



## La revue pour l'histoire du CNRS

4 | 2001  
L'environnement

---

### Les recherches sur l'environnement à Marseille

Conférence-débat du 23 novembre 2000

---



#### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/3222>

DOI : 10.4000/histoire-cnrs.3222

ISSN : 1955-2408

#### Éditeur

CNRS Éditions

#### Édition imprimée

Date de publication : 5 mai 2001

ISBN : 978-2-271-05787-7

ISSN : 1298-9800

#### Référence électronique

« Les recherches sur l'environnement à Marseille », *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 4 | 2001, mis en ligne le 20 juin 2007, consulté le 03 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/3222> ; DOI : 10.4000/histoire-cnrs.3222

---

Ce document a été généré automatiquement le 3 mai 2019.

Comité pour l'histoire du CNRS

---

# Les recherches sur l'environnement à Marseille

Conférence-débat du 23 novembre 2000

---

## NOTE DE L'ÉDITEUR

NDLR : pendant la préparation de ce numéro, nous avons eu la tristesse d'apprendre le décès de Louis-André Gérard-Varet, directeur d'études à l'EHESS.

- 1 Le 23 novembre 2000, le Comité pour l'histoire du CNRS a organisé à Marseille une conférence-débat sur le rôle qu'ont joué les questions environnementales dans la dynamique des laboratoires, qu'ils soient anciens ou qu'ils aient été créés dans cette perspective. Le temps d'une journée n'a pas permis de donner la parole aux représentants de tous les laboratoires. Les choix étaient dictés plus par le désir de montrer la diversité des équipes qui se reconnaissent comme travaillant sur des questions liées à l'environnement que par un souci d'exhaustivité. En fin d'après-midi, une table ronde a permis de débattre du lien entre recherche et questions de société. Christian Lévêque, directeur du Programme interdisciplinaire Environnement, Vie et Sociétés, a conclu cette journée.
- 2 La multiplicité des thèmes évoqués, et surtout la richesse de l'histoire des laboratoires installés depuis longtemps à Marseille, demandent qu'on revienne sur chacun d'entre eux dans des prochains numéros de La Revue, en particulier sur le Centre d'océanologie de Marseille (COM). Au-delà de l'histoire fort intéressante des laboratoires, ce compte rendu succinct veut reprendre la question déjà traitée par le dossier : la difficulté que l'on rencontre à définir la notion d'environnement, qui se traduit par la richesse des points d'entrée que cette apparente difficulté stimule.
- 3 La journée ne pouvait commencer qu'en abordant le lien entre Marseille et la mer. Le Centre d'océanologie a une longue histoire et a été l'un des maillons de la politique de développement des recherches océanographiques en France depuis les années 1950. Son directeur, Lucien Laubier, a ouvert cette journée.

« Émergence de l'océanographie au CNRS : les conditions d'une recherche pluridisciplinaire Naissance de l'océanographie en France

- 4 L'océanographie ne constitue pas une science au sens habituel du terme, mais se caractérise par sa pluridisciplinarité marquée. Plus brièvement, le *Vocabulaire de l'océanographie* publié en 1976 en donne la définition suivante : « Ensemble des disciplines scientifiques spécialisées dans l'étude de l'océan », soit l'océanographie biologique, l'océanographie chimique et géochimique, l'océanographie géologique et sédimentologique, l'océanographie géophysique. L'*Encyclopædia Universalis* reprendra cette définition. L'océanographie a vu le jour au cours de la seconde partie du XIX<sup>e</sup> siècle, selon deux orientations complémentaires : les campagnes hauturières d'exploration de l'océan profond, en particulier, pour la France, celles qui sont organisées et financées par le prince Albert I<sup>er</sup> de Monaco, et la construction d'un réseau particulièrement dense de stations marines et d'infrastructures permanentes de recherches initialement consacrées à la zoologie et la biologie des organismes marins.
- 5 La biologie marine domine les recherches en zone littorale pendant qu'une océanographie pluridisciplinaire explore l'océan du large et les grandes profondeurs. L'Institut océanographique, Fondation française reconnue d'utilité publique, créée par le prince Albert I<sup>er</sup> de Monaco, qui réunit le Musée océanographique implanté à Monaco face à la mer à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et l'Institut construit à Paris à l'angle de la rue Saint-Jacques et de la rue Gay-Lussac, jouera un rôle majeur jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.
- 6 Dans le domaine militaire, le service hydrographique de la Marine s'est longtemps consacré à l'ensemble des opérations nécessaires à l'édition de cartes de navigation, depuis les activités de levé jusqu'aux techniques de gravure, ainsi qu'à la réalisation des documents nautiques et des annuaires de marée. Les préoccupations proprement océanographiques apparaissent au cours de la Seconde Guerre mondiale, notamment dans le domaine de l'acoustique sous-marine et, par voie de conséquence, de l'hydrologie<sup>1</sup>.
- 7 En 1920, la création d'un Office scientifique et technique des pêches maritimes introduit, pour ce qui concerne les ressources vivantes marines, une première frontière entre la recherche académique menée dans les stations marines des universités et la recherche appliquée aux pêches et à la conchyliculture. Le nouvel organisme dispose à partir de 1935 d'un grand chalutier de haute mer appelé *Président-Théodore-Tissier*.
- 8 L'océanographie apparaît au CNRS, il y a une cinquantaine d'années, avec la création d'un laboratoire propre, construit dans le cadre de la Station biologique de Roscoff et inauguré en 1951, le laboratoire Yves-Delage. Au cours des années 1950, l'utilisation scientifique de moyens navals (*Calypso*, bathyscaphe FNRS 3, soucoupe plongeante *Denise* en fin de décennie) justifie la création au CNRS d'un Comité pour la programmation de ces équipements et d'un Laboratoire pour le développement de l'instrumentation scientifique des bathyscaphes.
- 9 Au cours des années 1960, l'océanographie nationale bénéficie de la part de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST) d'une forte impulsion avec la création de l'action concertée « Océans » et de son Comité exploitation des océans (COMEXO). La présidence du Comité est confiée à Louis Fage, professeur au Muséum et à l'Institut océanographique de Paris. La mission confiée au Comité est claire : procéder à un état des lieux exhaustif de l'océanographie française en cette fin des années 1950 et

proposer des remèdes à la situation constatée, c'est-à-dire jeter les bases d'une politique française des sciences et techniques de la mer. Cette décision fondamentale est à l'origine du développement rapide des infrastructures, des moyens lourds navals, des crédits de programme et des bourses de recherche. La nouvelle organisation du CNRS, suite aux décrets de mars 1966, autorise la création d'un Institut national d'astronomie et de géophysique (INAG), groupant des observatoires astronomiques et les Instituts de physique du globe, tous deux dotés de corps spécifiques de personnels; une commission horizontale d'océanographie, en dehors du Comité national, est créée en 1966<sup>2</sup>.

- 10 En 1967, la création d'un nouvel organisme chargé de la coordination des programmes, le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), création souhaitée par le COMEXO, est à l'origine d'un conflit d'intérêt. En même temps, l'existence de deux organismes publics aboutit, comme cela est souvent le cas, à une distinction amont/aval presque caricaturale de leurs activités. L'apparition de cette démarcation n'a pas eu, pour le CNRS, de conséquence négative; au contraire, la communauté des chercheurs du CNRS et des enseignants-chercheurs des grandes stations marines a su tirer parti à moyen terme de la compétition ainsi créée. Ainsi, pour ce qui concerne l'océanographie entre 1966 et 1969, seront créés les quatre grands laboratoires associés en océanographie : le Laboratoire d'océanographie physique du Muséum national d'histoire naturelle, le Laboratoire Arago de Banyuls-sur-Mer, la Station marine d'Endoume, le Laboratoire de géologie et océanographie de Bordeaux, dirigé par le professeur Michel Vigneaux. D'autres formules, comme les équipes de recherche associées (ERA), verront le jour pour des laboratoires moins importants.
- 11 Sous l'impulsion de Pierre Drach, une commission particulière, la commission 51 « océanographie », est créée en dehors des sections du Comité national, par un arrêté du CNRS daté du 28 juillet 1966 ; elle est présidée par Georges Teissier. Il s'agit d'une commission dite horizontale, c'est-à-dire surtout concernée par l'emploi des moyens lourds, l'évaluation des laboratoires et non par l'évolution de la carrière des chercheurs, dont la gestion reste confiée aux sections « verticales » spécifiques dont ils font partie (ainsi les océanographes biologistes sont-ils « gérés » par la section de biologie animale, les océanographes géologues par celle de géologie et paléontologie, etc.).
- 12 Dans le domaine des géosciences marines, le CNEXO, chargé par les textes des relations de coopération internationale, a assuré avec un réel succès, dès 1970, la présence de la France comme membre à part entière dans le programme international de forage de fonds océaniques
- 13 (IPOD, pour *International Programme of Ocean Drilling*) qui verra intervenir un grand nombre d'équipes CNRS et universitaires de géosciences. Le mouvement de mai 68 a eu en océanographie, comme dans d'autres domaines, des retombées importantes. La décision de création, dès 1971, d'une section verticale d'océanographie, la section 12, est prise à la suite de débats animés qui se sont tenus en juillet 1968 à Villefranche-sur-Mer, puis à Paris à l'automne ; comme les autres sections verticales du Comité national, cette section d'océanographie est chargée de la gestion des carrières, des formations et des équipements lourds. Elle est présidée par Henri Lacombe et compte parmi ses membres le commandant Jacques-Yves Cousteau. Très rapidement, les relations se tendent entre le Centre national pour l'exploitation des océans et la section d'océanographie du CNRS, à propos de l'accès des équipes CNRS et universitaires aux moyens lourds navals du CNEXO. Au terme de son premier mandat, en 1976, le champ de cette section a été élargi pour faire place à la physique de l'atmosphère. Au département des sciences de la Terre, de

l'océan, de l'atmosphère et de l'espace correspondaient, en 1976, quatre sections : 1) astronomie et environnement planétaire ; 2) géophysique et géologie interne, minéralogie ; 3) géologie sédimentaire et paléontologie et 4) océanographie et physique de l'atmosphère. Il a fallu de toute manière définir avec précision le domaine de compétence de la quatrième section en physique atmosphérique. Géographiquement, ce domaine a été défini comme la région comprise entre le sol ou l'océan et une altitude de vingt kilomètres environ, approximativement l'altitude de la seconde tropopause. Thématiquement, le domaine de la quatrième section comprenait les processus dynamiques thermiques et radiatifs de la troposphère et de la basse atmosphère, à l'exclusion des processus de réaction chimique, la photochimie et l'équilibre des composants mineurs. L'ozone n'intervenait ainsi que par ses effets sur le bilan radiatif et la circulation générale. Pour la première fois, l'accent est mis sur la compréhension du climat et de ses variations. La création du comité de recherches marines en 1977 par le secrétariat d'État chargé de la Recherche scientifique aide les équipes du CNRS et des universités à obtenir, sur les navires de la flotte hauturière gérée par le CNEXO, le temps nécessaire à la réalisation de leurs projets de campagne. Le CRM entreprend également de renouveler la flottille côtière des laboratoires maritimes et d'assurer le maintien des conditions d'accueil des chercheurs dans les grands laboratoires côtiers. En 1976, l'organisation interne du CNEXO fait l'objet d'importantes modifications avec la création de deux directions générales adjointes distinctes, l'une chargée de la coordination des activités nationales en océanographie, l'autre des activités propres de l'organisme. L'expérience technocratique d'un CNEXO bicéphale fut, par chance pour l'établissement, de courte durée; elle eut surtout en interne pour résultat principal de susciter des tensions inutiles entre les personnels des deux directions opérationnelles. Le retour à une organisation plus simple dès 1979 a favorisé le développement des premières actions d'animation menées et financées conjointement par le CNRS et le CNEXO, en particulier dans le domaine de l'aquaculture et des géosciences. Le CNEXO a été chargé par le ministre de l'Industrie et de la Recherche scientifique, en 1979, de proposer au gouvernement un plan à moyen terme pour la période 1980-1983. Le CNEXO fit appel à de nombreuses personnalités de la communauté des chercheurs, aussi bien du CNRS que de l'Université, de sorte que la présentation de ce document devant la section océanographie et physique de l'atmosphère ne suscita guère de réactions, d'autant que, dans ce plan, une place significative était réservée aux actions d'incitation en direction de la communauté scientifique. La construction d'un sous-marin d'exploration profonde a été décidée à cette époque sous l'impulsion du ministre de l'Industrie, André Giraud, ingénieur au corps des Mines, qu'avait vivement impressionné la découverte des phénomènes hydrothermaux à l'axe de la dorsale du Pacifique oriental. Ce sous-marin capable d'atteindre 6 000 mètres de profondeur, ultérieurement baptisé *Nautile*, a été achevé en 1984 et a réalisé dans les fosses de subduction de l'est et du sud du Japon, dans le courant de l'été 1985, sa première campagne scientifique, en collaboration avec le Japon. La campagne Kaiko était dirigée, du côté français, par Xavier Le Pichon. Le secrétariat d'État à la Recherche identifie dans une perspective décennale des programmes à moyen terme : parmi eux, le programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC) jouera par la suite un rôle majeur dans la structuration des communautés scientifiques.

- 14 Le projet de réforme du mode de financement de la recherche, issu du rapport de Robert Chabbal sur le financement de la recherche, est appliqué à titre expérimental au CNEXO en 1980. Les principes retenus dans ce rapport sur le financement de la recherche, inspiré de la réforme proposée par lord Rothschild quelques années auparavant pour le

Royaume-Uni, consistent à identifier des sous-ensembles homogènes pour faciliter la prise des décisions. Trois sous-ensembles, que l'on peut représenter sous la forme de cercles concentriques, ont été définis : dans le premier cercle se trouvent placées la recherche fondamentale et la recherche exploratoire, dans le deuxième cercle, les programmes de recherche finalisée susceptibles d'être commandités par plusieurs « ministères clients » ; enfin, dans le troisième cercle se trouvent les grands objets de développement technologique. Un fonds interministériel de la recherche devait permettre de maintenir une certaine souplesse dans les arbitrages au sein des deux premiers cercles. L'expérience s'avère rapidement désastreuse pour l'établissement. Cette procédure avait des conséquences graves en termes de cohérence entre les différents programmes du CNEXO et les moyens disponibles pour les mener à bien. Une autre difficulté concernait l'évaluation des coûts indirects que les ministères jugeaient toujours excessifs. Chacun des « ministères clients » avait une tendance naturelle à considérer ses objectifs comme des priorités et n'hésitait pas à prendre position sur la répartition des chercheurs de l'établissement...

