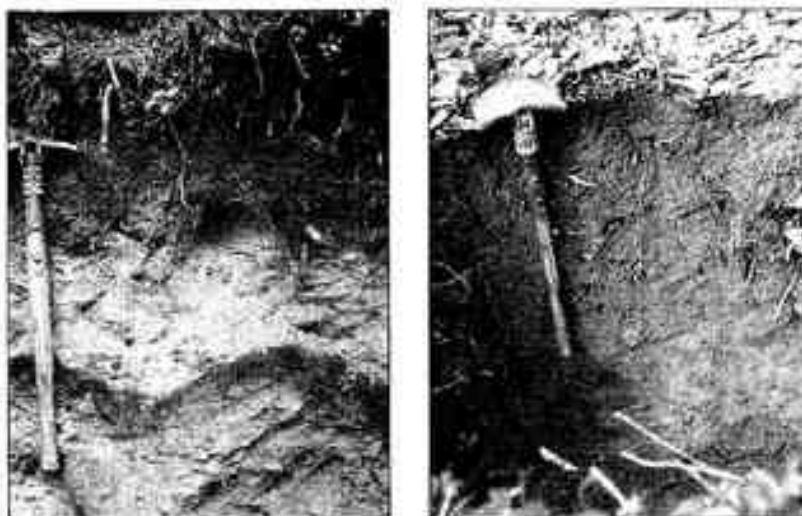


Fig. 1. Profil de deux sols à fonctionnement divergent. L'un, podzol à strates (horizons) bien individualisées; l'autre, sol brun à profil et horizons peu différenciés. Le podzol provoque une exportation et redistribution de la matière organique et des éléments minéraux, alors que le sol brun assure une meilleure conservation des éléments minéraux en favorisant leur recyclage par la végétation.

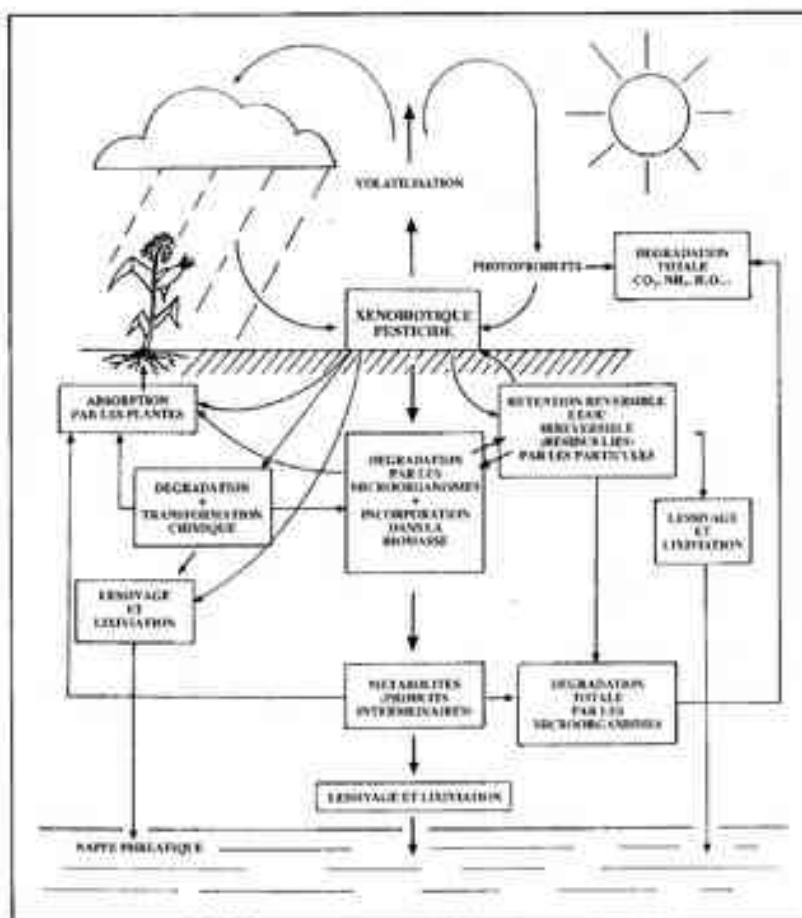


Fig. 2. Schéma des grandes voies de transformation de substances xénobiotiques dans les systèmes sol-plante.

de la nature des substituants et du type de métabolite. Ces résidus, inextractibles sans changement de leur nature chimique, présentent des risques écotoxicologiques dus à l'halogénéation possible des humus, à leur persistance et au risque de relargage de composés toxiques transférables aux plantes et aux nappes.

Conclusion

Les sols sont des réacteurs biochimiques qui peuvent, sans aucun doute, jouer leur rôle de filtre actif si les apports sont limités et peu perturbants. Mais les contaminants minéraux et or-

ganiques qu'ils reçoivent présentent un danger à court et long terme pour la qualité des eaux et des végétaux destinés à la consommation humaine et animale.

Une des conséquences de ces risques mal définis a conduit à la création d'un observatoire de la qualité des sols, dont l'objectif final est de disposer, en France, d'une centaine de sites où des campagnes de mesures sont complétées par un suivi continu des événements affectant les sites.

Même si, actuellement, les sols ne peuvent pas être purifiés comme l'air et l'eau, l'établissement de modèles de

prévision et d'évolution pourrait déjà limiter les dommages. Mais une meilleure connaissance du fonctionnement des sols et des interactions « plantes-microorganismes-sols-polluants » permettrait la prévention et/ou le traitement des contaminations.

Jacques Berthelin, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe Géomicrobiologie du Centre de pédologie biologique (UP 6831 CNRS).

Philippe Adrien, chargé de recherche au CNRS, Centre de pédologie biologique (UP 6831 CNRS), BP 5, 17, rue Notre-Dame des Pauvres, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

La forêt méditerranéenne

La forêt méditerranéenne est passée du stade des multiusages à un abandon presque total. Les modifications écologiques consécutives ont considérablement accru l'extension des incendies et les risques de pollution génétique.

Marcel Barbero, Roger Loisel et Pierre Quézel

Jusqu'au siècle dernier, la forêt méditerranéenne française était exploitée en système de multiusages : utilisation différenciée des taillis pour bois de chauffage, tan et charbonnette ; utilisation pastorale des espaces préforestiers, des maquis et garrigues, cultures extensives sur les sols profonds

mais aussi cueillette des menus produits de la forêt (plantes aromatiques et médicinales, bulbes, graines...).

Ces forêts n'occupaient alors que de très faibles superficies et l'épuisement des sols par surutilisation déterminait leur très faible productivité. Les catastrophes naturelles et les perturbations par l'érosion et les crues étaient fréquentes et ont conduit l'Etat à entreprendre des travaux considérables de reboisement des principaux massifs comme l'Aigoual et le Ventoux.

L'exode rural vers les villes en voie d'industrialisation dès la fin du XIX^e siècle a affecté par ailleurs la Provence, puis les départements côtiers du Languedoc-Roussillon. Il s'est traduit par une modification progressive mais continue des paysages forestiers liée à la régénération naturelle, surtout sur les anciennes zones de culture et pâturage ou de conifères expansionnistes. Ainsi, entre 1878 et aujourd'hui, le Pin d'Alep et le Pin sylvestre sont passés respectivement de 35 000 ha à 161 000 ha et de 30 000 ha à 230 000 ha sur l'ensemble de la Provence.

Une forêt fragilisée

Cette explosion naturelle des conifères a été accompagnée de celle de nombreuses espèces arbustives très combustibles comme les cistes, genêts, ajoncs, calycotomes et romarins. Par ailleurs, depuis une trentaine d'années, la sous-utilisation ou l'inutilisation des taillis pour le bois de chauffe pose des problèmes considérables en matière d'aménagement et de gestion de ces espaces, où les diverses espèces de chênes, voire de châtaigniers, épuisées par des siècles d'utilisation répétitive, sont de moins en moins productives et de plus en plus sensibilisées aux attaques parasitaires. Cette évolution a conduit à un accroissement considérable des risques d'incendies, et dans le Var, les surfaces incendiées supérieures à 8 000 ha se sont accrues par trentaine d'années avec des maximums de 29 020 ha en 1942, 68 470 en 1943, 23 396 en 1950, 22 500 en 1968. De plus, un développement de ravageurs est à craindre surtout au niveau des taillis dont les peuplements sont inexploités, continus et souvent de même âge. Soulignons aussi l'apparition de risques de pollution génétique au niveau des peuplements autochtones du fait de l'introduction de « races » allochtones souvent mal adap-



Forêt incendiée à Saint-André des Alpes (Alpes de Haute-Provence), (© INRA, cliché P. Delabrière).

tées au point de vue écologique, pour de simples raisons économiques ou de facilité (Pin d'Alep, Pin sylvestre).

Néanmoins, le taux de boisement moyen de la région a augmenté depuis le siècle dernier : de 23 % en 1878, il est passé à 38 % aujourd'hui. Cette situation s'accroît puisque les économistes envisagent en Provence, pour les vingt prochaines années, un abandon des surfaces cultivées équivalent au département du Vaucluse, soit plus de 357 000 ha.

Cette évolution de l'espace et la sous-utilisation, voire l'arrêt d'exploitation des forêts, ont eu nombre de conséquences importantes. L'hétérogénéité structurale et architecturale des écosystèmes forestiers s'est accrue, tandis qu'une remontée biologique (richesse et diversité spécifiques) par transformation de stades sylvigénétiques s'est produite. Des modèles dynamiques originaux par substitution d'essences mieux adaptées à la concurrence (remplacement des sclérophylles par les caducifoliées) se sont constitués et des structures préforestières « hors équilibre », où les stratégies d'occupation spatiale et temporelle par les végétaux sont aléatoires, se sont développées.

Les objectifs

Compte tenu de cet état de fait, les axes de recherche privilégiés de notre équipe sur les forêts méditerranéennes concernent actuellement ces différents points. Ils sont complétés par une approche expérimentale *in natura* des perturbations par l'étude des fonctions de réponse des végétaux.

Un point fort de toutes ces recherches est leur reproductibilité à l'échelle circum-méditerranéenne où les sur-usages et non-usages ont tendance à créer des oppositions dans l'évolution des écosystèmes entre le Nord et le Sud. Le Nord, en remontée biologique, voit se multiplier la fréquence des perturbations de type incendies ; le Sud, soumis aux phénomènes d'érosion et de désertification liés au développement démographique, voit son capital forestier se réduire (plus de 3 % par an) et les structures en place se banaliser par sur-exploitation.

■ Marcel Barbero, professeur à l'université Aix-Marseille III, Laboratoire de botanique et écologie méditerranéenne.

■ Roger Loisel, professeur à l'université Aix-Marseille III, Laboratoire de botanique et écologie méditerranéenne.

■ Pierre Quézel, professeur à l'université Aix-Marseille III, directeur du Laboratoire de botanique et écologie méditerranéenne (IMEP URA 1152 CNRS), Centre Saint-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 4.

Aménager un espace moins sensible au feu

Le paysage forestier méditerranéen n'échappera à la fatalité des incendies qu'en combinant de multiples activités sur une mosaïque d'espaces écologiques diversifiés.

■ Bernard Hubert

Si le feu a toujours été une des composantes des espaces méditerranéens, il n'a pris l'ampleur qu'on lui connaît que depuis le déplacement des activités économiques hors de ces zones. Dans l'ancien système agraire, l'utilisation des terres en fonction de la topographie, des sols, de l'exposition, de l'éloignement, structurait l'espace en un maillage très diversifié. Dans un tel écosystème, le feu ne trouvait que peu

de combustible pour se développer : le « risque feu » était socialement contrôlé.

Les relations entre la société rurale et la forêt ayant subi d'importantes transformations, le développement de certaines formations végétales n'a plus été contrôlé et le délaissement a conduit à un paysage végétal homogène et très embroussaillé, donc très sensible aux incendies.



La ténacité pastorale permet de minimiser les risques d'incendie. De plus, les broussailles sont une ressource intéressante pour les troupeaux de chèvres. (© INRA).

Revenir à un usage multiple

C'est en fonction du « risque feu » que doivent être proposés les aménagements de ces espaces. Les équipements de défense des forêts contre les incendies (DFCI) ne permettent pas, à eux seuls, de les protéger, pas plus d'ailleurs que des projets forestiers ou agricoles isolés. On ne peut retrouver un maillage efficace que dans une combinaison raiso-

onnée de ces activités. Cela implique de revenir à un usage multiple de l'espace et de remettre en question la spécialisation pratiquée depuis ces dernières années. Il s'agit en particulier de combiner dans le temps les principales activités identifiées (foresterie, agriculture, élevage, chasse, tourisme, etc.) sur des espaces dans des états diversifiés : forêt dense, forêt claire, coupures agricoles, clairières, boisements de feuillus et de

résineux, parcelles voisines d'âges et de conduites sylvicoles différents.

Une telle mosaïque écologique ne peut se conserver qu'en organisant ses transformations dans le temps. En région méditerranéenne, l'élevage joue un rôle particulier. L'éleveur s'appuie sur un espace offrant une gamme de ressources végétales dont la qualité et les périodes de production se répartissent dans l'année et sur des espaces différents. Il mobilise ces ressources en réalisant une chaîne fourragère ajustée aux besoins de son troupeau en fonction des cycles de reproduction et des productions.

Ainsi utilisée, chaque portion d'un espace rural méditerranéen a plusieurs

fonctions : par rapport aux objectifs de production et de protection du forestier, par rapport à la chaîne fourragère des éleveurs... mais on peut aussi en définir pour les chasseurs (reproduction, gagnage, réserve), les touristes (espaces ouverts ou fermés, mosaïques paysagères). Le projet le plus harmonieux sera celui qui résoudra au mieux les différentes contradictions de cet aménagement multi-fonctions.

Un tel projet mobilise toute une gamme de connaissances relatives aux techniques de sylviculture comme à celles de débroussaillage. Il demande aussi de savoir conduire le pâturage de formations complexes et hétérogènes, de maîtriser les ressources végétales herbacées

et arbustives et d'organiser un système fourrager fondé sur l'utilisation de ce type de ressources.

Ceci appelle la production de nouveaux savoirs combinant la connaissance des phénomènes biologiques et l'organisation des pratiques humaines, dans une dynamique où l'action du temps (saisons, années, générations...) est utilisée comme un véritable élément de gestion.

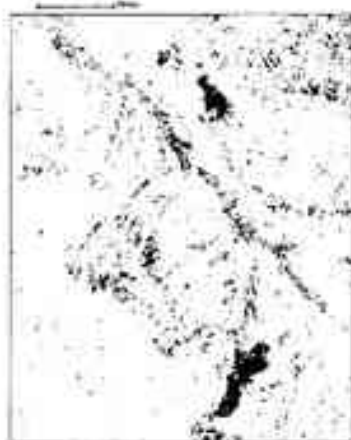
■ Bernard Hubert, directeur de recherche à l'INRA, directeur de l'Unité d'écodéveloppement, INRA, Centre de recherches d'Avignon, BP 91, 84140 Montfavet.

Le morcellement forestier

Dans les régions à forte activité économique ou agricole, comme la Vallée de la Garonne, la proportion de la couverture forestière tombe à 4% (alors qu'elle représente un cinquième de la France). Le paysage forestier, morcelé, prend alors la forme d'une mosaïque naturelle. Son étude permet de mieux comprendre comment l'homme transforme le paysage où il vit et de mesurer l'influence de ces transformations sur les espèces vivantes qui le par-

tagent avec lui. Pour ce faire, on numérise les images obtenues par télédétection, ce qui permet de visualiser les formations boisées.

La distribution statistique des superficies est dissymétrique : les bosquets sont d'autant plus nombreux que leur surface est réduite. Il devient alors possible de comparer des mosaïques forestières de régions différentes ou de suivre, au cours du temps, l'évolution d'un même paysage. La forme des bosquets apparaît extrêmement variable. Elle ne peut s'étudier que grâce à des méthodes spécialement destinées à mesurer la complexité des contours d'un objet. L'étude de la relation entre le périmètre et l'aire d'un polygone permet d'en apprécier la complexité et de la « résumer » à travers une grandeur caractéristique : la dimension fractale D . On sait à la suite des travaux de Mandelbrot que lorsque la complexité de la forme d'un polygone augmente, la valeur de D se rapproche de 2. On peut par ce calcul apprécier l'importance des lisières, zones de contact entre la forêt et ce qui l'entoure, hébergeant souvent une faune propre.



Le morcellement forestier vu par le satellite Landsat au nord-ouest de l'agglomération toulousaine.

■ Jacques Langa, professeur à l'université Toulouse III, Centre d'écologie des ressources renouvelables (LP 8211 CNRS), 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse Cedex.

Forêts résineuses de montagne

Faute de régénération régulière, les forêts résineuses de montagne vieillissent et semblent inexorablement vouées à la disparition.

■ Jean-François Dobremez

Après l'optimum démographique du XIX^e siècle, les montagnes françaises et européennes se sont dépeuplées. De vastes reboisements ont permis de lutter contre l'érosion des sols et les avalanches, d'améliorer le cycle de l'eau, d'augmenter la richesse biologique et la diversité des milieux.

Des peuplements qui vieillissent

Mais dans la plus grande partie des forêts résineuses, il n'y a pas de régénération. Aucun individu jeune ne remplace les arbres vieillissants. Les peuplements sont voués à la disparition, entraînant le cortège des maux qu'ils combattaient. Le seul remède est la plantation, difficile au plan technique, souvent insupportable au plan financier.

On est tenté de croire que ce dysfonctionnement est dû, justement, à la na-

ture artificielle des peuplements et que les forêts vierges ou naturelles ajoutent, à toutes leurs autres qualités supposées, un rajeunissement et une régénération continus, garants de leur avenir et leur donnant la structure idyllique des futaies jardinées.

Les recherches menées dans les sapinières montagnardes de l'Himalaya du Népal (forêts de *Abies spectabilis*) montrent qu'il n'en est rien : mêmes difficultés de régénération, même capitalisation de bois sur pied, même vieillissement inexorable.

- A l'échelle de la placette d'étude (500 à 700 m²), la régénération se fait localement par «vagues» d'une durée moyenne d'une quarantaine d'années. La vague une fois passée, plus aucun individu ne peut s'implanter ou survivre et la concurrence intraspécifique n'exclut pas systématiquement les plus jeunes individus.

- A l'échelle du massif forestier, la structure résulte de la juxtaposition, sous forme de mosaïque, d'éléments de population couvrant 500 à 1 000 m², très

différents les uns des autres par leur âge et par leur densité.

- Sur une grande surface, celle d'un bassin versant, la répartition des âges des arbres est tout à fait anormale : bosse encore peu marquée dans les classes d'âge de 10 à 30 ans, bosse très nette de 55 à 110 ans; 35 % des individus sont apparus entre les années 1891 et 1905 et 3 % seulement de 1931 à 1945.

Tout se passe comme si, à la faveur d'un événement imprévisible (chablis, incendie, coupe...) intéressant une petite surface, la régénération se déclenchait pendant une période relativement longue, mais avec un arrêt brusque après une quarantaine d'années.

Ces taches élémentaires de régénération n'apparaissent pas régulièrement dans le temps, mais suivent des fluctuations de l'ordre du siècle.

Vous avez dit « naturel » ?

En définitive, le manque de renouvellement continu semble un caractère « naturel » des forêts résineuses de mon-

tagne.

La régénération est le résultat de processus élémentaires très nombreux : floraison, pollinisation, fécondation, maturation, dissémination, consommation des graines, germination... Chacune de ces étapes est soumise aux fluctuations de l'environnement physico-chimique et biologique et a donc un aspect imprévisible.

La sommation des processus élémentaires aboutit à des cycles de grande amplitude.

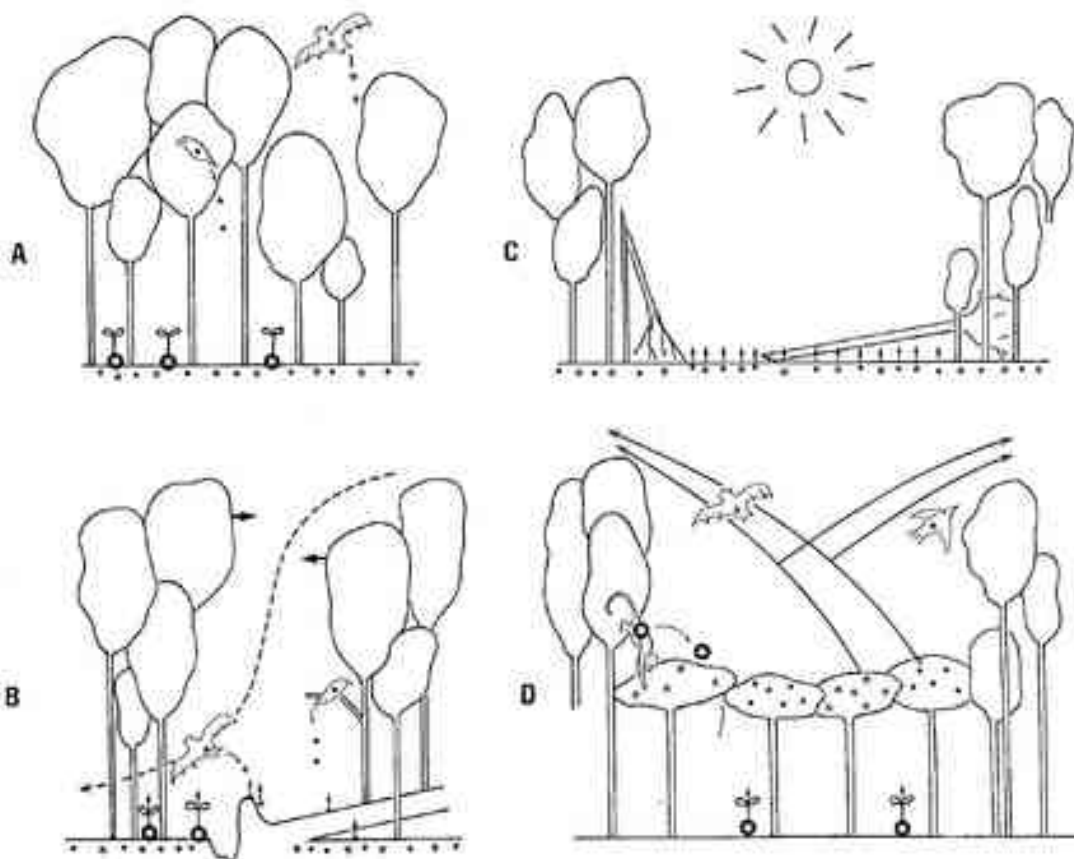
Elucider l'ensemble des mécanismes qui règlent le rajeunissement des forêts d'altitude demandera de très nombreuses années de travail, sans avoir aucune assurance qu'ils seront contrôlables. La gestion de ces milieux est ainsi rendue très difficile.

Jean-François Dobremez, professeur à l'université de Franche-Comté, directeur du Groupe de recherches Himalaya-Karakorum (GDR G0123 CNRS), 1, place Aristide-Briand, 92195 Meudon Cedex.



Sapinière vierge sans régénération dans l'Himalaya au Népal. (Cliché J.F. Dobremez).

LA FORÊT TROPICALE EN QUATRE VOILETS



Ces quatre schémas mettent en évidence l'importance des interactions plantes-animaux et le rôle des vertébrés dans la dissémination des graines dans les mécanismes de régénération de la forêt en Guyane française.

A. La forêt mature est soumise à une « pluie de graines » permanente, de l'ordre de 10 000 unités/jour/ha ; ces graines, de petite taille, proviennent de plantes pionnières et sont transportées essentiellement par des oiseaux (●) ou chauves-souris (*). Elles constituent dans le sol un « stock » en dormance, tant que la lumière sera filtrée par la voûte forestière. D'autres graines, de grosse taille, issues d'espèces de la forêt mature et le plus souvent transportées par des plus gros animaux, germent dans la pénombre du sous-bois puis restent également en latence, mais à l'état de plantules (○).

B. Après la chute d'un arbre (chablis) formant une petite trouée, le stock de graines en dormance dans le sol, obstrué par l'abondante litière, ne peut germer. L'ouverture de la voûte modifie le comportement des vertébrés et donc les modalités de la pluie de graines : certaines, transportées par des chauves-souris, atteignent la hutte de déracinement, seul point suffisamment ensoleillé pour leur développement (●). D'autres, transportées par des oiseaux, atteignent la périphérie du chablis et, moins exigeantes en lumière, y germent (○). Enfin, les plantules en latence se développent (○), et les arbres restés en place, traumatisés ou non, participent partiellement à la fermeture de la trouée (→).

C. Après formation d'un grand chablis, la litière est rapidement éliminée. L'ensoleillement direct tue la majorité des plantules en latence,

mais lève la dormance des graines d'espèces pionnières au sol (300 germinations/m²) qui formeront rapidement un couvert végétal dense. Quand il s'agit d'une grande ouverture due à l'activité humaine, ce sont les mêmes mécanismes, amplifiés, qui interviennent.

D. Quelques années plus tard, des graines provenant d'espèces de la forêt mature voisine (○) y sont apportées par les grands vertébrés frugivores. Elles germent et se développent à l'ombre des plantes pionnières qu'elles remplaceront progressivement en quelques décennies.

■ Pierre Charles-Dominique, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de régénération forestière et inter-relations plantes-animaux (UA 1183 CNRS), Muséum national d'histoire naturelle, Laboratoire d'écologie générale, 4, avenue du Petit Château, 91800 Brunoy.

La savane

La recherche fondamentale en écologie des savanes doit se traduire en modèles de développement.

Luc Abbadie,
Jean-Claude Menaut
et Carlos Prado

La savane couvre plus du quart des terres émergées. Elle subit un stress hydrique saisonnier, aggravé de l'imprévisibilité des pluies aux périodes de croissance de la végétation. S'y ajoutent la diversité et la pauvreté des sols, ainsi que le feu dont la variété des régimes est un facteur de maintien de l'hétérogénéité locale. L'hétérogénéité spatiale est encore accentuée par la pression des activités humaines traditionnelles : élevage, défrichement et jachère (Fig. 1).

La variabilité environnementale et structurale de la savane se manifeste par un équilibre dynamique herbes-arbres, résultant en une mosaïque de types de végétation de densité et de distribution des ligneux très variables. Elle n'empêche cependant pas ces différents faciès de posséder nombre de caractéristiques écologiques communes. Les travaux récents tendent à démontrer l'unicité fonctionnelle des savanes, la variabilité des facteurs et des paramètres affectant la vitesse des processus et non leur nature.

Cette spécificité débouche sur des perspectives tant théoriques qu'appliquées. La complexité de ces systèmes écologiques et la nature des contraintes qu'ils subissent en font de bons modèles pour l'étude de la spatialisation des processus et de leurs conséquences à différents niveaux hiérarchiques. On avancerait ainsi dans la compréhension du rôle de l'hétérogénéité des ressources et de la structure, à différentes échelles d'espace et de temps, dans la dynamique d'un système complexe.

L'objectif de recherches en savane est de dégager et de quantifier les mécanismes qui régissent sa dynamique. Cela implique de répondre à quatre questions-clés :

1. Quelles sont les propriétés structurales et fonctionnelles des savanes qui leur permettent de résister à des perturbations, à différentes échelles d'espace et de temps ?

2. Existe-t-il des seuils de perturbation au-delà desquels les écosystèmes de savane sont irréversiblement modifiés, même après disparition du facteur de perturbation ?

3. De quelle façon et avec quelle amplitude la structure et le fonctionnement de différents types de savane changent-ils en réponse à des perturbations ?

4. Quels mécanismes déterminent les mode et vitesse de réponse – et de récupération – à une perturbation ?

Répondre à ces questions conduit à avancer des hypothèses et à les tester par une approche expérimentale qui permettra d'analyser les effets d'une modification d'un paramètre ou d'une variable d'état. Si les modèles ne peuvent tester les hypothèses, ils permettent de prédire les conséquences de leur validation ou de leur réfutation. La modélisation joue donc un rôle fondamental dans l'exploration des questions-clés, dans la détermination de l'importance des divers processus et dans l'analyse des possibles effets d'une perturbation sur le long terme.

Un modèle pour explorer la dynamique de la savane

Les modèles classiques de la dynamique des communautés végétales traitent ressources et populations comme des entités homogènes. On peut au

contraire considérer que la dynamique de la végétation résulte d'événements locaux qui agissent au niveau de l'individu et de son voisinage immédiat. On est ainsi conduit à développer des formalismes explicitant la position des individus dans l'espace et rendant compte de la variabilité des traits biologiques qui leur permettent d'explorer l'hétérogénéité du milieu : dispersion, dormance, vitesse de croissance et durée de vie.

Dans cet esprit, un modèle de simulation a été bâti afin d'explorer les conséquences de l'hypothèse suivante : la distribution des communautés ligneuses de savane est d'abord déterminée par les traits biologiques des individus, puis façonnée par des facteurs externes).

On a pour cela pris en compte l'expression spatiale de la dynamique de population des espèces qui comprend la création de sites favorables à l'établissement (vides initiaux ou créés par la mortalité des individus), la dispersion (conquête des sites) et la capacité d'une plante à se maintenir sur un site (mode et vitesse de croissance, durée de vie) (Fig. 2).

Chacune de ces phases est soumise à des contraintes qu'il importe de formuler au niveau de chaque individu. Ainsi, une plantule s'établissant dans la strate herbacée subira la compétition de ce couvert jusqu'à ce qu'elle le dépasse, à condition toutefois d'avoir été épargnée par le feu pendant ce temps. Si elle s'établit sous un couvert ligneux, elle échappe à la concurrence des herbacées



Fig. 1. Savane arbustive, région de Lamto (Côte-d'Ivoire). (Cliché J.C. Menaut).

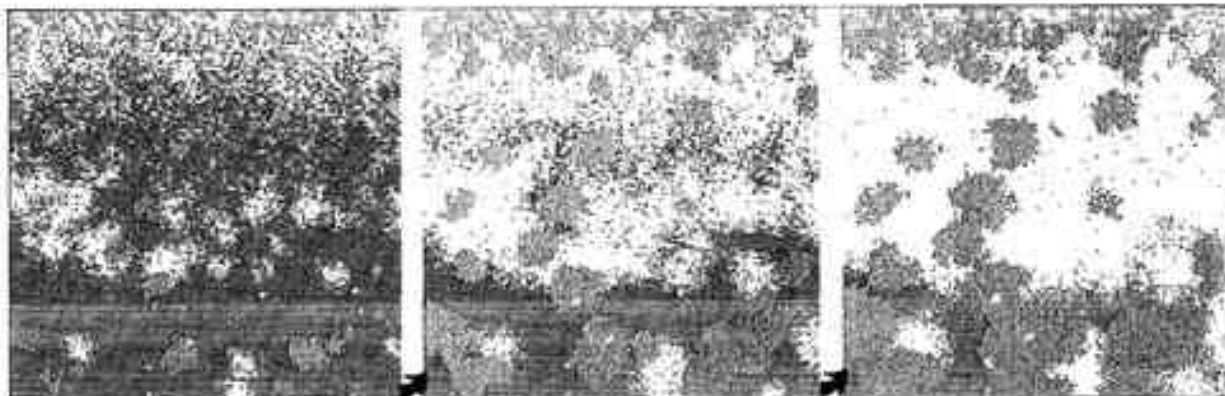


Fig. 2. Variation de la structure spatiale de la végétation au cours du temps. Résultats obtenus par simulation d'une communauté de quatre espèces (C. Prado, ENS-CEFE).

et à sa destruction probable par le feu, mais doit subir ses voisins immédiats, de plus grande taille. On aboutit ainsi à un peuplement ligneux constitué d'arbres épars et de bosquets, caractéristique de la savane.

Un tel modèle permet de comprendre comment la dynamique des bosquets (création, durée, éclatement) dépend de certains traits biologiques des individus (dispersion, longévité), modulés

par des phénomènes de compétition. Il montre également le seuil en-deçà duquel les variations des facteurs du milieu, qui s'expriment ici surtout au travers de la croissance de la strate herbacée et de l'intensité des feux, ne produisent pas de changement d'état du peuplement ligneux. Seule une perturbation brutale peut modifier cet état et conduire le système vers un autre régime dynamique.

Luc Abbadie, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'écologie (URA 258 CNRS).

Jean-Claude Monant, ingénieur de recherche au CNRS, responsable du programme « écologie des savanes », Laboratoire d'écologie (URA 258 CNRS).

Carlos Prado, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'écologie (URA 258 CNRS), Ecole normale supérieure, 46, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.

La désertification du Sahel

Longtemps mise sur le compte de la seule activité humaine, la sécheresse qui a sévi au Sahel de 1968 à 1984 semble bien être due à une véritable crise climatique.

Pierre Rognon

De 1968 à 1984, les effets conjugués d'une sécheresse exceptionnelle et d'une pression anthropique croissante ont provoqué la première grande catastrophe écologique contemporaine.

Au début, cette sécheresse a été comparée à celles de 1912-16 ou 1939-44 et les dégradations en chaîne observées ont été attribuées à une occupation humaine plus dense. Ainsi l'exploitation excessive des arbres comme pâturage de substitution et comme source d'énergie a entraîné une modification radicale du paysage végétal. Sur des sols dénudés, l'érosion éolienne a provoqué une remobilisation des dunes fixées et la déflation des fines particules des sols. Celles-ci, mises en suspension, ont augmenté la fréquence des brumes sèches, etc. La crise du Sahel était ainsi assimilée au phénomène général de dégradation des

terres cultivées, dû à un mauvais contrôle des techniques agricoles et de la croissance démographique. Son ampleur exceptionnelle au Sahel s'expliquait par la fragilité de sols sableux hérités d'époques géologiques où ces régions avaient été arides.

Sur ces bases, les experts, réunis en 1977 à Nairobi par l'UNESCO, ont proposé de lutter contre cette désertification par de nouveaux modes d'aménagement, en particulier la création de barrages verts. Cette politique n'était réalisable que si les causes profondes de la crise étaient d'origine anthropique. Quand il est devenu évident que la durée et l'intensité de cette sécheresse étaient sans précédent depuis le début du siècle, certains chercheurs ont pensé que les modifications de l'albédo sur des sols dénudés ou la concentration des poussières dans les couches moyennes de l'atmosphère avaient pu, au-delà d'un seuil critique, perturber les mécanismes de la pluie, soit par une accéléra-

tion de la subsidence de l'air, soit par un échauffement de l'atmosphère.

Une crise climatique

Au même moment, les études climatiques et hydrologiques montraient qu'après les sécheresses records de 1972-73 et l'année quasi « normale » de 1974, les déficits s'accroissaient jusqu'à de nouveaux records en 1982-84. Il devenait alors évident que cette crise était en relation avec un changement climatique durable que les géologues travaillant sur les variations « naturelles » des limites du Sahara avaient, très tôt, comparé à ceux qu'ils reconstituaient, à d'autres échelles de temps, au cours des quarante derniers millénaires. Ils attribuaient ces variations aux modifications de la position des hautes pressions tropicales sur le Sahara, elles-mêmes en rapport avec des modifications plus fondamentales de la circulation générale. Cette hypothèse a été confirmée par les études sur la mousson africaine actuelle, montrant que les années 1972 et 1983 coïncidaient avec des déséquilibres à l'échelle du Globe.

Des 1981, deux géologues français en extrapolant le caractère cyclique des sécheresses du Sahel prévoyaient une inversion de tendance en 1985. Cette prévision semble se réaliser avec l'amélioration de la pluviosité depuis



Arbres morts sur pied à la suite de la sécheresse (1984) ou abattus par les éleveurs pour donner leur feuillage en pâturage aux troupeaux. Ces *Balanites egyptiana* poussaient sur les berges d'un lit abandonné par le Niger au nord-est de Tombouctou sur la piste de Gao. (Cliché Y. Poncet).

1985 et les pluies très excédentaires du Sénégal au Soudan en 1988.

Il paraît clair aujourd'hui que le moteur de cette catastrophe écologique a été une crise climatique d'une ampleur insoupçonnée jusqu'à là. L'idée d'un profond changement climatique avait conduit à envisager une révision des grands aménagements hydrauliques et à

déplacer certaines populations vers des régions plus humides. Cette crise a certainement été amplifiée par les contraintes exercées sur le milieu par des populations à fort accroissement démographique. Si la pluviosité redevient « normale », on peut penser que les nouveaux moyens mis en œuvre pour économiser l'eau contribueront à limiter les

risques d'une nouvelle catastrophe, qui serait, cette fois, provoquée par les seules dégradations anthropiques.

Pierre Rognon, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, Département de géodynamique des milieux continentaux (UA 722 CNRS), université Paris VI, tour 16, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

L'espace rural évolue

L'évolution de l'espace rural français depuis 6 000 ans aboutit aujourd'hui à une baisse de la fertilité des terres et à des phénomènes de pollution diffuse.

Jean-Claude Lefeuvre

Longtemps négligé par les écologistes, l'espace rural apparaît désormais comme un lieu d'étude privilégié, susceptible d'aider au renouvellement des approches populationnelles et écosystémiques classiques par une meilleure prise en compte de l'espa-

ce, du temps et surtout de l'homme à travers ses activités et les changements qu'elles induisent.

La constitution de l'espace agricole français, comme celui d'une grande partie de l'Europe, s'est faite progressivement (avec des phases d'accélération) au cours de 6 000 ans d'histoire humaine, essentiellement par déforestation (45 millions d'hectares de forêt il y

a à peine 3 000 ans, 6,7 millions d'hectares à la veille de la Révolution) et par conquête de terres nouvelles (drainage de zones humides et poldérisation des marais).

Très schématiquement, quatre grands types de paysage résultent de ces origines : les systèmes de grande culture, caractérisés par la présence de bosquets « reliquats » de faible surface ; les bocages aux prairies et champs cultivés entourés de haies et talus boisés, formant un réseau à maille variable selon les régions ; les zones à fortes contraintes pédoclimatiques, présentant une structure en mosaïque où alternent espaces agricoles ouverts, friches, landes *sensu lato*, et forêts ; enfin, les plaines des marais desséchés, parcourues par un réseau dense de canaux de



Paysage de burons dans le Cantal. (© INRA, cliché L. Vidal).

► drainage à végétation aquatique et amphibie.

Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale, propriétés des structures en mosaïque ou en réseaux, conséquences écologiques de la fragmentation des écosystèmes sont autant de thèmes actuellement « porteurs » en écologie pour lesquels l'espace agricole constitue un support indispensable. Les transformations profondes subies par l'espace agricole français, initiées par une régression impressionnante du nombre d'actifs agricoles, sont dues en grande partie à l'avènement du machinisme agricole, à une politique de restructuration foncière, à un agrandissement des parcelles et des exploitations, aux changements des pratiques agricoles (engrais minéraux, pesticides), à la sélection de nouvelles variétés de plantes et à l'extension de leur aire de répartition (maïs), aussi bien qu'à la politique agricole commune (PAC) sur la résorption des excédents et à la politique agricole mondiale.

L'intensification des productions

Ces changements se traduisent par la coexistence de deux phénomènes contrastés : d'une part, l'intensification des productions végétales sur les terres considérées comme les plus fertiles et des productions animales sur de faibles surfaces (élevage hors sol) et, d'autre

part, l'abandon des terres à fortes contraintes ainsi que, depuis peu, des terres caractérisées par des productions excédentaires (prairies normandes et élevages de bovins laitiers). Cette intensification est considérée comme responsable d'une baisse de fertilité des terres, ainsi que de phénomènes de pollution diffuse.

Une partie de ces problèmes a été très bien étudiée en zone bocagère. Ces recherches ont montré que le réseau de haies et de talus boisés n'avait pas uniquement un effet brise-vent, mais jouait aussi un rôle climatique général, un rôle hydrologique (contrôle des eaux de ruissellement et de l'érosion, des transferts de substances nutritives et de pesticides, écrêtement des crues) ainsi qu'un rôle biologique (contrôle des ravageurs, maintien des pollinisateurs, etc.). Elles ont surtout montré que, pour comprendre le fonctionnement de tels systèmes, il faut éviter la partition de l'espace entre agrosystèmes, étudiés par les agronomes, et infrastructures écologiques (haies, fossés, bosquets). L'espace agricole forme un tout : il n'est pas composé d'agrosystèmes, mais d'agroécosystèmes, c'est-à-dire de champs et de zones d'inculture en interaction, dont l'une des originalités tient à ce qu'ils sont « pilotés » en grande partie par l'homme. A un niveau d'organisation supérieur, les écosystèmes, c'est-à-dire l'ensemble des agroécosystèmes inclus dans un bas-

sin versant, et particulièrement les infrastructures écologiques, régulent des flux d'eau, de substances nutritives (engrais, lisiers) et de pesticides (pollution diffuse) dont dépendent la qualité des eaux des rivières qui les drainent (nitrates, phosphates) et, à terme, la qualité des eaux littorales (marées vertes).

Le second phénomène, l'abandon, bien connu par ses conséquences écologiques, économiques et sociales (3 600 incendies et 34 000 ha de friches brûlés par an), fait partie de l'actualité dans la mesure où la politique du gel ou de l'abandon des terres agricoles peut s'étendre demain sur des sols agricoles déstructurés.

Les problèmes posés par le maintien de l'outil de production que constitue le sol, le contrôle de la qualité de l'eau et l'ampleur du phénomène de marginalisation de certaines terres agricoles obligent à reconsidérer la recherche sur ce type de milieu dans une optique très proche de celle qui est développée actuellement en écologie du paysage, sachant concilier des niveaux d'organisation différents, de la parcelle au bassin versant, et inclure les activités humaines dans sa démarche.

Jean-Claude Lefeuvre, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, directeur du Laboratoire d'évolution des systèmes naturels et modifiés (LIA 696 CNRS), Muséum national d'histoire naturelle, 36, rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris.

L'érosion des terres agricoles

L'érosion hydrique des sols affecte maintenant fréquemment les plateaux et collines limono-loessiques des pays du nord-ouest de l'Europe.

■ Anne-Véronique Auzet

Le détachement et le transfert de terre posent des problèmes au sein des parcelles agricoles du fait de la destruction des cultures (arrachement de semis, ensevelissement des plants au niveau des zones d'atterrissement) et de la gêne que causent les rigoles et les ravines pour les travaux agricoles. En outre, si le sol est peu épais, son ablation se traduit par une diminution de la réserve hydrique potentielle.

Mais les nuisances associées aux transferts et aux stagnations d'eaux boueuses en provenance des terres agricoles posent aussi d'importants problèmes aux collectivités qui ont à faire face aux engraisements et aux salissements de chaussées, aux atterrissements de boue dans les habitations, aux comblements des ouvrages (fossés, retenues...), à l'accroissement de la turbidité des cours d'eau et parfois des nappes souterraines dans les régions karstiques.

Les formes observées traduisent des différences de fonctionnement et leur prévision permettrait d'orienter les stratégies de protection.

Malgré l'apparente uniformité des paysages occupés par les grandes cultures, le détachement des particules de sol et leur transport peuvent générer différentes formes d'érosion qui se distinguent suivant le caractère diffus ou concentré des arrachements de terre, la densité des incisions (leur espacement peut être dans certains cas d'ordre métrique ou hectométrique) et par la localisation de ces incisions, sur les versants eux-mêmes ou dans le fond de vallons secs.

Ainsi, dans les bassins versants agricoles, les aires de contribution au ruissellement et les zones sources de sédiments sont interdépendantes, mais leurs limites ne sont pas identiques. Leur distribution dans l'espace et dans le temps dépend de la conjonction entre la chronologie des événements climatiques et la chronologie des opérations

culturales qui déterminent, dans des conditions morphopédologiques données, des états de surface propres à générer du ruissellement et/ou des sédiments.

Les différentes formes d'érosion traduisent donc des combinaisons différentes de processus de formation et de concentration du ruissellement, d'arrachement des particules sous l'action de la pluie ou de l'écoulement et de transport principalement lié au ruissellement.

L'étude de la sensibilité des bassins agricoles à différents types de formes d'érosion, entreprise en collaboration par des agronomes et des pédologues de l'INRA et des géomorphologues du CNRS, doit conduire à préciser la distribution et la chronologie des processus hydrologiques et érosifs au sein de petits bassins versants agricoles. Ces recherches permettraient ainsi de définir les domaines de validité des mesures à mettre en œuvre, soit au niveau des systèmes de cultures pratiqués, soit au niveau de l'aménagement (parcellaire, localisation de surfaces à couvert permanent...).

■ Anne-Véronique Auzet, chargée de recherche au CNRS, Centre d'études et de recherches éco-géographiques (URA 95 CNRS), 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg Cedex.



Ravine d'érosion en Pays de Caux. (© INRA, cliché G. Saignet)

Mesurer l'érosion

L'utilisation des méthodes topométriques (photogrammétrie terrestre et télémétrie infrarouge sans réflecteur) pour le suivi, temporel et spatial, de l'évolution des ravines d'érosion en montagne permet de déterminer à la fois l'ampleur des modifications locales du milieu physique et l'exportation globale des matériaux solides hors de la ravine, entre deux dates, sans perturber son fonctionnement (me-

sures indirectes).

L'exploitation stéréoscopique des clichés obtenus avec une caméra métrique – ou restitution photogramétrique – et la constitution de modèles numériques de terrain permettent d'établir et de comparer, à plusieurs dates, des planches de courbes de niveaux des ravines à très grande échelle (1/50 à 1/250, équidistance de 10 ou 20 cm), de calculer et localiser, selon une grille de points, les variations d'altitude de la surface du sol au cours du temps, puis de déterminer l'ablation moyenne qui en a résulté.

Les mesures fournies par le télémètre associé à un théodolite don-

nent directement les distances entre l'appareil et une grille de points visés, situés à la surface du sol. En opérant à deux dates, on peut calculer les écarts de distances entre les surfaces des modèles successifs pour les points de la grille et estimer la tranche moyenne érodée.

Dans les deux cas, la précision des mesures effectuées est de 0,5 à 1 cm.

■ Tatiana Muxart, directeur de recherche au CNRS, directeur-adjoint du Laboratoire de géographie physique (URA 141-CNRS), 1, place Aristide-Briand, 92195 Meudon Cedex.

Un observatoire pour l'environnement

Mettre en relation les changements écologiques, économiques et sociaux : tel est l'objet de l'observatoire micro-régional pilote qui se met en place sur le Causse Méjan.

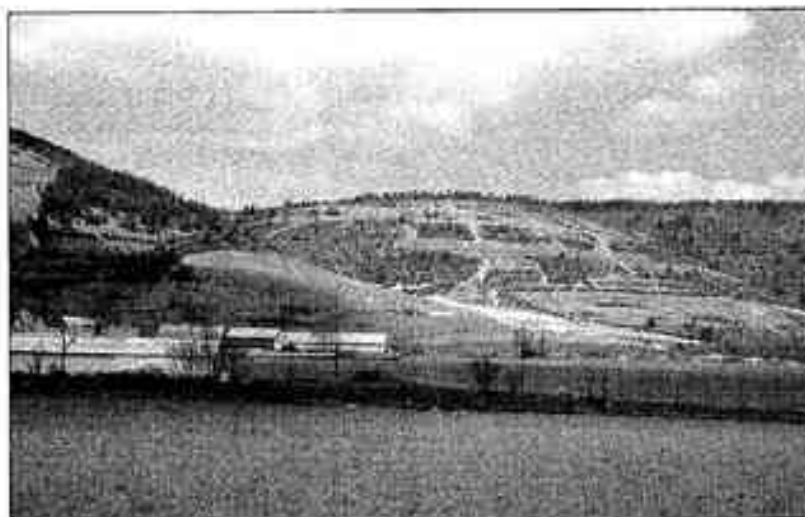
■ Marcel Jollivet

Soit un milieu fragile, faiblement productif et soumis à un climat rude, mis en valeur par un élevage ovin moderne qui est économiquement conduit à le solliciter de plus en plus. N'y a-t-il pas risque à terme que celui-ci soit dégradé par la pression accrue subie et qu'il en coûte de plus en plus d'efforts et d'argent aux éleveurs pour en tirer parti, à un moment où il leur faut précisément produire moins cher ? N'y a-t-il pas risque par conséquent que l'élevage cessant de fournir un revenu satisfaisant, la population ne parte, laissant ces espaces à l'abandon ? Peut-il y avoir des façons de gérer les ressources pastorales, ou des utilisations alternatives de ces milieux, qui évitent ces écueils ? Pour répondre à ces questions, il faut inventer un dispositif de recherche à caractère global et largement interdisciplinaire associant sciences de la nature et sciences de la société. Il faut avoir des hypothèses claires sur les processus économiques, écologiques et sociaux les plus importants et sur leurs relations et donc construire un schéma d'analyse intégré. Pour pouvoir tester ces hypothèses et le jeu complexe des interactions, il faut saisir les dynamiques à l'œuvre. Il faut donc disposer d'un outil d'observation permettant de fabriquer les séries de données exigées par le schéma d'ana-

lyse. D'où l'idée de mettre en place un « observatoire interdisciplinaire » micro-régional qui, outre son intérêt pour la recherche, doit permettre de suivre les évolutions les plus importantes à toutes fins utiles pour le gestionnaire. Celui qui se met en place sur le Causse Méjan a l'intérêt d'être un prototype de

valeur générale sur le plan méthodologique.

■ Marcel Jollivet, directeur de recherches au CNRS, Groupe de recherches sociologiques (LP 18-CNRS), bât. G, université Paris X, 92001 Nanterre Cedex.



Sur le Causse Méjan, les défrichements récents observés sur d'anciens parcours embroussaillés, même s'ils risquent d'entraîner une érosion des sols, voient une dégradation des pelouses, sont le reflet d'une adaptation des systèmes d'élevage à la crise économique et au contexte local. (© INRA-ESR Montpellier, cliché J.P. Chassany)

Milieu urbain

Pôles d'attraction puissants, parfois même en compétition, les villes attirent une population à la recherche des éléments vitaux qu'elles sont susceptibles d'apporter: travail, échanges de biens ou d'informations, loisirs... Cependant les crises urbaines n'ont cessé de surgir sur tous les continents, et elles ne sont pas réservées aux mégalofoles. Aux transformations écologiques négatives, les

sociétés industrialisées répondent en tentant de juguler les pollutions les plus graves, ou en mettant en place des projets d'urbanisme proposant une place importante à la « nature ». Reste pourtant que, même lorsqu'elles assurent correctement l'essentiel de leurs fonctions, les villes sont, de par leurs structures mêmes, des milieux générateurs de tensions.

Antoine Haumont

L'environnement urbain

Si les actions publiques contre les pollutions et nuisances semblent porter des fruits, les milieux urbains voient se développer d'autres pathologies liées directement à leurs structures physiques et sociales.

■ *Antoine Haumont*

La plupart des villes des pays industrialisés disposent désormais de systèmes d'observation sur les éléments physiques, chimiques et biologiques des milieux urbains: l'état de l'air et des eaux, de la flore et de la faune, les niveaux du bruit sont régulièrement examinés, pour inspirer et fonder les actions publiques qui visent l'élimination des pollutions et des nuisances.

L'évolution récente de ces indicateurs est encourageante, sans que l'on distingue précisément ce qui, dans cette évolution, revient à la réglementation ou aux changements techniques, ou bien à des évolutions plus générales, comme la désindustrialisation et le desserrement des aires urbanisées. Les recherches sur les eaux urbaines illustrent le passage d'une problématique des pathologies à des projets intégrés de re-

conquête: les saumons dans la Tamise ou la Seine propre supposent des systèmes assez complexes, où d'ailleurs le cycle de l'eau n'est presque plus « naturel ». Ce qui n'exclut pas des situations en permanence proches des seuils critiques, notamment dans la pollution atmosphérique, comme celle d'Athènes où, en juillet 1987, la conjonction de la canicule, de la pollution et du sous-équipement a été meurtrière.

Les nouvelles complexités des milieux urbains et les modes de vie suscitent cependant de nouvelles pathologies et de nouvelles gênes. Les troubles provoqués par le bruit, les tensions qui résultent pour les citadins de l'incapacité de mener diverses séquences de la vie quotidienne selon le schéma qu'ils avaient prévu, sont directement liés aux structures physiques et sociales des milieux urbains. Cette situation contribue, avec d'autres causes, à une demande croissante de confort.

La situation est différente dans la plupart des villes des pays en voie de développement, et notamment dans les plus grandes. Les générations successives de nuisances connues par les pays industrialisés y sont toutes présentes, plus quelques autres; l'insuffisance des réseaux physiques est particulièrement grave: la destruction ou la désorganisation de l'environnement naturel ajoutent au désastre.

La croissance urbaine des XIX^e et XX^e siècles a suscité plusieurs vagues de propositions et de recherches dont l'objectif est de réconcilier les citadins avec l'environnement naturel. Une partie de ces réflexions entre dans les projets d'urbanisme donnant une place importante à la nature, des cités jardins aux villes nouvelles ou aux îlots naturels dans les milieux urbains. D'autres efforts visent une interprétation globale des relations entre les ressources naturelles et l'urbanisation, souvent à partir de modèles empruntés à l'écologie ou à la dynamique des systèmes. Les résultats ne sont pas toujours pertinents.

■ Antoine Haumont, chercheur associé au CNRS, Centre de recherche sur l'habitat (UA 1245 CNRS), Ecole d'architecture de Paris-La Défense, 92023 Nanterre Cedex.

Les couronnes périurbaines

Les nouveaux « ruraux » tiennent à préserver leur cadre de vie et son « confort naturel ». Mais ils occupent aussi les lieux les plus convoités à des fins résidentielles...

Francis Beaucaire

Le peuplement des franges périphériques de nos agglomérations a entraîné au cours des deux dernières décennies des modifications des milieux d'accueil. Parmi elles, les questions d'environnement sont loin d'être absentes, même si elles se sont développées avec une certaine inertie par rapport à des problèmes immédiats en matière de logement, d'équipements publics ou d'infrastructures.

Des enquêtes menées auprès des nouveaux résidents, il semble ressortir que la recherche d'un cadre de vie plus proche de la « nature » n'est venue qu'après le désir d'accéder à un logement plus vaste ou à la propriété privée. Pourtant, une fois installés, les « nouveaux ruraux » sont devenus très vigilants envers toute atteinte à leur cadre de vie, c'est-

à-dire envers la poursuite du mouvement de périurbanisation, le seuil de basculement de la campagne vers une forme lâche de la banlieue demeurant fort bas dans l'esprit de ces populations.

De multiples exemples de cette pugnacité à préserver les éléments les plus apparents du « confort naturel » par opposition à la situation des villes – saturées, bruyantes et polluées – sont donnés aujourd'hui par la résistance opposée aux projets d'infrastructures de transport : lignes d'interconnexion TGV à Paris ou Lyon, autoroutes pénétrantes ou en rocade, en particulier en Ile-de-France (A86, A14 et A16). Les réactions que ces projets ont pu déclencher sont très vives. Ainsi, par exemple, devant la vigueur des protestations des riverains, des associations et des élus, l'autoroute A14 devra passer en tunnel sous la forêt de Saint-Germain, malgré l'énorme surcoût engendré.

Les couronnes de peuplement lâche sont donc des lieux de conflit entre des usages du sol apparemment contradictoires. Mais cette opposition en recoupe une autre, moins directement sensible aux nouveaux résidents : les milieux les plus variés et les plus riches en termes d'écologie ou de paysage sont aussi les lieux les plus convoités à des fins résidentielles. Ils sont ainsi dotés d'une valeur foncière qui contribue à en augmenter la fragilité : zones humides, lisières forestières, versants de vallées...

A travers ces deux familles de conflits d'usage ou de voisinage, l'environnement apparaît au bout du compte comme une donnée fondamentale, dans la réalité des choses comme dans leur perception sociale, et cela en des lieux où, *a priori*, les questions d'environnement ne se posent guère avec acuité, entre la « vraie nature » des écologues d'un côté, et les nuisances massives du centre des villes de l'autre.

Francis Beaucaire, maître de conférence, enseignant-chercheur au Laboratoire de géographie urbaine, université Paris X, 200, avenue de la République, 92001 Nanterre Cedex.



Crétail (Val-de-Marne) : le lac et la préfecture. Les urbanistes des villes nouvelles ont ouvert l'ancien espace clos pour y placer dans le soleil, la verdure, ou l'eau, des « unités » plus ou moins autonomes. Ceci n'a pas entravé la création de franges périurbaines peuplées de « résidents » à la recherche d'un cadre de vie plus proche de la nature. (© Mairie de Crétail, diffusion par La Documentation Française, cliché P. Chouraki).

Les comportements en milieu urbain

Les grandes villes industrielles favorisent-elles la psychose ?
Les manifestations agressives ne sont qu'un des aspects des comportements déviants observés en zones urbaines.

André Galinowski et
Karim Atroun

Les troubles du comportement observés en milieu urbain sont variés. D'une manière générale, les villes ont toujours été considérées comme un milieu malsain par opposition à la campagne. En instituant le corps subalterne des officiers de santé en 1803, le législateur espérait en faire des médecins de campagne: «Les habitants des campagnes», disait-il, ayant des mœurs plus pures que ceux des villes ont des maladies plus simples et qui exigent par ce motif moins d'instruction et moins d'apprentis».

La ville favorise l'apparition de troubles mentaux, phobies ou paniques. La conséquence en est une consommation de plus en plus effrénée de tranquillisants comme en témoigne une enquête INSEE (1982) qui montre que 42 % de la consommation des psychotropes concerne les troubles mentaux, 38 % l'insomnie et 20 % les maladies à expression psychosomatique. Cette surconsommation s'inscrit dans un contexte de généralisation sociale de l'angoisse en zone urbaine due en particulier aux facteurs suivants: la perte des valeurs sociales (famille, religion, syndicalisme), la survalorisation de l'individu et de la réussite personnelle, le refus de la douleur et du vieillissement.

Pourquoi l'agressivité ?

Parmi les modèles proposés pour comprendre un comportement fr-

queusement observé en zone urbaine, le comportement agressif, la théorie de l'apprentissage social de Bandura distingue:

- une phase d'acquisition de la conduite aggressive: le sujet est en contact avec des modèles ayant un comportement agressif;
- des facteurs de déclenchement: l'individu répond à la provocation en fonction des conséquences qu'il anticipe en l'absence de réponse aggressive de sa part. La soumission à une autorité recommandant un comportement agressif joue également un rôle déclenchant (Milgram);

- des facteurs de maintien: externes (récompenses tangibles, approbation sociale) et internes (déshumanisation des victimes, projection sur autrui de sa propre agressivité...).

L'agressivité prend sa forme la plus grave lorsque le sujet souffre de troubles dits «psychotiques». La civilisation occidentale favorise-t-elle la psychose et sa forme la plus inquiétante: la schizophrénie? Cooper et Sartorius (1977) notent la moindre gravité et la relative rareté des évolutions psychotiques chroniques dans les civilisations pré-industrielles. Ils proposent trois explications:

- les grandes villes industrielles conduisent à la constitution de schizophrènes reconnaissables et rejetés;
- la baisse de la mortalité infantile amène la survie d'individus génétiquement vulnérables à la maladie;
- en milieu urbain, les familles jouent un rôle moindre alors que la complexité des tâches et des enjeux sociaux aug-

mente, rendant l'adaptation plus difficile.

Ainsi les facteurs en cause sont-ils sociaux, biologiques et psychologiques dans le cas de la schizophrénie, comme dans les multiples comportements déviants qui gênent le fonctionnement du groupe et dans les troubles individuels favorisés par la confrontation avec la collectivité.

André Galinowski, chef de clinique, Service hospitalo-universitaire de santé mentale et de thérapie, centre hospitalier Sainte-Anne.

Karim Atroun, interne en psychiatrie, Service hospitalo-universitaire de santé mentale et de thérapie, centre hospitalier Sainte-Anne, 1, rue Cahuis, 75674 Paris Cedex 14.

Effets du bruit

Si le bruit de l'environnement ne rend pas sourd, à la différence de certaines situations de travail, il perturbe la qualité de l'audition. En milieu scolaire, par exemple, il ne fait pas que diminuer l'intelligibilité du discours professoral, il entrave le développement de l'attention des enfants et affecte l'acquisition du langage.

La gêne psychologique engendrée par le bruit est largement modulée par différents facteurs, telle l'évaluation globale de l'environnement (différence réalité-ambiance attendue). Elle influence certains comportements: elle conduit par exemple les habitants à renforcer l'isolation de leur appartement très exposé au bruit, ou à l'inverse provoque leur fuite, et l'on assiste dans des quartiers très bruyants à un changement total de la classe sociale des habitants, le prix des appartements diminuant.

Les travaux les plus récents mettent en évidence des perturbations physiologiques (du sommeil, du rythme cardiaque et de la pression sanguine), pouvant engendrer à leur tour des troubles somatiques chez les personnes les plus fragiles. Une question se pose alors aux chercheurs: peut-on diminuer la sensibilité des personnes au bruit ?

Michel Vallier, directeur de recherche à l'INRETS, directeur adjoint de l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité-Rhône-Alpes, 109, avenue Salvador Allende, case 24, 69675 Bron Cedex.



Le milieu urbain favorise-t-il le développement de comportements agressifs ? Certaines situations qu'on ne rencontre guère qu'en ville peuvent conduire ses habitants à abandonner toute « civilité ». (© Libération, cliché P. Artignan).

La gestion locale des déchets

Les responsables municipaux considèrent comme parfaitement légitime de financer le service d'élimination des déchets, tandis que la récupération doit « voler de ses propres ailes ». Est-ce bien rationnel ?

■ Gérard Bertolini



Décharge sauvage dans le Briançonnais. (© INRA, cliché G. Bouloux).

Deux logiques différentes s'appliquent à l'élimination et à la récupération des déchets. La logique de l'élimination, devenue dominante, s'inscrit dans une perspective de service public, assortie d'un monopole local renforcé par les économies d'échelle et la technicité croissante de la filière. Quant au financement, il est assuré par l'impôt.

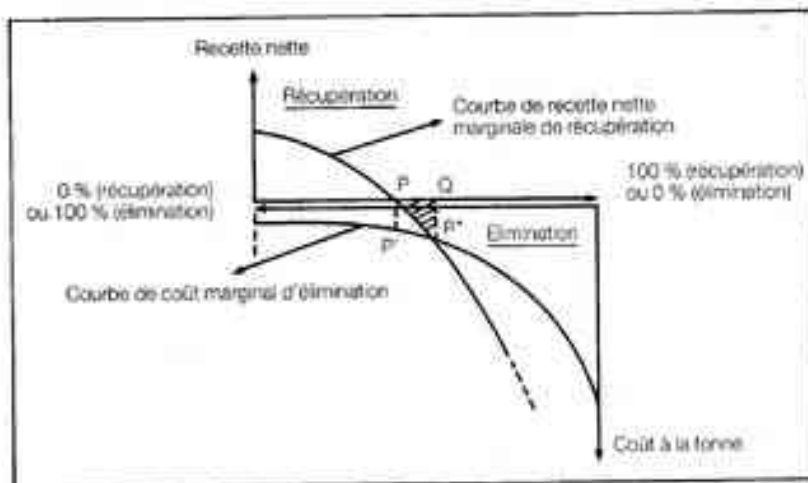
En contrepoint, suivant une logique classique d'économie de marché, la récupération doit être rentable pour être entreprise : les recettes sont des recettes marchandes, provenant de la vente des produits récupérés ; en outre, les rendements

sont décroissants lorsqu'on vise une récupération plus poussée des gisements.

L'activité séparée de ces deux secteurs se traduit pour la collectivité (locale en premier lieu) par un sous-optimum économique. L'atteinte de l'optimum nécessite qu'une rémunération pour service rendu soit également versée au secteur de la récupération. Certaines villes allemandes l'ont bien compris et intègrent les deux logiques : cela conduit à des taux de récupération élevés et à des prix de vente/départ des matériaux récupérés nuls, voire négatifs.

D'autres facteurs jouent dans le même sens : la multiplication des situations de blocage de projets de nouvelles installations de traitement provoque un regain d'intérêt en faveur de la récupération ; pour les produits récupérés, vendus sur des marchés dont le caractère international induit de fortes fluctuations des prix et des recettes, s'ajoute l'intérêt de disposer de débouchés locaux plus stables.

Tout cela pousse à envisager la récupération et l'élimination comme deux fonctions à intégrer, et non plus comme deux secteurs séparés d'exploitation d'un même gisement.



Récupération et élimination : à la recherche d'un optimum d'ensemble. La partie supérieure représente le problème de la récupération, sous la forme de sa courbe de recette nette marginale, fonction décroissante du pourcentage récupéré dans le gisement de déchets. Laissez à elle-même, la récupération détermine son niveau d'activité au point P, où sa recette marginale est nulle. Le secteur de l'élimination, représenté dans la partie inférieure, doit alors traiter le reste des déchets. Ce faisant, le coût total de l'élimination est plus élevé que dans le cas où la récupération pousse son activité jusqu'au point Q qui apparaît comme l'optimum d'équilibre entre les deux secteurs, correspondant au point P* où les deux courbes marginales s'égalisent. Pour obtenir ce résultat, la collectivité devrait prendre en charge le coût correspondant à l'aire PQP*.

■ Gérard Bertolini, chargé de recherche au CNRS, Economie et économétrie de l'environnement (UA 934 CNRS), université de Lyon I, 43, boulevard du 11 novembre 1918, 69621 Villeurbanne.

Origines sociales des impacts

L'homme agit sur son environnement. D'où vient cette action, quelles raisons l'animent ? La réponse la plus évidente est que l'homme aménage son environnement en fonction des besoins qu'il se définit, des projets qu'il forme et des capacités techniques qu'il peut mobiliser, tous facteurs que l'histoire transforme. Mais l'impact de l'homme résulte aussi de la face cachée du projet aménageur : l'ignorance, entendue au double sens de « ne pas savoir » et « ne pas s'intéresser ».

Les sciences de l'homme s'attachent à dévoiler l'arrière-plan de ce jeu de l'intentionnalité et de l'ignorance et à saisir les mécanismes et processus

sociaux à l'œuvre. Trois éclairages sont proposés ici. Le rôle primordial de l'imaginaire propre à une culture est mis en évidence dans le cas de sociétés primitives qu'on pourrait croire les plus soumises à leur environnement. Avec le paysage de la Camargue, se présente une « nature » paradoxale, car produite par l'interaction non voulue entre plusieurs activités productives. On découvre enfin l'action diffuse et cachée, mais qui peut être majeure, de certains mécanismes institutionnels ou économiques, a priori étrangers à la question, comme les règles des finances publiques et de la fiscalité.

Olivier Godard

Milieux et sociétés

Il est nécessaire de prendre au sérieux le fait que les hommes interprètent leur environnement et que la nature revêt par là de multiples dimensions qui agissent sur leur évolution sociale.

 Maurice Godelier

Personne ne suppose plus aujourd'hui que la nature extérieure à l'homme lui impose directement ses modes de vie, ses modes de pensée,

ses formes d'organisation sociale. Une telle hypothèse a toujours semblé excessive et a fait place rapidement aux thèses « possibilistes ». Pour celles-ci, la nature se bornerait à offrir à l'homme les ressources variées des divers milieux et

écosystèmes de notre planète. Or, pour que certains éléments de la nature soient perçus comme des ressources pour l'homme, il faut des conditions particulières qui ont varié avec l'évolution de l'humanité et son histoire.

Parmi ces conditions figure au premier rang la base technique dont dispose une société pour agir sur la nature qui l'entoure et en disjoint certains éléments matériels utiles à sa reproduction. C'est ainsi que, pour tirer avantage des quantités exceptionnelles de poissons ou de crustacés qui s'accumulent saisonnièrement sur la côte nord-ouest de l'Amérique du nord et en Floride, les Indiens devaient disposer de techniques de capture en masse et surtout de techniques de conservation afin de répartir la consommation tout au long de l'année. Celles-ci impliquaient la construction de grandes installations fixes et la sédentarisation des populations autour des sites de pêche et de collecte. On a là une chaîne causale mais qui n'explique pas toute l'organisation de ces sociétés indiennes et ne suppose pas non plus qu'elles aient exploité toutes les ressources qui leur étaient accessibles sur la base de leurs techniques.

Les Pygmées et les Bantous face à la forêt

Pour expliquer la diversité des rapports des hommes avec la nature, il est donc nécessaire de tenir compte, le plus possible, des systèmes de représentations qu'ils s'en font et à l'intérieur desquels ils orientent leurs choix et légitiment leurs attitudes. Comparons par exemple les représentations opposées que se font, de la forêt équatoriale du Congo, les Pygmées Mbuti et les Bantous qui en tirent leurs conditions d'existence, les premiers par la chasse et

la cueillette, les seconds par l'agriculture sur brûlis. Pour les Pygmées, la forêt n'est pas seulement un ensemble de populations animales, végétales, c'est aussi une réalité surnaturelle, omniprésente, une divinité bienveillante à laquelle ils offrent des sacrifices et qui les remercie en poussant le gibier dans leurs filets. Les clairières défrichées par les Bantous apparaissent aux Mbuti comme un monde hostile où l'eau est polluée, la chaleur écrasante, les maladies nombreuses. Pour les Bantous, par contre, la forêt est une réalité hostile, inhospitalière, un obstacle qu'il faut abattre à la hache pour cultiver manioc et maïs. L'agriculteur bantou ne connaît pas bien la forêt. Il a peur de s'y perdre et d'y mourir, attaqué par des démons dont les Pygmées sont les complices. Dans cette opposition, se dessinent deux logiques économiques et sociales distinctes : les Mbuti vivent sans transformer de façon significative la nature, les Bantous, au contraire, doivent pour planter des tubercules et des céréales transformer la nature en y créant un écosystème artificiel (champs, jardins) qu'ils ne maintiennent que par un apport considérable d'énergie. Or, c'est dans la direction qu'indique l'exemple des Bantous que sont allées les sociétés qui, à partir du Néolithique, ont fait reposer leur vie matérielle sur l'usage de plantes et d'animaux domestiques qui ne pouvaient survivre sans le travail de l'homme. L'homme agit donc sur la nature, mais il le fait à partir d'un système d'interprétations de ses éléments visibles, ses forces cachées, ses régularités,

ses accidents. Et tout cela s'exprime dans des représentations qui combinent connaissances empiriques et savoirs imaginaires.

Une évolution irréversible

Peut-on aller plus loin et rendre compte des structures profondes des sociétés, tels les systèmes de parenté, à partir des diverses stratégies d'actions sur la nature ? Peut-on connecter un milieu, un mode de production et un mode de filiation sociale, le caractère matrilineaire ou patrilineaire de la parenté ? Jusqu'alors aucune corrélation significative n'a été découverte dans ce sens. Cependant on constate, à prendre les choses de très haut, que le développement de l'agriculture et de l'élevage a entraîné des processus irréversibles dans les rapports de l'homme à la nature, rendant impossible le retour à des modes de vie fondés exclusivement sur la chasse et la cueillette. Les diverses lignes d'évolution qui ont coexisté pendant des siècles s'arrêtent aujourd'hui ou se brouillent sous la contrainte de produire en masse et de produire pour vendre, « rationalité » des temps modernes prise dans d'autres attentes imaginaires, car les rapports des hommes à la nature contiennent toujours en eux les enjeux des rapports des hommes entre eux.

■ Maurice Godelier, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales, Laboratoire d'anthropologie sociale (UM 16 CNRS), EHESS, 54, boulevard Raspail, 75006 Paris.



Pygmées dans la région de Morigoumba. (© La Documentation française, cliché S. Schwarz).

La Camargue n'est pas « naturelle »

Depuis le Moyen Âge, la superposition d'entreprises humaines, souvent contradictoires, de valorisation de ce territoire lacustre et instable a contribué à la mise en place d'écosystèmes originaux qualifiés aujourd'hui d'espaces naturels.

■ Bernard Picon

Dans cette zone deltaïque en formation de 75 000 ha, soumise aux crues hivernales du Rhône et aux incursions de la mer, tout établissement humain permanent était impossible. Du Moyen Âge au XIX^e siècle, les hommes tentent de la coloniser dans une optique agricole. L'endiguement complet des deux bras du Rhône et de la mer est effectif en 1869. Faute d'apports naturels d'eau douce, le déficit hydrique qui sévit ici (500 mm de pluie, 1 500 mm d'évaporation) associé à une nappe aquifère salée provoque la salinité des sols de surface et donc leur stérilisation.