- 15 Le changement majeur de politique à partir de mai 1981 a conduit les nouveaux responsables des deux organismes à poursuivre les efforts de rapprochement et d'actions conjointes. Du côté du CNRS, les actions développées par le Programme interdisciplinaire de recherche océan (le P1ROCEAN), créé début 1981, ont contribué à cette politique. En même temps, la mise en oeuvre de programmes incitatifs de recherche financés et conduits conjointement par les deux organismes a constitué pour les communautés concernées un signal visible de cette évolution. Cette tendance s'est poursuivie jusqu'à nos jours.
- 16 Quelques mois après sa nomination en mars 1982, le nouveau président-directeur général de CNEXO, Yves Sillard, avait décidé de créer un comité scientifique ouvert à la communauté nationale sur le modèle du comité des programmes scientifiques du CNES. Y. Sillard sut convaincre les responsables du CNRS en premier lieu, Roger Chesselet, directeur du PIR-OCEAN, et Michel Petit, alors directeur de l'INAG et du département des sciences de la Terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace, ainsi que les dirigeants de l'ORSTOM, de l'intérêt pour tous les organismes de créer ce forum d'échanges et de rencontres, et d'apporter en même temps une solution durable à l'évaluation des demandes de campagnes hauturières d'où qu'elles viennent et à la programmation annuelle de la flotte.
- 17 Alors que la création, en septembre 1967, de l'Institut national d'astronomie et de géophysique (INAG) avait été sans conséquence pour l'océanographie, sa transformation en Institut national des sciences de l'univers (INSU) en février 1985 a entraîné la création en novembre de la même année des Observatoires des sciences de l'Univers (OSU), chargés d'une triple mission de recherche, de formation et d'observation, et comprenant des observatoires océanologiques. Ces derniers n'ont cependant pas bénéficié des dotations spécifiques en personnel et en crédit permettant le bon fonctionnement de la mission nouvelle d'observation du milieu marin côtier.
- 18 Début 1985, la fusion, décidée par le gouvernement, du CNEXO et de l'Institut scientifique et technique des pêches maritimes (décret de juin 1984) pour former l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) apporte une solution globalement satisfaisante au soutien scientifique des professionnels des pêches et des cultures marines.

- 19 Au cours des quinze dernières années, la place prise par les orientations scientifiques concernant la dynamique du climat et les climats du passé est devenue prépondérante. Ces orientations ont le grand mérite de rapprocher les communautés des océanographes et des « atmosphériciens » ; mais elles ont également des effets négatifs par rapport à tout ce qui ne se rattache pas facilement à l'évolution des climats actuels et passés. C'est pendant cette période que les nouvelles technologies spatiales apportent à l'océanographie un complet renouvellement des méthodes d'observation synoptique de l'océan. La communauté CNRS/INSU, seule ou en association avec d'autres organismes, a joué un rôle essentiel dans l'exploitation de ces nouvelles possibilités. Parallèlement, de nouveaux équipements autonomes ont été développés, notamment en biogéochimie (mesure de CO<sub>2</sub> à partir des bouées dérivantes), et l'informatique a été largement utilisée pour la réalisation de modèles physico-chimiques et biologiques.
- 20 Un débat récurrent depuis une quarantaine d'années concerne la place des sciences de la vie en océanographie ou, si l'on préfère, la frontière entre la part de l'océanographie biologique qui intéresse directement les autres disciplines océanographiques et celle qui peut, à juste titre, demeurer dans le secteur des sciences de la vie (écologie individuelle ou autécologie). Au sein du Comité national, le partage en deux sous-ensembles de cette communauté scientifique se traduit par un affaiblissement global et constitue un obstacle au développement de la pluridisciplinarité.
- 21 Comme on peut l'imaginer, la multiplicité des organismes en charge des recherches sur l'océan n'a pas facilité le travail des tutelles ministérielles. Le constat des difficultés rencontrées par le CNEXO en matière de coordination nationale (difficultés que traduit de manière caricaturale la remarque selon laquelle un organisme ne saurait être à la fois juge et partie) a conduit à lui retirer ce rôle au bout d'une dizaine d'années d'existence ; il a fallu alors imaginer d'autres mécanismes. En 1982 fut créé par le ministère chargé de la Recherche, le Comité consultatif des programmes de recherches et technologie marines (CCPRTM) ; à partir de 1991, à l'initiative du ministre chargé de la Recherche, un Comité des directeurs d'organismes a été institué pour le suivi des programmes océanographiques concernant l'évolution du climat. La comparaison de la politique nationale française avec celles de pays comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni, qui bénéficient d'une organisation gouvernementale plus compacte, montre toutefois que la communauté océanographique française a su s'accommoder de sa situation particulière.

#### Bilan

- 22 Les cinquante dernières années du xx<sup>e</sup> siècle ont vu la recherche océanographique apparaître au sein du CNRS, y prendre corps, s'y affirmer et se développer dans la plupart des orientations scientifiques de type fondamental. La création, il y a une trentaine d'années, d'un organisme spécialisé en sciences et technologies marines, sa fusion ultérieure avec un institut spécialisé dans les domaines de la pêche et de la conchyliculture, ont malheureusement contribué à accroître la tendance traditionnellement forte vers la recherche fondamentale de la communauté du CNRS et des établissements universitaires, tout en lui apportant les moyens lourds indispensables à, a mise en oeuvre. En ce sens, le CNRS a su tirer remarquablement parti des possibilités offertes en ce qui concerne l'accès aux moyens océanographiques de haute mer.
- 23 La création, en 1976, d'une section du Comité national groupant l'étude des deux enveloppes fluides de notre planète qui interagissent fortement, jointe à la médiatisation internationale des questions d'évolution du climat depuis une quinzaine d'années, ont

aujourd'hui pour conséquences une double priorité accordée aux processus actuels et aux variations climatiques du passé. Cela tend à éliminer du champ de la section « Océan et atmosphère » d'autres aspects probablement aussi importants aux termes d'une vie humaine. Le CNRS, qui cherche à juste titre à rapprocher les études démographiques des populations d'organismes marins de leur histoire évolutive et, par voie de conséquence, de celle des modifications environnementales qui en sont à l'origine, a délibérément choisi d'encourager une orientation dont l'importance ne doit pas être sous-estimée. Encore faut-il trouver les mécanismes qui permettent à des chercheurs, comme à des ingénieurs, répartis entre deux sections, entrant elles-mêmes dans les champs de compétences de deux départements scientifiques distincts, d'œuvrer de manière synergique dans le cadre d'une pluridisciplinarité souvent prônée, mais rarement encouragée d'une façon efficace.

- 24 Contrairement au domaine spatial, la France n'est pas parvenue à concevoir d'emblée une grande politique océanographique. L'impulsion donnée par le succès de l'exploration des grandes profondeurs au cours des années 1950, relayée par la première décennie d'existence de la DGRST, n'a pas abouti à créer un mécanisme gouvernemental durable de coordination et de répartition des tâches. Les grandes ambitions, représentées entre 1970 et 1985, pour la France comme pour d'autres pays industrialisés, par des projets tels que l'exploitation des richesses minérales des grands fonds (les nodules polymétalliques), à l'origine de la Troisième Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, ou l'énergie thermique des mers, n'ont, pour des raisons diverses, pas abouti.
- 25 Pourtant, notre pays est conduit par son histoire, par ses possessions territoriales et sa position géographique, à élaborer une politique océanographique ambitieuse, politique qui passe notamment, en matière de moyens lourds, par la définition de priorités stratégiques à l'échelle nationale et européenne. De nouvelles questions sont aujourd'hui posées à la communauté scientifique. Les unes, comme l'évolution du climat de la planète, ont un caractère global qui dissimule encore les difficultés des approches régionales. Les autres, comme les ressources en hydrocarbures fossiles (pétrole et gaz) des marges continentales entre 300 et 3000 mètres, impliquent une forte coordination des efforts de recherches fondamentales et appliquées. D'autres orientations enfin comportent des aspects sociétaux dont l'analyse et la résolution supposent une coopération entre les disciplines océanographiques traditionnelles et les sciences humaines et sociales. Ce nouveau défi pluridisciplinaire est loin d'être gagné dans notre pays.
- 26 En ce qui concerne le CNRS, la réussite de l'INSU n'est pas contestable même si les différents champs de recherche de l'Institut ne bénéficient pas encore de la même attention. Pour l'avenir le véritable risque se situe probablement ailleurs : l'INSU et le département des sciences de l'univers parviendront-ils à travailler en bonne intelligence et avec efficacité avec les autres composantes concernées du CNRS et, en premier lieu, les départements des sciences de la vie et des sciences de l'homme et de la société ? L'environnement des physiciens, des géochimistes, des géologues, des écologistes, des microbiologistes et des chercheurs en sciences de l'homme et de la société recouvrira-t-il bientôt un seul et même concept ?
- 27 Des réponses qui seront apportées à ces questions dépend probablement l'avenir de l'océanographie au CNRS au cours des prochaines décennies. »
- 28 Marseille fait immédiatement penser au Bassin méditerranéen, à la végétation et à la flore qui le caractérisent. Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, des savants se sont intéressés à l'histoire

régionale de la flore. La qualité de leurs travaux les a conduits à entrer en contact avec ce qui se faisait ailleurs, empruntant des techniques ou transférant celles mises au point à Marseille. Cette longue histoire a conduit à la création de l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie (IMEP). Jacques-Louis de Beaulieu, Armand Pons et Pierre Quézel, chercheurs à l'IMEP, ont présenté cette longue histoire<sup>3</sup>.

«Quand l'écologie rencontre la paléoécologie. Origine et histoire d'une unité Marseillaise, l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie

- 29 Nous retraçons ici la trajectoire, depuis son origine, il y a de cela environ trente-cinq ans, d'une équipe marseillaise qui a exploré nos environnements continentaux passés en étroite liaison avec des écologues actualistes, puis en fusion totale depuis la création, en 1985, de l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie. Les rédacteurs de cette note ont été les acteurs de cette aventure scientifique. Leurs difficultés à retrouver certaines archives ou à se souvenir de certains événements montrent qu'il était effectivement temps de faire un « retour sur soi ». En une période de rapide renouvellement des effectifs universitaires, il n'est pas inutile non plus que les recrues puissent apprendre dans quelle trame ils s'insèrent et à quelle culture il leur est demandé d'adhérer.
- 30 Dans le champ immense des disciplines environnementales, l'écologie vise à établir les relations qu'entretiennent les organismes vivants, entre eux et avec leur milieu. La paléoécologie obéit à cette définition mais s'applique au passé.
- 31 Bien entendu, la part de l'histoire dans la compréhension des écosystèmes actuels est décisive, de même qu'une bonne connaissance des écosystèmes actuels est nécessaire pour interpréter les signaux du passé (au moins du passé récent au cours duquel les taxons étaient encore voisins de leurs descendants actuels). Voilà pourquoi nous avons coutume de dire que paléoécologie et écologie actualiste sont deux facettes complémentaires et indissociables de l'écologie.
- 32 Le champ de l'écologie est lui-même si vaste qu'une spécialisation est évidemment nécessaire. Les trajectoires présentées ici, qui trouvent leurs origines dans un département de botanique de la faculté des sciences de Saint-Jérôme à Marseille, sont majoritairement centrées sur l'exploration des écosystèmes végétaux.
- 33 Un historique sommaire permettra tout d'abord de présenter l'évolution des outils et des thèmes ; puis seront proposés quelques éléments de réflexion sur la façon dont, dans le domaine de l'environnement, ont pu interagir avancées scientifiques, perceptions de l'environnement et demande sociale.

Naissance des équipes de recherche (1964-1978)

- 34 Notre histoire commence avec l'ouverture de la faculté des sciences de Saint-Jérôme en 1964, et les créations du Laboratoire de botanique et écologie méditerranéenne (LBEM) par Pierre Quézel et du Laboratoire de botanique historique et palynologie (LBHP) par Armand Pons. La paléobotanique en Provence débute avec Gaston de Saporta. Ses travaux, notamment sur les flores tertiaires d'Aix-en-Provence et de Manosque, l'ont conduit à devenir le premier botaniste évolutionniste français et à entretenir une correspondance régulière avec Charles Darwin. Il a eu pour successeurs Antoine Fortuné Marion (1891), qui termine sa carrière au début du siècle et surtout Louis Laurent (travaux sur la flore oligocène régionale et celle des tufs pléistocènes de Provence); puis la lignée s'est éteinte. On peut aussi rappeler que c'est sur le mont Ventoux qu'a été

décrite pour la première fois en France une zonation de la végétation en relation avec l'altitude par Charles Martins.