Industrie du sel en Camargue : tables et usine des Salins de Giraud (Bouches-du-Rhône). (© La Documentation française, cliché D. Vienney).

Un réseau complexe d'irrigation et de drainage est parallèlement mis en place pour dessaler les terres. 450 millions de m³ d'eau douce sont annuellement introduits sur le delta par pompage (riziculture). À partir de 1845, se met en place le plus grand marais salant d'Europe (900 000 tonnes de sel) par introduction artificielle d'eau de mer dans les étangs de basse Camargue (30 000 ha). La gestion hydraulique contradictoire et conflictuelle entre agriculture et industrie salinière débouche sur la création de la réserve nationale de Camargue au cœur du delta (1927) où le mélange des eaux de drainage agricole et des eaux salées favorise la permanence de marais saumâtres biologique-

ment très productifs (Vaccarès et étangs inférieurs, 15 000 ha). À l'agriculture, l'industrie salinière et la protection de la nature s'ajoutent aujourd'hui des activités tertiaires de masse (chasse, tourisme vert) qui consomment « la nature » ainsi produite. Depuis 1970, un pare naturel régional a pour fonction de gérer cette complexité, les équilibres socio-économiques étant ici les garants de l'existence des « paysages naturels ».

■ Bernard Picon, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche en écologie sociale (UA 1251 CNRS), Centre pluridisciplinaire de la Vieille Charité, CNRS-EHESS, 2, rue de la Charité, 13002 Marseille.

Environnement et finances publiques

Finances publiques et environnement ne font pas toujours bon ménage : ils ont pourtant de forts intérêts communs...

■ Claude Henry

L'environnement coûte cher, dit-on. Il est certain qu'on le sacrifie trop souvent pour de fausses économies. De vraies économies, cependant, il en existe, qui bénéficient à la fois aux finances publiques et à l'environnement : cela concerne aussi bien la manière dont l'argent public est prélevé que la manière dont il est dépensé.

Les prélèvements publics modifient l'attitude des agents économiques à l'égard de l'environnement. C'est

même la raison première pour laquelle certains prélèvements spécifiques ont été mis en place. Les redevances de pollution en sont l'illustration la plus connue : leur objectif principal est d'enrayer la dégradation de l'eau ou de l'air. Mais la fiscalité générale peut aussi avoir une influence importante. Des dégrèvements d'impôt, sur le revenu ou sur les sociétés, permettent dans certains pays la constitution de véritables patrimoines de milieux naturels, assurés dès lors d'une gestion adaptée et d'une protection solide contre les appétits de toutes sortes. À l'inverse, des dispositions fiscales d'importance apparem-

ment secondaire peuvent enclencher une logique dévastatrice.

Le mouvement d'investissements privés dans le boisement des Highlands d'Ecosse en est une illustration saisissante.

Les Highlands face aux impôts

En Grande-Bretagne, en effet, il existait jusqu'au printemps 1988 deux régimes d'impôt sur les revenus forestiers : le régime général d'imposition progressive de l'ensemble des revenus d'un contribuable, et un régime particu-

lier aux revenus forestiers (impôt forfaitaire faible). Chaque propriétaire pouvait choisir entre les deux régimes. De ces dispositions fiscales découlait le scénario typique de l'investissement forestier privé en Grande-Bretagne. Une personne dont le revenu total se situe dans les tranches supérieures d'imposition achète un terrain à boisier. Optant pour le régime général, elle peut déduire de son revenu imposable tous les coûts de préparation du terrain, d'établissement et d'entretien des plantations. Vers la sixième ou la septième année, les coûts d'entretien deviennent négligeables et n'ont donc plus d'effet appréciable sur le revenu imposable. Elle vend alors à une institution financière obligée de diversifier son portefeuille et intéressée par des perspectives de rendement, modestes certes, mais raisonnablement sûres. En optant pour le régime particulier, l'acquéreur paie très peu d'impôts au moment des coupes, c'est-à-dire dans la brève période où se concentrent les revenus forestiers.

Un double gaspillage

La mécanique fiscale transforme ainsi un rendement réel de 2 à 3 % en un rendement apparent de 7 à 8 %. Le Trésor public y a perdu des dizaines de millions de livres sterling, et les Highlands des dizaines de milliers d'hectares de ces landes qui fabriquent l'eau du saumon et du whisky, et qui fascinent tant de visiteurs. De ce double gaspillage, une alliance entre le Trésor et les défenseurs de l'environnement est enfin venue à bout en mars 1988.

Côté dépenses – dépense de l'argent public et dépense du patrimoine naturel public – la simultanéité des gaspillages ou, au contraire, des utilisations intelligentes est significative. Un exemple suisse : un projet d'autoroute le long du Rhône, dans le canton du Valais, a suscité une telle opposition que le gouvernement fédéral s'est résolu à en confier le réexamen à un médiateur indépendant. Au terme d'un long processus de conception et de discussion de variantes

alternatives, le médiateur a été en mesure de recommander un tracé dont la sobriété contraste avec la gourmandise du projet initial : longueur des tronçons très visibles – problème crucial dans une vallée relativement étroite – réduite des trois-quarts, moitié moins de matériaux de construction nécessaires, nombre de zones naturelles et de sites affectés par l'autoroute divisé par trois.

Cette sobriété correspond à un effort pour insérer au plus juste l'équipement dans son cadre naturel, plutôt que d'écraser ce cadre sous des ouvrages d'art grandioses. Les contribuables suisses y trouvent aussi leur compte. Aménager – quand du moins il faut aménager – avec plutôt que contre la nature, apparaît aussi un bon principe pour gérer les finances publiques.

■ Claude Henry, directeur de recherche au CNRS, professeur à l'Ecole polytechnique, Laboratoire d'économétrie de l'Ecole polytechnique (UA 206 CNRS), 1, rue Descartes, 75005 Paris.



L'île de Skye, rattachée géographiquement aux Highlands. (© SYGMA, cliché S. Franklin).

La fiscalité contre l'environnement

Alors que l'impôt peut être un instrument actif des politiques d'environnement, la fiscalité générale a souvent des effets pervers mal maîtrisés qui méritent d'être examinés.

■ Robert Hertzog

L'impôt peut d'abord être perçu comme outil de protection de l'environnement : il apporte des moyens aux services, finance des équipements, permet des compensations. Il peut inciter ou dissuader les agents économiques d'avoir certains comportements.

Mais on a découvert aussi que la fiscalité générale, avec ses masses considérables, indifférente à l'environnement, n'est pas neutre pour autant et mérite une radiographie d'ensemble pour repérer les dispositions indésirables ou qui valent d'être défendues au nom de l'environnement.

Par intérêt, la fiscalité assise sur des flux de dépenses ou de revenus est orientée vers la croissance des activités productives ou marchandes. Des groupes de pression économiques arrivent à infléchir l'impôt dans leur sens. Le « lobbying » des écologistes est ici trop marginal et récent pour laisser une trace.

Le Code Général des Impôts exonère de la taxe foncière sur les propriétés non bâties les marais asséchés, pendant les vingt premières années après le dessèchement. Or, les zones humides constituent des écosystèmes très riches. Il accorde une exonération de dix ans pour les terres incultes ou en friche depuis quinze ans, lorsqu'elles sont plantées en arbres fruitiers ou mises en culture, alors qu'elles peuvent jouer un rôle positif dans la préservation des flores ou faunes.

Les impôts locaux ont des effets mal maîtrisés et défavorables. La taxe foncière sur les propriétés non bâties est souvent assise sur une valeur surévaluée : le propriétaire qui doit un impôt pour un fonds est poussé à sa mise en culture. L'achat de nouveaux équipements, fussent-ils moins polluants, accroît la base de la taxe professionnelle avec cependant la possibilité de pratiquer des amortissements avantageux (50 % la première année pour les immeubles destinés à la lutte contre la pollution de l'eau ou de l'air).

La valeur locative des immeubles d'habitation tient compte de leur situa-

tion et environnement. La mauvaise qualité de ceux-ci réduit l'impôt, favorisant la formation de quartiers dont la population n'est pas attentive aux considérations d'environnement, et souvent dissuadée de faire des efforts pour l'améliorer.

La pression des intérêts économiques

La fiscalité favorise l'exploitation des richesses naturelles. La provision pour reconstitution de gisements, déductible pour le calcul de l'impôt sur les sociétés, induit une logique de prospection continue afin de réinvestir en permanence la provision. La faible imposition des bénéfices agricoles (forfait) incite à mettre en exploitation des terres peu produc-

tives, en les forçant par un apport intensif d'engrais dont la nocivité est connue, mais qui sont peu taxés à la TVA, dont la prétendue neutralité prime l'économie contre l'environnement. Les activités extractives en sont un autre exemple.

Les dispositions fiscales très avantageuses pour l'acquisition et la plantation de forêts, opérations bénéfiques pour l'environnement, sont conçues dans une perspective d'exploitation économique du bois (essences à croissance rapide peu intéressantes en termes écologiques).

À l'étranger, l'exploitation de la forêt amazonienne et des forêts équatoriales est favorisée par la fiscalité applicable aux établissements de l'économie « moderne », destinés à produire pour l'exportation.

Tant que la pression des intérêts économiques sur la fiscalité sera plus constante et motivée que celle des protecteurs de l'environnement, l'impôt continuera à exprimer prioritairement les préoccupations de ceux-là.

■ Robert Hertzog, professeur à l'université Robert Schumann de Strasbourg, directeur de l'unité de recherche associée « Recherches administratives et financières » (URA 04 964 CNRS), 1, place d'Athènes, 67084 Strasbourg Cedex.



Assèchement et mise en culture du marais de Renac (Ille-et-Vilaine). Les marais asséchés sont exonérés de la taxe foncière sur les propriétés non bâties. Cette réglementation favorise ainsi la disparition d'écosystèmes riches. (© INRA, cliché J. Haury).

L'ENVIRONNEMENT AGIT SUR LES ETRES VIVANTS

Sous peine de disparaître les êtres vivants développent des stratégies adaptatives. L'homme n'échappe pas à la règle. Mais sa propre stratégie passe sans doute par la mise en œuvre d'une véritable « gestion de l'environnement ».



Manchots royaux aux îles Crozet, océan Indien austral. (Cliché L. Martin).



Animaux et végétaux

Les activités industrielles et agricoles, l'urbanisation et les transports modifient l'environnement d'une façon qui est de plus en plus souvent ressentie comme néfaste pour l'ensemble des êtres vivants. Cependant, depuis que la vie existe sur terre, celle-ci est confrontée à des changements locaux, régionaux et même planétaires (variations climatiques) qui ne sont pas subis de manière passive. La réaction qu'une perturbation déclenche de la part d'un individu ou d'une population est le plus souvent favorable à la survie de l'espèce, traduisant l'existence générale de mécanismes d'adaptation. Des assemblages

complexes d'espèces tels que les forêts tropicales ou les récifs coralliens peuvent eux-mêmes faire preuve de capacités globales de résistance et de régénération. Mais gardons-nous d'un optimisme à la Pangloss, certaines réactions biologiques peuvent être inadaptées, voire auto-destructives. C'est en tenant compte des niveaux d'organisation du monde vivant que l'étude de ces réactions, positives ou négatives, évidemment nécessaire pour faire face correctement à la plupart des problèmes pratiques d'environnement, doit être menée.

Louis Thaler et Bernard Delay

S'adapter ou disparaître

Qu'elles soient positives ou négatives, les réactions des êtres vivants aux variations de leur environnement sont multiples. Extinction, pullulation ou expansion géographique n'en sont que les conséquences les plus criantes.

■ Louis Thaler et Bernard Delay

Toute modification de l'environnement, d'origine humaine ou naturelle, entraîne des réactions chez les êtres vivants, que ce soit au niveau de l'individu, de la population, de la communauté d'espèces ou de la biosphère tout entière.

Les individus,

En ce qui concerne les individus, deux notions s'imposent : celle de génotype (ou constitution génétique individuelle) qui rend compte de ce que dans un même environnement tous les individus d'une espèce ne se développent ni ne se comportent de la même façon, et celle de norme de réaction qui indique

les différentes formes adaptatives ou non que des individus de même génotype peuvent prendre selon le milieu où ils se développent et vivent. Il importe de distinguer parmi toutes ces « réactions » celles qui sont avantageuses et constituent la plasticité adaptative individuelle. En général sont très plastiques les espèces où la longévité individuelle est relativement grande, la combinaison

plasticité-longévité constituant une bonne stratégie adaptative.

Ainsi, chez les vertébrés, par exemple les poissons et les rits, le contact avec des substances organiques toxiques induit ou augmente la production d'enzymes de détoxication. Il semblerait donc que cette plasticité, très supérieure à celle des invertébrés, permette à ces animaux d'acquérir une bonne résistance aux pesticides par un mécanisme très différent de celui évoqué plus loin pour les insectes, les moustiques par exemple.

La manifestation la plus élaborée de plasticité est sans doute le système immunitaire de l'homme et des mammifères, qui les protège si bien contre tant d'agents infectieux, mais qui se dérègle si facilement (allergies).

les populations...

La réaction la plus rapide et la plus visible des populations à une atteinte environnementale concerne leur dynamique numérique : chute des effectifs pouvant aller jusqu'à l'extinction ou, au contraire, augmentation pouvant prendre les proportions d'une pullulation, ou encore expansion géographique soudaine pouvant être qualifiée d'invasion. Les stratégies adaptatives propres à chaque espèce déterminent en partie le cours de ces événements. Celles qui sont adaptées à des milieux stables paraissent *a priori* plus menacées, tandis que celles qui sont adaptées à des mi-

lieux moins stables seraient plus menaçantes. Mais ces prédictions sont incertaines car les populations sont également capables d'évoluer, c'est leur second mode de réaction. Ainsi, les insectes, du fait de leur plasticité individuelle réduite, succombent en masse aux premiers traitements insecticides, mais il y a toujours des survivants et ceux-ci sont plus résistants que la moyenne. La sélection est en route ; grâce aux générations rapprochées, elle pourra collectionner en peu d'années une série de mutations favorables et construire des génotypes nouveaux, hautement résistants. Telle espèce, un moment décimée, pourra se retrouver plus florissante que jamais si ses compétiteurs et prédateurs ont moins bien réagi qu'elle-même à la sélection exercée par les pesticides. Une faible plasticité, combinée à une reproduction rapide, peut donc être également une bonne stratégie adaptative.

... et les espèces

Certaines espèces se révèlent pré-adaptées aux conditions nouvelles et en profitent aussitôt, d'autres évoluent et s'adaptent. Quelques nouvelles espèces paraissent même se former sous nos yeux, comme ces souris aux chromosomes réarrangés dont le mode de vie est profondément modifié par leur état d'espèces commensales de l'homme. Mais, en contrepartie, combien d'espèces déjà éteintes au cours des derniers

siècles et décennies, et la vague ne fait que s'amplifier ! Ces soustractions altèrent profondément de nombreuses communautés d'espèces et sont en elles-mêmes d'importantes modifications environnementales puisque, pour la plupart des êtres vivants, l'environnement le plus proche est constitué par les représentants des autres espèces vivant au même endroit. Le fonctionnement d'écosystèmes complexes comme la forêt tropicale, dont les mammifères et oiseaux frugivores contrôlent la régénération en assurant la dissémination des graines, est compromis, même dans les zones où la forêt n'est pas encore détruite. Au cours des temps géologiques, la Terre a connu d'autres « crises » marquées par des « extinctions en masse » auxquelles il est tentant de comparer celles d'aujourd'hui. Les crises précédentes n'étaient pas seulement négatives : tandis que des groupes entiers s'éteignaient, d'autres évoluaient intensément et il s'ensuivait un formidable renouveau. La crise actuelle est-elle différente par sa brutalité ? Saurons-nous l'arrêter ? Y aura-t-il un renouveau ?

■ Louis Thaler, professeur à l'université de Montpellier, directeur de l'Institut des sciences de l'évolution (UA 327 CNRS).

■ Bernard Delay, directeur de recherche au CNRS, directeur adjoint de l'Institut des sciences de l'évolution (UA 327 CNRS), université des Sciences et Techniques du Languedoc, place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier.



Montée à terre de la Tortue-luth, tortue marine dont le poids oscille entre 600 et 800 kg, sur une plage de la Guyane française. La Tortue-luth est aujourd'hui menacée d'extinction. C'est la raison pour laquelle un plan de survie a été déclenché (commerce et circulation interdits) à l'initiative des deux organisations internationales Green Peace et World Wildlife Fund (WWF). (© SYGMA, cliché A. Fatras).

La résistance croissante aux pesticides

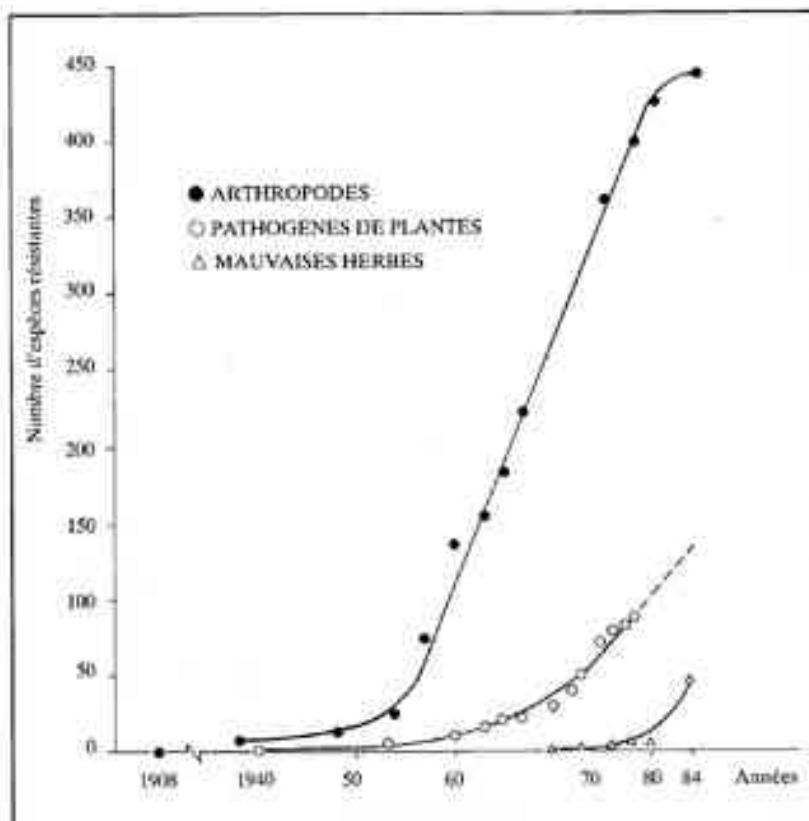
En 1950, la présence de résistance était rare, mais en 1989, ce sont les populations totalement sensibles qui deviennent rares. Pourquoi ?

■ Nicole Pasteur

Les phénomènes de résistance aux pesticides, produits toxiques utilisés par l'homme pour lutter contre les organismes nuisibles en agriculture et en santé publique, touchent aujourd'hui de nombreuses espèces de tous les embranchements du règne vivant. Chez tous ces organismes (proca-



Infestation d'amaranthes résistantes dans un champ de maïs traité avec une forte dose d'atrazine. (Cliché AGPM).



Chronologie de l'augmentation du nombre des espèces chez lesquelles une résistance à au moins un pesticide a été détectée (d'après G. P. Georgiou). Chez les arthropodes, ces résistances concernent essentiellement les insecticides et, dans de nombreux cas, elles touchent toutes les familles d'insecticides : organophosphorés (malathion, chlorpyrifos...), carbamates (protoposur), organochlorés (DDT) ou pyrèthrinoides (deltaméthrine).

ryotes, protozoaires, plantes ou animaux), la résistance est due à l'apparition d'individus possédant une caractéristique physiologique héréditaire qui leur permet de survivre en présence d'une quantité de toxique supérieure à celle qui tue les individus « sensibles » de la même population. En présence du toxique, les individus résistants ont une plus grande aptitude à survivre et ils se reproduisent plus que les individus sensibles. Leur proportion dans une population initialement sensible augmente, parfois très rapidement, conduisant à de véritables pullulations.

Mécanismes d'action des pesticides

Les pesticides agissent au niveau des cibles dont la fonction est indispensable à la vie. Par exemple, certains insecticides inhibent de manière irréversible l'acétylcholinestérase des synapses, provoquant ainsi des anomalies nerveuses fatales. Les anticoagulants utilisés contre les rongeurs inhibent la réduction de la vitamine K induisant des hémorragies mortelles (voir l'encadré de G. Lorgue et K. Nahas). Certains herbicides bloquent la photosynthèse, d'autres la division cellulaire ou la synthèse d'acides aminés. Chez les insectes, les plantes ou les rongeurs résistants, les cibles continuent à fonctionner normalement en présence de doses de toxique létales pour les individus sensibles, soit parce qu'elles sont devenues moins sensibles, soit parce qu'il existe un mécanisme qui empêche le toxique de les atteindre.

dre. Citons en exemple les processus de détoxification qui « capturent » ou transforment le pesticide en un produit moins toxique ou totalement inoffensif.

L'apparition de la résistance à un pesticide semble inévitable, bien que l'on connaisse de rares exceptions (bouillie bordelaise). Les cibles protéiques se modifient à une vitesse au plus égale au taux de mutation et l'ajustement des processus de détoxification est inhérent à la vie. Si nous voulons continuer à utiliser efficacement en santé publique et en agriculture les pesticides, il est indispensable de comprendre la dynamique de la résistance pour pouvoir la prévoir et la limiter. L'évolution de la résistance dans le temps et dans l'espace est sous la dépendance des facteurs génétiques qui en sont responsables, des facteurs biologiques particuliers à chaque espèce et des facteurs opérationnels dont dépendent les pressions de sélection. Parmi ces facteurs, seuls ceux concernant les conditions opérationnelles, c'est-à-dire le choix des pesticides et de leur mode d'application, sont sous notre contrôle. Il convient donc de considérer chaque cas dans son contexte génétique et biologique particulier. Une aide considérable est apportée par les modèles qui prennent en compte la totalité de nos connaissances sur les gènes de résistance (nature moléculaire, localisation dans les noyaux ou dans des organites, mode d'hérédité, nombre, fréquence, caractéristiques de dominance/récessivité vis-à-vis des « allèles sensibles » correspondants, valeurs adaptatives isolément ou en combinaison avec les divers allèles des différents gènes de résistance,

etc.) et sur la biologie de l'espèce étudiée (stratégie de reproduction, mode et modalités de reproduction – sexuée ou asexuée, homogame ou polygame – et mécanismes structurant les populations : nature et variété des biotopes occupés en relation avec leur accessibilité aux traitements par les pesticides, flux génétiques, existence de

facteurs d'incompatibilité, caractéristiques du comportement, etc.).

■ Nicole Pasteur, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe « Génétique » (UA 327 CNRS), Institut des sciences de l'évolution, université de Montpellier II, place Eugène Bataillon, 34090 Montpellier.

L'amplification génique

Les enzymes qui détoxiquent les xénobiotiques (substances étrangères à un organisme) peuvent être produites en très grandes quantités. C'est le cas d'estérases responsables de la résistance aux insecticides organophosphorés qui, chez le moustique commun, peuvent constituer jusqu'à 10 % des protéines totales des individus résistants. Cette énorme production est le résultat de la multiplication (amplification) des copies du gène de structure (au moins cinq cents), localisées en un seul endroit d'un chromosome. Chez les insectes résistants, l'estérase amplifiée est abondante dans certains tissus seulement, dont le tube digestif et certains neurones du cerveau. Le mécanisme d'amplification génique s'observe également dans de nombreux cas de résistance à des produits toxiques



Coupe de cerveau du moustique montrant les neurones contenant l'estérase B. Noter la forte fluorescence de couleur jaune de certains neurones produite par la liaison de l'anticorps spécifique de l'estérase (cliché E. Nunez).

impliquant des phénomènes de détoxification (métaux lourds, médicaments anticancéreux...).

■ Travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration entre l'Unité de biologie moléculaire de l'INRA d'Antibes et l'Équipe de génétique de l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier.

La réponse des rongeurs aux anticoagulants

Les anticoagulants sont utilisés dans la lutte contre les rongeurs depuis moins de quarante ans. Mais des populations résistantes de rats surmulots, *Rattus norvegicus*, ont été observées en Ecosse dès 1958, puis au Danemark (1962), aux Pays-Bas (1966), aux USA (1974), etc.

Les anticoagulants comme le coumatène agissent selon le principe de l'inhibition compétitive. Ils se combinent à une enzyme, une réductase, qui normalement fait passer la vitamine K de la forme époxyde, inactive, à sa forme ac-

tive indispensable à la coagulation sanguine. La mutation responsable de la résistance provoque une altération du site récepteur de la réductase. Le coumatène ne s'y fixe plus et n'a plus d'effet inhibiteur. Notons qu'en même temps, il y a diminution de l'affinité de l'enzyme pour son substrat normal, la vitamine K époxyde : ceci entraîne chez le rat résistant des besoins alimentaires accrus en vitamine K.

Les anticoagulants demeurent des rodenticides de choix, et l'élucidation du mécanisme génétique de la résistance a permis d'améliorer

leur emploi (lutte discontinue, changement fréquent de substances actives). Elle a permis également la découverte de rodenticides plus puissants.

■ Guy Lorge, professeur à l'École nationale vétérinaire de Lyon, directeur du Laboratoire d'écotoxicologie (Laboratoire associé CNRS/INRA)

■ Kamel Nahas, assistant, Laboratoire d'écotoxicologie (Laboratoire associé CNRS/INRA), École nationale vétérinaire de Lyon, BP 31, 69752 Charbonnières.

Comment résiste le moustique

■ Michel Raymond
et Nicole Pasteur

Tout a commencé en 1969, quand on a décidé d'utiliser le chlorpyrifos (insecticide organophosphoré) pour éliminer le moustique commun du littoral languedocien. La résistance à ce produit, découverte pour la première fois en 1972 à Lunel (Hérault), s'est rapidement propagée sur toute la zone traitée en quelques années. D'abord due à l'estérase de détoxification A1, d'autres gènes sont apparus dès 1978 : autres enzymes de détoxification (estérases ou oxydases), acétylcholinestérase insensible. Aujourd'hui, on dénombre au moins sept gènes de résistance distincts dans le sud de la France.

■ Michel Raymond, chargé de recherche au CNRS, Institut des sciences de l'évolution, Equipe de génétique (UA 327 CNRS).

■ Nicole Pasteur, directrice de recherche au CNRS, responsable de l'équipe « génétique » (UA 327 CNRS), Institut des sciences de l'évolution, université de Montpellier II, place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier.



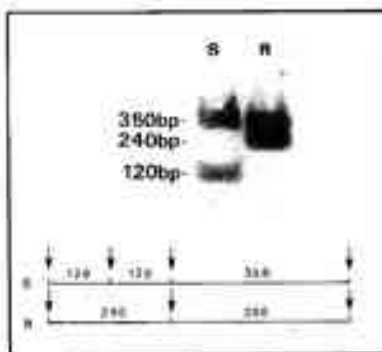
Fréquences du gène "Ace1" dans les populations de moustique commun du sud de la France entre 1978 et 1986-1987. Ce gène code une acétylcholinestérase insensible à certains insecticides. Pour tuer les individus qui l'ont, il faut multiplier la quantité de l'organophosphoré chlorpyrifos par cent et celle du carbamate propoxur par dix mille.

L'efficacité limitée des herbicides

■ Jacques Gasquez,
Henri Darmency,
et Michel Dron

L'électrophorèse du gène *psbA* (gène chloroplastique codant pour la protéine de membrane cible des triazines), après son découpage par une enzyme de restriction, montre la disparition d'un site de coupe quand on passe de la forme sensible aux herbicides triaziniques S à la forme résistante R : les deux fragments de 120 paires de base (bp) de S sont remplacés par un fragment unique de 340 bp. La protéine codée par R ne diffère que par

une seule substitution d'acide aminé, mais cette mutation ponctuelle suffit à supprimer son affinité pour l'herbicide et rend la plante mille fois plus résistante. Au contraire, la protéine codée par S attire et retient l'herbicide et s'en trouve inhibée quant au rôle qu'elle joue dans la membrane du chloroplaste, ce qui bloque la photosynthèse. La résistance de type R est apparue depuis 1970 chez près de cinquante espèces de mauvaises herbes dans le monde entier. Elle affecte 500 000 ha de maïs et de vignoble en France. L'apparition des plantes résistantes est généralement la conséquence d'une même pression de sélection maintenue plusieurs années : monoculture, monodésherbage, herbicide persistant et très puissant.



Résistance aux herbicides :
électrophorèse du gène *psbA*.

■ Jacques Gasquez, directeur de recherche à l'INRA, co-responsable de l'aspect « Evolution et génétique des populations de mauvaises herbes », Laboratoire de malherbologie.

■ Henri Darmency, chargé de recherche à l'INRA, co-responsable de l'aspect « Evolution et génétique des populations de mauvaises herbes », Laboratoire de malherbologie, BV 1540, 21034 Dijon.

■ Michel Dron, professeur à l'université Paris-Sud, responsable de l'équipe de Cytogénétique moléculaire (UA 1128 CNRS), université Paris-Sud, Laboratoire de biologie moléculaire et végétale, Bât. 430, 91405 Orsay Cedex.

Les réponses génétiques en environnement variable

A la variabilité de l'environnement, les organismes vivants répondent soit en ajustant leur phénotype, soit en maintenant leur diversité génétique.

■ Isabelle Olivieri
et Pierre-Henri Gouyon

La variabilité de l'environnement, dans l'espace et dans le temps, a entraîné chez les organismes vivants deux types de réponses, non exclusives : la plasticité phénotypique et le polymorphisme génétique.

La plasticité phénotypique consiste

pour chaque individu à ajuster son phénotype (morphologie, physiologie, comportement...) aux variations environnementales de telle façon que sa valeur sélective (probabilité de survie de l'organisme depuis son stade zygote multipliée par l'espérance du nombre de zygotes qu'il produit) reste « suffisante » malgré les vicissitudes de son existence. Un génotype donné ne détermine plus, dans ce cadre, un phénotype fixé mais un ensemble de phénotypes

appelé « norme de réaction », fonction des conditions environnementales.

A un type donné de variabilité environnementale correspond la sélection d'une certaine norme de réaction (celle dont la valeur sélective est la plus élevée). Il faut remarquer que les normes de réaction sont soumises aux contraintes génétiques et phénotypiques propres à l'espèce.

Le polymorphisme

L'abandon de la vision typologique de l'espèce à la suite des travaux de Darwin a conduit à la construction de divers modèles permettant d'expliquer le maintien du polymorphisme. Ainsi, la variabilité spatio-temporelle du milieu peut maintenir une diversité génétique dans l'espèce qui l'occupe. Pour appréhender ce processus, il est nécessaire de prendre en compte simultanément des facteurs aussi différents que :

- la mutation au sens large qui est à l'origine de la variabilité ;
- le hasard, qui provoque des variations de fréquences dans les populations, d'autant plus efficacement que la population est de taille plus réduite ;
- les systèmes de reproduction et la recombinaison, qui gèrent les associations entre gènes ;
- la migration entre sous-popula-

tions, qui détermine le degré de morcellement de la population ;

- enfin, l'effet des variations du milieu sur la réussite reproductive des individus de la population.

A l'heure actuelle, aucun modèle synthétique incluant l'ensemble de ces facteurs n'existe. Cependant, certains modèles montrent quelques effets majeurs du système.

Tout d'abord, le « glissement d'équilibre » (*shifting balance* de S. Wright) : les fluctuations aléatoires des fréquences géniques qui résultent de variations importantes d'effectifs peuvent permettre l'apparition de combinaisons génétiques qui n'auraient eu aucune chance d'apparaître autrement.

La variabilité temporelle du milieu peut aussi maintenir un polymorphisme par des effets complexes incluant la dominance ou la récessivité des gènes déterminant le caractère ou bien, en l'absence de tels effets, s'il existe une périodicité à la variation du milieu. Dans ce dernier cas, le polymorphisme est maintenu d'autant plus efficacement que la période de variation de l'environnement est courte. Si la fonction périodique est complexe, c'est la composante de la période la plus longue qui détermine l'effet global. En conséquence, une variation « aléatoire », équivalente à un « bruit » dont la plus grande période

est infinie, ne peut maintenir le polymorphisme.

Enfin, on peut dire que la diversité génétique sur l'ensemble de la population est d'autant plus grande qu'elle est morcelée. Cette différenciation spatio-temporelle dépend, d'une part, de la façon dont s'opèrent les migrations d'un point à l'autre, et d'autre part, des probabilités locales d'extinction.

Interaction entre plasticité et polymorphisme

Si l'on tente de prédire l'évolution d'une population en environnement variable, on peut montrer les points suivants :

- Le polymorphisme entre un génotype plastique et un génotype non plastique peut être maintenu dans une population soumise à une variabilité temporelle à condition que le caractère plastique soit déterminé par des gènes dominants et qu'il y ait un coût à la plasticité (mise en place de structures particulières) ;

- dans une métapopulation - c'est-à-dire dans un ensemble de populations fondées les unes à partir des autres à la faveur d'extinctions locales et évoluant ensuite sous l'action de facteurs internes du fait d'un morcellement spatial important - les traits comme l'aptitude à la migration sont soumis à sélection. On peut dire que les génotypes capables de faire varier leur taux de migration dans la bonne direction (plastiques) éliminent systématiquement les génotypes qui ont un taux de migration fixe (non plastiques). Cependant, en l'absence d'un génotype plastique, il est possible de maintenir un polymorphisme génétique pour le taux de migration. Dans ce système, il y a en outre interaction entre la diversité génétique et la plasticité phénotypique.

D'autres traits que la migration, comme par exemple la durée de vie, l'âge de reproduction..., sont soumis au même type d'interaction de plusieurs facteurs et de plusieurs types de variabilité. Pour comprendre l'évolution de tels traits, il est nécessaire d'intégrer les différentes approches de l'écologie, de l'évolution, de la génétique, de la démographie, de la physiologie et de l'éthologie.



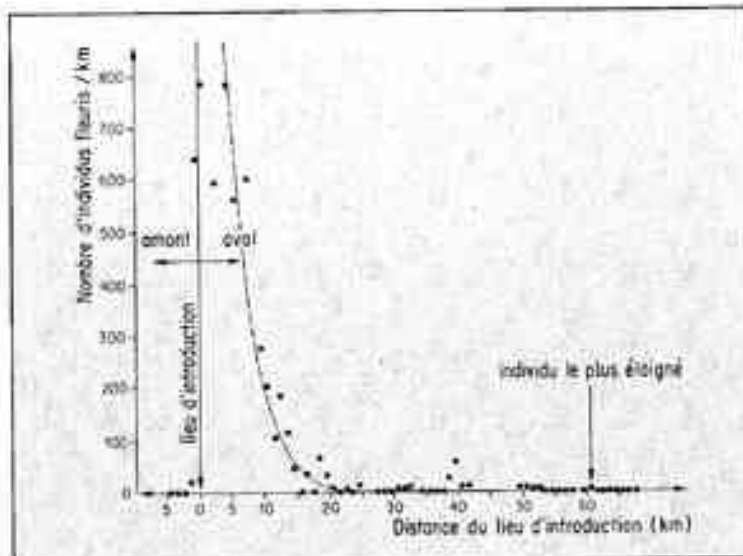
Saussurea gossypiphora est caractéristique des plantes adaptées au froid. Sa pilosité et sa taille dépendent strictement des conditions climatiques locales, plus il fait froid, plus elle a de poils protecteurs et plus elle est petite. On la rencontre dans l'Himalaya entre 4 500 m et 5 700 m d'altitude. (Cliché J.F. Dobremez)

■ Isabelle Olivier, chargée de recherche à l'INRA, Station d'amélioration des plantes de Montpellier, Domaine de Melgued, 34130 Muguin.

■ Pierre-Henri Gouyon, professeur à l'université Paris-Sud, directeur du Laboratoire d'évolution et systématique des végétaux (UA 121 CNRS), bât. 362, 91405 Orsay Cedex.

Les invasions biologiques

Les invasions biologiques sont étroitement liées à l'action de l'homme sur l'environnement et très souvent le résultat de plusieurs événements et processus écologiques comme l'illustre l'exemple du Frêne à fleur. Celui-ci a été introduit en 1920 dans un arboretum de la vallée de la Vis, affluent de l'Hérault. En 1986, la répartition des individus fleuris de cette espèce le long de la Vis et l'Hérault permet les constatations suivantes : alors que les graines ailées sont apparemment bien adaptées à la dissémination par le vent, c'est l'eau qui est de loin le vecteur le plus efficace (comparaison amont-aval) : les crues puissantes de ces rivières, en détruisant partiellement la végétation des berges, dégagent des sites où la germination est plus facile et contribuent ainsi largement à l'invasion ; enfin, l'expansion de l'espèce s'est faite grâce à la flottabilité des graines à une vitesse moyenne de 1 km/an, ce qui est su-



Expansion du Frêne à fleur en amont et en aval de l'arboretum de la Vis (d'après M. Debussche et C. Thébaud).

périeur aux vitesses communément observées pour d'autres modes de dissémination.

Les invasions biologiques constituent un objet d'étude privilégié pour comprendre la régulation et la dynamique des populations naturelles où jouent simultanément dissémination, compétition, perturbations et fluctuations du milieu... La dimension spatiale des

processus, la variété des situations rencontrées permettent souvent d'apprécier l'importance relative de chacun d'eux et de proposer des hypothèses testables.

■ Jacques Lepart, ingénieur de recherche au CNRS, Centre d'études phytosociologiques et écologiques Louis-Ermerger, route de Mende, BP 5051, 34033 Montpellier Cedex.

Processus génétiques associés aux invasions

L'étude des espèces colonisatrices peut se situer au niveau des variations de leurs systèmes génétiques, plutôt qu'à celui de la recherche d'un ensemble fixe de caractéristiques.

■ Pierre-Henri Gouyon
et Isabelle Olivieri

Comme l'a fait remarquer Lewontin, la colonisation est l'établissement d'une population ou d'une espèce dans un espace géographique ou écologique nouveau pour cette espèce. Ainsi, ce qui fait qu'une espèce est un envahisseur est qu'on la voit aujourd'hui là où elle ne se trouvait pas hier, et/ou que le nombre d'individus de cette

espèce s'accroît de façon anormale et imprévue. En d'autres termes, un envahisseur est une espèce qui n'est pas à l'équilibre d'un point de vue écologique et/ou démographique. D'où les deux conséquences suivantes :

- étant donné qu'aucune espèce ne peut avoir existé depuis la nuit des temps, on peut en déduire que toutes les espèces sont ou ont été des envahisseurs à un moment de leur histoire ;

- la compréhension des phénomènes d'invasion passe par celle de la notion

d'équilibre écologique.

Au sein de l'aire de répartition d'une espèce donnée, les *avatars* (*) de celle-ci occupent un certain type de milieu, ou habitat. L'habitat actuel de l'espèce dépend de la composition génétique de celle-ci, qui détermine en effet l'aptitude des individus à survivre et à se reproduire dans un environnement donné. D'un autre côté, la composition génétique de l'espèce est elle-même le résultat de la sélection exercée par l'habitat au cours des générations précédentes. Ainsi, l'habitat de l'espèce à une génération donnée influence (par la sélection naturelle) la composition génétique de l'espèce à la génération suivante, qui elle-même influence l'habitat de l'espèce au cours de cette génération. De ce point de vue, un équilibre est atteint lorsque l'habitat à une génération donnée favorise les combinaisons génétiques de l'espèce qui vont permettre à l'espèce de vivre précisément dans cet habitat à la génération suivante.

« La Reine Rouge »

On en arrive rapidement, avec ce type de raisonnement, à la conclusion que toutes les espèces devraient être en déséquilibre avec leur milieu, et donc colonisatrices ou en cours d'extinction (à une échelle de temps suffisamment grande, ceci est sans doute vrai). En fait, de nombreuses études ont montré que le facteur qui empêche habituellement une espèce donnée d'exploiter le milieu dans toutes les directions possibles (de modifier constamment sa niche écologique) est, à court terme, l'existence d'autres espèces (cf. la phrase célèbre de J.-P. Sartre, « *L'enfer, c'est les autres* »). De ce point de vue, une espèce atteint un équilibre lorsque son évolution vers de nouvelles adaptations à de nouveaux milieux devient moins rapide que l'évolution d'une autre espèce vivant déjà dans ces milieux. Ce type de processus a été envisagé dès 1973 par Van Valen sous le terme d'*hypothèse de la Reine Rouge*. La reine rouge à laquelle il fait allusion ici est celle de *De l'autre côté du miroir* de Lewis Carroll,

qui, entraînant Alice sur un échiquier, se met à courir très vite. Au bout d'une longue course, le paysage n'a pas changé, et la Reine explique à Alice que dans son pays, il est nécessaire de courir très vite si l'on veut rester à la même place.

On peut penser que la probabilité d'extinction d'une espèce qui n'a pas atteint son équilibre est supérieure à celle d'une espèce en situation d'équilibre écologique. Ainsi, on peut dire des espèces actuelles non colonisatrices qu'elles sont celles qui ont atteint leur équilibre. Les autres se sont éteintes. Les envahisseurs sont des espèces qui n'ont pas encore atteint ce stade. Aussi, la prédiction de leur comportement futur est très difficile à court terme, et probablement impossible à long terme. Ce qui est certain, c'est que ces espèces sont caractérisées par l'instabilité de leur système génétique, si bien qu'il nous semble dangereux de vouloir établir des descriptions des envahisseurs sur la base de leur système génétique (cycle de vie, régime de reproduction, migration...). Il serait plus utile d'étudier les variations de ce système au

cours des phases d'invasion, ainsi que, si possible, les modifications finales qui ont permis à l'espèce d'atteindre un équilibre écologique (il y en a probablement plusieurs possibles).

La compréhension des modifications des systèmes génétiques liés aux invasions permettra peut-être de comprendre les mécanismes d'extinction des espèces, et donc de mieux appréhender les problèmes liés à la biologie de la conservation des espèces et au maintien de leur diversité génétique.

(*) De même que les avatars de Vishnou entraînent la représentation matérielle dans la mythologie hindoue, les avatars d'une espèce sont les formes matérielles qui, à un moment donné, portent l'information génétique de cette espèce.

■ Pierre-Henri Gouyon, professeur à l'université Paris-Sud, directeur du Laboratoire d'évolution et systématique des végétaux (UA 121 CNRS), bld. 362, 91405 Orsay Cedex.

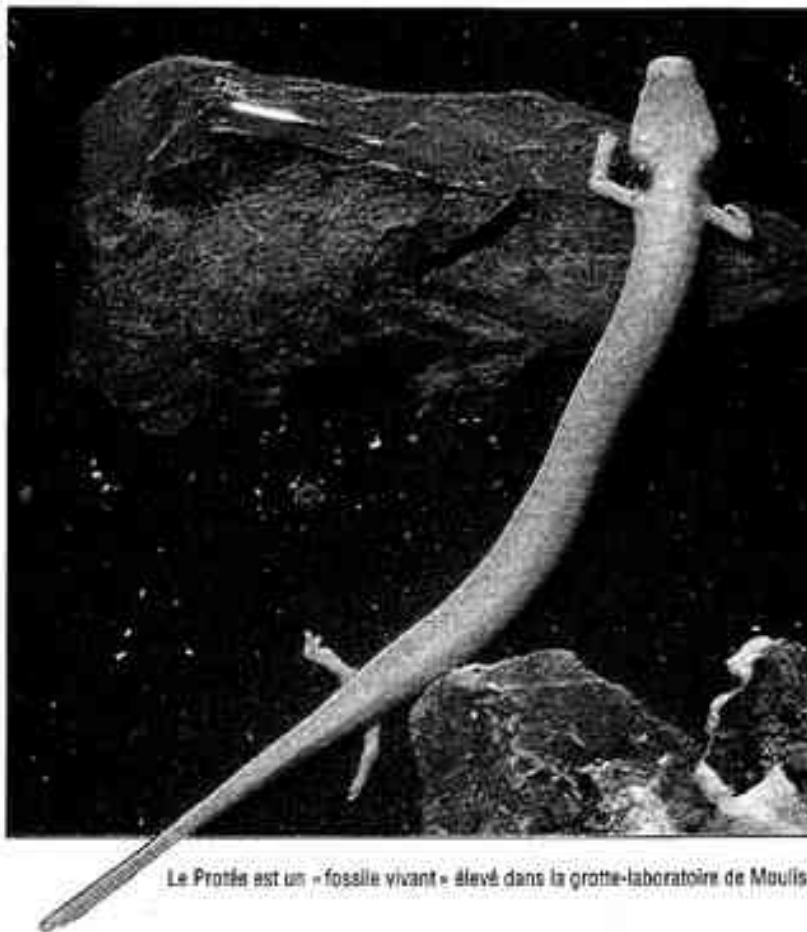
■ Isabelle Olivier, chargée de recherche à l'INRA, Station d'amélioration des plantes de Montpellier, Domaine de Mèzeuil, 34130 Mauguio.

Le monde vivant des grottes

Loin d'être un refuge pour fossiles vivants, les grottes sont des lieux de colonisation active pour des espèces qui se sont adaptées à leurs contraintes spécifiques.

■ Christian Juberthie

Dans la pensée collective, les grottes représentent le milieu souterrain. Il n'en est rien. Le milieu souterrain c'est, en effet, l'ensemble des fissures de la roche, micro-espaces des éboulis (milieu souterrain superficiel : MSS), grottes, tunnels volcaniques et sous-marins, en zones tempérée et tropicale, et 98 % des eaux continentales. Il représente un écosystème sans production primaire *in situ*, ses chaînes trophiques sont à base de matières organiques introduites sous terre par les eaux d'infiltration, les pertes et les animaux ; de ce fait, les biocénoses sont simples. ▶



Le Proteus est un « fossile vivant » élevé dans la grotte-laboratoire de Moulis.

- Les animaux y subissent des contraintes du fait de l'absence de lumière et de photopériode, de l'humidité proche de la saturation, du faible pouvoir énergétique des ressources, des températures peu élevées, localement du faible taux d'oxygène des eaux souterraines, et de l'existence de barrières géomorphologiques à la dispersion et à la panmixie des populations.

Des adaptations exceptionnelles

Les données récentes plaident pour une colonisation active des grottes et des niches vides néoformées (MSS, tubes de lave), par des populations de la surface. Sous les contraintes du milieu, l'adaptation à la vie sous terre s'accompagne de l'acquisition de traits convergents dans tous les groupes. Ce sont :

- la régression des yeux ; elle résulterait de l'accumulation de mutations ayant valeur neutre à l'obscurité, les individus déficients n'étant pas éliminés en se croisant ;
- une optimisation de l'utilisation de ressources peu énergétiques, par une réduction de l'allocation à la reproduction, un abaissement du métabolisme

respiratoire, un ralentissement de la croissance, et chez les Coléoptères une réduction des risques de prédation, les larves s'enfermant leur vie durant en logette et ne s'alimentant pas ; l'investissement est dans la survie des jeunes dont un fort pourcentage devient adulte ;

- une optimisation de la recherche de nourriture par une activité s'exerçant tout au long du nyctémère, conséquence de la perte de l'horloge biologique et des centres optiques qui la gouvernent.

Les scénarios de différenciation

Loin d'être un refuge pour « fossiles vivants », les « grottes » sont un lieu d'intense genèse d'espèces. Ainsi, des scénarios de différenciations successives d'espèces souterraines lors des changements d'environnement ont été proposés.

A la première glaciation, vers 2,3 millions d'années, sur les versants du Mont Canigou, deux ensembles de Coléoptères souterrains, l'un montagnard, l'autre méditerranéen, ont divergé sous des pressions de sélection liées à la chu-

te des températures et des ressources. Au sein de populations ayant acquis un polymorphisme neutre sous des températures similaires aux actuelles, les porteurs d'allèles psychrophiles ont été sélectionnés grâce à un avantage démographique aux basses températures.

A deux glaciations ultérieures, le processus de spéciation a été réactivé, lors de la colonisation de MSS néoformé par l'érosion, à partir de populations déjà souterraines, aux effectifs réduits par la chute des ressources et ayant acquis un polymorphisme génétique et comportemental en relation avec les barrières au flux génique. En même temps, un isolement reproductif résultant de divergences dans les séquences du comportement sexuel s'est mis en place.

L'agressivité sexuelle entre espèces entraîne le décès des femelles agressées par les mâles de l'autre espèce, ce qui maintient séparées les aires de répartition.

■ Christian Jüberthie, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire souterrain de Moulis (LP 8491 CNRS), 09200 Saint-Girons.

Particularités biologiques en Antarctique

L'Antarctique, le bout du monde, est un des endroits les moins hospitaliers de la Terre. Pourtant, la vie y est présente, très organisée et on y découvre nombre d'adaptations originales.

■ Paul Trehen

Le fonctionnement des écosystèmes terrestres subantarctiques est remarquable car il dépend pour une part importante des apports organiques d'origine marine. Une seule colonie de Manchots royaux de 300 000 couples apporte 20 000 tonnes de fientes, 1 100 tonnes de cadavres, 350 tonnes de plumes et duvets. Les 25 millions d'oiseaux de l'archipel Crozet contribuent de manière significative aux flux énergétiques, ainsi qu'à la dynamique des communautés végétales et animales de ces îles et des autres îles subantarctiques : Kerguelen, Amsterdam, Saint-Paul.

Le froid : un facteur d'évolution

Les conditions climatiques, températures extrêmes sur le continent antarctique, plus tempérées sur les îles sub-



Anatantia aptera, mouche subantarctique dépourvue d'ailes. (Cliché G. Chauvin).



Les îles Kerguelen se caractérisent par une forte proportion d'espèces végétales endémiques. La violence des vents, allée à des températures très basses, même en été, impose une croissance limitée essentiellement de type herbacé et sclérophylle. L'introduction en 1874 des lapins sur la Grande Ile fait que seuls les îlots épars ont conservé une flore endémique à laquelle appartient le Chou de Kerguelen (*Pringlea antiscorbutica*). Cette crucifère pousse sur la littoral jusqu'à 800 m d'altitude. On ne lui connaît aucun proche parent. (Cliché P. Avérous).

antartiques, sont des éléments déterminants dans la sélection de nombreux caractères morphologiques et physiologiques des vertébrés et des invertébrés. Les premiers exploitent les ressources trophiques marines. Ils présentent de ce fait de nombreuses particularités physiologiques leur permettant de résister à des températures basses, dans l'air au moment de leur reproduction et de leur croissance juvénile, ou dans l'eau voisine de 0°C. A ces capacités de résistance au froid est étroitement associée leur aptitude à survivre au jeûne puisque leur reproduction à terre en dépend. La « thermogénèse sans frisson » du pousin du Manchot royal est plus liée à l'action du glucagon qu'à celle des catécholamines généralement observées chez les mammifères. Parallèlement, la régulation du catabolisme protéique, inconnue chez les homéothermes des zones tempérées, est une « alarme » qui déclenche le mouvement des Manchots empereurs reproducteurs en Antarctique, depuis leur colonie jusqu'à la mer distante de 200 km, où ils vont s'alimenter.

Spéciation chez les insectes

Les îles subantarctiques, du fait de leur isolement, ont permis le maintien de populations d'insectes qui, par certains caractères, permettent une approche comparative avec les recherches sur les manchots : résistance aux températures basses, longévité, itéroparité (pos-

sibilité pour un individu de se reproduire en plusieurs fois), capacités d'accumulation de réserves lipidiques, résistance au jeûne. Dans le cas des Diptères, la diminution des aptitudes à la dispersion liée à l'aptérisme (*Anatalanta aptera*) ou au microptérisme (*Paractoria*

dreuxi) est compensée par une meilleure régulation des réserves lipidiques qui peuvent être stockées durant la vie imaginaire, notamment dans le thorax à l'emplacement des muscles alaires atrophiés. Les mécanismes qui permettent l'ajustement entre croissance larvinaire, ponte et disponibilité ou accessibilité des substrats, qui sont le plus souvent des cadavres de manchots, sont aussi les éléments de compréhension des processus évolutifs, par exemple l'aptérisme ou la multiplication du nombre d'espèces.

Les systèmes biologiques antarctiques et subantarctiques sont particulièrement sensibles aux pollutions, aux colonisations par des espèces étrangères, aux effets de l'exploitation des ressources mais aussi aux variations climatiques. Les populations d'albatros, d'éléphants de mer, décroissent, le nombre des otaries s'accroît, ainsi que celui des espèces introduites.

Les programmes à venir devront permettre la création de stations d'observation des « changements » et s'intégrer aux objectifs retenus par le SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) en 1988, à un haut niveau de concertation internationale.

■ Paul Trehen, professeur à l'université de Rennes I, directeur de la Station biologique de Palmpont, Laboratoire d'écologie du sol-biologie des populations (URA 97 CNRS, 35380 Plélan-le-Grand).



Avec un poids pouvant exéder 3 tonnes chez les vieux mâles pour une longueur de 6 mètres ou plus, l'éléphant de mer (*Mirounga leonina*) est le plus gros des Pinnipèdes. Hôte commun des îles australes (Kerguelen, Crozet...), ce mammifère carnivore adapté à la vie aquatique tire son nom de sa trompe nasale qui sert de caisse de résonance à son cri. Hautement grégaire, le mâle aime également à s'entourer d'un harem. (Cliché P. Avérous).

Un monde sans soleil

Autour des sources hydrothermales des profondeurs sous-marines, des peuplements complexes d'êtres vivants se développent en toute indépendance de la lumière solaire et de la photosynthèse.

■ *Lucien Laubier*

La vie peut-elle exister en l'absence de lumière ? L'oxygène atmosphérique est-il indispensable à la vie ? Les êtres vivants peuvent-ils synthétiser des molécules organiques par d'autres voies que la photosynthèse des plantes vertes ? Pour la plupart d'entre nous, la réponse à ces questions est négative.

Et pourtant, les géochimistes nous ont appris que la vie a pris naissance sur notre planète il y a 3,6 milliards d'années, alors que l'oxygène libre n'était pas encore apparu. Pendant près de deux milliards d'années, il en sera ainsi et l'apparition des premiers organismes capables de libérer l'oxygène par photolyse des molécules d'eau a constitué une véritable pollution à l'échelle planétaire.

La découverte, récente, de peuplements bactériens et animaux intimement associés aux émissions de fluide hydrothermal découvertes dans les profondeurs sous-marines à l'axe des dorsales océaniques est venue à point nommé pour nous rappeler l'importance de ces faits. Par 2 à 3000 mètres de profondeur, frileusement groupés autour des sorties de fluides chargés de sulfures à haute température (150 à 350°C et plus), des animaux de grande taille vivent en symbiose avec des bactéries chimiosynthétiques abritées dans leurs propres cellules. En l'absence de toute lumière, ces bactéries tirent l'énergie nécessaire à la fixation de gaz carbonique (CO_2) et à la synthèse de la matière organique, de l'oxydation ménagée de l'hydrogène sulfuré produit en profondeur par réduction des sulfates de l'eau de mer circulant dans le basalte fissuré. Ainsi, ces peuplements exubérants vivent indé-

pendamment de la lumière solaire et de la photosynthèse. Le soleil viendrait-il à mourir, les peuplements « hydrothermaux » continueraient d'exister et de se développer à partir de l'énergie géothermique libérée par la fission nucléaire.

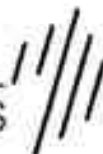
On a avancé que dans les fluides hydrothermaux eux-mêmes, en milieu parfaitement anoxique, des bactéries très particulières, les archaebactéries, pouvaient subsister à des températures largement supérieures à 100°C. Au-delà de 120°C, la question demeure encore controversée. En-deçà de cette température, proche de celle de l'océan primordial, l'existence de telles bactéries est démontrée. On a même suggéré que la vie a pu prendre naissance dans les milieux hydrothermaux.

Ainsi, la vie peut exister et existe sur notre planète en l'absence de lumière solaire et sans faire appel aux molécules organiques produites dans l'usine photosynthétique des plantes vertes. Ainsi, le monde vivant n'est pas toujours vert...

■ Lucien Laubier, professeur à l'Institut océanographique, haut conseiller scientifique de l'IFREMER, 66, avenue d'Iéna, 75116 Paris.



Grouillement de vers vestimentifères et des crabes qui les consomment par 2 600 m de profondeur, sur la dorsale du Pacifique Oriental (campagne Hydronaute Nautille). (© IFREMER)



Homme et santé

Connaissance des agents « agresseurs », des altérations de la santé, des relations entre les uns et les autres : tels sont les trois points de vue à considérer dans l'étude des effets de l'environnement sur la santé de l'homme. Tous les trois doivent être abordés au niveau « microscopique » (échelle organique, cellulaire, intracellulaire, moléculaire) et « macroscopique » (échelle des individus envisagés dans leur totalité et surtout échelle des populations). Comment, par exemple, se passer de la connaissance microscopique des mécanismes par lesquels on chemine d'un agent agresseur à l'altération de la santé qui lui est liée ? Mais comment

croire à l'inverse qu'il est possible – sur le plan pratique et même d'un point de vue théorique – de construire un modèle microscopique exhaustif des relations homme-santé permettant de prévoir, de façon certaine, l'impact et l'effet de différentes stratégies d'intervention ? Recherche passionnante, car mêlant intimement d'une part la fascinante complexité du microscopique et, d'autre part, l'extrême diversité des individus qui composent les populations humaines, dans leurs caractéristiques individuelles comme dans les risques auxquels ils sont soumis.

Denis Hémon

Allergies saisonnières

A chaque région, son calendrier pollinique ; sa connaissance doit permettre de prédire – voire prévenir – les pollinoses qui représentent 50 % des allergies respiratoires de notre pays.

■ **Bernard David**

Parmi les substances naturelles de l'environnement, le pollen représente une source d'allergènes responsables d'environ 50 % des cas d'al-

lergie respiratoire dans notre pays.

Si sur le plan de la recherche fondamentale, il est indispensable d'identifier les constituants structuraux des grains de pollen qui se comportent comme des allergènes et d'analyser leur structure

physico-chimique, il est également utile de repérer les différentes espèces de pollens dont les grains sont transportés dans l'atmosphère afin de relier la symptomatologie clinique aux pollens spécifiques en cause. La caractéristique essentielle des pollinoses est leur facteur saisonnier variable selon les différentes espèces de pollens, les latitudes et les climats. En effet, la floraison de chaque pollen conditionne la chronologie et parfois l'intensité des symptômes. ►

► Ce sont les espèces anémophiles qui libèrent dans l'air les plus grandes quantités de pollen : ils peuvent d'ailleurs franchir des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de leur lieu d'origine. Ainsi une sensibilisation peut survenir dans une région où les pollens en culture sont absents ; seules des études analytiques et quantitatives rigoureuses des pollens dans l'atmosphère apportent des informations très utiles pour la détermination des différentes espèces à un moment précis permettant d'identifier le pollen spécifique. On ne possède actuellement aucune donnée permettant de relier l'allergénicité d'un pollen à sa structure physico-chimique. Cependant, certains faits expérimentaux laissent à penser que les nuisances de l'atmosphère pourraient modifier la structure native d'un pollen et augmenter ses propriétés allergisantes.

Deux méthodes sont utilisées pour recenser et quantifier les pollens : la méthode gravimétrique (étude de la pluie pollinique) et la méthode volumétrique (étude du flux pollinique). Les appareils les plus répandus en Europe sont la trappe de Hirst et l'appareil de Burkard, décrit sur la figure.

Le calendrier pollinique

Grâce au développement de ces techniques et à la mise en place en France et en Europe de véritables réseaux régionaux de capteurs, la connaissance des principaux pollens disséminés dans l'air permet d'établir un calendrier pollinique pour une région donnée. Ainsi, toute une série d'études pluridisciplinaires ont pu être menées : par exemple, la corrélation entre une symptomatologie clinique allergique et la teneur de l'air en pollens de graminées (mi-mai, mi-juillet à Paris), l'importance de la Pariétaire dans le Midi couvrant trois saisons successives, les sensibilisations précoces du début de l'année (janvier, février, mars, avril) dues aux pollens d'arbre (frêne, platane, bouleau, noisetier...).

Une fois dressé un inventaire complet de la flore pollinique présente dans l'atmosphère de chaque région, il est possible de mettre en évidence les régions et les périodes à hauts risques allergéniques et de circonscrire la variabilité interannuelle de la période et de l'importance des émissions polliniques. On a ainsi constaté que certains taxons (marqueur qui permet d'associer ou de différencier les caractères d'une espèce, d'un genre, d'une famille d'origine animale ou végétale) émettent chaque année des quantités à peu près équivalentes de pollen alors que d'autres présentent des alternances importantes.



Appareil de Burkard de recueil des pollens. L'air chargé de particules en suspension est aspiré par une pompe à vide située dans l'appareil. Le flux pollinique est ensuite projeté sur un tambour rotatif sur lequel on applique une bande de melinex enduite de substance adhésive. Le tambour tourne à raison de 2 mm/h derrière un orifice de 2×14 mm par où l'air est aspiré. Après exposition hebdomadaire, la bande est découpée en sept parties égales qui sont montées séparément entre lame et lamelle pour être examinées au microscope.

Les graminées constituent 21 % de la masse totale de pollen inhalé par an.

La surveillance des pollens constitue un des aspects essentiels de prédiction et certainement de prévention dans l'épidémiologie des pollinoses.

Note : A la suite des « journées environnement » organisées par le PIREN en

1987, dont l'un des thèmes concernait l'allergie, une plaquette a été publiée : « Le point sur l'allergie : influence de l'environnement » (1988).

■ Bernard David, professeur à l'Institut Pasteur, chef de l'unité d'immuno-allergie, Institut Pasteur, 28, rue du Docteur Roux, 75724 Paris Cedex 15.

Asthme et pollution chez l'enfant

Dès sa naissance, le système respiratoire de l'enfant est agressé par de multiples allergènes. L'information des parents et des pouvoirs publics est indispensable à la prévention des affections qui en résultent.

■ *Alain Grimfeld*

La pollution atmosphérique intervient pour une grande part dans le déclenchement et la pérennisation d'un asthme chez l'enfant, depuis les premiers mois de vie. La première en date est certainement la pollution domestique dès le retour à domicile de l'enfant après la naissance : pneumallergènes, acariens, épithélia d'animaux (pols, plumes) ; trophallergènes (lait de vache, protéines d'œufs, poisson...) ; contaminants de l'air non spécifiques, à

l'intérieur des maisons (gaz des appareils de chauffage, laques cosmétiques, produits de dégradation des matériaux d'isolation...) ; enfin la pollution créée par le tabagisme des parents, ce tabagisme « passif » subi par les enfants, notamment en bas âge, étant certainement parmi les plus nocifs des polluants qui peuvent les agresser. A l'intérieur et à l'extérieur des maisons (dès les premières sorties), l'enfant va être en contact avec d'autres types de polluants : pollens, déchets industriels volatils, gaz d'échappement des voitures..., ces derniers dépendant en

grande partie du lieu d'habitation. Une dernière source de contamination est représentée par la vie en collectivité (crèches, maternelles, écoles) dans lesquelles se développent rapidement les épidémies de virose respiratoire.

La « pollution » alimentaire intervenant sur l'appareil respiratoire est essentiellement représentée par les colorants (dans l'état actuel des connaissances). L'intervention éventuelle de la pollution tellurique ou des eaux en ce domaine n'est pas connue.

La prévention de ces phénomènes passe par l'information permanente des parents (mesures d'hygiène et d'assainissement au domicile, suppression du tabagisme, contrôle de la vie en collectivité) et des pouvoirs publics (contrôle de l'environnement et information de la population par voie de presse).

■ *Alain Grimfeld, Service de pédiatrie et pneumologie de l'enfant, hôpital Trousseau, 26, avenue du docteur Arnold Netter, 75571 Paris.*



La plupart des usines sont à l'origine de déchets industriels volatils intervenant dans le déclenchement de l'asthme chez l'enfant. Ici, une cimenterie à Origny-Sainte-Benoîte (Aisne). (© INRA, cliché J. Nioré)

L'environnement et la promotion tumorale

Certains composés dépourvus en eux-mêmes d'activité cancérigène ou mutagène sont capables d'augmenter l'efficacité des cancérigènes ou de « révéler » leurs effets.

■ Charles Frayssinet
et Christiane Lafarge-Frayssinet

La cancérisation induite par une substance chimique se développe selon un processus séquentiel, progressant par étapes successives au cours desquelles peuvent intervenir des composés possédant des fonctions différentes. Dans un premier temps, les cancérigènes « génotoxiques » se lient au génome, provoquant des altérations qui, si elles sont incomplètement ou incorrectement réparées, introduiront des lésions irréversibles telles que mutations ou remaniements chromosomiques. Plusieurs mutations ponctuelles affectant des oncogènes ont été ainsi caractérisées. Cette première étape constitue l'initiation.

La lésion génétique ainsi créée reste

parfois quiescente : la cellule affectée respecte le contrôle de l'organisme, en particulier lorsque les doses de cancérigènes reçues sont faibles, mais elle conserve pendant un temps indéfini les potentialités acquises. Une telle situation est « modulable » : elle peut demeurer bloquée ou bien évoluer vers la production de tumeurs à la suite de l'intervention soit de cancérigènes, soit de molécules (exogènes ou endogènes) qui ne sont ni des mutagènes ni des cancérigènes actifs mais agissent essentiellement par voie épigénétique : les promoteurs tumoraux. Le concept de promotion tumorale a été développé dans le courant des années 1950 par Berenblum et Subik à partir des expériences de cancérisation de la peau de souris ; depuis, il a été généralisé à la plupart des autres tissus et a donné lieu à la mise au point de nombreux modèles

expérimentaux *in vivo* ou en culture de cellules. Il recouvre plusieurs mécanismes différents comme l'attestent la spécificité d'organe de la plupart des promoteurs ainsi que la multiplicité des substances ou des interventions auxquelles on reconnaît un pouvoir promoteur.

Les risques pour l'homme

Les règles d'hygiène et de sécurité en vigueur dans les sociétés modernes nous épargnent l'exposition à des doses de cancérigènes suffisantes pour provoquer des transformations complètes et définitives de certaines de nos cellules ; par contre, les agents cancérigènes sont répandus d'une façon diffuse (combustions, usage du tabac, hydrocarbures naturels, contaminants, rayonnements divers). Chaque individu possède donc des cellules ayant subi les premières étapes de transformation mais quiescentes et sensibles à une éventuelle promotion, qui apparaît ainsi comme une des étapes déterminantes de l'achèvement d'un processus tumoral. Un bilan complet des promoteurs tumoraux présents dans notre environnement n'est certes pas encore établi, mais des promoteurs actifs ont été reconnus parmi des substances naturelles (esters de phorbol), des produits industriels (polychlorobiphényles), des médicaments (phénobarbital, hypolipémiants...), des pesticides organo-chlorés, des additifs alimentaires, des contaminants tels que les dioxines ou certaines mycotoxines... En outre, l'abus de l'alcool ainsi que des carences ou déséquilibres alimentaires peuvent accélérer des processus de cancérisation et être assimilés à des traitements promoteurs. Un fort pourcentage des cancers humains dépend de nos conditions environnementales : dans ce pourcentage, une part peut être attribuée aux promoteurs tumoraux.

Une recherche fondamentale est encore nécessaire pour établir les mécanismes mis en œuvre par certains des promoteurs les plus puissants. Un effort de détection des promoteurs environnementaux et de quantification de leurs effets doit également être mené à bien pour pouvoir apprécier l'ampleur des problèmes posés.



Effet promoteur d'un polychlorobiphényle : les PCB, produits industriels pouvant contaminer l'environnement, exacerbent l'action de cancérigènes au niveau du foie. Dans cette expérience, deux groupes de rats sont d'abord traités par de l'aflatoxine B₁, cancérigène hépatique puissant. Un groupe reçoit ensuite un régime contenant un PCB. Des nodules préneoplasiques, révélés par une coloration rouge, sont visibles sur ces coupes de foie, beaucoup moins nombreux chez ceux recevant le régime témoin (1) que chez ceux recevant le régime additionné de PCB (2).

■ Charles Frayssinet, directeur de recherche au CNRS, responsable du Laboratoire de pathologie cellulaire (UPR 06 CNRS) de l'Institut de recherches scientifiques sur le cancer.

■ Christiane Lafarge-Frayssinet, directeur de recherche au CNRS (UPR 06 CNRS), Institut de recherches scientifiques sur le cancer, 7, rue Guy Moquet, 94802 Villejuif Cedex.

Allergies et fausses allergies alimentaires

En moins d'un siècle, le micro-environnement alimentaire a été profondément bouleversé. L'impact de ces modifications sur le système immunologique dépasse très probablement l'importance des réactions indésirables que l'on identifie.

■ Anne Moneret-Vautrin

Depuis la nuit des temps, les hommes ont éliminé empiriquement de leur alimentation les substances toxiques, naturelles ou provenant de processus secondaires de fermentation, contamination bactérienne, fongique ou minérale. Une pathologie propre à l'homme est l'allergie alimentaire (AA) : des symptômes variés, touchant tous les organes, et dont la gravité peut être celle d'un choc avec risque léthal, sont dus à une anormale réponse immunologique de l'organisme. Que sont en effet les aliments ? Non seulement des nutriments essentiels à la vie, mais aussi des systèmes diversifiés de protéines hétérologues, par là même antigéniques, et qui devraient induire une réaction de rejet, si l'organisme n'avait pas élaboré une réponse immunitaire complexe de tolérance. Contrairement aux allergies aux pollens, aux venins d'hyménoptères, aux médicaments, se caractérisant par une réaction isolée d'hypersensibilité, l'AA reconnaît une double composante : d'une part, cette même réaction d'hypersensibilité, d'autre part, une rupture de tolérance, c'est-à-dire l'apparition d'une anomalie à l'un ou l'autre niveau de la réponse physiologique de tolérance. Celle-ci est installée dans les deux premières années de la vie au niveau d'un système immunologique propre à l'intestin en voie de maturation. On ne sait si cette réponse physiologique se fait de la même façon à l'âge adulte, question à garder en mémoire pour apprécier le risque éventuel de sensibilisation aux aliments nouveaux proposées par les technologies alimentaires.

Les allergènes d'origine animale représentent plus de la moitié des cas. Il faut toutefois souligner la fréquence de sensibilisation aux fruits et légumes chez les sujets allergiques aux pollens, en raison des phénomènes d'antigénicité croisée.

Outre leur pouvoir sensibilisant, certains aliments sont riches en amines biogènes comme l'histamine et la tyramine. Pour peu qu'il existe une hyperméabilité de la muqueuse intestinale, une anomalie du catabolisme de l'histamine, et

une hypersusceptibilité de l'organisme aux effets pharmacologiques de ces amines, toute ingestion excessive peut entraîner des troubles similaires à ceux de l'allergie alimentaire. Les aliments comme la tomate, le blanc d'œuf, capables de provoquer la libération d'histamine dans l'organisme (aliments histamino-libérateurs) entraînent des symptômes identiques. Cette pathologie est individualisée sous le nom de fausses allergies alimentaires (FAA). L'intrication d'AA et de FAA est fréquente car toutes les deux créent – et sont favorisées par – une hyperméabilité de la muqueuse digestive.

Les technologies modernes

Les additifs alimentaires (colorants, conservateurs...) créent une pathologie propre : à la possibilité d'allergie s'ajoutent des effets multiples de neuro-modulation. D'autre part, certains additifs sont responsables de phénomènes d'inhibition enzymatique qui peuvent interférer avec le métabolisme de l'histamine ou des protéines.

Les technologies modernes ont transformé l'alimentation : l'apparition de nouvelles molécules comme l'aspartame entraîne celle de sensibilisation et peut-être de neuromodulation. L'utilisation courante de protéines allergisantes comme les crustacés et le soja, la consommation élargie à de nombreux fruits exotiques, la multiplicité des condiments épicés, conservateurs dans les plats cuisinés, l'emploi croissant de métabisulfites, l'apparition d'aliments pour sportifs commercialisés sous forme de poudre de protéines, la modification de structure chimique des protéines (texturation) sont des facteurs d'augmentation de la pathologie allergique et pseudo-allergique chez le consommateur. Ils génèrent également une pathologie professionnelle liée à l'inhalation. La tendance actuelle d'extrême diversification d'arômes doit rendre vigilant : d'autant plus légitime est l'appréhension qu'ils échappent actuellement à toute appréciation.