- 35 Dès le début du xx<sup>e</sup> siècle, Charles Flahault jette à Montpellier les bases de la phytogéographie et de l'écologie en France<sup>4</sup>, que Louis Emberger (1930) contribuera ensuite à faire largement connaître sur le plan national comme international. C'est là que les fondateurs de l'IMEP se sont formés vers le milieu de ce siècle. De même, dans les années 1920, J. Braun-Blanquet, venant de Zurich, s'installe à Montpellier. Il y développe l'école phytosociologique dite zuricho-montpelliéraine, qui consiste : 1) à individualiser des associations végétales définies par un cortège d'espèces, dont certaines, à aires de répartitions réduites ou à exigences écologiques précises (climat, sol, concurrence, dynamique), sont caractéristiques ; 2) à classer ces associations en fonction de leurs compositions floristiques et de leurs relations avec les paramètres environnementaux. Cette discipline s'est répandue très rapidement en Europe centrale et dans les pays latins (mais n'a pas convaincu les Anglo-Saxons). Dans les années 1950, R. Molinier, qui enseigne la botanique à Marseille, utilise largement la phytosociologie et accomplit un remarquable travail cartographique au 1/20 000 de la basse Provence, alors que P. Quézel, à Montpellier, puis à Alger et enfin à Marseille, choisit une approche essentiellement phytogéographique où la phytosociologie joue toutefois un rôle important.
- 36 Parmi les élèves de R. Molinier figure A. Pons qui, après un diplôme d'études supérieures sur le Grand Luberon (1953), se laisse tenter par Louis Emberger, directeur de l'Institut de botanique de Montpellier et grand découvreur de la végétation du Maroc, qui entreprend la cartographie de la végétation du Maghreb. C'est ainsi que A. Pons rencontre R. Quézel à Alger. Ce dernier, après avoir été formé à Montpellier, devient assistant, maître de conférences puis professeur de botanique à l'université d'Alger. À partir de 1950, il se consacre principalement à l'étude de la flore et de la végétation des hautes montagnes du Maghreb, puis du Sahara, et malgré l'état de guerre, achève en 1963 avec son collègue S. Santa la rédaction de la *Nouvelle Flore d'Algérie*. P. Quézel et A. Pons ont publié ensemble une étude de la végétation des rochers maritimes d'Algérie (1954), mais les « événements » ont contraint A. Pons à rentrer à Montpellier où, attaché de recherche au CNRS, il entreprend des recherches historiques sur la végétation méditerranéenne inspirées par l'œuvre de C. Flahault<sup>5</sup> et de J. Braun-Blanquet<sup>6</sup>.

Les écologues marseillais

- 37 En 1962, P. Quézel est nommé à Marseille où il crée, deux ans plus tard, le LBEM lors de l'ouverture de la faculté de Saint-Jérôme. L'époque est favorable aux recrutements et P. Quézel s'entoure très vite d'un groupe de jeunes assistants dont il oriente les recherches vers l'exploration systématique des écosystèmes méditerranéens, en particulier forestiers et montagnards. C'est ainsi que Marcel Barbéro réalise sa thèse de doctorat d'État sur les Alpes-Maritimes (1972), Roger Loisel (1976) et Guy Aubert (1976) sur la basse Provence, Gilles Bonin (1978) sur l'Apennin méridional, Jacques Gamisans (1975) sur la Corse, Michel Gruber (1978) sur les Pyrénées centro-orientales. Par ailleurs, en accord avec le CNRS et grâce à une coopération efficace avec l'Unesco, le Conseil de l'Europe et l'Agence pour l'agriculture et l'alimentation (FAO), un effort particulier est fait sur l'exploration des écosystèmes orophiles et forestiers en Grèce, en Turquie, à Chypre, en Syrie et au Liban, grâce à la réalisation de multiples missions et de plusieurs thèses. De même, le contact avec les pays du Maghreb n'est pas rompu et le laboratoire accueille de nombreux chercheurs originaires de l'Afrique du Nord, dont les thèses sont réalisées sur le terrain

dans leur pays d'origine. Un important travail de cartographie phytoécologique est de plus accompli en Provence mais aussi en Méditerranée orientale.

- 38 En 1978, toutes les thèses d'État de cette génération ont été soutenues et l'équipe est certainement celle qui a acquis le plus gros corpus de connaissances sur la flore et la végétation méditerranéenne et saharienne. Parmi les publications les plus significatives, il convient de citer en région méditerranéenne celles consacrées au peuplement végétal des hautes montagnes de l'Afrique du Nord, de la Sierra Nevada et celles relatives aux grands systèmes orophiles méditerranéens centro-orientaux : Apennins, montagnes grecques et crétoises, Turquie sud-occidentale, Chypre, Syrie et Liban, débouchant sur la réalisation d'une *Carte de la Végétation potentielle de la Méditerranée orientale*, premier ouvrage synthétique sur cette portion du bassin. Au Sahara, un premier bilan est également réalisé grâce à la publication de *La végétation du Sahara*. Essentiellement consacrés à l'analyse du dynamisme et de la structuration des écosystèmes végétaux, ces travaux abordent aussi largement les questions de diversité biologique, de conservation et productivité des écosystèmes forestiers, l'importance des processus d'anthropisation ainsi que l'origine et la mise en place des flores méditerranéennes, thèmes qui deviendront par la suite les axes de force des préoccupations de l'équipe<sup>7</sup>.

Les recherches en paléoécologie

- 39 En 1964, A. Pons revient de Montpellier où, à l'initiative du professeur Emberger, il a soutenu sa thèse (1964) sur l'approche palynologique de la végétation du Pliocène (entre quatre et deux millions d'années). Il possède donc les deux « casquettes », d'écologue et paléoécologue.
- 40 Au début des années 1960, toutes les hypothèses sur la mise en place des écosystèmes méditerranéens ne s'appuient que sur l'observation de leur répartition actuelle en relation avec les paramètres du milieu, de leurs dynamiques à très court terme et de très rares données paléobotaniques. A. Pons est convaincu que ces hypothèses doivent être réévaluées à la lumière des données historiques objectives que peut apporter la paléoécologie, et en particulier l'analyse pollinique, discipline qui a émergé dans les années 1920 et qui est en pleine expansion en Europe du Nord. Cette discipline s'appuie sur les caractéristiques extraordinaires des grains de pollen et des spores : ils sont dispersés en très grande quantité dans l'atmosphère, à une certaine distance des végétaux qui les ont émis. Leur membrane externe (l'exine) est constituée d'une sorte de matière plastique naturelle très résistante (la sporopollinine), qui peut se conserver indéfiniment si elle est enfouie dans les sédiments à l'abri de l'air; enfin, cette exine présente des formes très variables, caractéristiques des plantes productrices. Le comptage des grains de pollen fossiles extraits de la gangue sédimentaire qui les a conservés (dépôts lacustres, tourbes...) permet de reconstituer les paysages du passé.
- 41 Pour A. Pons, il faut retracer en priorité la mise en place des végétations actuelles depuis 15 000 ans, à l'issue du choc terrible de la dernière glaciation. C'est cette tâche exaltante d'exploration d'un domaine quasi vierge qu'il propose à ses collaborateurs et étudiants. Maurice Reille explorera l'Afrique du Nord (1970) et la Corse (1975), Hélène Triat-Laval la basse Provence (1978) et Jacques-Louis de Beaulieu les Cévennes et les Alpes du sud (1978).
- 42 A. Pons a aussi été très impressionné par les travaux d'Emmanuel Le Roy Ladurie (*Histoire du climat depuis l'an mil*, 1967) qui, assistant à la faculté des lettres de Montpellier, est venu l'inviter à initier en France l'étude des anneaux de croissance des arbres (cernes) comme marqueurs des changements climatiques passés à un pas de temps calendaire. Il est donc

décidé à appliquer cette nouvelle discipline aux arbres du domaine méditerranéen et, voulant la fonder sur une bonne connaissance des processus actuels, il obtient le recrutement au CNRS de Françoise Serre (1973) avec un programme initial de calibration de la croissance actuelle du pin d'Alep.

- 43 Le principe de la dendrochronologie est simple : sous nos latitudes marquées par l'alternance d'une saison froide au cours de laquelle les ligneux entrent en dormance, la croissance de l'arbre est caractérisée par la production printanière d'un bois initial, à larges cellules, puis d'un bois final, estival et à croissance plus difficile, à cellules de plus petite taille. À chaque année correspond donc, sauf accident, un anneau de croissance. L'épaisseur de chaque cerne reflète la réaction de l'arbre aux conditions environnementales. Les variations d'épaisseur sont fortement corrélées avec celles du climat. Pour les arbres vivants, un âge peut être attribué à chaque cerne par comptage depuis l'assise cambiale (sous l'écorce) jusqu'au centre. Il est possible de reculer dans le temps par interdatation en étudiant des arbres anciens dont les durées de vie se chevauchent : des anneaux caractéristiques (cernes très minces d'années très froides, par exemple) sont utilisés pour corrélés les séquences de cernes. Mais évidemment, l'interprétation des variations d'épaisseur des cernes nécessite, pour chaque espèce, une connaissance des paramètres régissant sa croissance, donc une calibration dans l'actuel.
- 44 Après beaucoup de temps passé en mises au point méthodologiques, les premiers objectifs fixés par A. Pons sont atteints entre 1973 et 1978 avec les soutenances des thèses de ces premiers recrutés. Leurs résultats mettent à mal quelques idées reçues. Par exemple, J. Braun-Blanquet et R. Molinier estimaient qu'en Provence et en Languedoc les bois de chênes verts dispersés au milieu des cultures étaient les témoins d'une forêt primitive réduite par l'homme et qu'en cas d'abandon, on retournerait à un équilibre dit climacique (c'est-à-dire de végétation la plus adaptée au climat), dominé par la chênaie de chêne vert. Les résultats de H. Triat-Laval comme ceux de M. Reille ont montré au contraire que, dans nos régions, le chêne blanc a été dominant pendant le postglaciaire jusqu'à ce que, à partir d'au moins 4000 ans avant le présent, l'action de l'homme ait favorisé le chêne vert qui résiste mieux à l'incendie.
- 45 Cependant, des collègues interprètent aussi la progression du chêne vert depuis quatre millénaires comme le signe d'une évolution du climat méditerranéen vers plus d'aridité, bien que cette évolution s'accompagne d'une balkanisation peu compatible avec une évolution climatique. C'est le point de départ d'un débat toujours vivace qui va soutenir toutes les recherches ultérieures des écologues comme des paléoécologues : comment faire la part entre les paramètres dits naturels et ceux liés aux perturbations par l'homme dans la dynamique des écosystèmes ?
- Des équipes en pleine expansion (1978-1985)
- 46 En paléoécologie, c'est le temps des premières synthèses. À partir de 1978, le LBHP est impliqué dans le programme 158 du PICG : paléohydrologie des zones tempérées au cours des quinze derniers millénaires. Pour la plupart des équipes européennes de paléoécologie, ce programme, coordonné par le suédois B. Berglund, a constitué un formidable lieu d'échanges, de réflexion méthodologique et d'harmonisation des méthodes et fut à l'origine d'un réseau toujours vivace. Les questionnements dépassent désormais le cadre régional initial pour envisager les dynamiques de végétation et du climat à l'échelle de notre continent et donc à repérer des régions où l'on manque encore d'information. Des thésards espagnols, italiens, roumains et hongrois sont accueillis à Marseille, dont les travaux permettent de combler ces vides.

- 47 En dendrochronologie, F. Serre et ses premiers élèves, L. Tessier et F. Guibal, élargissent le champ des investigations aux principales essences des plaines et des montagnes méditerranéennes. Joël Guiot développe des fonctions de réponse des cernes d'arbres aux paramètres climatiques.
- 48 En paléoclimatologie quantitative, si l'on excepte l'action de l'homme pendant les périodes récentes, le principal paramètre régissant la dynamique des écosystèmes est constitué par les variations du climat, et, dès l'origine de la paléoécologie, les changements de populations observés ont été interprétés en termes de climats.
- 49 Dans les années 1970, la théorie de Milankovich, qui relie les variations du climat terrestre à l'insolation des latitudes nord, vient d'être validée par un astronome belge, A. L. Berger (1977), et par les données de la paléocéanographie qui a révélé, grâce aux variations des isotopes de l'oxygène, la multiplicité des crises glaciaires au cours du Pléistocène et a développé des outils pour évaluer quantitativement les variations des températures des eaux marines. Cette communauté sait qu'il est indispensable de pouvoir comparer les domaines marins et continentaux pour mieux comprendre le fonctionnement climatique planétaire et le LBHP est ainsi intégré pour la première fois en 1981 à un programme de paléoclimatologie de la Communauté européenne qui lie les deux domaines et demande aux palynologues d'utiliser les assemblages polliniques pour reconstituer quantitativement les paléoclimats.
- 50 J. Guiot commence à développer une fonction de transfert entre assemblages polliniques fossiles et paramètres climatiques (1987). La plus grande difficulté à surmonter alors tient à ce qu'il faut filtrer les données actuelles de référence, plus ou moins fortement infléchies par l'action de l'homme, pour baser, autant que possible, les calculs concernant ce passé sur des relations réelles entre climat et végétation. Un long effort de calibration a permis la première reconstitution du dernier cycle climatique (les derniers 140 000 ans) en domaine continental.
- 51 On peut dire que c'est l'intégration dans une approche globale des problèmes climatiques, d'abord avec le Programme national d'étude des climats (PNEDC) puis avec la participation aux programmes européens de paléoclimatologie, qui a constitué le déclic faisant entrer le LBHP dans une nouvelle dynamique avec des exigences plus sévères de rendement, de publications et de communication.
- Toujours plus de pluridisciplinarité
- 52 Une des stratégies du PICG 158 était de proposer une méthodologie pluridisciplinaire standard d'étude des paléo-milieus en croisant l'information obtenue auprès de la plus grande variété de marqueurs biologiques et physico-chimiques. De plus, la paléoclimatologie quantitative fondée sur les seules données polliniques montrait aussi qu'une plus grande précision serait obtenue en comparant plusieurs marqueurs.
- 53 En Grande-Bretagne, l'étude des insectes fossiles a donné d'excellents résultats. Un étudiant passionné d'entomologie, Philippe Ponel, est formé là-bas, puis recruté au CNRS.
- 54 D'autres disciplines paléoécologiques rejoignent le groupe : pédo-anthracologie (Michel Thinon, Christiane Rolando, Brigitte Talon), étude des gastéropodes (Frédéric Magnin). Le développement de l'étude des diatomées subfossiles (Patrick Rioual) et des chironomides (diptères dont les larves aquatiques sont de bons marqueurs climatiques) sera ultérieurement facilité par l'intégration à l'IMEP d'une équipe d'hydrobiologistes.
- 55 Comme on l'a précisé plus haut, la répartition actuelle des écosystèmes peut être expliquée à 90 % par les phénomènes de recolonisation post-glaciaire, mais le ressac des

glaciaires et des interglaciaires qui rythment notre climat depuis deux millions d'années a généré des phénomènes d'extinctions, de migrations et de dérives génétiques qui expliquent à une autre échelle l'état de la biodiversité au début de l'Holocène.