■ Anne Moneret-Vautrin, professeur de médecine interne, CHU de Brahm, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy.

Mycotoxines : danger !

Les mycotoxines, ces substances produites par des champignons microscopiques, les moisissures, sont susceptibles de contaminer les aliments et de provoquer chez l'homme nombre d'affections graves.

■ Guy Dirheimer

Les mycotoxines sont produites par des moisissures qui peuvent se développer sur les végétaux dans les champs, mais aussi sur les récoltes stockées et même sur des aliments de l'homme et des animaux domestiques. Elles peuvent contaminer l'homme soit directement, soit indirectement par l'intermédiaire d'aliments d'origine animale.

Le danger des mycotoxines fut porté à l'attention du public lorsqu'en 1960 survint en Grande-Bretagne une catastrophe sans précédent dans les annales de l'élevage : en une saison, 100 000 diodons à l'engraissement moururent de graves lésions hépatiques. Une farine à base de tourteaux d'arachide fut incriminée. La recherche du principe toxique permit d'y découvrir une substance produite par un champignon microscopique, *Aspergillus flavus*, qui fut appelée aflatoxine.

Plusieurs aflatoxines et leurs métabolites ont été caractérisées depuis. En plus de leur activité hépatotoxique, les aflatoxines sont de puissants cancérigènes hépatiques. Une des sources potentielles majeures est le lait fourni par des vaches nourries avec des tourteaux d'arachide en provenance des pays chauds et humides. La réglementation française impose aux aliments destinés aux vaches laitières une teneur maximale de 20 µg/kg. Les résultats d'un récent inventaire de la qualité alimentaire, réalisé en France, n'ont pas montré la présence d'aflatoxine dans les 30 échantillons de lait analysés (limite de dosage : 1 µg/kg). Par contre, entre 5 et 10 % des lots de cacahuètes et de pistaches analysés en renfermaient (moyenne 18 µg/kg et 880 µg/kg, respectivement).

La découverte des aflatoxines a entraîné une recherche active d'autres métabolites toxiques des champignons microscopiques. C'est ainsi que furent



Reins de porcs intoxiqués par l'ochratoxine A. À gauche, rein témoin, sain, et à droite, deux reins d'animaux intoxiqués, hypertrophiés, plus pâles, avec des taches blanchâtres. (Cliché P. Krogh).

► découverts l'ochratoxine A, la citrinine, la patuline, la famille des trichothécènes, la stérigmatocystine, la zéaralénone, etc. Le mécanisme d'action des trois

premiers groupes est plus particulièrement étudié en France (Laboratoires du CNRS de Villejuif et de Strasbourg).

L'ochratoxine A, métabolite d'*As-*

pergillus ochraceus et de *Penicillium viridicatum* contamine essentiellement le maïs. Elle est responsable de la néphropathie endémique des Balkans et de néphropathies chez les porcs d'élevage. Elle inhibe la synthèse des protéines par compétition avec la phénylalanine. De plus, elle provoque des coupures de l'ADN *in vivo* et s'est révélée cancérigène chez l'animal.

Les trichothécènes, produites en particulier par des *Fusarium*, ont été à l'origine de nombreuses intoxications d'animaux de ferme et d'une affection humaine grave décrite dès le XIX^e siècle en Russie, l'alcie alimentaire toxique. Elle apparaissait après consommation de céréales ayant été stockées durant l'hiver. Une température plutôt basse est favorable à la production de certaines trichothécènes. Elles inhibent la synthèse des protéines et, dans certains systèmes, celle de l'ADN. Chez l'homme, elles provoquent des irritations cutanées sévères, des vomissements, des désordres hématologiques et un effet immunodépresseur.

■ Guy Dirheimer, professeur à l'université Louis Pasteur, directeur-adjoint de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire (LP 6201 CNRS), CNRS, 15, rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex.

Environnement et déterminisme génétique

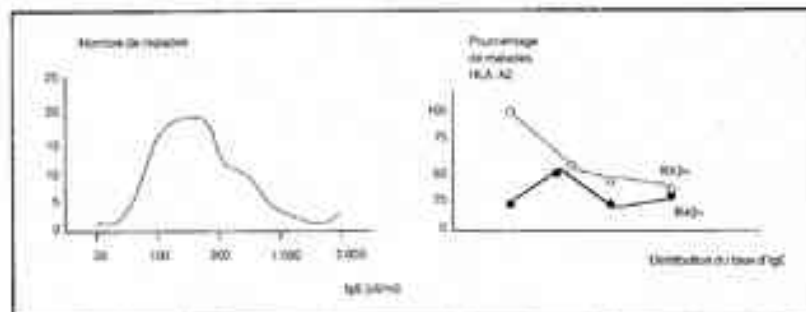
Certaines maladies dites communes ont une composante génétique indéniable. Néanmoins, l'environnement participe pour une part importante à leur genèse et à leur expression.

■ Riad Fadel

Le système immunitaire de l'homme et des mammifères, qui les protège si bien contre tant d'agents infectieux, est une des manifestations les plus élaborées de la plasticité adaptative des êtres vivants. Toutefois, ce système subtil peut se dérégler.

Le diabète sucré est une maladie auto-immune : l'organisme produit des anticorps contre des cellules de son propre pancréas ce qui entraîne une production insuffisante d'insuline. L'analyse des gènes du complexe majeur d'histocompatibilité ou HLA (*Human leucocyte antigen*) révèle que l'un d'entre eux est impliqué, le gène DR. On a mis au point des sondes moléculaires qui permettent de distinguer les diffé-

rentes formes, ou allèles, que peut prendre ce gène et on constate que l'allèle DR4 se retrouve chez les patients diabétiques. Toutefois, les infections virales et certains médicaments semblent jouer un rôle dans le développement de la maladie sous sa forme insulino-dépendante (dont le traitement nécessite des injections d'insuline), tandis que les excès alimentaires, sources d'obésité, favorisent la forme non-insulino-dépendante.



■ Allergie : relation entre taux d'IgE et type HLA. La courbe de gauche indique la distribution des taux d'IgE totales d'un échantillon de malades allergiques au pollen de ragweed (antigène majeur Ra3+). La courbe de droite représente la fréquence des malades Ra3+ ou Ra3- possédant l'antigène HLA A2. Un individu a plus de chance d'être sensible à l'antigène Ra3 du ragweed s'il est HLA A2. Cette association génétique est plus nette lorsque le taux d'IgE est bas (<200 U/ml).

Dans l'allergie, les anticorps indésirables produits par l'organisme sont des immunoglobulines IgE. Ici encore, le complexe HLA est impliqué. Par exemple, dans l'allergie au pollen de « rag-

weed » on a pu montrer le rôle du gène Dw appartenant à ce complexe : la production d'anticorps IgE contre un antigène particulier de ce pollen est le fait de patients portant l'allèle Dw2. Mais c'est le degré d'exposition au pollen qui déclenchera la maladie et qui la module-
ra.

L'infarctus du myocarde et d'autres maladies cardio-vasculaires surviennent plus fréquemment chez ceux qui ont un taux de cholestérol élevé dans le sang. Le cholestérol étant transporté dans le sang par une lipoprotéine dite LDL, on s'est intéressé au récepteur de ce transporteur. On a découvert qu'une mutation du gène codant pour le récepteur de la LDL se retrouve chez 30 % des sujets malades. Il n'empêche que des facteurs

d'environnement tels que l'obésité, le stress, le tabagisme et le manque d'exercice jouent un rôle important dans le développement de ces maladies.

L'analyse des facteurs génétiques des maladies communes que sont les affections cardio-vasculaires, le diabète auto-immun et l'allergie progresse rapidement sans réduire pour autant l'importance des facteurs provenant de l'environnement, qu'ils tiennent de la virologie, de la nutrition, de la toxicologie ou simplement du mode de vie.

■ Rind Fadel, docteur en médecine, chercheur à l'Institut Pasteur, Unité d'immunologie, 28, rue du docteur Roux, 75015 Paris.

Le cas du chlorure de vinyle

L'utilisation du chlorure de vinyle monomère (CVM) pour la synthèse des matières plastiques s'est longtemps faite sans que des précautions spéciales soient prises concernant les conditions de travail des ouvriers. Or, en 1973, les chercheurs devaient démontrer le pouvoir cancérogène du CVM qui induit une tumeur extrêmement rare, l'angiosarcome du foie. Exploitant les résultats des recherches effectuées dans différents laboratoires, des efforts considérables ont été réalisés depuis pour réduire la pollution dans les usines, par l'application de règles très strictes fixant le taux de CVM à des valeurs qui ne semblent plus présenter de danger pour la



Laboratoire de transformation du chlorure de polyvinyle.

santé. Par ailleurs, une collaboration entre les industriels français, l'INSERM et le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) s'est instituée pour développer des méthodes de surveillance biologique chez les individus exposés et pour étudier les mécanismes de l'induction de cette tumeur par le CVM.

■ Alain Barbin, assistant de recherche à l'OMS, Centre international de recherche sur le cancer, Unité des cancérogènes de l'environnement et facteurs d'hôte, 150, cours Albert Thomas, 69372 Lyon Cedex 08.

Les polluants des locaux

La pollution intérieure des locaux est devenue un problème majeur de santé publique depuis l'établissement des mesures d'économie d'énergie. L'insuffisance de ventilation a pour conséquence une concentration accrue de polluants domestiques.

■ Claude Molina

La liste des polluants de l'air intérieur des locaux est considérable et leurs effets sur la santé sont bien identifiés pour chacun d'entre eux. Par contre, l'interaction entre ces différents polluants, surtout lorsqu'ils sont en faible concentration, est extrêmement difficile à apprécier.

Il faut distinguer trois grands types de polluants :

1 - Les polluants physiques dont les plus connus sont l'amiante et le radon. L'utilisation de l'amiante dans la construction de nouveaux bâtiments a notablement diminué. La nocivité du radon a été établie dans quelques régions volcaniques d'Europe. Des normes sont actuellement à l'étude pour l'habitat.

2 - Les polluants biologiques : allergènes et microbes. Les allergènes domestiques sont représentés en très grande majorité par la poussière de maison et particulièrement les acariens *Dermatophagoides pteronyssinus* et *D. farinae*. A cet égard, les sujets atopiques constituent de véritables « sentinelles » de l'environnement. Mais on peut établir maintenant des taux limites de concentration acceptables pour la moyenne des individus (quantification immunoelectrophorétique de l'antigène PI dans l'atmosphère ambiante).

Ces notions sont d'autant plus intéressantes qu'on dispose aujourd'hui d'acaricides puissants et que les modifications de l'humidité relative à l'intérieur de l'habitat peuvent favoriser leur disparition. Il en est de même des moisissures.

Quant aux polluants microbiens, ils proviennent soit de maisons mal entretenues, soit d'immeubles climatisés où le conditionnement d'air est mal surveillé (lorsque l'eau stagne dans les conduites des climatiseurs). Germes, actinomycètes ou amibes peuvent s'y développer et provoquer nombre de maladies ou troubles.

3 - Les polluants chimiques, qui sont les plus nombreux. Certains proviennent d'infiltration de l'air extérieur, d'autres des matériaux de construction et des équipements. Un grand nombre provient des produits utilisés pour le nettoyage ou l'entretien. Enfin, la fumée de cigarettes représente souvent le polluant chimique intérieur le plus important et l'un des plus nocifs.

Plus de 300 composés organiques volatils sont aujourd'hui connus. En dehors du CO₂, témoin d'une ventilation insuffisante, citons le SO₂ provenant de l'air extérieur, le NO₂ (cuisinières ou chaudières à gaz), le formaldéhyde (matériaux isolants), les isocyanates (peintures), l'acétone (produits de nettoyage) et le benzopyrène (gaz d'échappement des véhicules).



Gaine de climatisation colmatée. (© CAMFIL, cliché M. Rault).

► Des normes ont été fixées par les Agences de Protection de l'Environnement dans différents pays. Il est actuellement admis que le taux de ventilation doit être supérieur à 10 litres par seconde et par personne. Ce taux doit être accru lorsqu'il existe un fumeur dans l'habitation.

Les manifestations

Les maladies liées à ces différents polluants se divisent en trois grandes catégories.

« Les maladies infectieuses type *Legionella*, non pas dues directement à la climatisation, mais à la pollution des

germes dans les tours aéro-refroidissantes voisines.

« Les manifestations allergiques, soit de type alvéolites ou manifestations fébriles (fièvre du lundi) avec présence d'anticorps précipitants dans le sérum des sujets exposés (*Thermoactinomyces*, moisissures, *Aureobasidium pullulans*, amibes, etc.), soit de type asthme ou rhinite, déclenchés par les allergènes domestiques ou des substances irritantes de l'environnement.

« Enfin, il existe une série de troubles que l'on désigne actuellement sous le nom de « maladies des bâtiments malsains » (*Sick Building Syndrome*). Il s'agit de troubles fonctionnels des voies aériennes supérieures survenant chez des sujets atopiques avec céphalées, malaises, sécheresse des muqueuses. Leur cause est encore mal connue, mais il semble s'agir de troubles multifactoriels.

■ Claude Molina, professeur à l'université de Clermont-Ferrand I, chef du Service de pneumologie, directeur du Laboratoire de recherches allergo-immunologiques, hôpital Sabourin, BP 125, 63020 Clermont-Ferrand.

Des envahisseurs sous haute surveillance

Les acariens sont des arthropodes de petite taille (100 à 500 µm), très répandus dans notre environnement : milieux terrestres, aquatiques, et parasitisme à différents degrés des vertébrés et invertébrés. Certaines espèces jouent un rôle pathogène chez l'homme et les animaux. Leurs sécrétions et déjections provoquent des affections cutanées (gale humaine, dermatite) et des manifestations allergiques (asthme, rhinite, urticaire). Par exemple, certains acariens sont responsables d'allergie à la poussière de maison, tandis que d'autres peuvent causer des allergies professionnelles.

Les méthodes utilisées dans la recherche sur les acariens et les molécules pathogènes qu'ils pro-



Dermatophagoides pteromyrmex (adulte, face dorsale) : acarien de la poussière de maison. (Cliché M. Lux).

duisent sont, selon les cas : l'identification des espèces et la numération au microscope, le dosage de la guanine (marqueur) dans le milieu suspecté et enfin, à l'aide d'anticorps monoclonaux, la quantification d'allergènes spécifiques dans l'environnement des sujets allergiques à la poussière de maison.

Actuellement, plusieurs approches sont donc possibles pour détecter et contrôler les acariens par trop envahissants.

■ Joëlle Le Mao, ingénieur de recherche à l'Institut Pasteur, Laboratoire d'immuno-allergie, 25, rue du Docteur Roux, 75015 Paris.

La toxicité du plomb

Le plomb peut être un redoutable toxique pour l'homme. Il intervient dans la genèse de certaines maladies.

■ Yves Manuel
et Joël Rakotoarivony

La toxicologie des métaux concerne quatre-vingts éléments. Certains sont indispensables mais les autres sont toxiques. Parmi eux, le plomb, bien que n'étant pas le plus toxique, pose de façon exemplaire des problèmes économiques, juridiques et de santé publique.

Il s'agit d'un métal « lourd », divalent, très soluble dans les acides organiques, dans l'eau peu acide ou riche en nitrates et qui forme avec le calcaire des carbonates insolubles. Il est présent dans l'environnement sous forme inorganique (en particules, sulfures et oxydes) et sous forme organique d'origine industrielle (tétraéthyle ou méthyle), dix fois plus toxique. L'absorption se fait par voie pulmonaire et intestinale dans le premier cas, et par voie cutanée (formes solubles dans les lipides) dans le second. De plus, le plomb organique présente un tropisme pour la cellule nerveuse.

Les populations touchées

La toxicité du plomb concerne trois types de populations.

— Les populations « professionnellement exposées » (fondeurs, mineurs, pompistes...). Elles sont dans la plupart des pays considérées par le législateur, pour des raisons essentiellement économiques, comme « plus résistantes » que les populations « normales ».

— Les populations « accidentellement exposées » comme celles s'adonnant au

bricolage (dénatage de peinture ancienne, essence utilisée comme solvant...) ou les enfants qui vivent dans des logements à peintures au plomb.

— Enfin, les personnes « normalement exposées » qui subissent les effets de contaminations chroniques d'origine industrielle, automobile ou alimentaire... Une étude récente menée à Bruxelles montre que dans les immeubles à canalisations de plomb, la teneur en plomb de l'eau (prélevée au robinet) dépassait dans plus de 30 % des cas les normes CEE (50 ppb) et dans 20 % des cas 100 ppb.

La teneur en plomb de l'essence (plomb organique) varie de 0,4 à 0,15 g/l suivant les pays de la CEE. Une étroite corrélation a été trouvée entre la teneur en plomb de l'essence, la teneur atmosphérique et les index d'exposition chez l'homme et surtout chez l'enfant.

La plombémie (taux de plomb dans le sang) est le reflet exact de l'exposition immédiate et varie de 7 à 20 µg/100 ml suivant la contamination atmosphérique. En Europe, les normes relatives à la protection de la santé humaine fixent comme valeur maximum admissible 35 µg/100 ml. Or, chez les populations du premier type, la plombémie atteint 60 µg, voire 80 µg/100 ml !

Symptômes et mécanismes d'action

Les groupes de symptômes observés chez les personnes contaminées au plomb sont de nature diverse :

— troubles neurologiques, surtout chez l'enfant (encéphalopathies, poly-

névrites, modifications de la conduction nerveuse dès 45 µg/100 ml...);

— troubles rénaux liés à un vieillissement accéléré des structures cellulaires pouvant entraîner des insuffisances rénales et cela pour des doses moyennes et chroniques;

— troubles cardiovasculaires, encore difficiles à interpréter;

— troubles de la reproduction, hypospémie et effets sur la grossesse et le fœtus pour les populations professionnellement exposées.

Les mécanismes conduisant à l'apparition de ces atteintes à la santé sont assez bien connus. Une fois incorporé, le plomb entre en compétition avec le calcium (Ca^{2+}) et va s'accumuler dans les os, mais il peut aussi bloquer plusieurs enzymes dont l'acide D-aminolévulinique déshydratase, la ferrochelatase. Ainsi, il diminue la synthèse et l'activité du système cytochrome P450 et ce, surtout au niveau des reins. Enfin, le plomb organique, déalkylé en plomb triéthyle, inhibe les phosphorylations oxydatives et interfère dans la synthèse de la sérotonine et le transport intracellulaire des acides aminés.

Il est clair que le plomb est d'autant plus dangereux que ses effets apparaissent pour des concentrations très faibles. Le retentissement chez l'enfant est précoce et de mieux en mieux connu. Cependant, des études complémentaires épidémiologiques et multiparamétriques sont nécessaires. Mais dès maintenant, toute réduction des sources de plomb est souhaitable.

■ Yves Manuel, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Unité de physiopathologie et toxicologie rénale (Unité 133 INSERM).

■ Joël Rakotoarivony, chargé de recherche à l'INSERM, Unité de physiopathologie et toxicologie rénale (Unité 133 INSERM), faculté de Médecine, 103, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

Produits cancérigènes et action publique

Les incertitudes scientifiques d'identification et d'estimation quantitative des risques cancérigènes créent des difficultés particulières pour l'action réglementaire de protection de l'environnement.

■ Jean-Paul Moatti

L'augmentation d'un facteur dix de la production et de la taille des unités de l'industrie chimique ces trente dernières années, l'introduction annuelle sur le marché mondial de deux cents à mille substances chimiques nouvelles ont multiplié les risques

de rejets dans l'environnement de substances potentiellement cancérigènes. Or, les agents cancérigènes présentent plusieurs caractéristiques qui contribuent à révéler une crise des mécanismes classiques d'évaluation, de prévention et de régulation des risques d'origine industrielle pour la santé et l'environnement.

Il s'agit de traiter des risques pour lesquels il peut s'écouler un laps de temps important entre l'exposition initiale au facteur de risque et le déclenchement de ses conséquences létales ou morbides éventuelles (15 à 25 ans pour le cancer du poumon et 35 ans pour le mésothéliome dû à l'amiante, 12 à 25 ans pour l'angiosarcome du foie dû au

chlorure de vinyle). De plus, le caractère multifactoriel de la pathologie cancéreuse accentue, dans la plupart des cas, la difficulté d'attribution d'un effet particulier à une substance spécifique. D'où de multiples incertitudes scientifiques quant à la simple identification du caractère cancérogène d'une substance.

A l'heure actuelle, moins d'une trentaine d'agents ou de procédés industriels sont classés par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) dans la catégorie des produits dont la cancérogénicité chez l'homme est fermement établie (liste publiée par le CIRC) ; un nombre plus important de substances sont plus ou moins fortement soupçonnées.

Evaluer le risque cancérogène

Des difficultés plus grandes encore apparaissent dès lors qu'il s'agit d'évaluer l'ampleur du risque cancérogène. Alors qu'en matière de toxicité aiguë (ou sub-aiguë), il est en général possible de déterminer, par l'expérimentation animale et les observations cliniques, des doses-seuil en-deçà desquelles un composé chimique n'exerce pas d'action nocive sur l'organisme humain, il n'existe pas dans l'état actuel des connaissances de consensus scientifique sur l'existence ou l'absence de seuils d'innocuité pour les expositions à des substances cancérogènes.

De plus, l'estimation du risque au niveau de doses caractéristiques des expositions environnementales implique, en règle générale, différentes formes d'extrapolation (extrapolation animal/hom-

me ; fortes doses/faibles doses).

Un travail que nous avons effectué sur la 2,3,7,8-TCDD (l'un des isomères de la famille des polychlorodibenzo-dioxines, et celui rencontré lors de l'accident de Seveso) permet d'illustrer l'importance de la plage d'incertitude : l'application systématique des différents modèles toxicologiques et biostatistiques envisageables aux données des deux expérimentations animales, internationalement considérées comme les plus sérieuses, conduit à retenir comme dose correspondant à un excès de risque de 10^{-6} chez l'animal (un cas de cancer supplémentaire pour une exposition collective de 10^6 individus), des valeurs qui peuvent varier de 10^{-14} mg/kg/jour à 10^{-7} mg/kg/jour (ceci à qualité égale de l'ajustement statistique des données observées).

Dès qu'on considère qu'il n'existe aucun degré d'exposition à une substance qui soit totalement dénué de risque (hypothèse d'absence de seuil) et que l'interdiction pure et simple de toute production susceptible d'induire un risque (si minime soit-il) de cancérogénicité relève d'une logique de l'absurde, il devient inévitable de rendre plus « transparents » les arbitrages qui portent sur les niveaux de risque socialement considérés comme « acceptables » ainsi que sur les limites économiques dans l'allocation des ressources de protection.

Le tableau présente un ensemble de résultats tirés d'études consacrées à des mesures de protection effectivement mises en œuvre en France pour réduire les expositions à des substances ou agents physiques cancérogènes. Ces ré-

sultats révèlent des inégalités considérables dans l'effort de prévention, ne tenant pas seulement aux incertitudes sur les relations exposition/risque et qui posent question quant aux effets des réglementations et des normes dans ce domaine.

Vers une harmonisation européenne

Les procédures de concertation les plus couramment pratiquées par l'administration française (en particulier au travers de comités consultatifs regroupant représentants des intérêts économiques et sociaux et consultation qualitative d'experts techniques et scientifiques), si elles ont fait la preuve de leur potentiel d'atténuation des conflits, ne mettent pas à l'abri de dangers sérieux de déstabilisation dès qu'existent de fortes incertitudes scientifiques ; ceci d'autant que les tendances à l'harmonisation européenne des réglementations incitent à une argumentation formalisée et quantifiée en matière d'évaluation de risques. Une recherche en cours sur le cas de l'interdiction européenne des PCB dans les transformateurs électriques suggère que l'absence d'évaluation formalisée, dans un contexte de forte émotion de l'opinion publique (soupçon de formation de dioxine lors d'incendies de transformateurs), peut conduire à des mesures dont la rationalité s'avère discutable.

■ Jean-Paul Moatti, chargé de recherche à l'INSERM, responsable de l'équipe « Economie de la prévention » (U 240 INSERM), BP 48, 92260 Fontenay-aux-Ilotes.

Risque	Installation	Coût de protection annuel (1981) millions de francs	10^{-3} Décès évités l'année d'exposition(*)	Coût implicite du décès évité (1981) millions de francs
1	MVC-P Usine de PVC récente	2,1	0,07-0,86	2500-30000
2	MVC-P Usine de MVC récente	5,4	0,23-2,3	2300-23000
3	MVC-P Usine de PVC ancienne	1,5	40-482	3-37
4	RI-P Centrale PWR	3,4	7	480
5	RI-T Centrale PWR	0,3	4,8	60
6	RI-T Mine d'uranium	0,09	8,8	10
7	RI-T Service hospitalier	0,003	0,5	6
8	Am-T Usine d'amiante (F)	12,4	1650-4550	2,7-7,5
9	Am-T Usine d'amiante (GB)	109,3	1450-4000	27-75
MVC Angiosarcome du foie mortel lié au monochlorure de vinyle (MVC) dégagé lors de la fabrication du MVC ou lors de sa polymérisation en PVC.				
RI Cancers mortels liés aux rayonnements ionisants.				
Am Mésotéliomes et cancers broncho-pulmonaires mortels liés à la fabrication d'amiante manufacturée.				
P Risque concernant le public riverain du site (rayon de 100 km autour du site).				
T Risque concernant les travailleurs du site.				
(*) Les décès évités ont été évalués en utilisant les relations exposition/risque généralement admises.				

■ Investissements de prévention des risques cancérogènes dans différentes industries. (Données CEPN/INSERM).

Influence du bioxyde d'azote et de l'ozone sur la santé humaine

Le bioxyde d'azote et l'ozone, peu dangereux aux concentrations habituellement rencontrées dans l'atmosphère, exercent des effets nocifs sur l'homme dans les zones polluées.

■ Cyr Voisin

Le bioxyde d'azote (NO_2) et l'ozone (O_3), qui en dérive sous l'influence du rayonnement ultra-violet, sont des polluants oxydants d'origines variées (voitures automobiles, industries chimiques, fumée de cigarettes...), dont la concentration dans l'atmosphère urbaine est actuellement en progression. Ils interviennent par formation de radicaux libres de l'oxygène, particulièrement agressifs pour les cellules et les tissus exposés.

Peu dangereux aux concentrations habituellement rencontrées dans l'atmosphère (0,01 à 0,02 ppm), ils exercent des effets nocifs variés sur l'appareil respiratoire humain, lors des pics de

pollution pouvant atteindre 0,05 à 0,2 ppm ou dans les zones particulièrement polluées.

A court terme, ils entraînent une augmentation des infections aiguës bactériennes et virales, par action cytotoxique directe sur les macrophages alvéolaires qui assurent la défense phagocytaire des espaces aériens. Ils provoquent en outre une inflammation des voies aériennes avec perturbation de la fonction muco-ciliaire, augmentation de la résistance bronchique au flux aérien et développement d'une hyper-réactivité bronchique non spécifique, surtout marquée chez les asthmatiques. Des recherches ont montré que les macrophages alvéolaires exposés pendant des périodes courtes à des faibles

concentrations de NO_2 jouent un rôle important à l'origine de ces faits, en libérant des médiateurs pro-inflammatoires et en attirant localement des polynucléaires neutrophiles qui amplifient l'inflammation de la muqueuse respiratoire.

A long terme, ces polluants oxydants entraînent des lésions dégénératives des bronchioles terminales et des lésions du tissu pulmonaire, de type fibrosant pour O_3 , de type emphysémateux pour NO_2 , par déséquilibre de la balance protéases-antiprotéases liée à l'action inhibitrice des radicaux libres de l'oxygène sur l'alpha-1-antitrypsine et à la libération accrue d'élastase granulocytaire et macrophagique.

L'organisme dispose pour s'opposer aux effets du NO_2 et de l' O_3 d'enzymes antioxydantes (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase) et de pièges à radicaux libres, parmi lesquels le glutathion, les vitamines E et C tiennent une place importante, expliquant le comportement variable des individus vis-à-vis du risque oxydant.

■ Cyr Voisin, professeur à la faculté de Médecine de Lille, Institut Pasteur, 1, rue du Professeur Calmette, BP 245, 59019 Lille Cedex.

Notre environnement radioactif

L'irradiation due aux activités humaines – médicales, militaires, civiles – est, à l'heure actuelle, très inférieure à l'irradiation naturelle.

■ Gérard Lambert

Avant même sa formation, la surface de notre planète était exposée aux rayonnements ionisants. De nos jours, les êtres vivants sont exposés à cinq sources différentes d'irradiation :

- le rayonnement cosmique, qui provient de l'espace ;
- le rayonnement, essentiellement γ , émis par les substances radioactives présentes dans les roches ;
- les rayonnements α , β , γ émis par les nucléides radioactifs présents dans l'atmosphère ;
- les rayonnements α , β et γ émis par ceux de ces nucléides qui ont pénétré à l'intérieur même des cellules des organismes ;
- enfin, les rayonnements X dus aux examens radiologiques, les rayonnements X et γ de la radiothérapie, et plus rarement les rayons X émis par des ap-

pareils utilisant de hautes tensions électriques (téléviseurs, etc.).

La part de chacune des sources naturelles à l'irradiation d'un être vivant dépend du lieu et des conditions dans lesquelles il vit. Le rayonnement cosmique est beaucoup plus intense en altitude. Le rayonnement du sol dépend essentiellement de la teneur des roches voisines en uranium, thorium (et leurs descendants) et potassium-40. Les principaux émetteurs radioactifs de l'atmosphère sont constitués des radons 220 et 222 (à l'état gazeux) et de leurs descendants (à l'état d'aérosols), qui sont cent fois moins abondants au-dessus des océans qu'au-dessus des continents, un peu moins abondants en altitude, et par contre fortement concentrés (dix à mille fois) en atmosphère confinée, comme par exemple à l'intérieur d'une maison mal aérée. Enfin, les organismes vivants sont également soumis à l'irradiation de l'isotope 14 du carbone formé par action

des rayonnements cosmiques sur l'azote atmosphérique, et absorbé sous forme de $^{14}\text{CO}_2$ par les plantes, puis par l'ensemble de l'écosystème.

Les activités humaines ne se limitent pas aux irradiations médicales, dont on peut espérer que leur effet global est positif. Les explosions nucléaires dans l'atmosphère et le développement de l'industrie nucléaire ont introduit dans l'environnement des radionucléides artificiels qui contribuent, évidemment, aux diverses sources d'irradiation, autres que le rayonnement cosmique. Cependant, à l'exception de régions limitées de la Terre et pendant des durées très réduites, la part des irradiations due aux activités humaines était encore très faible en 1980, comme le montre la figure extraite d'une étude très officielle d'un comité d'experts de l'ONU.

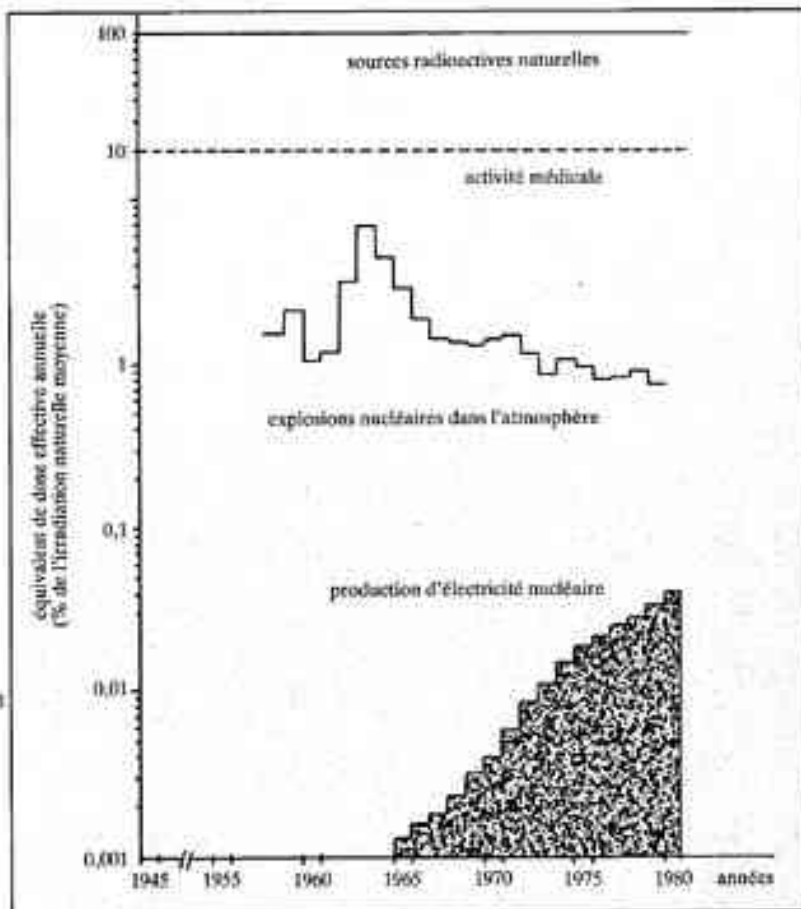
Depuis cette date, divers accidents se sont produits dans les centrales nucléaires. Les conséquences pour l'environnement en ont été négligeables, dans la mesure où le confinement de ces installations s'est montré efficace. Ce ne fut malheureusement pas le cas pour l'incendie de la centrale de Tchernobyl, qui a entraîné localement des irradiations importantes. A plus grande échelle, l'irradiation résultant de cet accident, calculée jusqu'à l'extinction des

derniers produits radioactifs, reste en Europe inférieure à 1,2 mSv, soit l'équivalent de sept mois d'irradiation naturelle, et bien moins dans les autres continents.

La comparaison de valeurs moyennes renseigne toutefois mal sur la nocivité de l'irradiation qui résulte des activités humaines. En fait, il apparaît que l'irradiation naturelle varie considérablement de - 75 % à dix fois sa valeur moyenne, pour de larges fractions de la population. Le supplément d'irradiation d'origine anthropique reste nettement inférieur à ces variations. Il semble donc bien qu'à l'heure actuelle l'irradiation due aux activités humaines soit encore peu significative.

■ Gérard Lambert, directeur de recherche au CNRS, Centre des faibles radioactivités (LP 2101 CNRS, Laboratoire mixte CNRS/CEA), avenue de la Terrasse, 91193 Gif-sur-Yvette Cedex.

La valeur moyenne de la radioactivité atmosphérique d'origine artificielle est toujours restée très faible par rapport à la radioactivité naturelle. C'est ce qui ressort entre autres de cette figure tirée d'un rapport du comité scientifique de l'ONU (SCEAR) qui montre l'évolution des différentes causes d'irradiation de la population de la Terre, exprimées en % de l'irradiation naturelle qui est une constante.



Radioactivité et santé

A la radioactivité naturelle s'ajoute depuis quelques décennies une radioactivité due à certaines activités humaines, notamment industrielles et médicales (voir l'article de G. Lambert).

On sait qu'une exposition aux rayonnements ionisants peut induire des effets nocifs, à condition bien sûr que son intensité et/ou sa durée soient suffisamment importantes. Ces effets sont de deux types :

- des effets aigus (de l'érythème à la nécrose des tissus), immédiats (quelques jours à quelques semaines), qui n'apparaissent que si la dose d'exposition est supérieure à certaines valeurs seuil, elles-mêmes relativement élevées (de l'ordre de 0,5 à 1 Sv) ;
- des effets retardés (cancer, leu-

cémie) dont l'apparition ne peut être définie que par une probabilité, celle-ci augmentant avec la dose d'exposition. Il faut remarquer que ces effets n'ont jamais pu être mis en évidence en dessous de doses d'exposition de l'ordre de 0,1 Sv : par prudence, on admet toutefois qu'il n'y a pas de seuil dans la relation exposition-effet, ce qui n'est sans doute pas exact au moins dans un certain nombre de cas.

Lors du déroulement normal des activités nucléaires, c'est-à-dire lorsque la source d'exposition potentielle est parfaitement contrôlée, les dispositions sont prises pour que les doses pouvant éventuellement concerner les personnes du public soient très faibles, au maximum de l'ordre de 0,00001 Sv/an. Des augmentations aussi infimes, largement inférieures aux

fluctuations de la radioactivité naturelle, ne peuvent avoir d'incidence sur la santé.