- 56 Les modélisateurs du système climatique global s'intéressent aussi à ces périodes, car l'accroissement exponentiel du CO<sub>2</sub> atmosphérique lié à la combustion du carbone fossile crée une situation sans équivalent au cours des quinze derniers millénaires, mais déjà approchée lors d'optimums interglaciaires passés (si l'on se réfère aux données des carottes de glace).
- 57 Ce sont les raisons qui justifient le besoin de reculer dans le temps, d'autant que les connaissances sur l'histoire des écosystèmes végétaux au cours du Pléistocène sont longtemps restées extrêmement fragmentaires. En effet, sur les continents, les enregistrements continus permettant d'appréhender les changements dans la longue durée sont extrêmement rares. Les paléoécologues de l'IMEP ont eu la chance de pouvoir étudier trois séquences couvrant les 150 derniers milliers d'années (deux en France, une en Espagne), mais surtout de découvrir et explorer les formidables pièges à sédiments que constituent les lacs et paléolacs de cratère du Velay. L'exploration de ces sites a été conduite, à partir de 1985, en très étroite collaboration avec les équipes du Laboratoire de géologie du Quaternaire, unité propre du CNRS aujourd'hui intégrée au CEREGE, Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement.
- 58 Ces travaux ont permis de retracer l'histoire de la végétation et du climat depuis un peu plus de 400 000 ans, ouvrant la voie à des comparaisons avec les données des carottes marines, la longue carotte de glace antarctique Vostok, les accumulations de loess d'Europe et d'Asie centrale et les quelques rares longs enregistrements lacustres connus à ce jour pour tenter une reconstitution planétaire de notre histoire climatique.

Interactions avec l'écologie

- 59 En écologie, cette période correspond pour l'essentiel à l'exploitation et à la conceptualisation du corpus de connaissances acquis dans la décennie précédente. C'est ainsi que les particularités écologiques et économiques des forêts méditerranéennes sont à l'origine de divers programmes réalisés en coopération avec l'INRA, en particulier l'équipe d'écologie forestière d'Avignon, avec un atelier commun sur le Ventoux, auquel participent les dendrologues, notamment dans le cadre de contrats DGRST (chêne vert, chêne pubescent, cèdre) et surtout du groupement d'études coopératives (GRECO) « forêts méditerranéennes », associant le CNRS et l'INRA, dont P. Quézel et P. Bouvarel ont été les coresponsables et dont les travaux ont largement contribué à définir les conceptions actuelles sur la signification et la valeur écologique, dynamique et économique de ces forêts et de leurs stades de dégradation. Parmi elles, citons en particulier la signification écologique et bioclimatique précise des principales essences méditerranéennes, la valeur éminemment protectrice des forêts méditerranéennes, sans que toutefois la notion de productivité ne soit toujours exclue, le rôle des incendies dans leur structuration débouchant sur des notions évidentes de prévention, essentiellement écologiques.
- 60 Un point particulièrement important a été la définition de modèles dynamiques conceptuels, précisant pour la première fois le rôle des conifères dans la structuration des écosystèmes. L'analyse globale des écosystèmes forestiers sur le pourtour méditerranéen a permis d'établir par ailleurs l'importance fondamentale de l'impact anthropozoologique, aboutissant actuellement à deux processus principaux, respectivement au nord et au sud du bassin.

- 61 Au nord, la réoccupation des espaces considérables abandonnés par l'agriculture et le pastoralisme depuis le début du siècle permet un processus puissant de remontée biologique se traduisant, malgré les incendies, par un accroissement considérable des surfaces forestières et la maturation des écosystèmes qu'elles individualisent, mais encore, notamment en basse Provence, par un retour vers la chênaie de chêne blanc, en bonne adéquation avec les observations des palynologues.
- 62 Au sud, au contraire, l'exacerbation des impacts anthropiques et surtout le surpâturage conduisent inéluctablement à la dégradation, voire à la déstructuration et la disparition des forêts.
- 63 L'analyse de ces deux modèles dynamiques principaux a débouché sur une prise en compte de leur impact sur la biodiversité, aspect qui deviendra ultérieurement un des axes principaux de recherche de l'équipe.
- 64 Divers membres du laboratoire ont par ailleurs étendu leurs recherches, dans le cadre de programmes internationaux, à d'autres régions du monde à climat méditerranéen, notamment la Californie, la région du Cap et le Chili méditerranéen.  
Depuis la création de l'IMEP (1985-2000)
- 65 En 1984, à l'expiration du GRECO, le LBHP et le LBEM sont invités à constituer une unité associée unique, l'IMEP, créée le 1<sup>er</sup> janvier 1985 sous la codirection d'A. Pons et P. Quézel. Cette fusion va donner lieu à une série de chantiers fédérateurs, en particulier des programmes nationaux, puis internationaux, sur la limite supérieure des forêts, écotone à forte contrainte climatique, mais aussi soumis aux perturbations par le pastoralisme. Ces chantiers ont très largement associé les compétences des paléoécologues et des écologues.
- 66 La demande sociale plus pressante pour une gestion des questions d'environnement prenant en compte aussi bien les variations des paramètres climatiques que les pressions anthropiques a aussi conduit à la mise en place d'opérations pluridisciplinaires qui associent les paléoécologues et les écologues du paysage de l'IMEP avec des chercheurs en sciences de l'homme.
- 67 Quelques années plus tard ont été mises en place les nouvelles règles du jeu nationales qui veulent que tout enseignant-chercheur qui se respecte soit contractualisé. Elles ont conduit l'IMEP à intégrer d'autres équipes de biologistes de Saint-Jérôme avec des secteurs non abordés par les deux équipes fondatrices, comme les hydrosystèmes méditerranéens continentaux soumis à de multiples perturbations, ou la microbiologie des sols. Cet accroissement numérique (entre 1985 et 2000 – dernière contractualisation –, les effectifs de l'IMEP en personnels statutaires sont passés de trente-neuf à soixante-quatre) et cette agrégation de groupes porteurs de leur propre dynamique peut paraître constituer un facteur d'hétérogénéité, mais elle a ouvert la voie à de nouvelles synergies (développement, par exemple, d'opérations de paléolimnologie pilotées par les hydrobiologistes) et, sous réserve d'une bonne coordination, elle permet d'appréhender les écosystèmes méditerranéens d'une manière plus intégrée, c'est-à-dire réellement écologique. C'est ainsi qu'au cours de ces quinze dernières années, le sillon tracé a été considérablement élargi thématiquement et conceptuellement.
- 68 En paléoécologie, en 1988, un groupe international d'experts a décidé de promouvoir une opération visant à rassembler le maximum de séquences polliniques témoignant de l'histoire de la végétation à travers l'Europe. Cette opération s'avérait indispensable en vue de l'établissement de synthèses continentales nécessaires pour une bonne

confrontation entre les données et les modèles théoriques, tant au niveau des dynamiques de végétation que des dynamiques climatiques. Les palynologues de l'IMEP, cooptés pour piloter cette *European Pollen Database* (EPD), se sont faits les missionnaires de cet ambitieux projet (aujourd'hui, un millier de séquences polliniques sont référencées dans l'EPD) et se sont aussi trouvés au coeur d'un réseau d'exploitation de ce référentiel pour divers objectifs, piloté par Rachid Cheddadi. Par exemple, dans le cadre du programme européen PMIP, des reconstructions climatiques à 18 000 et à 6 000 ans avant le présent ont été établies de façon à pouvoir ensuite les comparer avec celles issues des modèles de dynamiques de climat et de végétation. Cette approche permet d'évaluer la pertinence des divers modèles et d'orienter leurs réajustements. Par exemple, l'EPD est un instrument de confrontation avec les hypothèses des généticiens qui pratiquent la phylogéographie, qui consiste, pour quelques essences forestières, à décrire des lignées infraspécifiques dont la répartition est une trace de la recolonisation postglaciaire de l'Europe par ces taxons à partir de leurs refuges méridionaux (programmes européens OAK et Cytofor).

- 69 Cette première confrontation a conduit les partenaires généticiens et paléoécologues à développer un projet complémentaire d'exploration de l'ADN dans les restes fossiles des essences incriminées afin de tester dans le passé les hypothèses phylogéographiques (programme européen FOSSILVA).
- 70 En dendrochronologie, les approches autécologies et rétrospectives ont été renouvelées par la mise en service d'un outil nouveau, la microdensitométrie : l'étude de la densité du cerne (bois initial et bois final) permet désormais d'intégrer les paramètres saisonniers de la croissance dans leur réaction aux changements climatiques ou aux perturbations, mettant en évidence le rôle fondamental de mise en réserve de nutriments pendant l'été, qui conditionneront l'épaisseur du cerne de l'année suivante.
- 71 Au niveau synécologique, cette nouvelle approche a été couplée, dans le cas du pin d'Alep, par une stratégie de suivi en continu de la mise en place du cerne (stations d'enregistrement). En d'autres secteurs où les contraintes climatiques ne sont pas suffisantes pour induire des séries de cernes sensibles, un couplage avec l'analyse des isotopes stables de la cellulose du bois permet l'exploitation des variables de moyenne et de basse fréquence.
- 72 Ces acquis ont permis d'approfondir les calibrations des relations cerne/climat et ont débouché sur l'établissement de scénarios prospectifs de croissance<sup>8</sup>.
- 73 Enfin, grâce à l'intégration de J.-L. Édouard, C. Miramont et A. Thomas, l'effort a porté sur l'acquisition de longues séquences temporelles holocènes par une stratégie de recherche systématique de troncs subfossiles dans les Alpes françaises du sud.
- 74 Le courant de l'écologie du paysage est né, d'une part, du constat que la pression de l'homme s'avère quasi omniprésente dans la dynamique des écosystèmes, et que la distinction entre systèmes naturels et systèmes anthropisés était un leurre, et, d'autre part, d'une nécessité de spatialiser et de hiérarchiser l'information écologique.
- 75 Les axes de recherche actuels de l'équipe « Écologie du paysage et biologie de la conservation » portent sur : 1) la validation de schémas de dynamique de la végétation en région méditerranéenne grâce à une approche spatialisée et hiérarchisée, destinée à permettre une modélisation des processus écosystémiques ; 2) l'analyse des effets respectifs des différents facteurs environnementaux (paramètres mésologiques, régimes de perturbation, modes d'usage des sols) et historiques dans l'organisation des

communautés et des populations végétales et animales ; 3) l'étude des conséquences de l'isolement sur la structuration et la dynamique des communautés et des populations végétales ; 4) la dynamique et l'ajustement des traits d'histoire de vie d'espèces envahissantes en fonction de la disponibilité spatio-temporelle des ressources environnementales ; 5) la mise au point et la validation des procédures d'obtention de groupes fonctionnels, incluant une analyse critique de la valeur écologique des traits d'histoire de vie considérés.

- 76 En ce qui concerne les patrons de recolonisation des terres abandonnées ou incendiées, les études poursuivies visent à distinguer les facteurs exogènes (flux biologiques et matériels depuis les systèmes voisins) des facteurs endogènes (potentialités séminales et composantes topo-édaphiques) mis en jeu dans les processus de reconstitution de la végétation. Cette approche est plus particulièrement développée dans la thématique agro-écosystèmes et territoires en déprise. Parallèlement, la signification spatiale des modèles phytodynamiques est développée de manière à les relier à la structuration des sociétés humaines et à tirer des lois sur la dynamique des populations en tant que fonction de l'organisation du paysage.
- 77 La thématique biologie de la conservation a pour objet 1) l'analyse de l'impact de l'anthropisation, à différentes échelles d'espace et de temps, sur les principaux processus écologiques et biologiques, notamment sur la dynamique de la biodiversité (invasions biologiques, extinction d'espèces) et 2) l'étude des modalités de conservation d'espèces, de populations, de communautés ou de régions particulières (*hotspots*) grâce à une bonne intégration des processus biologiques et biogéographiques. Dans ce contexte, sont pris en compte divers niveaux écosystémiques (écologie du paysage et des communautés, biologie et génétique des populations) ainsi que les interactions biotiques majeures (dissémination, modalités de reproduction) L'impact de l'isolement fonctionnel et/ou spatial sur l'organisation des communautés ou des populations en situation insulaire vraie (îles de Provence) ou en situation d'habitats isolés est aussi examiné car les retombées pratiques en biologie de la conservation sont nombreuses. L'objectif final consiste à fixer le cadre théorique et pratique des opérations de réhabilitation, voire de restauration écologique, des systèmes fortement perturbés.
- 78 L'écologie fonctionnelle est appliquée, à l'échelle des parcelles, pour identifier les mécanismes intimes du fonctionnement des écosystèmes méditerranéens par l'évaluation et la quantification des flux entre sol, plante et atmosphère.
- 79 Le rôle des micro-organismes des sols (bactéries, champignons et arthropodes) dans la dégradation des litières sous chênes verts constitue un axe fort qui mobilise le groupe des microbiologistes, piloté jusqu'en octobre 2000 par Jean Le Petit.
- 80 Nommé professeur à l'université de Provence, G. Bonin y a dirigé un groupe qui a abordé les réactions écophysiologicals des végétaux ligneux aux facteurs environnementaux avec pour objectif de relier ces réactions aux processus fonctionnels susceptibles d'orienter la dynamique des écosystèmes, selon deux grands axes : 1) cycles de nutriments et dynamiques du couvert végétal et 2) rôle de l'émission des métabolites secondaires qui peuvent être utilisés comme indicateurs des réactions autécologiques des végétaux (cas des sclérophylles méditerranéens) ou révélateurs de potentialités allélopathiques et autotoxiques pouvant être déterminantes dans la compétition spatiale. Cette approche rejoint naturellement celle de l'écologie du paysage

81 Enfin, une forte demande en expertises s'exerce auprès de nos équipes, relevant de la thématique de l'écologie des perturbations, pour laquelle la recherche fondamentale rejoint d'urgentes questions de société ; l'IMEP, qui s'est de longue date investi dans la problématique relative aux réponses des écosystèmes aux feux de forêts et aux conséquences des stratégies de prévention, se voit aussi interrogé sur des questions qui tiennent aux réactions des écosystèmes et des agrosystèmes à des composts incluant des boues d'épuration ou encore à la prolifération d'algues toxiques dans les hydrosystèmes, ou enfin aux conséquences de la démoustication en Camargue.

#### Quelques considérations finales

82 Cet historique est forcément schématique. Délibérément, il n'a pas été fait état des aspects humains de la vie des laboratoires afin de se concentrer exclusivement sur les trajectoires de recherche. La dynamique des groupes, les moments de joie, les problèmes, la compétition, les ratages, les drames parfois, font la trame de chair et de sang de l'aventure scientifique. Cette « petite histoire », qui n'est pas seulement anecdotique, puisqu'elle explique en partie les orientations de la recherche et certains rendez-vous manqués ou retardés, est si importante qu'elle mériterait sans doute un autre récit.

83 Les auteurs et acteurs de cette aventure peuvent sans aucun doute témoigner d'un changement profond dans leur propre perception des questions d'environnement au cours des trente dernières années. D'une approche descriptive visant à établir un état des lieux, d'abord académique, on est passé rapidement à une démarche systémique tendant à démontrer les mécanismes de fonctionnement des écosystèmes à toutes leurs échelles, en utilisant des outils de plus en plus sophistiqués et en particulier ceux issus de la révolution informatique (gestion de données en grands nombres et multivariées), pour finalement mettre cette approche au service des gestionnaires de l'environnement.

84 Mais surtout nos propres recherches se sont inscrites dans un temps très particulier de bouleversement sociétal, induisant des dynamiques écosystémiques imprévues.

85 Dans les régions méditerranéennes, l'émergence tangible des conséquences de l'effondrement des systèmes agricoles traditionnels au nord de la Méditerranée (remontée biologique bien perceptible à l'échelle d'une génération humaine) s'est opposée à la poursuite, dans les pays du sud de la Méditerranée, d'une surexploitation catastrophique des écosystèmes végétaux. Nous nous trouvons donc en face d'un laboratoire grandeur nature qui répond déjà partiellement à bien des questions posées il y a trente ans sur la dynamique de certains écosystèmes (ainsi la résurgence en Provence des chênaies de chênes blancs vient-elle conforter les observations des paléocéologues sur leur rôle dominant avant les grandes perturbations protohistoriques et historiques).

86 Simultanément ont été allumés les signaux d'alarme sur les risques que l'industrialisation généralisée faisaient courir aux systèmes écologiques (biodiversité) et au climat (effet de serre) à l'échelle planétaire. Il en est résulté que désormais les questions d'environnement constituent une des urgences de la demande sociale et que nos équipes sont interpellées par cette demande.

87 Ce changement radical tient à des observations scientifiques plus ou moins imprévues (en tout cas, imprévues pour les spécialistes des paléoclimats qui, dans les années 1960, venant de valider la théorie de Milankovich, annonçaient qu'il fallait nous préparer à rentrer dans la prochaine glaciation et n'envisageaient nullement un réchauffement global !). Pour les paléocéologues, si les questionnements ont changé, les stratégies demeurent les mêmes : il s'agit toujours de déchiffrer dans le passé les situations les plus

proches de celles que laissent prévoir les évolutions observées au cours du  $xx^e$  siècle. Au lieu d'explorer la sortie des précédents inter-glaciaires vers les glaciations suivantes, on va se concentrer sur leurs optimums thermiques, généralement associés à des taux de  $CO_2$  dans l'atmosphère supérieurs à ceux de l'époque préindustrielle.

- 88 Dans leur champ, parmi la cohorte de bien d'autres experts, les chercheurs de l'IMEP ont certainement contribué, par leurs travaux, à l'émergence et à la diffusion de ces nouveaux questionnements. Leurs racines les plaçaient en bonne position pour allumer les premiers signaux d'alarme (au moins en ce qui concerne la biodiversité des régions méditerranéennes), ils ne se sont donc pas transformés seulement par adaptation à une demande exogène.
- 89 L'IMEP constitue une des rares équipes françaises qui associent de façon relativement équilibrée écologues actualistes et paléoécologues. Cette conjonction qui offre de multiples facettes d'évaluation de l'état des écosystèmes méditerranéens a toujours été un facteur d'enrichissement mutuel, mais les véritables pratiques pluridisciplinaires ne se sont mises en place, en interne, que lentement. Elles sont rendues aujourd'hui indispensables par la démarche de modélisation. La pluridisciplinarité a été, bien évidemment, très largement pratiquée avec des équipes extérieures à l'IMEP relevant des biosciences (avec une mention particulière pour l'IRFM de l'INRA d'Avignon, compagnon de route de très longue date), des géosciences et des sciences humaines. La constitution d'un institut associant les différentes équipes qui traitent des environnements continentaux dans l'aire d'Aix-Marseille rendrait d'ailleurs beaucoup plus lisibles les interfaces entre ces équipes. Ainsi, dans ce  $xxi^e$  siècle naissant, l'IMEP paraît bien préparé pour répondre aux exigences des politiques scientifiques nationales et européennes qui veulent que les approches fondamentales de l'écologie contribuent plus activement à l'aide à la décision des gestionnaires de l'environnement<sup>9</sup>. »
- 90 Après la mer et la flore, la Terre. La géologie s'est diversifiée en géosciences de l'environnement Bruno Hamelin, directeur du CEREGE, retrace rapidement cette mutation.
- «Les géosciences de l'environnement: le point de vue des géologues sur la gestion de notre planèteUn changement de paradigme
- 91 Les termes de « géosciences de l'environnement » constituent un intitulé très récent et recouvrent effectivement un concept nouveau, au sein des différents champs disciplinaires de la géologie. Si la plupart des grands centres nationaux en sciences de la Terre développent désormais une part plus ou moins significative de leur activité dans ce domaine, seuls quelques laboratoires en ont fait leur affichage prioritaire, voire exclusif. C'est le cas du CEREGE, à Aix-en-Provence, qui servira d'exemple pour cet exposé, afin d'explicitier les approches et les pratiques regroupées sous cet intitulé.
- 92 Pour mettre en perspective historique la genèse d'un tel centre, créé en 1995 à l'initiative de l'université Aix-Marseille III et du CNRS, et fortement soutenu par les collectivités locales, on peut considérer qu'une unité comme le CEREGE constitue l'un des produits les plus caractéristiques d'une double mutation qui a profondément modifié l'activité et la composition de la communauté des sciences de la Terre au cours des dernières décennies.
- 93 La première de ces mutations, initiée à partir de la fin des années 1960, a été l'irruption des sciences dites dures au cœur de la géologie. Physique, chimie, calcul numérique et modélisation sont maintenant des composantes essentielles de la vie d'un laboratoire comme le CEREGE. Que l'on ne s'y méprenne pas néanmoins : l'activité de terrain, qui

constitue toujours pour le grand public l'image de marque du géologue, explorateur, observateur curieux et passionné, parfois à la limite de l'aventurier, reste primordiale et spécifique. Celle-ci est pourtant désormais indissociable de l'activité de mesure, parfois extrêmement sophistiquée, et pour une grande part réalisée dans l'enceinte close du laboratoire.

- 94 La seconde mutation, nettement plus récente, a été la prise de conscience massive par la communauté géologique, au cours de la dernière décennie, que les enveloppes superficielles de notre planète — l'atmosphère, les océans et les eaux continentales, les sols — ne pouvaient plus être négligées comme elles l'avaient été auparavant. Cette désaffection relative, incontestable autant dans les activités de recherche que dans les cursus d'enseignement, résultait de la double tradition historique, qui situait l'essentiel des débouchés professionnels du domaine dans la prospection et l'exploitation des ressources minières et énergétiques, et l'essentiel des grands sujets de recherche, à la suite de la révolution conceptuelle de la tectonique des plaques, en 1968, dans la dynamique et l'évolution des enveloppes internes: la convection du manteau, la dynamo au sein du noyau, la formation de la croûte continentale, etc.
- 95 C'est clairement sous la pression grandissante de la demande sociétale que la reconversion s'est amorcée, amplifiée, reconversion qui dure encore aujourd'hui. Il est plaisant de se remémorer maintenant certains débats houleux du début des années 1990, lors d'assises de prospective comme en tient périodiquement l'INSU, où ceux qui prônaient l'urgence de cette reconversion (parmi lesquels au premier chef se trouvait un des *leaders* nationaux, qui n'avait pas encore été ministre à cette époque) étaient taxés d'agression caractérisée par la majorité de la profession. Ces débats se sont naturellement trouvés rapidement dépassés, au fur et à mesure que les sujets de recherche liés à l'environnement prenaient toute la place qu'ils méritent, dans leur variété et leur complexité, qui n'ont rien à envier à celles des thématiques plus traditionnelles — et d'ailleurs toujours d'actualité également ! — de la discipline.
- 96 Là aussi, pour éviter toute ambiguïté, il est bon de souligner que des écoles françaises de tout premier plan existaient bien évidemment auparavant, en océanographie, pédologie et sciences de l'atmosphère. Il n'en reste pas moins que la reconnaissance et le statut de ces disciplines se sont largement améliorés au cours de la dernière période: que l'on pense, par exemple, au niveau structurel, au nouveau découpage et au poids de l'actuelle section 12 du comité national, au sein du département SDU.
- Des changements dans la pratique de la recherche
- 97 Comment ces évolutions se traduisent-elles dans les thématiques de recherche et dans l'activité quotidienne d'un laboratoire comme le CEREGE ? Plutôt que d'entamer une énumération, ou une description d'organigramme et de dispositif de recherche, qui auraient été plus exhaustives mais certainement plus fastidieuses et pas nécessairement plus illustratives, j'ai choisi de présenter trois exemples, étroitement liés à trois niveaux de l'instrumentation physico-chimique dont j'évoquais l'importance en introduction. Ces trois exemples devraient permettre à la fois de bien situer quelle est l'approche des géologues environnementalistes, et comment leur activité de recherche fondamentale se distingue d'un simple contrôle à des fins de protection ou de sauvegarde, qui relève en général d'organismes spécifiques, ou parfois de bureaux d'études.
- 98 Mon premier exemple a trait aux utilisations de la spectrométrie de masse en géochimie isotopique de l'environnement. Il s'agit d'une technique expérimentale qui relève de la catégorie des instruments dits mi-lourds, dont le coût d'acquisition s'élève à quelques

millions de francs, et dont la mise en oeuvre peut encore être envisagée à l'échelle d'un laboratoire particulier (une quinzaine de laboratoires de ce type existent actuellement en France, dont trois sont spécialisés dans l'environnement). La génération d'appareils actuellement en service a, pour l'essentiel, été mise au point dans les années 1960 et 1970 et résulte d'une collaboration étroite entre chercheurs en sciences de la Terre et constructeurs, en vue de l'analyse des échantillons lunaires. Cette technique a par la suite été intensément utilisée pour les problèmes de géodynamique interne, et ce n'est que relativement récemment que les applications environnementales ont pris leur pleine ampleur.

- 99 L'application prise en exemple ici, parmi d'autres, porte sur le suivi de la contamination en plomb dans les différents compartiments de l'environnement. L'abondance des quatre isotopes stables du plomb est en effet variable d'un gisement de plomb à l'autre, car trois d'entre eux sont des descendants d'isotopes radioactifs de l'uranium et du thorium et ont, en conséquence, vu leur abondance relative augmenter progressivement au cours des temps géologiques, de manière variable suivant l'époque de formation et le contexte géologique de ces gisements. Ces variations constituent donc une empreinte isotopique (comme on parle d'empreinte génétique) qui permet d'identifier précisément la source de provenance du plomb d'origine anthropique qui est détecté maintenant dans tous les milieux naturels à l'échelle globale. Cette technique a par exemple pu être utilisée pour suivre la dissémination des aérosols atmosphériques au-dessus de l'Atlantique Nord, pour étudier la circulation des masses d'eaux océaniques, en surface d'abord, puis maintenant dans les abysses, à comprendre les flux sédimentaires sur une zone de plateau continental comme celle du golfe du Lion, particulièrement soumise aux influences anthropiques par apport atmosphérique ou fluvial, ou encore, pour relier la contamination des sols aux différentes émissions d'une zone aux activités industrielles intenses et diversifiées, comme celle du bassin de Fos-Berre.
- 100 Il faut souligner à propos de ce, premier exemple que ce type d'étude n'a qu'une incidence minimale, sauf cas particulier, en termes de protection des écosystèmes. Les teneurs en plomb analysées dans la plupart des exemples cités sont suffisamment faibles pour être très largement inférieures aux seuils de toxicité, au point qu'il est même parfois extrêmement délicat de collecter des échantillons sans les polluer par les outils de prélèvement – comme dans le cas des glaces polaires, ou des eaux profondes de l'océan. En revanche, le fait d'utiliser la contamination d'origine anthropique, alliée à la capacité d'identifier cette contamination grâce aux isotopes, constitue un outil de traçage inestimable pour comprendre le fonctionnement des systèmes naturels et des cycles géochimiques en leur sein, autant sur le plan fondamental qu'en vue d'éventuelles prédictions des temps de réponse à des pollutions accidentelles qui sont, quant à elles, parfois massives.
- 101 Mon deuxième exemple porte également sur la géochimie isotopique, mais liée dans ce cas à l'utilisation d'un accélérateur de particules pour la réalisation des mesures de spectrométrie de masse. Parmi la très large palette des isotopes utilisables en géologie, un certain nombre sont générés par l'impact du rayonnement cosmique sur les atomes de l'atmosphère et des roches exposées dans les premiers mètres de la surface de la Terre. Ces isotopes, dits cosmogéniques, ont des utilisations particulièrement attractives en géologie (le carbone 14, en particulier, en fait partie, mais il en existe toute une série d'autres). En revanche, ils présentent l'inconvénient de n'être produits qu'à des teneurs infimes dans les milieux naturels. Il est alors nécessaire de faire appel à un spectromètre

de masse plus sensible, constitué par un « petit » accélérateur de particules. Bien que très largement dépassées du point de vue de ses dimensions et énergie pour les applications actuelles de la physique nucléaire, les moyens à mettre en oeuvre pour l'acquisition et le fonctionnement de ce type d'appareil excèdent les capacités d'un seul laboratoire. Une dizaine de centres en sciences de la Terre en disposent au monde, dont celui de Gif-sur-Yvette, fonctionnant en service national au bénéfice de l'ensemble de la communauté depuis 1983. Les plans de développement, prévus dans le contrat de plan État-Région qui débute, prévoient l'installation de deux appareils, l'un en région parisienne dédié aux datations  $^{14}\text{C}$ , et l'autre appuyé au CEREGE, pour la mesure des autres isotopes cosmogéniques.