En dépit des précautions prises, la source peut cependant échapper au contrôle créant une situation d'incident ou d'accident : le passé montre toutefois que la probabilité d'occurrence de situations accidentelles sérieuses est extrêmement faible. Si un accident grave devait survenir, la mise en œuvre de mesures d'intervention appropriées permettrait d'en limiter les conséquences pour la santé.

■ René Coulon, adjoint au chef du Département de protection sanitaire du CEA, Institut de protection et de sûreté nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex.



Environnement et sociétés humaines

L'environnement ne reste pas extérieur à la vie des sociétés contemporaines. A travers diverses médiations, il influence leur devenir, même si l'idée d'un déterminisme direct a été invalidée. Un exemple de ces médiations : les caractéristiques des ressources naturelles marquent les propriétés de fonctionnement des marchés sur lesquelles elles s'échangent.

Surtout, la notion d'un environnement perçu comme menacé et « à protéger » a été intégrée ou construite, à des degrés divers, au sein des ordres symbolique (représentations et perceptions), juridique (concepts et règles de droit) et économique (nouvelles contraintes et opportunités,

coûts et incitations). La recherche s'est saisie de ces questions d'un point de vue explicatif et normatif. Elle analyse pareillement les épineux problèmes de conception et de mise en œuvre des nouvelles politiques publiques adoptées aux niveaux national et international.

L'environnement a aussi pénétré le domaine de la gestion, suscitant des travaux visant l'adaptation d'instruments existants, comme le calcul ou les mécanismes d'incitation économiques, ou de nouvelles approches comme celles qui s'organisent autour des notions de « gestion patrimoniale » ou de « risque technologique majeur ».

Olivier Godard

L'économie des ressources naturelles épuisables

Les ressources naturelles, dès lors qu'elles sont assimilées à des biens économiques, présentent des particularités qui affectent le fonctionnement des marchés et la dynamique économique.

■ Michel Moreaux

Une des formes majeures du rapport entretenu par l'homme avec son environnement s'exprime dans la catégorie des « ressources natu-

relles », éléments de l'environnement que l'homme isole conceptuellement et techniquement (l'extraction) en fonction d'un projet d'usage ou de consommation qu'il réalise sans autre détour ou

à l'issue d'une phase de transformation productive. Dès lors qu'elles sont considérées comme des biens économiques, ces ressources présentent des particularités. Elles peuvent être renouvelables ►

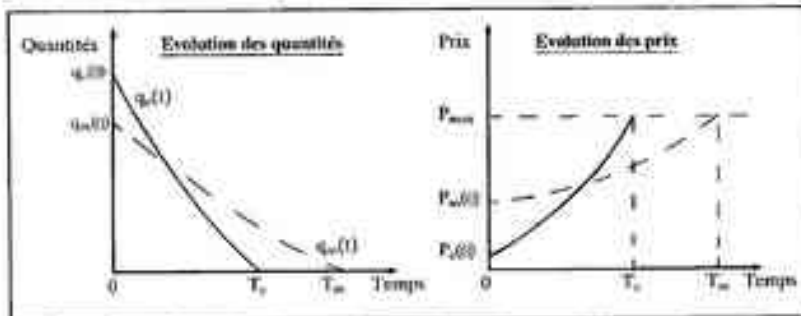
► ou non, épuisables ou non ; elles peuvent être dispersées ou concentrées en certains sites, aisément ou difficilement accessibles et appropriables, de qualité homogène ou hétérogène... Ces particularités structurent l'organisation des institutions économiques assurant ou régulant leur exploitation.

Depuis la fin des années 60, la théorie économique s'est attachée à saisir et analyser de manière rigoureuse les implications de ces diverses particularités. En voici deux exemples.

Dans la théorie habituelle des marchés, on montre qu'un monopole, pouvant choisir son prix de vente, produit moins et vendra en toute période à un prix plus élevé qu'une industrie fonctionnant sous un régime parfaitement concurrentiel. Pour une ressource non renouvelable finie, ce n'est pas le cas puisque la quantité totale vendue au cours du temps sera la même. Sous certaines conditions plausibles, on montre que le monopole épuise moins vite la ressource, ce qui donne une forme spécifique aux sentiers de quantités et de prix (voir figure).

Le syndrome hollandais

Au plan de l'analyse macroéconomique à court terme, on a découvert et analysé les effets pervers que pouvaient avoir, sur une économie nationale, la découverte et l'exploitation de nou-



Sentiers respectifs d'exploitation d'une ressource non renouvelable, selon un régime de monopole ou de concurrence parfaite ; $q_m(t)$ est le sentier des quantités vendues par le monopole, $q_c(t)$ le sentier concurrentiel, $p_m(t)$ et $p_c(t)$ sont les sentiers de prix correspondants. Sous régime concurrentiel, le rythme d'exploitation est plus rapide et la ressource se trouve plus vite épuisée. Son prix, d'abord inférieur au prix de monopole, s'élève au-dessus de ce dernier dans un deuxième temps.

veaux gisements de ressources naturelles. C'est ce qu'on a appelé le « syndrome hollandais », pour se référer aux difficultés rencontrées par les Pays-Bas à la suite de la mise en exploitation de leurs grands gisements de gaz : la hausse du taux de salaire réel qu'elle a entraînée a eu pour conséquence d'affaiblir la compétitivité des entreprises industrielles soumises à la concurrence internationale.

Au-delà de ces exemples, il faut constater que ce domaine de l'analyse économique conduit à aborder des pro-

blèmes parmi les plus délicats, comme l'intégration du temps avec sa double face d'incertitude et d'irréversibilité, les structures de marchés éloignés de la figure du marché concurrentiel parfait, l'innovation technologique, ou encore l'équité intergénérationnelle.

■ Michel Moreaux, professeur à l'université de Toulouse I, responsable du groupe de recherche en économie mathématique et quantitative (URA 947 CNRS), université de Toulouse I, place Anatole-France, 31042 Toulouse Cedex.

La nature disputée

Chacune des pratiques sociales ayant la nature pour cadre s'accompagne d'une représentation qu'elle s'efforce de rendre légitime.

■ André Micoud

La « nature » dont il est question ici est celle dont la définition ne pose même plus problème tant elle est aujourd'hui assimilée à « l'espace naturel », c'est-à-dire à l'espace que les sociétés urbaines désignent comme celui qu'elles n'occupent pas et qu'elles réservent... à la nature précisément. Si les conflits ne manquent pas pour savoir quels usages doivent être faits de ces espaces, ou de combien il faudrait les étendre, ils se déroulent sur un fond qui n'est lui-même pas remis en cause ; la



Les actions de réintroduction des animaux sauvages sont un bon révélateur des conflits entre les différentes représentations de la nature. Le lynx, hier réputé animal nuisible qu'on appelait aussi « loup-cervier », est maintenant protégé et même réintroduit en dépit de réticences locales. « Ni chat, ni loup », il est un bon symbole d'une nouvelle représentation du « sauvage acceptable » que certains groupes veulent imposer. (© WWF, cliché A. Pons).

nature est notre habitat. Parler d'habitat, ou encore d'environnement – mot récemment inventé pour désigner cette nature – voilà qui atteste de la force d'une double représentation, éco-logique et patrimoniale, c'est-à-dire d'une approche en termes de milieux et de conservation.

Cette conception-là n'a pas toujours été universellement admise. Les recherches historiques récentes montrent combien les idées sur la nature ont changé au cours du temps, comment non seulement ces représentations suivent l'évolution des pratiques dont elle est le cadre, mais surtout comment les différents groupes sociaux peuvent parvenir à en imposer de nouvelles en fonction de leurs places respectives dans la société. Avant l'invention du tourisme et de l'alpinisme, à la suite de la réévaluation romantique, la montagne était monstruosité difforme, le lieu de tous les dangers. Le littoral et le soleil, si convoités aujourd'hui, peuvent par bien des aspects être considérés comme des produits de l'hygiénisme du XIX^e siècle. Les marais et les zones humides, qu'on a supprimés en grand nombre pour cause de peste porteuse des germes de maladies, sont devenus aujourd'hui les « niches écologiques » par excellence,

zones de vie biologique intense et figures du milieu aqueux primordial.

Nature, qui es-tu ?

Les recherches sociologiques et ethnologiques, quant à elles, montrent que les affrontements pour la « définition » de la nature sont en quelque sorte permanents, même s'ils connaissent des périodes plus intenses. La nature ne cesse d'être « construite » socialement au travers des conflits entre groupes qui se disputent sa formalisation cognitive parce qu'ils se disputent son usage. Pour les producteurs, agriculteurs, forestiers, agrobiologistes..., elle reste avant tout une ressource ; pour les scientifiques de la nature, un milieu et un système à observer et à formaliser ; pour les usagers, par ailleurs de plus en plus divers et de plus en plus nombreux (chasseurs, cueilleurs, protecteurs, promeneurs, joggers, touristes, etc.), elle est terrain d'une activité ludique ou récréative, ou objet d'une contemplation esthétique. Tous s'affrontent, ou parfois concluent des alliances, pour soutenir qu'ils sont chacun « les meilleurs connaisseurs » de la nature. Mais tous ne disposent pas des mêmes atouts.

Aujourd'hui, le maniement d'un lan-

gage scientifique (celui des sciences de la nature ou des sciences humaines) semble bien être un élément déterminant de la lutte et les chercheurs sont convoqués pour cette activité de légitimation ; la représentation doit être soutenue par une expertise pour être reconnue et, le cas échéant, prendre corps sous la forme d'une norme sociale ou juridique, opposable à tous. Ceci indique que les oppositions, pour être rhétoriques, pour porter sur les mots et les figures (qu'on songe par exemple à toute l'action envisagée pour supprimer l'usage du terme « animal nuisible »), n'en visent pas moins à des résultats très concrets.

Au moment où l'Europe, qui est aussi celle de l'environnement, se met en place, d'autres représentations culturelles de la nature, anglo-saxonnes notamment, vont complexifier une partie qui n'est déjà plus hexagonale.

■ André Micoud, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherches et d'études sociologiques appliquées de la Loire (UA 899 CNRS), 6, place de l'Hôtel de Ville, 42000 Saint-Etienne.

L'environnement face à la loi

Les règles de droit visant à protéger l'environnement ne cessent de se multiplier. Correspondent-elles pour autant à leur objectif et, par conséquent, sont-elles efficaces ?

■ Alexandre Kiss

Ce qu'on appelle le droit de l'environnement est en fait composé de règles de droit administratif, de droit civil, de droit pénal, de droit communautaire, de droit international... Un examen de ce droit nécessite d'interroger toutes ces disciplines et de confronter leurs règles aux problèmes d'environnement. Certes, la définition de l'environnement n'est pas des plus aisées, mais le droit doit pouvoir, ici comme ailleurs, édicter des règles rigoureuses même quand la réalité en cause est difficile à saisir.

Une telle interrogation de notre système judiciaire fait ressortir un fait majeur. Le droit a pour objet de protéger les personnes, les biens et une organisation sociale ; les biens, une des clés de voûte du système, étant envisagés avant tout sous l'aspect de l'appropriation.

Cette façon de voir est mal adaptée à l'environnement, qui ne peut être réduit à un ensemble de biens : les processus écologiques, les systèmes servant de support à la vie doivent être sauvegardés tout autant sinon plus que « les biens de l'environnement » : une plaine alluviale, un bassin hydrographique sont des entités importantes au point de vue écologique et méconnues du droit.

De plus, les réalités écologiques se présentent souvent dans des formes que le droit n'appréhende pas aisément. Ainsi, pour protéger une espèce de la faune sauvage, il ne suffit pas de la déclarer propriété de l'Etat ou d'en interdire la chasse ; il faut aussi assurer les conditions nécessaires à sa survie, c'est-à-dire ménager des aires de reproduction et de repos, protéger les espèces animales ou végétales qui lui servent de nourriture, veiller à l'absence de pollutions dangereuses, etc. Or, tous ces as-

pects relèvent de traitements juridiques différents, souvent abordés séparément ou en termes contradictoires.



L'Aigle chauve, espèce en voie de disparition, a été conduit aux frontières de l'extinction par suite de la contamination de son réseau trophique par les résidus d'insecticides. (Cliché F. Ramade).

► Mieux exploiter le droit existant

Comment lever ces difficultés ? La recherche a envisagé plusieurs directions. Comme il serait peu réaliste de rêver à un système juridique entièrement différent, une première voie consiste à mieux exploiter les ressources du droit existant. Cela signifie d'abord clarifier, renforcer et appliquer plus strictement les règles existantes, notamment en matière pénale. Ensuite, mieux utiliser certains concepts juridiques disponibles : ainsi, l'assimilation des espèces de la faune sauvage vivant sur un terrain donné à l'immeuble que constitue ce dernier pourrait rendre certaines situations plus cohérentes et assurerait une meilleure protection. Enfin, il faudrait in-

troduire de nouvelles catégories juridiques, telles que : « espèces protégées », « être vivant », « substances dangereuses ».

Une deuxième voie, peut-être plus féconde à moyen terme, consiste à soumettre le droit existant à une lecture inspirée de la méthode systémique : l'édifice des règles intéressant l'environnement serait à reconstruire en partant de l'idée que la protection de l'environnement constitue un intérêt général d'importance primordiale, notamment pour assurer les droits des générations futures. Ainsi, l'on tirerait un certain nombre de règles cohérentes d'un principe de respect des grands équilibres écologiques et des relations qu'ils impliquent entre espaces et différentes espèces sauvages et cultivées. Pour ne don-

ner qu'un exemple, les différentes fonctions écologiques de la forêt – protection des sols, habitat d'espèces sauvages, absorption de pollutions, régulation climatique... – seraient à prendre en compte comme données inséparables d'un même fait, à opposer le cas échéant à des intérêts économiques, politiques ou militaires.

Dès maintenant, ce « droit écologique » apparaît en filigrane dans la législation nationale et surtout communautaire et internationale. Pourra-t-on le dégager avant qu'il ne soit trop tard ?

■ Alexandre Kiss, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre du droit de l'environnement (URA 0969 CNRS), université Robert Schuman, place d'Athènes, 67084 Strasbourg Cedex.

La notion de dommage écologique pour le droit

Le dommage écologique n'est pas ignoré par le droit. Celui-ci en donne simplement une traduction multiforme, ce qui l'amène parfois à combler les incertitudes scientifiques par des « conventions » juridiques.

■ Gilles J. Martin

La notion de dommage écologique est mal définie : atteintes à l'intégrité des personnes, dommages aux activités et aux biens marchands, dégradations subies par la nature et altération des processus bio-physiques essentiels sont présentés comme des dommages écologiques. L'examen de leur traitement juridique montre que le droit est perméable aux différentes perceptions sociales de ces phénomènes.

Ils sont d'abord perçus par le droit comme dommages prévisibles, cette prévisibilité fondant l'approche réglementaire destinée à les prévenir ou le mécanisme d'assurance visant leur compensation. Pour autant, certains dommages écologiques sont des dommages

acceptés par ce droit même : cela se manifeste dans la fixation de seuils par la réglementation, la mise en œuvre de techniques de compensation, ou l'utilisation par le juge de la méthode dite du bilan coûts-avantages. D'autres sont refusés par le droit qui en fait un élément constitutif d'infractions pénales : on parle alors de dommage infractionnel. Enfin, le dommage écologique peut être perçu comme un dommage réparable, catégorie qui est particulièrement révélatrice de l'approche juridique.

En effet, les conditions juridiques nécessaires à la réparation d'un dommage (victime identifiée, lien de causalité, possibilité d'évaluer le dommage, etc.) se révèlent ici souvent difficiles à satisfaire, spécialement lorsque ce domma-

ge affecte des biens naturels inappropriés ou des processus écologiques. Le droit ne peut se contenter, alors, d'attendre que des certitudes scientifiques et techniques lui soient données, à seule fin de les traduire. Il construit le réel par des « conventions », tant pour la recherche d'un responsable ou la désignation des victimes – par exemple, les générations futures – que pour l'évaluation des dommages.

■ Gilles J. Martin, professeur à l'université de Nice, directeur du Centre d'études et de recherches sur l'environnement, Faculté de droit et des sciences économiques de Nice, 7, avenue Robert Schuman, 06000 Nice Cedex.



Marée noire après le naufrage de l'Amoco Cadiz, en mars 1978, échoué devant Portsall (Nord-Finistère). (© INRA).
Le jugement de Chicago a condamné la Standard Oil et Indiana à verser des indemnités à l'Etat français et à diverses collectivités et groupes d'intérêts locaux. Si l'évaluation des dépenses de nettoyage fut relativement facile, celle des pertes de ressources économiques fut plus complexe. Mais comment évaluer le dommage écologique à moyen et à long terme ?

Stratégies énergétiques

En quinze ans, sous la contrainte d'enjeux environnementaux devenus majeurs, les stratégies énergétiques ont découvert le paramètre écologique.

■ Jean-Charles Hourcade

L'environnement n'a longtemps constitué pour le secteur énergétique qu'une contrainte parmi d'autres : localisation des barrages hydroélectriques, désulfuration du gaz à proximité de cultures (Lacq), interdiction du délestage en mer, modification des trajets des super-tankers. Pouvant altérer le bilan financier d'un projet, rarement l'annuler, les coûts de prévention ou réparation des « externalités » dues à la production-transmission d'énergie ne pesaient que marginalement sur la structure de l'offre. Mais en quinze ans, les enjeux environnementaux sont devenus globaux, et constituent désormais pour les économistes de l'énergie un problème économique majeur.

Deux dossiers très différents ont amorcé cette mutation :

- le nucléaire où l'avenir d'une filière est soudainement remis en question ; à côté de la contraction de la demande d'énergie, des coûts financiers et des problèmes d'organisation industrielle, les protestations contre les risques radioactifs bien avant Three Miles Island (1979) contribuent à l'arrêt des programmes aux USA et à leur rajeunissement en Europe. La Suède décide, par référendum, de sortir du nucléaire, rejointe par l'Italie après Tchernobyl.

- la « crise du bois de feu » qui menace la survie des populations pauvres et réduit les possibilités de développement dans des zones importantes du Tiers-Monde. L'écologie impose une contrainte que les énergies de substitution ne peuvent contourner en raison de la faible insertion des populations concernées dans l'espace monétaire. Les échecs de la promotion des « foyers améliorés » montreront que la mise au point d'une solution technique simple devient un problème très sophistiqué dès qu'on doit intégrer des critères « d'appropriabilité » par des populations dans un milieu déterminé.



Centre de production nucléaire de Paluel (Seine-Maritime). (© SODEL EDF, diffusion La Documentation française, cliché Briquand). Les interrogations concernant le ralentissement ou l'arrêt des programmes nucléaires ne sont qu'un des aspects de la prise en compte des considérations d'environnement sur la scène de l'économie du secteur énergétique.

La pénétration des considérations d'environnement sur la scène de l'économie du secteur énergétique connaît une nouvelle étape lorsque le gouvernement allemand adopte (juin 1982) des mesures conduisant à imposer le « pot catalytique » en pleine controverse sur la « mort des forêts ». La C.E.E. prendra le relais dès décembre 1982 en incluant des normes d'émission pour les centrales thermiques, puis en définissant un plan impératif de réduction des polluants automobiles. Entre-temps, le domaine du raffinage a dû engager son adaptation et l'Allemagne fédérale investit massivement pour désulfurer ses centrales au charbon.

Un nouveau défi apparaît aujourd'hui, celui des liaisons énergie-climat, qui constitue pour l'humanité une sorte de « pari de Pascal » à l'envers. La compétition entre filières peut s'en trouver modifiée (charbon émetteur de CO₂, option nucléaire limitée par le « risque Tchernobyl », innovation dans les équipements efficaces énergétiquement). Enfin, le Tiers-Monde ne pouvant asséoir son développement que sur ses énergies fossiles, l'environnement va

devenir inéluctablement une composante des rapports Nord-Sud.

Les stratégies énergétiques ont donc « découvert » le paramètre écologique. Mais, dans un contexte où les sensibilités sont contrastées d'un pays à l'autre et où les négociations internationales imposent un rythme de décision indépendant de celui de la progression des connaissances scientifiques, rien ne garantit que les compromis adoptés soient optimaux écologiquement ou les plus équitables.

Il y a, dans la saisie de telles situations, un défi à relever pour les sciences sociales, en contact étroit avec les sciences de la nature. L'effort a déjà commencé (étude des controverses, traitement du risque, outils d'évaluation des choix technologiques et démarches prospectives), mais il est souvent méconnu.

■ Jean-Charles Hourcade, chargé de recherche au CNRS, directeur du Centre international de recherches sur l'environnement et le développement, (UA 940 CNRS). Ecole des hautes études en sciences sociales, 1, rue du 11-Novembre, 92120 Montrouge.



La modélisation macroéconomique

La modélisation macroéconomique permet aujourd'hui de caractériser certains effets globaux des dépenses consenties pour l'environnement.

■ Michel Manuel

La modélisation macroéconomique des effets des dépenses consenties dans le cadre de politiques de l'environnement a pour but d'appréhender trois types d'impacts éventuels : la stimulation de la croissance économique, l'incidence sur la formation des coûts de production et sa diffusion dans l'économie, le relèvement de l'efficacité dans l'emploi des facteurs de production.

Divers exercices de simulation ont été effectués en France depuis une dizaine d'années à partir d'un modèle macroé-

conomique simplifié et adapté de celui employé par les autorités publiques pour la prévision économique à moyen terme de l'économie française. Certains enseignements ont pu être tirés : réduction marquée des effets positifs de stimulation de la croissance entre 1961 et 1980, effets négatifs cumulatifs sur la formation des coûts, mais d'une manière très variable selon les agents sur lesquels pèse la dépense et selon les moyens de financement utilisés, possibilité d'une compensation de ces effets négatifs par une modulation du profil des dépenses et par un relèvement de l'efficacité des facteurs de production.

Les difficultés rencontrées à l'occasion de ces exercices et la grande variabilité des effets obtenus selon les modalités de dépenses testées conduisent à utiliser différemment l'outil macroéconomique. Plutôt que de chercher à démontrer l'existence d'un impact global positif, non mesurable en termes de comptabilité nationale, il s'agit d'examiner sous quelles conditions diverses politiques, caractérisées par leur distribution dans le temps et leurs moyens de financement, peuvent n'exercer que des perturbations limitées. Cela traduirait non pas l'absence de conséquences économiques, mais le fait que ces dernières prendraient la forme d'une restructuration de la demande globale, les dépenses nouvelles d'environnement se substituant à d'autres utilisations finales du produit national.

■ Michel Manuel, économiste au Centre d'étude pour la prospective économique et les mathématiques appliquées à la planification, 142, rue du Chevaleret, 75013 Paris.

De la difficulté d'appliquer le droit

En dépit d'un état d'urgence, l'application du droit de l'environnement souffre de nombreuses exceptions. A qui la faute ?

■ Michel Prieur

Le droit de l'environnement est désormais parvenu à l'âge adulte. Néanmoins, un constat s'impose en France comme à l'étranger : il existe un décalage important entre la teneur des règles légales intéressant l'environnement et la réalité du droit mis en œuvre quotidiennement, ce que les Anglo-Saxons appellent "the implementation gap" et les Français le problème de « l'ineffectivité » de ce droit. A quels facteurs faut-il attribuer en France une telle situation ? A la décentralisation administrative et politique engagée en 1982, par exemple ?



La revendication du droit à de nouveaux loisirs (ici, la pratique de la « moto verte ») ou celle du respect d'activités traditionnelles mettent en évidence la difficulté d'application de la loi face à la résistance de groupes de pression. (Cliché P. Roy).

La recherche juridique s'est emparée de cette question en empruntant diverses voies d'investigation : analyse de l'évolution des textes, depuis les lois jusqu'aux circulaires d'application ; enquêtes sur les suites données aux procès-verbaux d'infraction ; analyse de la jurisprudence des tribunaux ; mise sur pied d'un observatoire de la décentralisation étudiant dans quatre régions la mise en place de cette réforme et les changements occasionnés...

Ces travaux montrent que la décentralisation n'a pas affecté, sauf à travers l'urbanisme, la mise en œuvre du droit de l'environnement, même si les collectivités locales exercent des responsabilités nouvelles et jouent un rôle déterminant dans l'investissement touchant à l'environnement (50 % de la dépense publique).

Les causes principales

En revanche, l'inapplication du droit se révèle avoir de multiples sources qui se rattachent au fonctionnement de l'appareil d'Etat. Par exemple : lenteur de l'administration à adopter les textes d'application sans lesquels les lois restent inopérantes ; faible usage, de la part des juges et des fonctionnaires, d'un droit de l'environnement mal connu du fait de sa dispersion dans une multitude de textes non rassemblés en un code et du contenu très technique de

certaines règles accessibles aux seuls spécialistes; faiblesse des moyens de surveillance en équipement et en personnel (en 1989, 535 inspecteurs pour 558 000 installations classées à contrôler); attribution de l'exercice des polices spéciales à des services de l'Etat qui ne sont pas indépendants des secteurs à contrôler (industrie, agriculture)...

Au-delà des contingences, cela révèle un certain éclatement de la notion d'intérêt général, écartelée entre des nécessités contradictoires que des groupes de pression portent avec vigueur, qu'il s'agisse d'intérêts économiques immé-

diats, de la revendication d'un droit aux loisirs (moto verte) ou de la défense d'activités traditionnelles comme la chasse d'espèces protégées...

La recherche montre aussi que la déréglementation, encore indirecte et peu visible, constitue un facteur d'aggravation de ce problème de mise en œuvre du droit: allègement de procédures ou de normes, tels le changement des seuils dans la nomenclature des installations classées ou l'atténuation des protections à laquelle procède la « loi montagne » de 1985; tolérance durable de situations irrégulières; recours à des mécanismes contractuels qui, se substituant à des

règles de police, contribuent à annihiler l'effet obligatoire de la règle de droit.

Ainsi, l'effectivité future du droit de l'environnement sera avant tout liée à l'évolution des rôles, des logiques de fonctionnement et des moyens de l'Etat.

■ Michel Prieur, doyen de la Faculté de droit et des sciences économiques de Limoges, directeur du Centre de recherche en droit économique, droit de l'urbanisme et droit de l'environnement (UA 967 CNRS), 32, rue Turgot, 87000 Limoges.

Droit imposé ou négocié ?

La politique publique réglementant les pollutions industrielles a vu le versant réglementaire classique se doubler d'un versant négocié : compromission ou recherche d'efficacité ?

■ Pierre Lascombes

L'étude de la politique publique menée en France vis-à-vis des pollutions industrielles a révélé une double face. La face réglementaire classique, fondée sur la seule exigence d'application de la loi, s'est vue doublée, depuis la prise en charge de ce secteur par l'Inspection des mines en 1971, d'une face pragmatique reposant sur la négociation des mesures de protection entre l'administration responsable de ces problèmes et les industriels.

Ce nouveau pragmatisme s'est traduit de deux manières :

- afin de s'assurer d'une meilleure application de la législation pour les grosses sources de pollution, le ministère de l'Environnement conclut avec les secteurs industriels concernés, branche par branche, une série d'accords au statut juridique ambigu, en apportant notamment certains concours financiers;

- les ingénieurs chargés localement de délivrer les autorisations et d'appliquer les règles se sont donné une doctrine visant la recherche d'une amélioration progressive des équipements en fonction des techniques disponibles et de la capacité économique des entreprises à la supporter; préoccupés d'une

efficacité concrète intégrant les impératifs industriels, ils ne se sont jamais sentis tenus par un légalisme strict, considérant le droit en vigueur davantage comme une ressource pour l'action et la négociation que comme une contrainte à faire respecter.

Cette innovation introduit une tension dans le dispositif de contrôle de la pollution entre les deux pôles de l'efficacité et de la légitimité, et révèle un trouble plus fondamental sur ce qu'on attend du droit. Les règles sont-elles im-

pératives, en tant qu'expression de la souveraineté nationale et de la prééminence de l'intérêt public? ou bien ne sont-elles, en fait sinon en droit, que des ressources mises à la disposition de l'administration pour amener les entreprises à négocier ?

■ Pierre Lascombes, chargé de recherche au CNRS, Groupe d'analyse des politiques publiques (ER 268 CNRS), 13, rue du Four, 75006 Paris.

Réglementation européenne et enjeux industriels

Une réglementation adoptée au nom de la protection de l'environnement peut avoir des conséquences considérables sur l'activité industrielle et la concurrence entre différents groupes et pays.

■ Philippe Roqueplo

Après plusieurs années de pressions et de controverses avivées par la découverte du déperissement des forêts et marquées par des tensions entre la France et l'Allemagne fédérale, les gouvernements européens ont enfin arrêté les mesures visant la réduction de la pollution atmosphérique provenant des automobiles et des centrales thermiques. L'étude de cette réglementation montre la diversité des enjeux industriels concernés.

Tout d'abord, cette réglementation constitue un facteur notoire de complexification des systèmes techniques qui, dans certains cas, vont être

plus difficiles à maîtriser : les risques de défaillance technique et les problèmes d'entretien s'en trouveront souvent accrus. Ainsi, au lieu de s'alimenter en énergie en brûlant leurs produits lourds très riches en soufre, les raffineries devront « convertir » leurs bas produits pour en tirer le gaz qu'ils pourront utiliser. De même, l'usage de pots catalytiques posera des problèmes de réglage et d'entretien des voitures.

Ensuite, cette réglementation soulève les paradoxes d'un principe d'équité conduisant à des inégalités et d'un principe de concurrence menant à des monopoles. D'un côté, le principe d'une « égale sévérité » pour tous a été interprété « source par source » et non dans

► le cadre d'une approche globale, par régions ou par pays, ce qui aurait pondéré l'effort à consentir par le niveau global de la pollution émise. Ce parti induit des différences de coûts considérables selon les cas. Ainsi, le surcoût des pots catalytiques est beaucoup plus important (en valeur absolue et *a fortiori* en valeur relative) pour les petites voitures sur lesquelles il faut installer l'injection électronique que sur les grosses qui en sont déjà équipées. Cette règle peut même instaurer de véritables situations de dépendance, ou conforter réglementairement des positions de monopole au profit de certains producteurs ou de certains consommateurs industriels : par exemple, l'obligation de recourir à l'injection électronique assoit le quasi-monopole de telle entreprise sur la partie mécanique des injecteurs ; de même, les produits lourds, fatals et non stockables des raffineries risquent de se voir transformés en déchets ou en produits dévalorisés éliminables uniquement dans les foyers de grande puissance équipés de désulfuration.

D'un autre côté, des inégalités réglementaires pourraient pénaliser les industries des pays les plus sévères ou constituer un obstacle à la libre circulation des marchandises (protectionnisme déguisé et limitation de la concurrence). Par ailleurs, des normes sévères homogènes présentent l'avantage d'élargir et de consolider les débouchés des industries liées à la dépollution, condition

économique d'un progrès écologique de l'industrie.

Finalement, l'environnement devient promoteur de modernité industrielle : la mobilisation de l'opinion de certains pays s'y transforme en « force industrialisante » et la réglementation européenne constitue l'un des appareils de pouvoir contribuant à étendre ce phénomène aux autres pays d'Europe. Il n'est que de citer le *Journal Officiel des Communautés européennes* : « La fixation de normes européennes sévères en matière de protection de l'environnement est (...) devenue un impératif et, en fait, un impératif économique ».

Resterait à déterminer au profit de qui cet impératif est mis en œuvre et si les enjeux économiques ne sont pas « en fait » en train de prendre le pas sur les enjeux écologiques. La question va se poser avec une force particulière à propos du CO₂ et de l'effet de serre : les enjeux fondamentaux seront-ils l'avenir du climat et de la planète elle-même, ou bien les « enjeux industriels » liés soit à l'énergie nucléaire, soit aux combustibles fossiles ?

La communauté scientifique devra sans aucun doute déployer une grande vigilance pour résister à une telle inversion des perspectives.

■ Philippe Roqueplois, directeur de recherche au CNRS, Centre d'étude des mouvements sociaux (UA 102 CNRS), 34, boulevard Raspail, 75006 Paris.



La réglementation européenne visant à réduire la pollution atmosphérique provenant des automobiles se présente comme un « impératif économique ». Aux chercheurs de mettre en lumière ses effets redistributifs : quels sont les groupes ou les pays qui en bénéficient concrètement ? (© INSERM, cliché M. Depardieu).

Quel prix pour la nature ?

La plupart des éléments du patrimoine naturel sont hors marché. S'ouvre alors à la recherche un large champ d'investigation pour la détermination d'indicateurs de valeur monétaire.

■ Patrick Point

Dans les sociétés d'économie de marché, à la plupart des biens et services se trouve associé un prix. Fondamentalement ce prix est un signal qui permet aux producteurs et aux consommateurs d'ajuster leurs comportements. C'est aussi un indicateur de la rareté relative dans les conditions d'offre et de demande actuelles et anticipées. Il faut entendre par là que le prix d'une ressource représente ce que l'on est prêt à sacrifier pour en obtenir ou conserver une unité.

S'agissant des ressources hors marché – cas de beaucoup d'éléments du patrimoine naturel : faune et flore sauvages, eau, air... –, un tel indicateur n'est pas directement disponible. Or, une gestion saine de ces ressources suppose l'existence d'un indicateur de valeur monétaire, sans lequel on est conduit trop souvent à considérer le prix comme nul.

De plus en plus, on s'inquiète de la valeur des actifs naturels hors marché ou mal pris en compte par le marché. Ces interrogations naissent notamment à l'occasion de l'évaluation des coûts et des avantages de projets affectant des éléments du patrimoine naturel, également lors d'essais de comptabilisation de ce patrimoine, et bien sûr lorsqu'il s'agit d'indemniser des dommages de type écologique. Les tribunaux sont maintenant fréquemment confrontés à ce problème.

Déterminer un prix en l'absence de marché

Si le marché est un révélateur commode de la valeur, il n'est ni indispensable, ni toujours souhaitable.

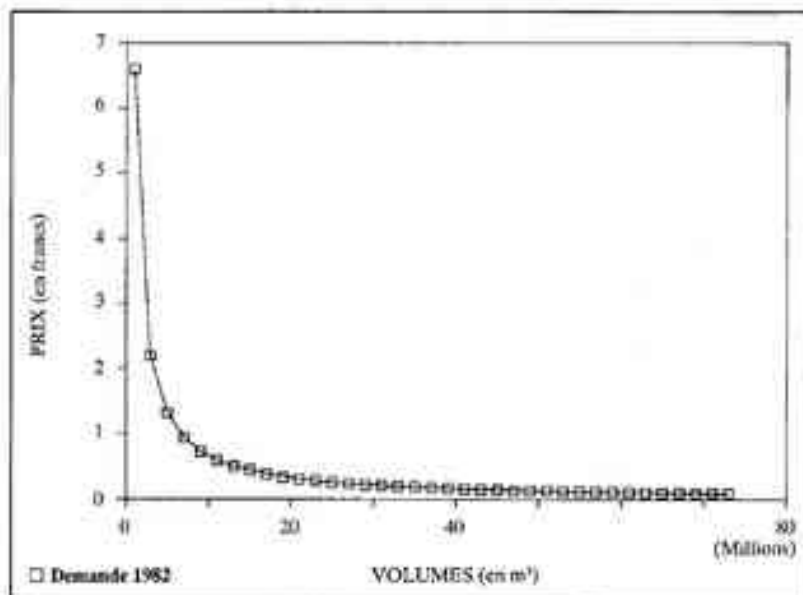
La puissance publique peut, pour des raisons tutélaires, désirer fixer quantitativement l'usage de certaines ressources. Il est alors possible de révéler le prix attaché à la ressource. Dans le cas de figure le plus simple, il existe des

mécanismes assurant un retour vers le marché (cf. droits à polluer négociables) et un prix se dégage alors. Dans le cas le plus général, l'introduction de quotas peut être analysée comme la mise en place de contraintes auxquelles sont associées des variables duales ayant la dimension d'un prix. On parle alors de prix fictifs, qui ne peuvent être révélés que par le calcul économique.

Il arrive aussi très souvent pour des actifs naturels multi-fonctions que certaines de leurs fonctions ne fassent l'objet d'aucune régulation par les prix ou les quantités. Il faut alors recourir à des méthodes spécifiques de calcul d'un pseudo-prix. Considérables sont les besoins observés dans ce domaine, et les défis qu'il représente pour la science économique suscitent à l'heure actuelle de nombreuses recherches.

Les fondements économiques de ces méthodes apparaissent très divers. Certaines sont ainsi basées sur la valeur de reconstitution, le coût d'opportunité, la révélation directe de la disponibilité à payer ou à vendre (évaluation contingente), l'analyse des comportements, la complémentarité ou la substituable avec des biens échangés sur les marchés, la contribution à la valeur de biens ou services marchands (prix hédonistiques), ou enfin la productivité des facteurs. Aucune de ces méthodes n'est parfaite et universelle. Il convient dans chaque cas de sélectionner la moins critiquable et de l'adapter précisément au contexte.

Illustrons cette démarche avec le cas de l'eau à usage d'irrigation qui pose

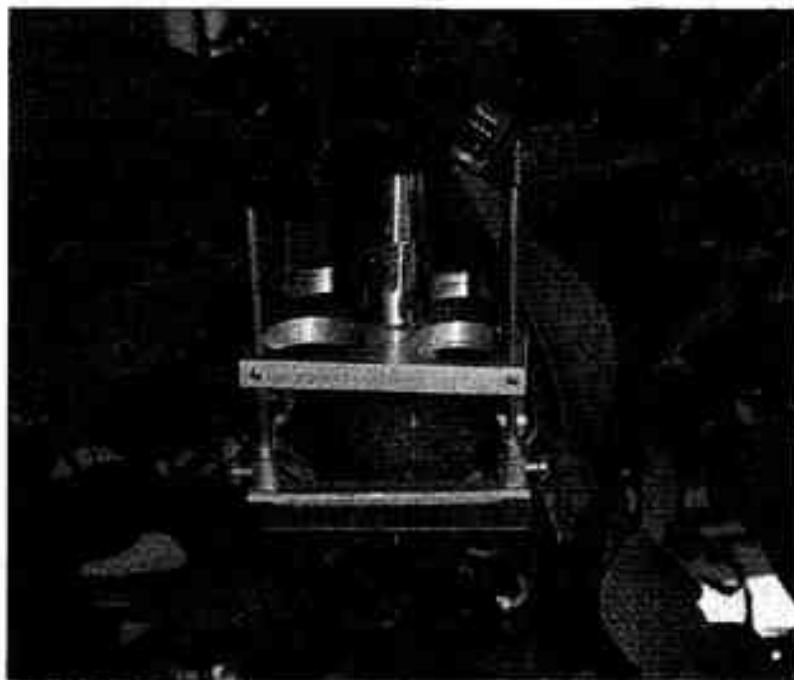


Estimation de la demande en eau pour l'irrigation, dans la plaine de la Durance en 1982. La rareté de la ressource conduit les agriculteurs à opter pour des technologies économes en eau (micro-irrigation, goutte-à-goutte), mais beaucoup plus onéreuses que les techniques habituelles d'arrosage gravitaire. Cet effet de substitution analysé dans un modèle microéconomique permet de simuler une fonction de demande d'eau et d'en déduire la valeur de la ressource (surplus) pour l'usage d'irrigation et son prix de référence.

problème dans certaines régions (voir figures). La ressource localement rare n'est pas dotée d'un prix. Certes les agriculteurs paient des redevances mais celles-ci reflètent le coût d'amenée, ce-

lui de la mise en pression, et non la rente de rareté de la ressource mise à disposition. L'observation de l'évolution des technologies d'irrigation liée à la rareté de la ressource nous a permis de mettre au point une méthode d'évaluation de son prix.

Le développement des recherches sur l'évaluation des actifs naturels devrait ouvrir de nouvelles perspectives de gestion du patrimoine naturel.



Patrick Point, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'analyse et de recherche économiques (UA 944 CNRS), Centre d'économie de l'environnement, avenue Léon Duguit, 33604 Pessac.

Capteur et son porte-capteur, utilisé dans un système de pilotage automatique de l'irrigation, basé sur l'interprétation des très fines variations de diamètre mesurées sur tige ou sur fruit, ici de citronnier. La précision du système est de 1/100 de mm, un microordinateur traite le signal et décide de l'irrigation (Procédé Pépista). La sophistication de cette technologie dont les coûts d'étude et de mise en œuvre sont élevés par rapport à celui de l'eau elle-même permet d'approcher de manière réaliste la vraie valeur de la ressource. (© INRA, cliché J.G. Huguet).

Pour une gestion patrimoniale concertée

L'approche patrimoniale vise la mise sur pied d'un comportement et donc d'un dispositif de gestion négociée dans le but d'organiser la prise en charge et l'usage multiple actuels d'un patrimoine et sa transmission aux générations futures.

■ Olivier Godard
et Henry Ollagnon

L'approche patrimoniale de la gestion des ressources et des milieux naturels s'est constituée en France depuis 1975, à l'occasion d'opérations de « recherche-action » motivées par des situations problématiques intéressant la qualité des eaux souterraines, la restauration des terrains et la sécurité en montagne, la gestion d'espaces forestiers ou celle de bassins hydrauliques.

Inspirée par la systémique, elle vise à articuler les résultats des sciences naturalistes et des sciences sociales, en particulier de la théorie économique, de la sociologie des organisations et des recherches sur la communication et la négociation. Elle débouche sur une notion de gestion plus large que celle qui résulte d'une approche strictement économique, et tient mieux compte de la pluralité des points de vue en présence que ne

le fait ordinairement une gestion publique.

Sans être une panacée, cette approche envisage ressources et milieux sous l'angle de la relation patrimoniale nouée avec eux par divers acteurs sociaux. Le terme « patrimonial » signifie que cette relation touche à l'identité, à l'autonomie et à la capacité d'adaptation de ces acteurs et qu'elle inscrit ces derniers dans une logique sociale de transmission intergénérationnelle. Du fait de l'incertitude sur le long terme, cela conduit à conditionner l'usage qui est fait des biens à leur conservation, à vouloir maintenir la pluralité des usages actuels ou potentiels d'un même milieu et à éviter les options impliquant des pertes irréversibles tout en organisant leur prise en charge par l'ensemble des acteurs concernés.

Sur cette base, la démarche vise la mise sur pied ou l'activation de dispositifs de négociation d'une gestion concertée entre tous les acteurs se reconnaissant un intérêt patrimonial pour une

ressource ou un milieu, et susceptibles de s'engager dans cette gestion.

Les experts interviennent dans la phase de diagnostic et d'orientation pour faciliter non seulement la prise de conscience par les acteurs de leurs intérêts patrimoniaux, mais aussi pour aider à la définition de lieux, de langages et de procédures de négociation entre les parties prenantes, pour coordonner la collecte d'informations, et pour proposer, en fonction des circonstances, divers outils et instruments. Les investigations à entreprendre ont un double objet : saisir les problèmes affectant ressources et milieux et les restituer dans une perspective dynamique et prospective ; saisir les perceptions et les logiques sous-jacentes aux pratiques actuelles des divers acteurs, afin de cerner les critères qui structurent leurs comportements, les oppositions et zones de convergences possibles et les relations patrimoniales effectives ou virtuelles sur lesquelles la gestion pourrait s'appuyer.

■ Olivier Godard, chargé de recherche au CNRS, chargé de mission au PIREN, Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (UA 940 CNRS), Ecole des hautes études en sciences sociales, 1, rue du 11-Novembre, 92120 Montrouge.

■ Henry Ollagnon, maître de conférence associé en gestion et négociation patrimoniales à l'INA-PG, responsable de l'Audit patrimonial, ministère de l'Agriculture, Direction des affaires financières et économiques, bureau d'évaluation et de prospective, 3, rue Barbey de Jouy, 75700 Paris.



Opération de reboisement dans les Alpes-Maritimes. (© INRA, cliché G. Pallant).

Le risque technologique majeur

Seveso, Bhopal, Tchernobyl... au-delà de l'impact émotionnel, ces événements constituent autant d'enjeux critiques pour les sociétés contemporaines. Un nouveau champ de l'action publique se dégage, un nouvel objet de recherche se constitue.

■ Claude Gilbert
et Patrick Lagadec

Depuis la fin des années 1970, une série d'accidents graves a révélé que le développement industriel moderne, couplé à la concentration urbaine et à la vulnérabilité des grands systèmes et réseaux techniques, faisait désormais planer des risques d'un type nouveau. Elle a laissé augurer de la possibilité de réelles déstabilisations pouvant affecter durablement les structures industrielles, les systèmes socio-politiques et même l'environnement nécessaire à la vie humaine.

En réponse, un nouveau champ de l'action publique s'est constitué, avec de nouvelles réglementations et de nouvelles compétences gouvernementales. Mais, faute sans doute de réelle crise post-accidentelle en pays occidental développé, les « risques majeurs » conservent un statut équivoque. Incertitudes, hésitations et concurrences s'allient pour freiner les politiques dans ce domaine.

La recherche, en introduisant dès 1979 le concept de « risque technologique majeur » et une interrogation de nature socio-politique sur la « sécurité industrielle », a largement anticipé sur les événements. Elle a démontré que l'accident était bien le résultat de pratiques techniques et organisationnelles, pas le fruit de la fatalité : qu'en franchissant l'enceinte industrielle, l'accident majeur obligeait à affronter les problèmes techniques pour dépasser les questions comme l'organisation des interfaces « hommes/systèmes techniques », la conception qu'une société se fait de sa sécurité collective, l'exercice de la démocratie et de l'autorité publique, la légitimité sociale des activités industrielles. Elle a donné une nouvelle perspective aux travaux développés jusqu'alors sur la fiabilité des matériels, les accidents du travail, les plans de secours, les comportements des populations en situations extrêmes.

Le domaine de l'extrême

Les voies ouvertes à la recherche sont nombreuses, allant de l'étude des stra-

tégies de prévention des défaillances à celle des modes de gestion des situations de crise post-accidentelle, en passant par des investigations politico-administratives sur la redistribution des pouvoirs et des compétences et sur l'adaptation des entreprises ou des administrations qui requiert, outre de nouveaux outils ou règles de gestion, de nouvelles cultures faisant une toute autre place aux questions de communication.

Cet objet impose à la recherche trois grandes caractéristiques. D'abord, c'est le domaine de l'extrême, à la fois réel et virtuel : rareté des événements qui défie la statistique et masque les urgences, incertitude des diagnostics (les confirmations scientifiques arrivent souvent trop tard), ampleur et nature des effets physiques, organisationnels et sociaux qui défient les meilleurs dispositifs de réponse, cristallisation en des temps très courts qui génère des effondrements brutaux de moyens, de représentations, de pouvoirs.

On doit aussi tenir ensemble des phénomènes appartenant à des registres très différents qui en viennent à interférer, voire à s'imbriquer : probabilités de défaillance, perceptions des risques, maîtrise de l'urbanisation, effets médiatiques, répartition des pouvoirs... ; des données subjectives peuvent devenir des opérateurs objectifs (ainsi l'ombre de « la » catastrophe pèse sur la perception de toute défaillance, même limitée) ; les acteurs médiatiques peuvent opérer comme de véritables décideurs, etc.

Contrôle à la frontière des véhicules en provenance des pays de l'Est (Hörseshausen, RFA), en mai 1986, à la suite de l'accident de Tchernobyl. (© SYGMA, cliché R. Bossu).

Enfin, l'accès à une information le plus souvent confidentielle, fugace et soumise à de rapides reconstructions, contraint le chercheur à s'impliquer dans des réseaux professionnels élargis et à opérer souvent en situation de crise, au plus près des décideurs, en affirmant une position d'observateur encore mal tolérée.

Ces particularités n'ont pas altéré la vigueur d'une action de recherche qui a débordé aujourd'hui son objet initial, les « risques majeurs » conduisant bien au-delà du simple éclairage des questions de sécurité industrielle.

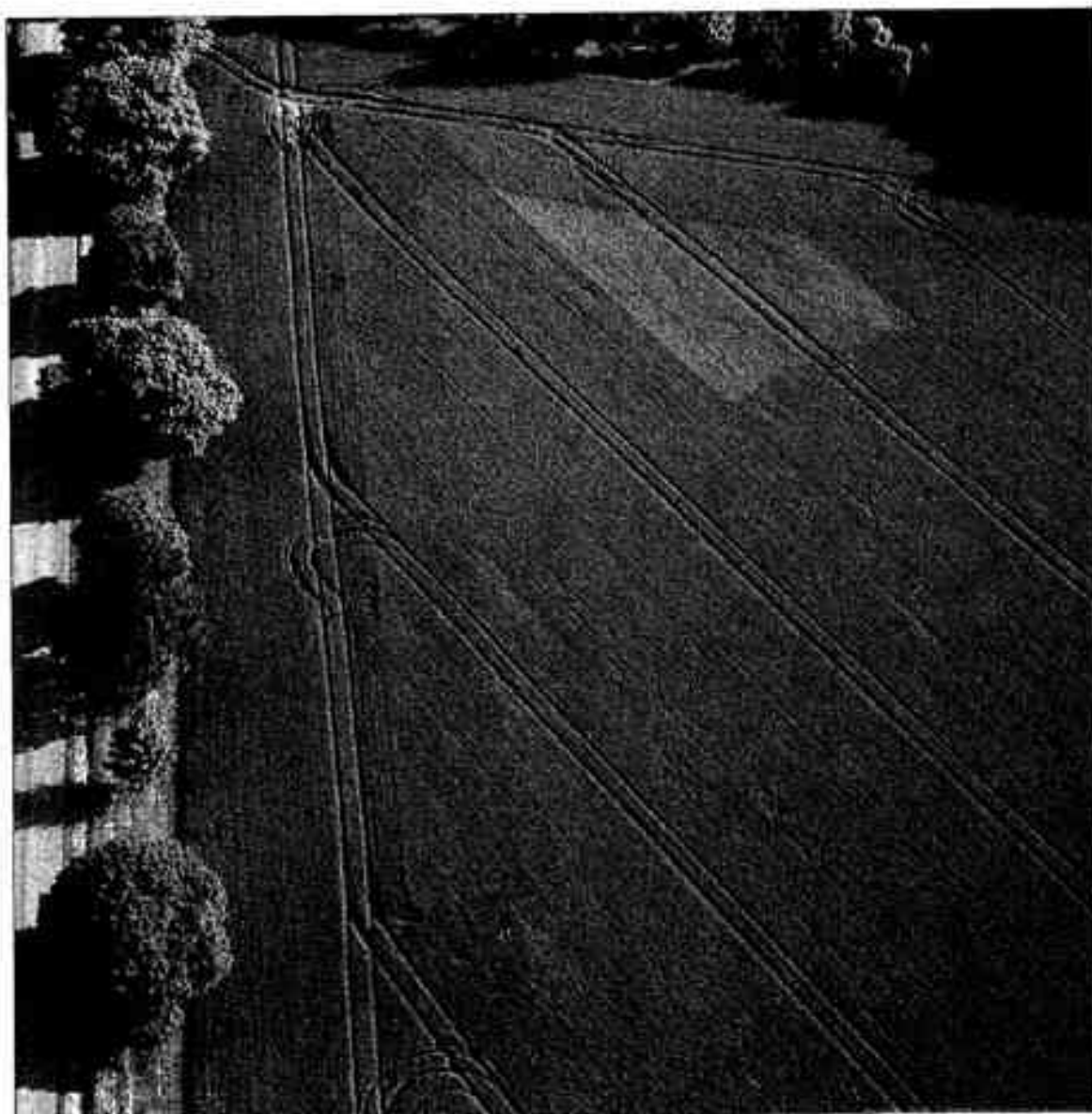
■ Claude Gilbert, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche sur le politique, l'administration et le territoire (UA 978 CNRS), Institut d'études politiques de Grenoble, BP 45, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

■ Patrick Lagadec, ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire d'économétrie (ER 206 CNRS), Ecole polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.



ACTIONS ET PROGRAMMES

Les questions que soulèvent les problèmes d'environnement exigent des chercheurs une organisation qui dépasse les frontières entre disciplines, entre pays, entre niveaux de développement.



Champ de céréales à Jouy-en-Josas (Yvelines). (© INRA, Cliché C. Slagmulder).

Le PIREN

Le PIREN a pour mission non seulement de coordonner les recherches en matière d'environnement, de concevoir, gérer et évaluer les opérations mais aussi d'assurer la liaison permanente avec et entre les disciplines scientifiques y participant.

Zaher Massoud

Le PIREN, Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement a été créé au CNRS en 1979. Ses approches sont principalement interdisciplinaires et consistent à établir des liens relevant de la recherche fondamentale, nécessaire à la résolution des problèmes posés.

Les recherches qu'il a mises en place et qu'il soutient s'articulent autour des axes suivants :

• Systèmes aquatiques continentaux

Les études sur les eaux continentales concernent le cycle de l'azote et du phosphore et le phénomène d'eutrophisation, le fonctionnement des vallées fluviales (Rhône, Rhin, Garonne, Seine et Durance), la maîtrise des ressources ichtyologiques, les parasitoses eau-transmissibles et les phénomènes de transfert dans le système sol-végétation-atmosphère à l'échelle des bassins versants.

• Milieu rural

Des travaux ont été lancés sur la gestion des ressources renouvelables, l'écologie des invasions biologiques, les équilibres et mutations des grands systèmes écologiques en relation avec les activités humaines, le fonctionnement des

systèmes agraires et le développement. Ce dernier aspect est développé en collaboration avec l'INRA.

• Recherches atmosphériques

Les activités scientifiques du PIREN dans ce domaine se situent à trois niveaux : le niveau planétaire avec des recherches sur le cycle du gaz carbonique et sur les grands cycles biogéochimiques surtout dans leurs phases atmosphériques ; le niveau régional avec des études sur les aérosols sahéliens et le niveau local avec celles concernant le brouillard et le gel. Le programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC) est piloté par l'INSU, en parfaite concertation avec le PIREN.

• Zone littorale

Le littoral français est examiné tant sur la façade atlantique que sur la façade méditerranéenne. Sont pris en compte les estuaires, les baies, les étangs et l'ensemble des interactions continent-océan.

• Ecotoxicologie

Les travaux développés en ecotoxicologie comportent deux volets : le premier étudie, au niveau des écosystèmes, le transfert et le devenir des produits toxiques à travers les réseaux trophiques ; le second, plus ponctuel, analyse d'une part la résistance aux insecticides

chez les insectes et d'autre part, les mécanismes moléculaires impliqués dans l'adaptation des organismes aux pollutions métalliques.

• Environnement et santé

Deux programmes ont été mis en route, le premier sur l'allergie (allergie respiratoire et allergie de contact) et le second sur la promotion tumorale.

• Droit, économie et sociologie de l'environnement

Des actions de recherche coordonnées impliquant ces trois disciplines ont été conçues pour étudier l'amont et l'aval des normes juridiques, la gestion locale de l'environnement, l'influence des problèmes d'environnement sur les choix techniques et les trajectoires économiques, et la prise de décision dans un contexte d'incertitude et d'irréversibilité.

• Histoire de l'environnement

Dans ce programme sont analysés tous les changements intervenus dans l'environnement depuis le Néolithique jusqu'à nos jours.

Dans la mise en place et le suivi de ces programmes, le PIREN travaille en concertation avec les universités, les organismes de recherche, le Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement. Sa collaboration avec les industries reste modeste.

L'évaluation des recherches se fait par la communauté scientifique nationale ou internationale.

Zaher Massoud, directeur de recherche au CNRS, directeur du PIREN, responsable de l'unité « Adaptation et structure des populations animales et microbiennes du sol » (URA 689 CNRS), 15, quai Anatole France, 75700 Paris.



Les boucles de la Seine dans la région de la Basse-Seine. L'étude du fonctionnement des vallées fluviales fait partie des axes de recherche du PIREN. (© Service de la navigation de la Seine).

Histoire de l'environnement

Retracer l'histoire de tous les changements intervenus dans un site donné depuis le Néolithique jusqu'à nos jours est un des objectifs du PIREN. Il contribuera à établir l'impact progressif de l'homme.

■ Robert Delort

L'histoire de l'environnement est une discipline très ancienne : Aristote et certains de ses prédecesseurs avaient déjà une claire conscience des variations de phénomènes naturels qu'ils situaient dans un temps linéaire, irréversible, différent du temps cyclique de l'éternel retour.

Jusqu'à l'époque actuelle, savants, philosophes, historiens ont certes eu le sentiment du devenir de l'espace dans le temps mais n'en ont guère fait d'études concrètes. C'est la structuration de l'écologie dans les dernières décennies qui a amené à situer dans un temps « progressif » l'ensemble des phénomènes de la nature vus, subis, ou modifiés par l'homme. Ce sont donc les préoccupations de l'histoire qui, après un XIX^e siècle où elles se sont appliquées aux sciences de l'homme et de la société, tentent au XX^e siècle d'enrichir, au moins d'une épaisse dimension chronologique, les sciences de la nature et de la vie, voire de la matière et des structures.

La voie a été frayée par la préhistoire, l'archéologie, l'anthropologie... et les principaux obstacles d'une telle démarche sont bien connus : tenter de situer dans la succession du temps un aspect plus ou moins pointu de la science actuelle (climatologie, sismologie, glaciologie, devenir des animaux, modifi-

cation des littoraux, des sols, de la couverture végétale, des sources d'énergie utilisées...) ne contribue à faire de l'histoire que si l'on sait dépasser la pure diachronie et aborder les problèmes de la synchronie.

Le PIREN

Depuis 1986, le PIREN a pu atteindre de nombreux chercheurs, venant d'horizons très différents, et les inciter ou les aider à constituer des équipes autour de projets véritablement interdisciplinaires, concernant la période s'étendant du Néolithique à nos jours.

La plupart des équipes ont travaillé sur de sites qui permettent d'envisager sur une longue durée la plus grande part des composants d'un environnement, leurs variations naturelles, celles dues à l'action des hommes, et leur temporaire synthèse qui est le milieu actuel. On peut prendre par exemple l'un des premiers projets menés à leur terme sous la responsabilité du professeur P. Leveau : « Mobilité des paysages et histoire de l'occupation du sol autour de l'Étang de Berre ».

L'étude du milieu naturel, antérieurement à tout déterminisme anthropique, a mis en évidence l'originalité du géosystème régional avec décapage important des versants lors des crises froides : pour l'Holocène, des carottes sédimentaires dans l'étang ou la vallée

de l'Arc ont montré les couches détritiques dues à l'anthropisation. Dès le Néolithique, des défrichements précoces et extensifs, en relation avec des variables climatiques difficiles à isoler, ont engorgé les thalwegs d'amont et construit les plaines littorales deltaïques : ces marécages ont été intégrés pour compléments alimentaires à l'agrosystème dominé par des oppida et les zones hautes. L'archéologie laisse cependant supposer une occupation protohistorique non permanente de ces oppida et déjà un habitat gagnant la plaine. La période romaine correspond à une accalmie de la morphogénèse, avec recul du littoral, drainage des basses terres, conditions climatiques probablement moins agressives : gestion agricole totalement nouvelle de l'espace, favorisant la descente des habitants vers les zones basses (« pais » romaine). La période médiévale et moderne est marquée par une importante crise détritique avec apogée aux siècles de forte pression démographique agricole (XVII^e-XIX^e).

Cet exemple montre bien comment les dizaines de chercheurs venant des sciences de l'homme et de la société comme des sciences de la nature et de la vie ont pu, en focalisant leurs efforts et leurs interrogations interdisciplinaires sur un site précis ou sur un élément, éclairer et établir, sur un milieu sujet à des variations naturelles, l'impact progressif de l'anthropisation.

■ Robert Delort, professeur aux universités de Paris VIII et de Genève, 2, rue de la Liberté, 93600 Saint-Denis.

Le programme DEFORPA

Évaluer l'état sanitaire des forêts du territoire national et son évolution, mais aussi établir clairement les causes de dépérissement, tels sont les objectifs que se sont fixés les organismes engagés dans DEFORPA.

■ Maurice Muller

Àu début de l'année 1984, après que les premiers symptômes de dépérissements forestiers aient été observés dans le massif vosgien, le ministère de l'Environnement prit l'initiative de lancer avec les ministères de l'Agriculture et de la Recherche et avec

le concours des grands organismes concernés (INRA, CNRS, Universités, ONF, CEA, EDF, Météorologie nationale), un programme national d'évaluation des dommages et de recherches sur les causes du phénomène. Ce programme fut baptisé « DEFORPA » (Dépérissement des Forêts attribué à la Pollution Atmosphérique).

Objectifs

Même si une partie importante du programme est consacrée à l'examen de la pollution de l'air en milieu forestier et de ses effets — directs ou indirects — sur les arbres et sur les sols, les autres facteurs (climatiques, édaphiques, biotiques, sylvoles...) susceptibles d'intervenir dans les processus de dépérissement ne sont pas négligés : en effet, DEFORPA s'oriente de plus en plus vers l'étude des effets combinés de ces différents facteurs, c'est-à-dire vers l'étude d'écosystèmes forestiers perturbés, notamment en région de montagne.

Un Comité de direction est responsa-

ble de la coordination et du financement du programme (3 à 4 millions de francs par an au plan national, auxquels s'ajoutent 2,5 millions de francs par an de la Commission des communautés européennes pour une quarantaine de projets). Un Comité scientifique détermine les orientations des recherches et assure l'évaluation des résultats et un Groupe opérationnel rassemble des représentants des principaux laboratoires engagés dans le programme.

Principaux résultats

— Le réseau français de surveillance de l'état sanitaire des forêts (dit réseau « bleu » DEFORPA) a été mis en place en 1983 dans le massif vosgien, puis étendu à l'ensemble des régions de montagne et à quelques régions de plaine. Dans l'ensemble, il y a eu accroissement des dommages (défoliation ou jaunissement des feuilles) jusqu'en 1985-1986, puis une légère diminution de ces symptômes sur les résineux, alors que l'état des feuillus connaît depuis deux ans une détérioration sensible

dans presque tout le territoire, mais dont le niveau reste cependant nettement inférieur à celui des résineux.

— Au vu des résultats actuels des recherches françaises et étrangères (notamment celles de la R.F.A.), on peut penser que les principaux symptômes du dépérissement dérivent de manière certaine de trois facteurs essentiels : deux naturels (des événements climatiques plus ou moins récents et la pauvreté originelle de certains sols), un d'origine humaine (la pollution acide). A ces trois facteurs peuvent s'ajouter les effets moins certains d'autres formes de pollution atmosphérique.

Tout d'abord, les causes climatiques : arrière-effet des sécheresses passées (1947-1949, 1959, 1972, 1976), elles se traduisent surtout par des défoliations et des réductions de la largeur des cerneaux annuels de croissance des arbres ; ces effets peuvent avoir été renforcés par des facteurs édaphiques et sylvicoles défavorables. Dans les cas extrêmes, des parasites racinaires (armillaires) ont pu entraîner la mort de l'arbre.

Ensuite, la pauvreté originelle des sols et la pollution acide : dépôts acides, ou potentiellement acides, humides (pluie, neige), occultes (brouillards) ou secs (SO_2 , NO_x) qui provoquent un lessivage accru des éléments nutritifs à partir du feuillage et surtout du sol. Lorsque cet effet s'exerce sur des arbres déjà en situation de déficience nutritive sur des roches-mères et des sols initialement pauvres, il aboutit à de véritables carences avec jaunissement, suivies éventuellement de pertes d'aiguilles.

Ces deux effets principaux peuvent être renforcés par des épisodes de pollution par SO_2 ou O_3 , agissant cette fois directement sur la physiologie des arbres.

■ Maurice Müller, chargé de mission au Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement/SRETIE, secrétaire scientifique du programme DEFORPA, Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement, 14, boulevard du Général Leclerc, 92524 Neuilly-sur-Seine Cedex.



Parmi les facteurs de dépérissement forestier d'origine humaine, les pluies acides provoquent un lessivage accru des éléments nutritifs contenus dans le feuillage des arbres, responsable de véritables carences. Chez les résineux, les plus touchés, un jaunissement apparaît suivi éventuellement d'une perte d'aiguilles. (© INRA, cliché Adrian).

Les programmes de recherche du SRETIE

Les nouveaux programmes pluridisciplinaires, s'ajoutant à ceux qui sont en cours de réalisation, représentent un investissement scientifique et technique de grande ampleur indispensable à l'élaboration d'une politique de l'environnement cohérente.

■ Jean-Claude Oppeneau

Le SRETIE met en œuvre les programmes de recherche et les études socio-économiques et juridiques du Secrétariat d'Etat en matière d'environnement.

A ce titre, il exerce plusieurs fonctions :

- une fonction d'anticipation, à savoir mettre en place un potentiel scientifique sur les questions dont l'évolution pourra conduire à des risques pour l'environnement ;
- une fonction de programmation, à savoir fournir les bases scientifiques nécessaires à la définition ou à la mise en œuvre de la politique de l'environnement ;
- une fonction d'animation des milieux scientifiques, en relation avec les grands organismes de recherche ;
- une fonction de « réponse rapide » et d'expertise ;
- une fonction de représentation nationale. Le Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement partage avec le ministère de la Recherche et de la Technologie la responsabilité de représenter au niveau international la politique française en matière de recherche sur l'environnement ;
- une fonction de développement de l'innovation technologique.

Ces fonctions, concertées avec le ministère de la Recherche et de la Technologie, doivent conduire à la définition et à la réalisation d'une politique de recherche finalisée sur l'environnement, indispensable à l'aide à la décision. Les problèmes d'environnement nécessitent un investissement scientifique et technique croissant et les solutions reposent sur des fondements scientifiques dûment établis. L'internationalisation des problèmes impose une coopération scientifique accentuée des programmes coordonnés, dans le contexte européen, par exemple, où l'Acte Unique a fait de l'environnement un axe politique à part entière, et dans le cadre des organisations internationales ou de relations bilatérales.

Le SRETIE a lancé en 1989 sept nouveaux programmes pluridisciplinaires qui correspondent tous à des préoccupations majeures du Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement.

Programme ECLAT (Evolution du Climat et de l'Atmosphère)

Son but est de permettre au Gouvernement français d'élaborer une politique cohérente et de faire des propositions concrètes face au problème posé par les risques de modification anthropique du climat liés à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et à l'altération de la couche protectrice d'ozone stratosphérique, ainsi qu'aux déforestations massives des régions tropicales. La spécificité de ce programme est d'articuler deux types de recherches complémentaires menées simultanément : d'une part, l'étude scientifique des processus interactifs physiques, chimiques et biologiques qui régulent l'atmosphère et le climat, laquelle devra déboucher sur l'élaboration des modèles de prévision des changements climatiques futurs et de leurs conséquences sur les écosystèmes aquatiques et terrestres ; d'autre part, des recherches d'ordre technique et socio-économique destinées à évaluer les alternatives possibles, qu'il s'agisse de politiques de prévention ou de politiques d'adaptation.

Le programme ECLAT est complémentaire du programme français Géosphère-Biosphère (PIGB) conduit par le ministère de la Recherche et de la Technologie.

Programme « Déchets toxiques »

Il s'agit d'un programme original à deux titres :

- Il privilégie la relation entre les industriels, producteurs de déchets et constructeurs de procédés d'élimination et le monde scientifique (universités, organismes de recherche) : les projets

de recherche sont bâtis par les scientifiques à partir des besoins des industriels, et ces derniers participent à l'évaluation des résultats.

— Il induit une collaboration scientifique et technique très avancée avec les Etats-Unis sur des thèmes de recherche communs.

Les thèmes concernent les différents procédés de traitement, la connaissance des déchets, les interactions sols-déchets, la réhabilitation des sols et la toxicologie.

Programme « Grands fleuves »

Les équipes scientifiques ont été mobilisées, par l'intermédiaire du CNRS/PIREN, pour étudier le Rhône, le Rhin et la Garonne. Si, jusqu'à présent, sur ces trois fleuves l'orientation a été très « fondamentaliste », aujourd'hui on s'oriente davantage vers des programmes plus finalisés et systémiques. Il s'agit d'abord du programme PIREN-Seine.

Le SRETIE va également mobiliser les scientifiques pour étudier le système Loire. Il mettra en place l'observatoire destiné à collecter l'ensemble des données déjà acquises et à assurer un suivi scientifique des transformations induites par le programme d'aménagement.

Programme « Conséquences écologiques de la déprise agricole »

Les nouvelles orientations de la Politique Agricole Communautaire, destinées à résorber et à contrôler les productions excédentaires, vont avoir des effets sur des superficies importantes du territoire national en terme d'abandon ou de réaffectation, il est important d'en connaître les conséquences écologiques.

Les thèmes pris en compte sont relatifs aux trajectoires d'évolution des milieux, les caractéristiques des évolutions, les blocages et les seuils.

Programme National « Efflorescences micro-algales des côtes métropolitaines »

Il réunira les équipes de recherche spécialisées dans le domaine, notamment l'IFREMER et le CNRS.

Suite à la mission effectuée en Mer du Nord en juillet 1989, trois thèmes ont été définis :

- observations de longue durée portant sur les populations naturelles qui permettent de repérer les tendances durables ;

- études des variations simultanées des conditions environnementales auxquelles une espèce en cours d'efflorescence doit s'adapter pour tirer le meilleur profit du milieu dans lequel elle évolue;
- acquisition des connaissances éco-physiologiques de base.

Programme « Génie génétique et environnement »

En coordination avec plusieurs ministères, le Secrétariat d'Etat à l'Environnement et le ministère de la Recherche et de la Technologie ont décidé de lancer un programme à long terme, à base de trois thèmes :

- la compréhension des mécanismes en jeu (état et manifestation d'un gène introduit dans un programme, modification de spécificité d'hôte ou du tropisme d'un virus génétiquement modifié),
- les nouvelles constructions visant à améliorer l'innocuité des gènes transférés,
- le développement de techniques d'é-

valuation des capacités de dissémination d'organismes génétiquement modifiés.

Programme « Eco-produits et technologies propres »

Il est probable qu'un consensus s'établira à l'échelle européenne en faveur d'un renforcement progressif des normes. Cette « course aux normes » correspond à une évolution dans laquelle l'environnement devient progressivement un élément de la concurrence par la qualité des produits, et une arme économique.

La sécurité, le silence, la réduction de la pollution, la qualité biologique des produits, ... acquièrent peu à peu une valeur marchande. Les confrontations sur la voiture propre, sur les lessives sans phosphates, les substituts aux CFC, la dégradation des produits d'emballage illustrent l'évolution vers une meilleure qualité, vers la récupération

ou l'élimination des déchets par tous les moyens disponibles, donc la reconsidération des procédés de fabrication et le développement de produits propres.

Les programmes importants en cours sont poursuivis. Il s'agit de « l'écologie et la gestion du patrimoine », de « l'éco-toxicologie et santé », de la « qualité des eaux marines et continentales », de la « qualité des sols », du « bruit et des vibrations », de la « pollution automobile » (diesel en particulier), des « sciences sociales et économiques », des « sciences juridiques », du « dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique (DEFORPA) », de « pollution et confort à l'intérieur des locaux (POLILO) » et « arbres d'ornement ».

■ Jean-Claude Oppeneau, chargé du Service de la recherche, des études et du traitement de l'information sur l'environnement (SRE-TIE) du Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement et de la prévision des risques technologiques et naturels majeurs, 14, boulevard du Général Leclerc, 92524 Neuilly-sur-Seine Cedex.

La recherche environnement de la Communauté européenne

En continuité avec les actions en cours, les nouveaux programmes STEP et EPOCH reflètent l'intérêt croissant des communautés européennes pour les recherches fondamentales sur l'environnement.

■ Philippe Bourdeau

La Commission des Communautés européennes est chargée de l'exécution de programmes pluriannuels de recherche dans le domaine de l'environnement. Leur objectif fondamental est de renforcer la base scientifique et technique de la politique communautaire de l'environnement. Il s'agit non seulement d'un apport à la solution de problèmes à court terme, mais également de recherches plus fondamentales concernant les phénomènes de l'environnement, le fonctionnement des écosystèmes, dont le but est d'identifier et d'élucider les problèmes qui se poseront à plus longue échéance. Les programmes ont également l'ambition d'améliorer la rentabilité quantitative et qualitative de l'effort global de recher-

che des Etats-membres mobilisés dans des projets coordonnés, d'intérêt commun.

Ces projets sont réalisés selon diverses modalités adaptées à leurs besoins : contrats de recherche à frais partagés ; actions concertées, coordonnant des recherches financées entièrement au niveau national ; travaux effectués au Centre commun de recherche à Ispra en Italie. Les Etats européens non-membres de la Communauté ont voulu y participer selon diverses modalités.