- 102 L'exemple d'application choisi dans ce cas est l'utilisation de deux de ces isotopes cosmogéniques, le béryllium 10 et l'aluminium 26, produits directement dans les quartz des roches, pour déterminer depuis quand ces roches sont exposées à la surface de la Terre. Cette donnée permet en particulier de dater certaines structures caractéristiques le long de plan de failles dont le déplacement progressif conditionne l'aléa sismique de la région environnante. La vitesse de déformation de la croûte terrestre peut donc être mesurée précisément par cette technique, et constitue un élément essentiel pour la compréhension du risque sismique de cette région. Après des succès notoires obtenus récemment dans certaines zones actives comme les Andes, des études sont en cours dans des régions à la sismicité plus modeste, mais néanmoins significatives, telles que la faille de la Durance en France. Il s'agit donc à nouveau dans le cadre de cet autre exemple d'études très en amont d'une stricte préoccupation de gestion environnementale, mais néanmoins importantes pour la compréhension du fonctionnement naturel de notre cadre de vie, et relevant bien de la compétence spécifique des chercheurs en sciences de la Terre.
- 103 Mon dernier exemple est pris parmi les utilisations en plein développement du rayonnement synchrotron. Il s'agit cette fois d'un très grand équipement (TGE) (deux sont en activité, et un troisième est en lancement, pour la France). Les équipes, françaises et étrangères, après une sélection rigoureuse de leurs projets, viennent installer leurs expériences, pour une durée limitée et une ou deux fois par an seulement dans les bons cas, sur ce type d'instrument. Les faisceaux de rayons X produits, à la longueur d'onde extrêmement courte, offrent une sonde très efficace de l'agencement des atomes au sein des structures solides. Dans l'étude sur laquelle je m'appuie ici, une équipe du CEREGE s'intéresse à la situation exacte du plomb dans la structure d'un des composants principaux des ciments, le CSH. Une des voies ouvertes pour l'inertage des déchets urbains ou industriels consiste en effet à les noyer dans les ciments destinés à la construction. La stabilité à long terme de ces composés, en particulier en regard du risque de mobilité des métaux lors de l'altération progressive de ces ciments au cours du temps, dépendra principalement du type de liaisons établies par le métal avec ses plus proches voisins dans la structure. La technique d'absorption des rayons X (EXAFS) permet l'identification de ses voisins (Ca, Si, O, etc.), ainsi que la détermination des distances interatomiques dans la structure.
- 104 Il s'agit encore une fois d'une méthode sophistiquée, maîtrisée par relativement peu d'équipes au monde, permettant d'aborder des problèmes très en amont de la chaîne des connaissances et de prises d'options destinées à une gestion plus responsable de notre environnement. Comme dans les exemples précédents, il s'agit sans équivoque de

recherche fondamentale, menée cependant avec le souci constant de son impact pratique et concret.

- 105 J'espère que ces quelques aperçus auront aidé à mieux situer le positionnement de la communauté des chercheurs en géosciences dans le grand carrousel actuel des discussions suscitées par l'environnement, où l'approche scientifique des problèmes n'est pas toujours privilégiée, tant s'en faut. Il est clair que si l'apport des géologues nous paraît indispensable, pour la compréhension des mécanismes et l'appréhension des ordres de grandeur, du milieu naturel et de ses perturbations, cette approche n'a aucune visée exclusive, le domaine étant d'évidence interdisciplinaire, et particulièrement attractif à ce titre. Il est également clair que beaucoup reste à faire, dans la poursuite des évolutions qui ont conduit à l'implication actuelle de notre discipline sur les thématiques environnementales. Tout particulièrement, la mutation des contenus des filières d'enseignement reste à amplifier pour prendre pleinement en compte ces mutations, de même que celle des pratiques de dialogue avec le grand public pour la divulgation des sujets de recherche poursuivis et des résultats obtenus.
- 106 Enfin, la question du lien entre structures de recherche et structures de décision, éternelle pierre d'achoppement, reste à traiter entièrement, mais c'est une autre histoire. »
- 107 Des traditions d'excellence, des écoles, jouent un rôle important dans l'essor de nouvelles problématiques. La calorimétrie remonte aux recherches de Laplace et Lavoisier à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. A Marseille, une école s'est vite créée. Jean Rouquerol, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre de thermodynamique et de microcalorimétrie du CNRS de 1990 à 2000, aujourd'hui membre de l'unité MADIREL, avec l'aide de Henri Tachoire, professeur à l'université de Provence, membre de l'unité MADIREL, a reconstruit cette histoire et l'importance de ce savoir-faire dans les réponses à apporter aux questions environnementales.
- « Microcalorimétrie, adsorption et environnementL'école marseillaise de calorimétrie et d'adsorption
- 108 Calorimétrie et adsorption sont deux spécialités solidement ancrées dans la tradition scientifique marseillaise. Elles furent en effet introduites, dès 1854, par le premier titulaire de la chaire de chimie de la faculté des sciences de Marseille, Pierre-Antoine Favre (1813-1880). Né à Lyon, celui-ci avait fait ses études et commencé sa carrière à Paris : d'abord médecin, il décida de se consacrer à la chimie, à laquelle avait su l'intéresser son professeur à l'École de médecine, Jean-Baptiste Dumas (c'était l'époque où la chimie avait bonne presse !). Successivement préparateur au Conservatoire royal des arts et métiers, agrégé de la faculté de médecine, chef de travaux pratiques à l'École centrale, il fut enfin nommé à Marseille en 1854. Il y vint avec la spécialité à laquelle il se consacrait depuis plus de dix ans, la thermochimie, qui étudie les échanges énergétiques qui accompagnent les réactions chimiques. Pour cela, il avait mis au point, avec son ami Jean-Thiébaud Silbermann (1806-1865), préparateur du physicien Claude Pouillet au Conservatoire royal des arts et métiers, deux calorimètres. L'un était le calorimètre à combustions vives, assez proche, dans sa forme et son principe, du calorimètre plus connu en France sous le nom de calorimètre de Marcelin Berthelot : en réalité, M. Berthelot, de quatorze ans le cadet de P.-A. Favre, ne semble pas s'être mis à la calorimétrie avant 1869, de sorte qu'en France, P.-A. Favre peut être considéré comme son prédécesseur en thermochimie, même si son tempérament plus discret et sa carrière,

finalement « provinciale », ne l'ont pas autant mis en valeur ; l'autre appareil était le calorimètre à mercure. Celui-ci, parfois aussi appelé thermomètre à calories, était en effet une sorte de thermomètre à mercure à bulbe sphérique de grand volume (un demi-litre dans l'appareil effectivement réalisé, 24 litres dans un projet qui ne semble pas avoir vu le jour) traversé par un doigt de gant contenant l'échantillon subissant la transformation étudiée. Une production de chaleur se traduisait par une dilatation du mercure qui pouvait être suivie soit par pesée (environ 3 mg de mercure par calorie), soit par observation du déplacement du mercure dans un capillaire de verre, comme dans un thermomètre ordinaire (avec le capillaire utilisé, le déplacement était d'environ 0,3 mm par calorie et il était suivi avec une lunette à micromètre permettant d'apprécier le 1/20<sup>e</sup> de mm).

- 109 C'est ce dernier calorimètre que P.-A. Favre utilisa dans ses études du phénomène très général d'adsorption gazeuse par les solides, qui consiste en une augmentation de concentration au voisinage immédiat de la surface du solide. P.-A. Favre explique qu'il se proposait « d'étudier avec précision les phénomènes thermiques qui se produisent lorsque les corps solides sont mouillés par les gaz, si l'on veut bien lui passer cette expression » : il voulait donc simplement comparer la chaleur d'adsorption avec la chaleur de liquéfaction correspondante. C'est effectivement, encore aujourd'hui, la marche à suivre chaque fois qu'il s'agit d'adsorption physique d'un gaz (c'est-à-dire sans réaction chimique). P.-A. Favre ne publia que deux articles sur la calorimétrie d'adsorption gazeuse: en 1854<sup>10</sup> et en 1874<sup>11</sup> (le dernier étant un article très complet de plus de cinquante pages). Il étudiait l'adsorption de divers gaz ou vapeurs (CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, HCl, HBr, HI, HSO<sub>3</sub>...) par les charbons actifs et le noir de platine, et, durant toute cette période, il était à la fois le seul et le premier au monde à effectuer ce type d'expérience. Néanmoins, la notoriété de M. Berthelot (assez critique au sujet du calorimètre à mercure, ce que P.-A. Favre n'avait guère apprécié) fit que le centre de gravité de la thermochimie en France s'installa à Paris, jusqu'aux travaux d'Albert Tian à Marseille. C'est en effet à A. Tian (1880-1972), préparateur du physicien Charles Fabry (1901), puis, comme P.-A. Favre, professeur à l'école de médecine – mais de Marseille – (1908) et enfin maître de conférences (1919) puis professeur (1921) de chimie à la faculté des sciences de Marseille, que l'on doit l'invention, entre 1920 et 1927, de la microcalorimétrie isotherme ou microcalorimétrie à conduction. Son invention vint combler deux grandes lacunes du calorimètre dit de M. Berthelot (ou de P.-A. Favre et J.-T. Silbermann, si nous restons logiques) qui sont l'impossibilité d'une part d'étudier des réactions de longue durée (disons, pour fixer les idées, de plus d'une demi-heure) et d'autre part de le faire à température constante (puisque, par principe, le calorimètre de M. Berthelot, que l'on appelle aussi aujourd'hui pseudo-adiabatique, est fondé sur la mesure d'une élévation de température qui, pour être mesurée avec l'exactitude souhaitée, nécessite d'être de plusieurs °C). A. Tian avait en réalité plusieurs idées, toutes orientées vers l'étude des réactions lentes :
- 110 - L'idée d'un thermostat original de grande stabilité faisant appel à une série d'enceintes concentriques limitant une succession d'enveloppes alternativement conductrices et non-conductrices : on peut ainsi amortir de plusieurs ordres de grandeur les fluctuations de température de la régulation de chauffage électrique périphérique.
- 111 - L'idée de tirer parti de la compensation de puissance (déjà introduite par James Prescott Joule en 1845) pour obtenir l'isothermie de l'échantillon en faisant appel soit à un effet

Joule (pour les réactions endothermiques), soit à un effet Peltier (capable d'absorber de la chaleur au niveau de la soudure d'un thermocouple parcouru par un courant dans la direction convenable et permettant donc de compenser les réactions exothermiques, qui sont les plus fréquentes).

- 112 - L'idée d'utiliser un assez grand nombre de thermocouples montés électriquement en série, mais thermiquement en parallèle, pour détecter le flux de chaleur non compensé. Sa première thermopile utilise dans ce but quarante-deux couples fer-constantan, auxquels s'ajoutent sept autres qui sont éventuellement le siège de l'effet Peltier compensateur.
- 113 Reconnu et primé par l'Académie des sciences en 1926, A. Tian put développer et améliorer son microcalorimètre, et y associer un élève enthousiaste et imaginaire, Édouard Calvet (1895-1966).
- 114 Agrégé de sciences physiques (1925), professeur des classes préparatoires au lycée Thiers, E. Calvet prépara en effet sa thèse avec A. Tian auquel il succéda en 1951 en chaire de chimie générale. Passionné par le microcalorimètre, É. Calvet lui a donné les caractéristiques qui lui manquaient pour devenir un instrument de mesure scientifique de type universel : il lui a ajouté, en 1947, le montage différentiel de deux thermopiles en opposition ; il a rationalisé la géométrie, la nature et la construction des thermopiles (qui comportent maintenant entre 400 et 2000 soudures uniformément réparties) ; il a affiné la réalisation du thermostat de A. Tian (en ajoutant notamment des cônes équirépartiteurs des perturbations thermiques résiduelles), il a enfin étendu de 20 à 1 000°C la gamme de température utilisable. En 1957, É. Calvet obtenait du CNRS la création d'un laboratoire propre, l'Institut de microcalorimétrie et de thermogénèse du CNRS. A cette époque (de grande sagesse !), le CNRS avait recherché pour cette construction un terrain aussi proche que possible du site de l'unique faculté des sciences de Marseille, à proximité immédiate de la gare Saint-Charles, afin de ne pas disperser le potentiel scientifique. Dans ce but, la Ville de Marseille avait fait don au CNRS, pour un franc symbolique, d'un terrain pris sur l'ancien parc de l'hôtel particulier de Paulin Talabot, le propriétaire de la compagnie de chemin de fer du Paris-Lyon-Méditerranée (PLM). Cet Institut, première construction neuve du CNRS à Marseille après la guerre, a été opérationnel en 1959. Pendant ses six premières années d'existence, il a été un moyen exceptionnel pour parfaire la mise au point du microcalorimètre et en évaluer l'intérêt dans de nombreuses branches de la science : en biologie (métabolisme d'organismes très divers, de la souche de virus à la drosophile, germination des graines...), en physique (mesure absolue de l'intensité d'un rayonnement laser ou des rayonnements  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  dans les réacteurs nucléaires) et surtout en chimie et physicochimie. La direction du département des sciences chimiques du CNRS, dont dépendait cet Institut, souhaite profiter du changement de directeur, en 1965, pour demander un recentrage des axes de recherche. Les trois domaines choisis alors furent la thermochimie, la métallurgie et les matériaux divisés et adsorbants, étant entendu que chacun d'entre eux devait s'appuyer sur le savoir-faire et les connaissances uniques du laboratoire en microcalorimétrie et en thermodynamique.
- 115 C'est dans le troisième thème (matériaux divisés et adsorbants) que se placent l'étude du phénomène d'adsorption et ses applications à l'environnement. La tradition de calorimétrie d'adsorption initiée par P.-A. Favre avait été réanimée par É. Calvet qui était à la recherche d'une méthode microcalorimétrique pour la détermination directe de l'aire spécifique des solides poreux ou pulvérulents d'intérêt technologique dont les aires

superficielles s'échelonnent habituellement entre 10 et 2600 m<sup>2</sup> pour un gramme de solide. On compte notamment parmi eux les charbons actifs, les gels de silice, les aluminés, les noirs de carbone, les zéolithes, les argiles, les pigments pour peinture, les poudres pharmaceutiques ou phytosanitaires. La méthode de loin la plus usitée pour mesurer leur aire spécifique est la méthode de Brunauer, Emmett et Teller (méthode dite BET) qui permet, à partir d'expériences d'adsorption d'azote à -196 °C, d'évaluer le contenu de la couche monomoléculaire, moyennant des hypothèses simplificatrices souvent contestées. En termes d'aire spécifique, l'inexactitude de la méthode peut en effet dépasser 20 %, notamment lorsque le solide possède des pores de dimension moléculaire (comme c'est le cas des charbons actifs ou des zéolithes). Malheureusement, la microcalorimétrie d'adsorption d'eau à la température ambiante, conduite par É. Calvet et ses collaborateurs, n'apporta pas les résultats probants attendus (baisse brusque de la chaleur d'adsorption à la fin du remplissage de la première couche), à la fois parce que la molécule d'eau était trop réactive avec les surfaces solides et parce que ces dernières sont le plus souvent énergétiquement très hétérogènes. Ce n'était toutefois que partie remise. Cela nous a en effet encouragés à mettre au point la microcalorimétrie d'adsorption isotherme d'azote ou d'argon à -196 °C et -186 °C. L'appareil, opérationnel en 1971, est encore aujourd'hui, en 2001, le seul au monde qui permette d'effectuer ces expériences dont l'intérêt est à la fois fondamental et pratique : fondamental, parce que les énergies d'adsorption sont à la base de toute expression théorique du phénomène d'adsorption et donc de toute modélisation ou simulation, pratique parce que tout progrès dans la détermination de la capacité de la monocouche et de l'orientation des molécules adsorbées permet d'avancer dans la détermination correcte des aires spécifiques.

- 116 En 2001, le laboratoire prévoit (sous son nouveau nom de MADIREL dont il est question plus loin) d'effectuer la première expérience mondiale de microcalorimétrie d'immersion d'un solide poreux dans l'argon liquide : la sphéricité et l'absence de polarité permanente de la molécule d'argon en font une molécule-sonde capable d'une énergie d'immersion peu dépendante de la forme géométrique et de la polarité de la surface adsorbante. Ce sera donc une sorte d'expérience de référence. Aucun appareil commercial ne permet d'effectuer cette expérience dont le montage, en laboratoire, prend à peu près deux ans.

Application aux recherches sur l'environnement

- 117 La rétention des gaz ou des solutés par les adsorbants est au coeur de bien des procédés de purification du milieu ambiant. Par ailleurs, lorsque cette rétention est réversible (cas de l'adsorption physique), l'adsorbant peut être régénéré (et resservir indéfiniment) tandis que, dans bien des cas, la substance adsorbée peut être également récupérée (par exemple, solvants adsorbés à la sortie des tunnels de peinture). Nous donnons ci-après quelques exemples de recherches sur l'environnement auxquelles nous avons apporté notre concours :

Les gaz de plongée sous-marine et l'ivresse des profondeurs<sup>12</sup>

- 118 Mise au point par la Comex, la plongée industrielle à plus de 400 mètres de profondeur est bien maîtrisée: Pour limiter la fatigue et la durée de décompressions fréquentes (une dizaine d'heures sont nécessaires pour décompresser à partir de 40 bars), les plongeurs sont amenés à vivre jusqu'à deux semaines sous une pression permanente de 40 bars où une faible pression partielle d'oxygène est complétée par une forte pression d'hélium ou d'hydrogène. L'espace de vie est confiné mais des sas permettent des échanges avec l'extérieur (notamment pour les repas) et sont à l'origine d'une certaine pollution par l'azote de l'air. Or, la pression partielle d'azote doit toujours rester très inférieure à 5

bars, pression à laquelle le plongeur est touché par l'« ivresse des profondeurs » qui lui fait perdre le sens des réalités et lui fait prendre de grands risques. Il s'agit donc d'éliminer l'azote tout en laissant l'oxygène et l'hélium : c'est sur ce sujet que notre laboratoire a travaillé, à la recherche d'un adsorbant spécifique, capable de retenir préférentiellement l'azote à une température qui ne soit pas inférieure à -30 °C et capable d'être régénéré à une température qui ne dépasse pas 50 °C. Il s'agissait en effet de pouvoir se contenter d'un groupe de réfrigération classique (sans besoin d'azote liquide) et de limiter l'amplitude (et donc la durée) du cycle de température nécessaire. Malgré les tailles très voisines des molécules d'azote et d'oxygène, leur polarité différente a pu être mise à profit pour une séparation efficace par un tamis moléculaire à cations fortement polaires.

La suppression de rejets gazeux industriels<sup>13</sup>

- 119 Depuis près d'un siècle, les ressources hydroélectriques de la vallée de la Maurienne y avaient fait installer des cellules d'électrolyse de l'alumine, pour la préparation de l'aluminium. Or, pour obtenir une alumine liquide à une température raisonnable et économique (de l'ordre de 700 °C au lieu des 2012 °C nécessaires à la fusion de l'alumine pure), on utilise comme fondant un sel très riche en fluor, la cryolithe. Le fluor gazeux qui s'échappait des cuves venait enrichir dangereusement la végétation environnante, au point que les brebis de cette vallée attrapaient inmanquablement la fluorose, maladie dentaire grave due à l'excès de fluor (alors qu'à faible dose le fluor est au contraire recommandé : illustration, s'il est besoin, que la chimie peut être bonne ou mauvaise, selon l'usage qu'on en fait !). Pour résoudre ce problème, Aluminium-Pechiney a souhaité modifier les propriétés adsorbantes de l'alumine afin de pouvoir l'utiliser pour commencer dans des filtres de rétention du fluor, avant de la dissoudre dans le bain de cryolithe. Ici encore, nous sommes intervenus dans la caractérisation des propriétés adsorbantes des alumines, en tirant parti du fait que les molécules de fluor et d'eau sont de taille très voisine : les études d'accessibilité de la microporosité ont pu être effectuées par adsorption d'eau, en évitant d'avoir à manipuler du fluor qui, en présence de la moindre trace d'eau, devient très corrosif pour la plupart des équipements fragiles utilisés en microgravimétrie, manométrie ou microcalorimétrie d'adsorption gazeuse. Aujourd'hui, le fluor ne s'échappe plus dans la vallée de la Maurienne et subit seulement un cycle d'évaporation, adsorption, ré-incorporation dans le bain cryolithique, sans quitter l'enceinte de l'usine elle-même.

La purification de l'eau potable<sup>14</sup>

- 120 En France, dans la plupart des usines de traitement de l'eau, l'étape ultime de purification de l'eau (ou d'affinage), destinée à éliminer les dernières traces de polluants (qui seraient notamment responsables d'odeurs ou de goûts résiduels), est une étape d'adsorption par un lit de charbon actif. Très actifs, habituellement, vis-à-vis des polluants organiques, les charbons, qui sont naturellement hydrophobes, ont toutefois besoin d'avoir à la fois une très large distribution de taille de pores (par suite de la grande variété de molécules à retenir) et une fraction de surface hydrophile, afin d'être effectivement actifs en présence d'eau. Nous avons pu montrer comment ces propriétés sont quantifiables, d'une manière sûre, grâce à la microcalorimétrie d'immersion dans des liquides organiques dont les molécules sont choisies avec des dimensions, des formes et des polarités différentes.

Perspectives

- 121 Marseille a donc été, avec P.-A. Favre, le berceau mondial de la calorimétrie d'adsorption puis, avec A. Tian et É. Calvet, le berceau mondial de la microcalorimétrie isotherme ou à

conduction. Le Centre de thermodynamique et de microcalorimétrie du CNRS (successeur de l'Institut initial) en a été le « temple » pendant quarante ans. À partir du 1<sup>er</sup> janvier 2001, deux nouvelles unités prennent sa suite.

- 122 L'une poursuivra les recherches de thermodynamique métallurgique (qui n'ont pas été abordées dans cette présentation) : il s'agit de l'unité mixte de recherche TECSEN (thermodynamique, propriétés électriques, contraintes, structures aux échelles nanométriques).
- 123 L'autre unité (l'UMR MADIREL, spécialisée dans les matériaux divisés, les revêtements et les électrocéramiques) reprend, avec tous les chercheurs qui s'étaient déjà impliqués dans ce domaine, le flambeau des études thermodynamiques et microcalorimétriques de l'adsorption aux interfaces gaz/solide et liquide/solide. Elle tient à conserver la tradition d'expériences fondamentales uniques au monde, comme celles qui ont été évoquées en microcalorimétrie d'adsorption ou d'immersion à -196 °C et -186 °C, mais aussi comme d'autres expériences d'adsorption (thermodésorption à vitesse contrôlée, manométrie d'adsorption en quasi-équilibre, microcalorimétrie d'intrusion d'eau sous pression...) que nous n'avons pas pu présenter faute de place. L'ensemble devrait faire honneur à la mémoire de P.-A. Favre, de A. Tian et de É. Calvet qui nous ont précédés : tous trois ont été des chercheurs très attentifs aux phénomènes physiques ou chimiques qu'ils étudiaient et observaient, ainsi que très proches des instruments qu'ils concevaient, essayaient et amélioraient eux-mêmes. C'est ce contact direct, sous toutes ses formes, entre le chercheur et le monde physique qu'il étudie qui nous semble être leur héritage le plus précieux, et que nous nous efforçons, au MADIREL, de conserver et de faire fructifier. »
- 124 Jusqu'à une date récente, les chercheurs semblaient impuissants face aux feux de forêt; ils n'avaient pas de solution à apporter. Ce n'est qu'en faisant appel aux nouveaux outils de modélisation et de simulation qu'ils peuvent contribuer à comprendre comment un feu se propage, et par là même qu'ils sont susceptibles d'aider à leur maîtrise.
- 125 Cette histoire récente est présentée par Dominique Morvan et Robert Martin, membres de l'Institut universitaire des systèmes thermiques industriels.  
« La modélisation numérique des feux de forêt »  
Position du problème
- 126 De tout temps, les feux de forêt ont été un phénomène naturel contre lequel les hommes se sont d'abord mobilisés, puis qu'ils ont essayé d'utiliser pour l'agriculture et l'élevage. À notre époque, les feux de forêt détruisent chaque année plusieurs millions d'hectares à travers le monde, dont plusieurs centaines de milliers en Europe et plusieurs dizaines de milliers en France.
- 127 Souvent, dans les grandes étendues boisées non peuplées de la planète (forêts du Yellowstone aux États-Unis, forêts amazoniennes au Brésil), les feux agissent comme un phénomène naturel, qui, depuis des millénaires, participent à l'équilibre écologique du milieu et favorisent la biodiversité. Dans d'autres contrées, ils sont utilisés par l'homme comme un outil associé à l'élevage, par l'apport des résidus de combustion, qui, comme les engrais, favorisent la repousse des pâtures pour le bétail, ou plus simplement pour aménager le milieu naturel (brûlage dirigé). En revanche, dans les régions très peuplées ou à fort développement touristique (Provence et Corse), un feu est toujours considéré comme une catastrophe naturelle. Il fait courir des risques aux populations, il détruit le milieu naturel et, de par sa fréquence, peut causer des dommages irréversibles entraînant, en raison de la destruction de la couverture végétale, une érosion des sols.

Dans le monde entier, des recherches se sont développées pour décrire le milieu avant, pendant et après le passage d'un feu. Toutes ces recherches, du fait de la complexité du sujet, font appel à de nombreuses disciplines (biologie végétale, écologie, chimie, physique, mathématiques). Les objectifs sont multiples : évaluer les risques d'apparition, prévoir la vitesse de propagation, évaluer les conséquences à court et moyen terme. Parmi ces objectifs, la lutte contre les feux de forêt est celui qui est prioritaire pour les États concernés par ce problème. Parmi les moyens matériels utilisés dans cette lutte, le simulateur de feu, par la prédiction du comportement du front de flammes qu'il apporte, est un outil informatique essentiel d'aide à la décision pour le personnel chargé de la protection contre les incendies. En s'appuyant sur une connaissance de la typologie des formations végétales en termes de combustible, de la topographie, des conditions météorologiques et avec un modèle de propagation du front, ce simulateur de feu permet de prédire l'avancement d'un feu sur une étendue cartographiée. De tels simulateurs ont été développés en Russie ainsi que dans les pays anglo-saxons et leur utilisation a donné des résultats plus ou moins conformes à la réalité du terrain. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories selon l'approche utilisée et l'objectif visé. Les trois approches correspondent à une évolution de la thématique de recherche allant du simple au compliqué. La plus ancienne est l'approche statistique ; est apparue ensuite une catégorie de modèles semi-empiriques ; et, dernièrement, grâce aux progrès des méthodes numériques et à la puissance des ordinateurs, une génération de codes prenant en compte l'essentiel des phénomènes physiques intervenant dans la combustion d'un couvert végétal a été développée.

Les modèles statistiques

- 128 Devant la complexité posée par l'analyse des phénomènes régissant la propagation d'un front de flammes dans le cas d'un incendie de forêt, au début des années 1960, les premiers travaux ont été fondés sur l'approche statistique. Il s'agissait, à partir d'un grand nombre d'observations sur des feux tests, d'exprimer la vitesse de propagation du front en fonction de paramètres (charge et humidité du combustible, vitesse et direction du vent, inclinaison de la pente, température de flamme...) choisis préalablement. Hormis le choix des paramètres, cette approche ne fait intervenir aucune considération physique. Mais, étant donné la faiblesse du support physique, de tels modèles ne peuvent donner de bons résultats que dans le cas où les feux se produisent dans des conditions voisines, voire identiques, de celles qui ont procédé à leur élaboration.

Les modèles semi-empiriques

- 129 La limitation des modèles statistiques, dans les prédictions de la propagation des feux sur le terrain, a amené Rothermel en 1972 à proposer le code de calcul BEHAVE. Ce code est basé sur un modèle semi-empirique utilisant la relation, établie par Frandsen en 1971, où la vitesse de propagation du front  $V$  est reliée au flux thermique  $F$  nécessaire à cette propagation, à la masse volumique du combustible et à  $H$  l'enthalpie nécessaire pour amener le combustible de la température ambiante à la température d'inflammation. Dans cette relation,  $V = F/\rho H$ , le terme  $F$  est relié à la chaleur de réaction de combustion et, par des termes correctifs, aux effets de pente et de vitesse du vent. La dépendance fonctionnelle de ces trois derniers termes peut se déduire des résultats d'expériences menées en laboratoire. L'intérêt de cette approche réside dans le fait qu'elle donne directement la vitesse de propagation en fonction de grandeurs physiques et de paramètres déterminés.