Le contenu scientifique des programmes a évolué au cours du temps tant pour répondre aux demandes immédiates des décideurs que pour pouvoir prévoir les besoins qui se feront sentir à plus long terme.

L'étude de la pollution chimique et la technologie anti-pollution ont toujours été, et restent, une partie importante du

programme. L'étude de l'environnement naturel a pris une part croissante.

Un programme séparé sur la climatologie et les risques naturels a été établi. Enfin, les risques technologiques majeurs ont été pris en considération plus récemment.

Quelques actions marquantes peuvent être signalées : enquête épidémiologique européenne sur les relations entre la pollution atmosphérique et les affections respiratoires ; amélioration de la méthodologie d'évaluation de la génotoxicité des produits chimiques ; bases de la réglementation pour l'utilisation agricole des boues d'épuration ; problème des « pluies acides » ; détermination du taux de transfert du plomb de l'essence à l'homme ; modélisation de l'effet de serre et de ses impacts dans la Communauté ; protection du patrimoine culturel contre la pollution atmosphérique ; floraisons d'algues en mer du Nord, projet EROS-2000 (European River Ocean System), sur les apports telluriques à la pollution des mers, coordonné par une équipe du CNRS.

Les programmes STEP et EPOCH

Les actions actuellement en cours seront renforcées par de nouveaux pro- ➤

grammes, baptisés STEP et EPOCH, qui reflètent l'intérêt accru accordé à la recherche environnement dans le Programme-Cadre de recherche et développement de la Communauté. Une dotation de 115 millions d'Ecus (815,85 millions de Francs) est prévue pour une période de trois ans.

Le programme STEP (Science and Technology for Environmental Protection) couvre les neuf domaines de recherche suivants : environnement et santé humaine ; évaluation des risques associés aux produits chimiques ; phénomènes atmosphériques et qualité de l'air ; qualité des eaux ; protection des sols et des eaux souterraines ; recherche sur les écosystèmes ; protection et conservation du patrimoine culturel européen ; technologies pour la protection de l'environnement ; risques technologiques majeurs et sécurité-incendie.

Le programme EPOCH (European Programme on Climate and Natural Hazards) concerne l'étude du climat, en particulier des changements climatiques par les gaz à effet de serre, l'étude des risques associés au changement et à la variabilité du climat, et l'étude d'autres phénomènes naturels. Il aborde les quatre thèmes suivants : climats anciens et modifications climatiques ; phénomènes et modèles climatiques ; effets du climat et risques liés au climat ; risques sismiques.

Ces deux programmes, pour lesquels un premier appel d'offres pourrait être publié en juin 1989, seront mis en œuvre principalement par le moyen de grands projets transnationaux dont EROS-2000 fait figure de prototype.



Fig. 1

Les nouvelles normes européennes visant à réduire la pollution atmosphérique provenant des automobiles vont rendre de fait obligatoire l'utilisation du pot catalytique dès le 1^{er} janvier 1991. Ce pot permet d'éliminer les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les hydrocarbures non brûlés qui se forment pendant la combustion dans le moteur, en les transformant en azote, gaz carbonique et eau.

Fig. 1 : monolithe céramique servant de support aux métaux précieux (platine, palladium, rhodium), éléments catalytiques utilisés pour l'épuration des gaz d'échappement automobiles. (© IFP).

Fig. 2 : cartographie du cérium dans la couche d'oxyde recouvrant la surface d'un monolithe utilisé en post-combustion automobile. (© IFP).



Fig. 2

Un premier programme communautaire sur les sciences et technologies marines (MAST) doit démarrer à la mi-1989. L'accent y sera mis sur la connaissance des mers et océans d'intérêt direct pour la Communauté.

Les trois programmes ci-dessus incluent des thèmes de recherche repris dans le Programme international géosphère-biosphère (PIGB-IGBP), du Conseil international des unions scientifiques (CIUS-ICSU). Ils pourraient donc constituer la fondation d'une composante européenne intégrée de ce grand programme mondial.

Les perspectives à moyen terme per-

mettent d'augurer une expansion substantielle de l'action de la Communauté européenne dans le domaine de la recherche environnement. Elle ne sera toutefois possible qu'avec le soutien et la participation active et enthousiaste des meilleurs chercheurs de la Communauté. Que cet appel soit entendu !

Philippe Bourdeau, directeur des programmes de recherche environnement, énergie non nucléaire, sciences et technologies marines, DGXII, Commission des communautés européennes, 200, rue de la Loi, B-1049 Bruxelles.

Le programme international Géosphère-Biosphère

Pour modéliser les conséquences de l'action humaine sur l'équilibre climatique, le Conseil international des unions scientifiques a lancé le programme Géosphère-Biosphère. Comprendre les interactions entre les différentes composantes du système Terre est son premier objectif.

Marie-Lise Chanin

Les dernières décennies nous ont appris que les océans, l'atmosphère, la cryosphère et les terres émergées avaient des comportements

couplés et que l'étude de leur évolution devait en tenir compte. Plus récemment, il a été reconnu que la biosphère jouait un rôle majeur dans les processus de changement à l'échelle globale. Or, les articles publiés dans ce dossier le

montrent, les prédictions actuelles ont une marge d'incertitude très grande liée à la difficulté de prendre en compte les couplages océan-atmosphère-biosphère et les mécanismes de contre-réaction.

C'est la raison pour laquelle la communauté scientifique, par l'intermédiaire du Conseil international des unions scientifiques, a décidé en 1986 de lancer un grand programme à l'échelle internationale intitulé « Géosphère-Biosphère : A study of global change » ou IGBP. Le but de ce programme est de comprendre le système océan-atmosphère-biosphère dans son intégralité et à l'échelle globale, grâce à une meilleure description de l'évolution des différentes composantes et de leur interaction, et ainsi de permettre, au cours de la prochaine décennie, une modélisa-

tion prédictive plus précise des conséquences de l'action de l'homme sur l'équilibre climatique. Une telle possibilité de prédiction est indispensable sur le plan économique et politique, bien qu'elle soit prématurée aujourd'hui.

Difficile tâche qui implique pour chacun de sortir de sa discipline, car la réponse ne sera fournie que par une vue globale des différentes composantes du système climatique et donc par une collaboration entre physiciens, chimistes, météorologistes, géochimistes, géologues, pédologues, hydrologues et biologistes. Le programme IGBP est certes très ambitieux, mais il s'appuie sur quelques grands programmes décidés au

cours des dernières années et représentant différentes composantes du climat. Mais pour atteindre cette vision globale, des actions nouvelles seront lancées, notamment en ce qui concerne les interactions entre la physique du climat, les cycles géochimiques et les écosystèmes.

En France, un Comité scientifique placé sous la tutelle de l'Académie des Sciences travaille depuis plus d'un an à définir les grandes lignes de la contribution française dont les objectifs peuvent être résumés de la façon suivante : comprendre le système Géosphère-Biosphère, c'est-à-dire le climat, les interactions climat-biogéochimie marine, les interactions biosphère-physico-chimie

de l'atmosphère et la réponse des écosystèmes aux forçages climatiques et chimiques ; décrire l'évolution du système Géosphère-Biosphère à partir des archives du passé et par la surveillance des différents paramètres au cours des prochaines décennies ; modéliser le système Géosphère-Biosphère, c'est-à-dire intégrer dans un modèle global les résultats des sous-systèmes dans le but d'une modélisation prédictive plus réaliste des scénarios possibles.

Marie-Lise Chanin, directeur de recherche au CNRS, directeur du Département atmosphère-moyenn, Service d'aéronomie (LP 3501 CNRS), BP 3, 91371 Verrières-le-Buisson Cedex.

Le programme MAB : l'homme et la biosphère

A travers un programme de recherche, de formation, de démonstration et de diffusion de l'information, le MAB entend répondre aux questions d'utilisation rationnelle et de conservation des ressources.

■ Gilbert Long

Le MAB (Man and Biosphere), l'un des grands programmes scientifiques intergouvernementaux de l'Unesco, met l'accent sur la recherche interdisciplinaire relative à des problèmes environnementaux précis. Il vise à analyser et comprendre les relations dans l'espace et dans le temps qui caractérisent le fonctionnement interactif entre systèmes sociaux et milieux, à divers niveaux d'organisation et d'intégration. En vue de favoriser la coopération internationale, six domaines sont plus spécialement pris en compte : zones tropicales humides et sub-humides, zones arides et semi-arides, zones tempérées et froides, îles et côtes, réserves de biosphère, systèmes urbains.

Parmi les problèmes-clés abordés, citons par exemple la détérioration environnementale des forêts et des savanes tropicales, les processus de désertification des zones arides, les conséquences des changements de l'utilisation des terres dans le milieu rural, le dépérissement des forêts des régions tempérées, le rôle capital des corridors fluviaux et des zones humides, les effets de l'urbanisation sur l'évolution des espaces ruraux et littoraux, etc. Par ailleurs, le réseau international des réserves de la

biosphère remplit quant à lui une triple fonction : conservation du matériel génétique et des écosystèmes, support logistique pour la recherche intégrée et la surveillance à long terme, développement associant environnement et développement.

De nouvelles orientations des projets de recherche ont été définies : le fonctionnement des écosystèmes soumis à des intensités variables de l'impact des

activités humaines, la gestion et la restauration de systèmes perturbés par les activités humaines, l'investissement humain et l'utilisation des ressources et, enfin, les réponses de l'homme aux contraintes et agressions de l'environnement.

Une soixantaine de chercheurs et ingénieurs de recherche du CNRS participent au programme MAB tant en France (programmes Causses-Cévennes et sur les corridors fluviaux, du PIREN/CNRS...) qu'à l'étranger (actions en coopération : forêts et savanes tropicales, zones arides et semi-arides, méditerranéennes et tropicales, systèmes des hautes montagnes, etc.).

Gilbert Long, directeur de recherche au CNRS, président du Comité français du MAB, vice-président du Conseil international de coordination du MAB, Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement, 14, bd du Général Leclerc, 92524 Neuilly-sur-Seine Cedex.



Boisement d'*Acacia errobbergiana* et *Acacia raddiana* à Korbubu à l'ouest d'Agades (Niger), envahi par une nappe de sable. Les problèmes de désertification des zones arides font partie des thèmes de recherche du programme MAB (Unesco). (Cliché Y. Pondet).

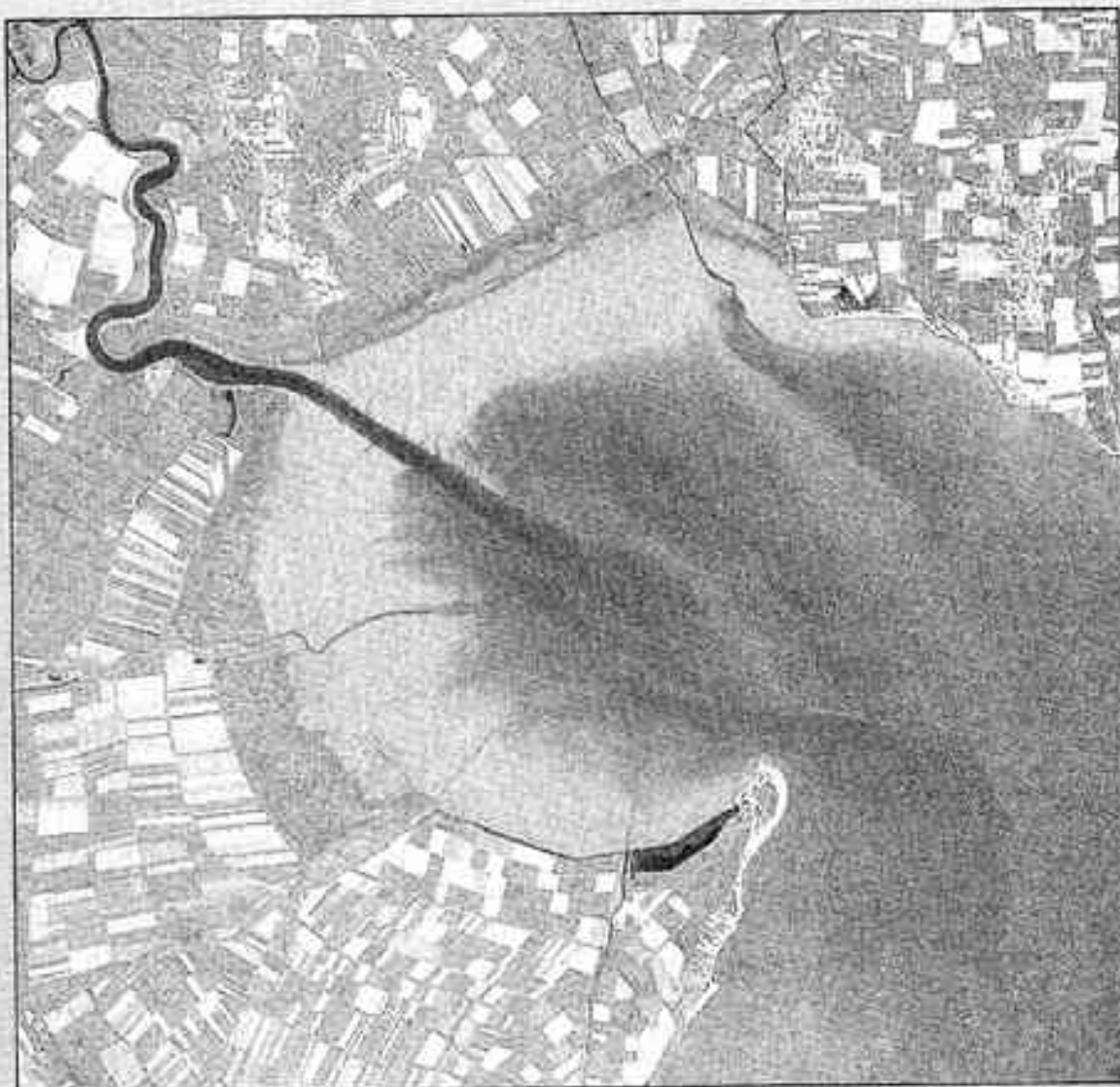


Vient de paraître

Aux Presses du CNRS, collection CNRS-Plus

"SPOT, des yeux braqués sur la Terre"

par Bernard Cervelle, directeur de recherche au CNRS



Le satellite d'observation de la Terre, SPOT, grâce à son excellente acuité visuelle et sa grande fréquence de prises de vue d'une même région, y compris la plus inaccessible, est un outil performant pour étudier l'écologie de notre planète. Il permet de suivre l'évolution des dégâts causés par des catastrophes naturelles : sécheresse, inondations, cyclones, éruptions volcaniques, séismes, feux de forêts, insectes ravageurs. Il facilite l'étude des conséquences de l'activité humaine sur l'environnement : pollutions chimique ou pétrolière, désertification, déforestation.

Cette image de l'anse de l'Aiguillon, près de La Rochelle, a été prise par SPOT et traitée en couleurs pseudo-naturelles : elle montre la finesse de ses observations, sur terre comme en mer. Toutes les régions du globe peuvent ainsi être observées, tous les trois jours, avec le recul nécessaire pour évaluer l'ampleur de tout phénomène affectant notre environnement. (Réalisation IGN © CNES 1986, distr. Spot image).

INDEX DES AUTEURS

Abbadie Luc	55	Galinowski André	63	Merlivat Liliane	34
Ackerer Philippe	41	Gasquez Jacques	76	Micoud André	96
Adrian Philippe	48	Gilbert Claude	105	Minster Jean-François	37
Amiard Jean-Claude	17	Godard Olivier	68-95-104	Moatti Jean-Paul	91
Amiard-Triquet Claude	17	Godelier Maurice	66	Molina Claude	89
Andersen Valérie	37	Gouyon Pierre-Henri	76-78	Moneret-Vautrin Anne	87
André Jean-Claude	31	Grimfeld Alain	85	Monfray Patrick	27
Atroun Karim	63	Grouzet Francis	35	Moreaux Michel	95
Auzet Anne-Véronique	59	Guedalia Daniel	30	Morel André	26
Baleux Bernard	34	Guiot Joël	10-11	Moyes Jean	10-11
Barbault Robert	6	Haumont Antoine	61	Muller Maurice	108
Barbero Marcel	50	Hémon Denis	83	Muxart Tatiana	60
Barbin Alain	89	Henry Claude	68	Nahas Kamel	75
Beaucire Francis	62	Hertzog Robert	79	Noël Jean-François	24
Bergametti Gilles	30	Hourcade Jean-Charles	99	Olivieri Isabelle	76-78
Berthelin Jacques	48	Hubert Bernard	51	Ollagnon Henry	104
Bertolini Gérard	64	Jollivet Marcel	60	Oppeneau Jean-Claude	110
Bourdenu Philippe	111	Juberthie Christian	79	Pasteur Nicole	74-76
Buat-Ménard Patrick	27-32-37	Kandel Robert	18	Petit-Maire Nicole	10-11
Cabioch Louis	32	Kiss Alexandre	97	Picon Bernard	68
Caphlanc Jacques	47	Lafarge-Frayssinet Christiane	86	Pinay Gilles	40
Carliolle Daniel	23	Lagadee Patrick	105	Point Patrick	102
Chanin Marie-Lise	112	Lambert Gérard	18-93	Pommereau Jean-Pierre	20
Charles-Dominique Pierre	54	Larrue Corinne	44	Pourriot Roger	44
Chavaudra Jean	22	Lascumes Pierre	101	Prado Carlos	55
Coudé-Gaussen Geneviève	30	Latarjet Raymond	22	Prieur Michel	100
Coulon René	94	Laubier Lucien	82	Quézel Pierre	50
Darmency Henri	76	Lauga Jacques	52	Rakotoarivony Joël	91
David Bernard	83	Le Mao Joëlle	90	Ramade François	14
Décamps Henri	39-41	Le Treut Hervé	20	Ravaut Michel	29
Delay Bernard	72	Lefevre Jean-Claude	45-57	Raymond Michel	76
Delort Robert	108	Lepart Jacques	78	Raynaud Dominique	25
Dirheimer Guy	87	Loisel Robert	50	Rognon Pierre	30-56
Dobrempeux Jean-François	48-52	Long Gilbert	113	Roqueplo Philippe	101
Donard Olivier	35	Lorgue Guy	75	Roux Albert-Louis	41
Dron Michel	76	Lorius Claude	12	Thaler Louis	72
Duplessy Jean-Claude	10-11-36	Manuel Michel	100	Thibault Max	43
Fadel Riad	88	Manuel Yves	91	Trehen Paul	80
Faucheux Sylvie	24	Martin Gilles J.	98	Troussellier Marc	34
Fontan Jacques	27	Mascart Patrick	29	Vallet Michel	63
Fortuné Madeleine	65	Massoud Zaher	6-107	Voisin Cyr	93
Frayssinet Charles	86	Mégie Gérard	20	Zilliox Lothaire	41
Fustec Eliane	42	Menaut Jean-Claude	55		

Foreword

The field of environment 6
Zaher Massoud, Robert Barbault
Confronted with environmental problems, widely being consequences of their own activities, humans react according to criteria and interests that vary with social groups. Developing general perspectives in order to structure our knowledge becomes an urgent matter.

Environment, a social science problem 8
Olivier Godard
The field of environment is a relationship defined by the interaction between man and biosphere. Social science contributes in a fundamental way to the understanding of both impact and feedback of this relationship.

Natural variability of environment

From forest to desert 10
Jean-Claude Duplessy, Jean Moyes, Nicole Petit-Maire, Joël Guiot
An Amazon forest reduced to a gallery forest, a rather cold Riviera, or Paris in the heart of a cold poor steppe: that is what man of the present time would have seen if he had lived some twenty thousand years ago.

Fossil fauna and flora climate indicators 11
Jean-Claude Duplessy, Joël Guiot, Jean Moyes, Nicole Petit-Maire
Marine and continental sediments contain animal or plant fossils allowing to reconstruct temperature and rainfall conditions of past millennia.

Glacial records 12
Claude Lorius
Variations in atmospheric environment during the last climatic cycle are recorded with great precision in the successive layers of snow on the ice caps.

Natural catastrophes 14
François Ramade
Demographic explosion, non-existent environmental planning, and unconsidered deforestation are all factors likely to increase human impact on natural catastrophes.

Man acts on the environment

Diffuse pollution 16
François Ramade
Disappearance of live species or advent of imbalance at the level of trophic chains are immediate consequences of the increasing production of synthetic organic molecules.

Metals in the environment 17
Claude Amiard-Triquet, Jean-Claude Amiard
Out of industrial environment, an estimation of metal effects on health is still difficult except for some examples of food poisoning.

Physics and chemistry of the atmosphere

Radiation balance, nebulosity, climate 18
Robert Kandel
The distribution of clouds in altitude and geographical localization is closely linked to energy transmission in the atmosphere; it plays a major part in natural or anthropogenic variability of the environment.

Simulating the climate and its variations 20
Hervé Le Treut
Numerical models for prediction of climate variations should take into account some processes still poorly understood and especially include the ocean and sea ice.

Stratospheric ozone 20
Gérard Mégie, Jean-Pierre Pommerehne
The ozone "hole" which has appeared recently above Antarctica is the first spectacular evidence of an impact of human activity on the global physical and chemical equilibrium of the atmosphere.

Models for the stratosphere 23
Daniel Cariolle
Supercomputers finally allow to consider the development of a tridimensional model of the stratosphere as well as the interpretation of coming satellite measurements.

Ozone: industrial strategies 24
Jean-François Noël, Sylvie Fauchoux
Confronted with the necessity of reducing the use of chlorofluorocarbons, industrial manufacturers have adopted opposite strategies, from passivity to anticipation.

Carbon dioxide: questions for the future 25
Dominique Roynaud
Observed fact: the increase in carbon dioxide of anthropic origin gives rise to

many questions: what is its climatic impact? How does biosphere respond? What is future evolution going to be?

Modelling the carbon dioxide cycle 27
Patrick Monfray
The impact of man on the carbon dioxide is evident. The possible development of climatic disorder will first of all depend on world energy policy.

Atmosphere and biogeochemical cycles 27
Jacques Fontan, Patrick Buat-Ménard
Natural biogeochemical cycles have been considerably modified by human activities. Their modelisation for predictive purposes on the climate should become a reality during the next ten years.

Atmospheric aerosols 30
Gilles Bergametti, Pierre Rognan, Geneviève Coude-Gaussen
In the atmosphere, dust developed by human activity adds to dust coming from natural sources. What exactly are they? where do they go? consequences of a migration...

Water cycle and climate 31
Jean-Claude André
Soil evaporation and plant transpiration modulate the water cycle and interact with climatic phenomena.

Oceanic environment

Pollution in littoral environment 32
Louis Cabioch
Study of the dynamics of estuary and marine systems is a first step towards the understanding of coastal pollution and its consequences.

Transient tracers in the ocean 34
Liliane Merlivat
Man has injected in the atmosphere isotopic and chemical tracers which then penetrate into the ocean. Their story allows to study the penetration of carbon dioxide into world ocean.

Metals in the sediments 35
Francis Grousset, Olivier Donard
Anthropogenic pollution by metals has now reached surface sediments in the deep ocean as a whole although its intensity remains low.

Marine ecosystem simulation 37
Valérie Andersen
The model is an essential tool for understanding the complexity of the marine ecosystem and simulating responses to its disturbances.

Geochemical ocean models 37

Jean-François Minster
The complexity of models, which are an important component of major research programmes elaborated by oceanic geochemistry teams, has reached a level where means of computation are needed.

Continental waters

The future of continental waters 39

Henri Décamps
Today the management of continental waters constitutes a challenge in five major fields which research must take up urgently at the risk of being unable to protect this natural environment.

Ground water and pollution 41

Philippe Ackerer, Lothaire Zilliox
Quantifying and simulating the transport of pollutants in the ground water imply a precise knowledge of reactions intervening in pollution dynamics.

Large rivers 41

Henri Décamps, Albert-Louis Roux
After three centuries of human planning, the biological diversity and ecological dynamics of river systems are today diminished or even suppressed which engenders many consequences for their management.

Nitrates in alluvial plains 42

Eliane Fustec
Increasing nitrate contents in surface and ground waters constitute a major problem where intensive agriculture and farming develop.

Nitrates: what strategies? 44

Corinne Larrue
The policy of fight against environmental pollution by nitrates is based on a consensus between all the actors involved. Although this strategy is efficient immediately, it is limited in the long term.

Controlling lake management 44

Roger Pourriot
Any modification at the level of the predator at the top of the trophic network may lead to a reorganization of microscopic algae stocking.

The bay of Mont-Saint-Michel 45

Jean-Claude Lefeuvre
An exceptional tidal range, spectacular sedimentary deposits, original transfers of organic matter are seen... the famous bay forms a very rich object of study.

Terrestrial ecosystems

Soil pollution 48

Jacques Berthelin, Philippe Adrian

The soil is threatened at present: human

activities introduce several mineral and organic contaminants which change its fundamental function as an active filter.

The Mediterranean forest 50

Marcel Barbero, Roger Loisel, Pierre Quézel

Formerly a multipurpose forest, the Mediterranean forest is now almost totally neglected. A succession of ecological modifications has considerably increased the spreading of fire and the risk of genetic pollution.

Preparing a space 51

less sensitive to fire
Bernard Hubert

The Mediterranean forest landscape will only escape the hazards of fire by combining numerous activities in diversified ecological spaces.

Mountain coniferous forests 52

Jean-François Dabremer

Owing to failing regular regeneration, mountain coniferous forests have aged and seem inexorably given up to disappearance.

The savanna 55

Luc Abbadie, Jean-Claude Menaut, Carlos Prado

Basic research in the field of savanna ecology requires development models.

The desertification 56

of the Sahel
Pierre Rognon

The severe drought in the Sahel from 1968 to 1984 which was long ascribed only to human activities seems to be due to a real climatic crisis.

Rural space changes 57

Jean-Claude Lefeuvre

Development of french rural space during 8000 years now results in a decrease in soil fertility and diffuse pollutions.

Erosion of agricultural land 59

Anne-Véronique Auzet

Water soil erosion affects now often the loamy plateaus and hills in North-Western Europe.

An observatory for environment 60

Marcel Jollivet

The object of the pilot micro-regional observatory which is being installed on the Causse-Méjan is to establish the relationship between ecological, economic and social changes.

Urban environment

Urban environment 61

Antoine Haumont

Whereas public actions towards pollution

and nuisances seem effective, urban environment sees the development of other pathologies directly linked to their physical and social structures.

Peri-urban borders 62

Francis Beaucire

The new "country people" want to preserve their environment and its "natural comfort". But they live in the most desirable residential places...

Behaviour in urban environment 63

André Galinowski, Karim Atoun

Do big industrial cities favour psychosis? Aggressive manifestations are only one of the aspects of deviating behaviours observed in urban zones.

Local waste management 64

Gérard Bertolini

Local government considers that it is perfectly justified to finance waste disposal services whereas waste utilization must fend for itself. Is it reasonable?

A river in the city 65

Madeleine Fortuné

The aspect of the Garonne river has changed in the course of years. The present price to pay for highways, bridges and embankments is a diminution of biological diversity.

Social origins of the impacts

Environment and societies 66

Maurice Godelier

It is necessary to seriously realize that humans interpret their environment and that nature thereby puts on numerous dimensions acting on their social evolution.

La Camargue is not "natural" 68

Bernard Picon

Overlapping of human undertakings for improving the exploitation of this unstable lacustrine territory has contributed to developing original ecosystems which today are designated "natural" spaces.

Environment and public finances 68

Claude Henry

Public finances and environment do not always get on happily together: they nevertheless share deep-rooted common concerns...

The financial system towards environment 70

Robert Hertzog

Whereas taxes may be an active instrument in environmental policy, general fiscality has often poorly controlled and perverse effects requiring an examination.

Environment acts on living creatures

Animals and plants

Adapt or disappear 72

Loius Thaler, Bernard Delay

Reactions of animals and plants to variations in their environment are numerous whether they are positive or negative. Extinction, pululation or geographic extension represent only the most spectacular consequences.

Increasing resistance to pesticides 74

Nicole Pasteur

In 1950 resistance was rare, but in 1989 it is the fully susceptible populations which have become rare. Why?

Genetics responses in a variable environment 76

Isabelle Olivieri, Pierre-Henri Gouyon

Living organisms respond to environmental variability either by adjusting their phenotype or by maintaining their genetic diversity at the population level.

Genetic processes associated with invasions 78

Pierre-Henri Gouyon, Isabelle Olivieri

The study of colonizing species can be concerned with the variations of their genetic systems rather than research on a fixed whole of characteristics.

The live world of the caves 79

Christian Juberthie

Far from being a refuge for live fossils, caves are active colonization places for species that have adapted themselves to their specific constraints.

Biological characteristics in the Antarctic 80

Paul Trehen

The Antarctic - the end of the world - is one of the less hospitable places on earth. And yet, life is present there and very organized and many original adaptations can be observed.

A world without sunshine 82

Lucien Laubier

Complex populations of creatures develop independently of sunlight and photosynthesis around hydrothermal sources in submarine depths.

Man and health

Seasonal allergies 83

Bernard David

Every region has its own pollinic calendar: it is thus possible to predict or even prevent pollinosis representing 50% of our country's respiratory allergies.

Asthma and pollution 85

in the case of the child

Alain Grinfeld

From birth, the respiratory system of the child is attacked by numerous allergens. The information of the parents and the authorities is essential to prevent subsequent diseases.

Environment and tumoral promotion 86

Charles Frayssinet, Christiane

Lafarge-Frayssinet

Some components which have no cancerogenic or mutagen activity of their own are able to increase the efficiency of cancerogenic components or to "reveal" their effects.

Allergies and false allergies to food 87

Anne Moneret-Vautrin

In less than one century, food micro-environment has been profoundly altered. The impact of these modifications on the immunological system probably goes far beyond the extend of identified undesirable reactions.

Mycotoxins: danger! 87

Guy Dirheimer

Mycotoxins, these substances produced by microscopic fungi, mould, are likely to contaminate food and cause many serious diseases in man.

Environment and genetic determinism 88

Riad Fadel

Some so-called common diseases undeniably have a genetic component. However, environment participates to a large extent in their genesis and expression.

Indoor pollution 89

Claude Molina

The concentration of domestic pollutants which is a consequence of reduction in room ventilation has become a major public health problem.

Toxicity of lead 91

Yves Manuel, Joël Rakotoarivony

Lead may be a dangerous poison to man. It is involved in the genesis of certain diseases.

Cancerogenic products and public action 91

Jean-Paul Moatti

Scientific uncertainty regarding the identification and quantitative estimation of cancerogenic risks creates particular

difficulties in the field of regulation of environmental protection.

Influence of nitrogen dioxide and ozone on human health 93

Cyr Vaisin

Nitrogen dioxide and ozone, which are not very dangerous in concentrations usually measured in the atmosphere, have a noxious effect on man in polluted zones.

Our radioactive environment 93

Gérard Lambert

Radioactivity due to human activities - medical, military and civil activities - is significantly less important than natural radioactivity at present.

Environment and human societies

The economy of exhaustible natural resources 95

Michel Moreaux

As soon as they are classed as economic assets, natural resources affect the functioning of the market as well as economic dynamics.

Controversy about nature 96

André Micoud

Every social practice taking place in nature endeavours to make its representation legal.

Environment facing law 97

Alexandre Kiss

Law rules aiming at environmental protection are multiplying all the time. Do they correspond to their objective and, consequently, are they efficient?

The notion of ecological damage for the law 98

Gilles J. Martin

Ecological damage is not neglected by the law. But the law translates it in many ways whereby scientific uncertainty sometimes is filled up by juridical "conventions".

Energetic strategies 99

Jean-Charles Hourcade

Constrained by major environmental stakes, energy strategies have "discovered" the ecological parameter in fifteen years.

Macroeconomic modelisation 100

Michel Manuel

Today macroeconomic modelisation makes it possible to distinguish some global effects of the expenses allowed for environment.

Difficulties in bringing law into operation 100

Michel Prieur

Despite the emergency of the situation, the bringing into operation of environmental law admits numerous exceptions. Whose fault is it?

Imposed or negotiated law? 101

Pierre Lascoumes

The traditional side of public policy making rules for industrial pollution has been supplemented by negotiations. Surrender or search for efficiency?

European regulation and industrial stakes 101

Philippe Roqueplo

A regulation adopted in the name of environmental protection may have considerable consequences for industrial activity and competition between various groups and countries.

What price for nature? 102

Patrick Point

Most of the elements of natural patrimony cannot be realized. Therefore, a large field of investigation is open to research in order to determine indicators of monetary value.

For a bargained patrimonial management 104

Olivier Godard, Henry Ollagnon

The patrimonial approach is aiming at setting up a behaviour and consequently a bargained management device harmonizing the present responsibility for and multiple uses of resources with the transmission of a patrimony to future generations.

Major technological risk 105

Claude Gilbert, Patrick Lagarde

Seveso, Bhopal, Chernobyl... beyond the emotional impact, these events represent critical stakes for contemporary societies. A new field of public action is arising and a new research objective is forming.

Actions and programmes

The PIREN 107

Zaher Massoud

The mission of the PIREN is not only to coordinate environmental research, to conceive, manage and evaluate research operations but also to assure the permanent link to and between participating scientific subjects.

History of the environment 108

Robert Delort

One of the objectives of the PIREN is to recall the history of all the changes produced in a given site from the Neolithic Age to today. It will contribute to the establishment of the progressive impact of man.

The DEFORPA programme 108

Maurice Muller

Organizations involved in DEFORPA have fixed objectives such as the evaluation of the sanitary state of national territory forests and its variations but also the clear establishment of the causes of the withering.

Research programmes of the SRETIE 110

Jean-Claude Oppeneau

The new multi-disciplinary programmes adding to those being accomplished represent a general scientific and technical investment indispensable for the elaboration of a coherent environmental policy.

Environmental research of the European community 111

Philippe Bourdeau

In continuity with present actions, the new programmes STEP and EPOCH reflect the increasing interest of the European community in fundamental environmental research.

The international Geosphere-Biosphere programme 112

Marie-Lise Chanin

In order to modelise the consequences of human action on climatic balance, the International Council of Scientific Unions launched the Geosphere-Biosphere programme. Its first objective is to understand the interactions between different components of the earth system.

The MAB programme: Man and Biosphere 113

Gilbert Long

MAB purposes to answer questions about national use and conservation of resources through a programme of research, training, demonstration and diffusion of information.

PLUS

LE SAVOIR EN CLAIR



Les efforts de recherche concernant l'environnement, consentis depuis plusieurs années par le gouvernement, permettent aujourd'hui de fonder de façon efficace les politiques de l'environnement. Ces efforts, dans lesquels le Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement du CNRS (PIREN) joue un rôle important, demeurent tout à fait indispensables : une politique moderne de l'environnement, prenant en compte les transformations sociales d'aujourd'hui, doit reposer sur des bases scientifiques solides.

Le Service de la recherche, des études et du traitement de l'information sur l'environnement (SRETIE), en étroite collaboration avec le PIREN, souhaite que le présent document permette aux chercheurs et aux acteurs de l'environnement d'améliorer encore la connaissance des problèmes, ceci favorisant les choix économiques et sociaux les plus pertinents.

Jean-Claude OPPENEAU
*Chargé du Service de la recherche,
des études et du traitement de
l'information sur l'environnement
au Secrétariat d'Etat chargé de
l'environnement et de la prévention
des risques technologiques et
naturels majeurs*

EN 4^e DE COUVERTURE

Dans les zones sujettes à la désertification (steppes semi-arides et savanes sahéliennes), comme ici à Djibouti, le surpâturage est une des causes essentielles de la dégradation du couvert végétal. Parmi les « coupables », les chèvres sont particulièrement redoutables. Après avoir détruit les végétaux herbacés laissés par les autres herbivores, elles grimpent aux arbres pour en manger le feuillage. Au cours des dernières années, l'explosion démographique en zone semi-aride (Afrique, Asie mineure, Inde...) a été accompagnée d'un accroissement encore plus important de la population des animaux domestiques. Evolution dangereuse dont pourrait résulter à terme un effondrement de la production primaire et un bouleversement irréversible de ces écosystèmes. (Cliché P. Brière).



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, QUAI ANATOLE-FRANCE 75700 PARIS. TÉL. (1) 47.63.15.15. TÉLEX 260 034