- 130 Les résultats obtenus par l'approche semi-empirique sont relativement satisfaisants dans le cas d'un feu sur terrain plat et en l'absence de vent, mais les termes correctifs prenant en compte ces effets ne reposent pas sur l'analyse du transfert thermique qu'ils induisent, et cela explique que les prédictions du modèle soient différentes de ce qui peut s'observer dans la réalité.

#### Les modèles thermiques

- 131 À l'époque où se développent les deux précédents types de modèles, une autre démarche apparaît, plus physique, qui s'appuie sur une analyse des transferts thermiques entre la zone de combustion et le combustible imbrûlé. À la suite des travaux d'Emmons qui, en 1964, propose un modèle basé sur une équation de bilan thermique, prenant en compte le rayonnement des braises, plusieurs auteurs s'engagent dans cette démarche. Leurs différents apports se situent dans la prise en compte, plus ou moins simplifiée, des différents phénomènes thermiques décrivant la propagation du front de flammes. Par exemple, de Mestre, en 1989, utilise un volume de contrôle pour effectuer le bilan d'énergie limité à la partie supérieure de la strate de combustible et il postule une forme du front de flammes linéaire avec un angle fixe par rapport à la verticale. Les modèles physiques permettent le calcul de la vitesse de propagation du feu si l'on détermine par une série de confrontations théorie-expérience les grandeurs thermophysiques caractéristiques du lit de braise, de la flamme et des gaz chauds.

#### Les modèles multiphasiques

- 132 Ces modèles utilisent une approche plus en amont que les précédents ; ils sont fondés sur les phénomènes de base qui induisent l'initiation et la propagation d'un feu. Dans ces modèles, les transferts thermiques au niveau de la flamme, des braises et des gaz chauds sont calculés à partir des propriétés intrinsèques du combustible et du milieu environnant. Albin, en 1980, propose un modèle de flamme prenant en compte ces mécanismes de base et Grishin, en 1986, utilise une approche diphasique, avec une phase gazeuse et une phase solide à plusieurs constituants. Dans le droit fil de cette démarche, M. Larini, en 1995, propose un modèle multiphasique décrivant le comportement d'une phase gazeuse et de plusieurs phases solides.
- 133 D'un point de vue schématique, cette approche vise une description aussi complète que possible (réactions chimiques en phase gazeuse, combustion de surface du charbon de bois, transferts turbulents...) des différents mécanismes physiques intervenant au cours de la propagation d'un feu à travers une strate de végétation. Elle comprend, en particulier, une description fine des mécanismes de dégradation (par séchage, pyrolyse et combustion de surface) des éléments combustibles situés en amont du front de flammes, ainsi que les transferts d'énergie par rayonnement et par convection en provenance de la flamme (particules de suie et gaz chauds) et des braises. La confrontation des résultats obtenus sur des feux de litière d'aiguilles de pin, en présence ou non de vent, avec différentes données expérimentales a permis de valider cette approche.

#### Perspectives

- 134 L'application de la théorie des écoulements réactifs à la modélisation des feux de forêt a permis de développer, pour la première fois, une description complète de l'ensemble des phénomènes physiques présents au cours de la propagation du front de flammes à travers une strate de végétation. À partir de cette approche, les éléments qui caractérisent la progression du front de flammes (température, hauteur de flamme, panache thermique, vitesse de propagation...) dérivent directement des conditions extérieures rencontrées par le feu (vent, pente, humidité, biomasse...). Couplée à un modèle en 3D d'écoulement

atmosphérique, elle doit permettre la réalisation de simulations à des échelles de plus en plus proches de la réalité du terrain. Associée aux nouveaux outils de calcul scientifique intensif (machines massivement parallèles), cette nouvelle approche de la modélisation des feux de forêt semble extrêmement prometteuse. Elle doit conduire à des avancées significatives des connaissances sur la physique et la dynamique des feux, qui pourront être intégrées dans les moteurs de propagation d'une nouvelle génération de simulateurs de feu. »

- 135 Les sciences de l'homme et de la société participent activement aux recherches sur l'environnement. Elles sont directement concernées, car l'interaction homme-nature ne peut pas faire l'économie de l'un de ces termes. Il est revenu à Robert Kast, directeur de recherche au CNRS en économie et gestion (GREQAM), de présenter leur importance dans l'étude des problèmes d'environnement.

«Les sciences de la société et la gestion des risques environnementauxLe principe de précaution interpelle toutes les sciences

- 136 Le principe de précaution a été évoqué depuis une vingtaine d'années dans les résolutions de comités préoccupés par les problèmes d'environnement. Il a pris diverses formes dans les rédactions des recommandations et des textes élaborant les principes de régulations (constitutions), voire des lois. Voici, par exemple, un extrait de la loi française 95-101 sur le renforcement de la protection de l'environnement : (principe de précaution), « selon lequel, l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ».
- 137 Quelques questions sont posées régulièrement relativement à la définition et aux possibilités de mise en pratique du principe de précaution. Ces questions proviennent du public, des décideurs, publics et privés, mais aussi de certains gouvernements, dans des contextes où ce principe peut être invoqué pour favoriser des mesures protectionnistes injustifiées.
- 138 Nous pouvons classer ces questions selon trois ordres. Le premier s'adresse au champ d'application du principe, le deuxième aux institutions et personnes qu'il concerne, le troisième à sa mise en pratique. Le champ d'application du principe de précaution peut être cerné à travers les questions suivantes :
- 139 - À quels domaines s'applique-t-il ?
- 140 - Peut-on faire une distinction entre risque, au sens habituel du terme, et d'autres sortes de risques faisant appel au principe ?
- 141 - Quelle différence établit-on entre ce principe et les autres principes de gestion des risques ?
- 142 - Y a-t-il une différence entre prudence et précaution ?
- 143 Le rôle des institutions concernées par le principe de précaution et leurs rapports avec les individus :
- 144 - Quelle doit être la participation du public au processus décisionnel ?
- 145 - Quels règlements intègrent-ils déjà le principe et comment le prouver ?
- 146 - Comment la référence au principe s'articule-t-elle dans les législations ?
- 147 - Comment le principe modifie-t-il l'attribution des responsabilités ?

- 148 La mise en pratique du principe de précaution dans les processus de décisions :
- 149 - Quelle est l'importance de l'évaluation scientifique des risques par rapport à leur perception par le public ?
- 150 - Quels sont les critères retenus pour la définition des dangers ?
- 151 - Quelles méthodes doit-on développer pour évaluer les bénéfices attendus et les dommages possibles ?
- 152 - Quelles informations sont-elles prises en compte et comment ?
- 153 Concernant le premier ordre de questions, celui du champ d'application du principe de précaution, nous pouvons nous interroger sur l'histoire de son apparition et la mettre en perspective avec d'autres histoires de la gestion des risques.
- 154 Rappelons tout d'abord, brièvement, pourquoi ce principe a été évoqué (invoqué, parfois) depuis une vingtaine d'années seulement. Le mot existait avant : il désigne un comportement face à l'incertitude. Ce n'est pas le fait de prendre en compte l'incertitude qui a changé, mais la perception de ce qu'elle peut être et la manière de la prendre en compte. Pour fixer les idées, je mentionnerais la parution en 1979 du livre du philosophe allemand Flans Jonas, *Le Principe de responsabilité*, qui condense en une théorie (son sous-titre est : *Une éthique pour la civilisation technologique*) le résultat de recherches intégrant des questions posées depuis longtemps par l'écologie (la discipline) et les mouvements de protection de la nature. Ces mouvements étaient très présents et actifs dans l'Allemagne des années 1930<sup>15</sup>. À partir d'exemples à présent bien connus sur les risques que font courir les moyens techniques, H. Jonas souligne les limites des approches de l'éthique classique. Celles-ci sont dues à deux éléments implicites communs à toutes les approches : les décisions sont statiques (elles ne prennent en compte qu'un futur proche, le monde extérieur reste immuable) et elles sont individuelles (on considère le prochain, la cité, et éventuellement l'environnement, comme soi-même).
- 155 Ces deux présupposés simplificateurs sont à l'origine du positivisme scientifique, à savoir : tout ce qui n'est pas humain peut être décrit (analysé) comme une machine envers laquelle le scientifique n'a pas de responsabilité. En allant plus loin, le corps humain lui-même peut être un objet d'étude et d'expérimentation afin d'en comprendre et maîtriser le fonctionnement. La science, fondée sur l'analyse et l'expérience, développe les techniques qui permettront de maîtriser tous les phénomènes : c'est une question de temps et de moyens. Dans cette optique, se justifient des décisions prises sur la base de critères individuels (entrepreneur ou dictateur bienveillant) dans un cadre statique et sans incertitude.
- Les connaissances scientifiques
- 156 La science qui a le plus profité de cette démarche est sans doute la physique, suivie par la chimie, la géologie et la biologie. Il n'est pas anodin que ce soit en physique, justement, que le principe d'incertitude de Heisenberg se soit imposé : « Si l'on connaît la masse d'une particule, on ne peut déterminer qu'une distribution de probabilités de sa position » (ou bien : si on connaît la position d'une particule, on ne peut déterminer qu'une distribution de probabilités de sa masse). Malgré ce principe, et malgré le fait qu'il soit au fondement de la physique quantique, dont on sait qu'elle a permis de développer de nombreuses techniques, la culture scientifique n'a pas intégré cette dimension essentielle de la connaissance : l'indétermination.

- 157 De nombreux problèmes que pose l'emploi de techniques bien contrôlées dans le cadre de leurs objectifs peuvent se ramener à cette indétermination parce qu'on élargit le champ des impacts de ces techniques. Chacun peut en trouver une multitude d'exemples dans les dérives technologiques, l'usage de médicaments, les politiques centralisées et bien d'autres sujets qui nous touchent. Ces exemples feront vite apparaître que le premier élément implicite est en cause : les décisions ont été prises dans un cadre statique. On entend par là que l'on s'est fixé un objectif, généralement atteint avec un risque d'erreur raisonnablement faible, mais dans un horizon de temps limité. Or le monde ne s'arrête pas à cet horizon temporel et les conséquences continuent à se manifester, parfois d'une manière irréversible. La prise en compte du temps, des arrivées prévues, probables ou simplement possibles d'informations supplémentaires modifie radicalement le processus de décision : il s'agit d'un processus de décision dynamique. Peu ou prou, on intègre le plus souvent de la dynamique dans la prise de décision, mais bien souvent pas assez, ou bien en ayant une confiance exagérée dans la capacité de trouver des techniques qui permettront de résoudre les problèmes qui peuvent se présenter dans le futur. Quand bien même on garderait cet optimisme, il resterait à intégrer les coûts de la mise au point de ces technologies et de leur mise en oeuvre dans les décisions prises.
- 158 Par ailleurs, la prise en compte de l'évolution des conséquences incite le plus souvent à considérer que l'environnement (au sens général) dans lequel elles s'insèrent évolue aussi : le monde n'est pas immuable. La science économique a été la première à souligner que les interactions entre des décideurs étaient fondamentales, même lorsqu'ils agissent de manière indépendante dans le cadre d'un marché purement concurrentiel. Cette constatation a donné lieu à l'émergence de la théorie des jeux qui permet l'analyse de telles interactions et à laquelle ont recours les autres sciences humaines ainsi que la biologie pour démontrer que des solutions qui semblaient naturelles n'étaient souvent pas satisfaisantes. La science écologique aussi se réfère à la théorie des jeux, d'une part, en considérant que la nature, opposée au décideur humain, réagit, au sens où le hasard choisit une réponse, et, d'autre part, en analysant mieux les composantes de cette nature, selon des critères, différents de ceux de l'humain, mais prévisibles, au moins en probabilité.

#### Les sciences de la société

- 159 La seconde hypothèse implicite dans l'élaboration de l'éthique classique consiste à considérer le prochain comme soi-même. On comprend comment une telle hypothèse a pu s'imposer dans les civilisations qui ont hérité des cités grecques administrées par des sages issus d'une aristocratie et de l'égalitarisme humain face à l'immensité du Dieu du Livre, dont la phrase de Jésus est révélatrice : « Aime ton prochain comme toi-même. » En effet, cette recommandation, que l'on retrouve de manière plus ou moins équivalente dans toutes les religions du Livre qui entourent la Méditerranée, est déjà si difficile à suivre sur le plan individuel que l'on est enclin à ne pas la compliquer encore lorsqu'on considère la collectivité. Et pourtant, une décision individuelle n'a pas beaucoup de caractères communs avec une décision collective. Non seulement une telle décision nécessite de prendre en compte les interactions entre les individus, comme l'a souligné la science économique, entre les individus et leur environnement, comme le souligne la science écologique, mais elle répond aussi à d'autres paradigmes. Il ne s'agit plus en effet de chercher une décision qui soit meilleure, parce que la notion de meilleur n'a pas de sens, mais de chercher une organisation qui permette à chaque décideur de prendre des

décisions qui n'incitent pas son environnement (incluant les autres décideurs et les éléments susceptibles de réagir à la décision) à agir contre son intérêt.

- 160 La sociologie et l'histoire nous renseignent sur de nombreuses organisations qui cherchent à atteindre cet objectif ou le négligent. Le droit, dans le cadre d'organisations politiques existantes, a élaboré des lois qui vont dans ce sens. L'économie a montré que des principes qui semblent élémentaires sont incompatibles avec un tel objectif, tel le théorème d'impossibilité de Arrow qui montre qu'un critère collectif qui vérifie des conditions minimales<sup>16</sup> n'est compatible qu'avec celui d'un seul décideur. Il n'est donc pas très étonnant que, faute d'avoir une aristocratie homogène, les démocraties dégénèrent en dictature dès que des problèmes spécifiques opposent les décideurs individuels. À moins que des organisations adaptées permettent de résoudre suffisamment ces problèmes.
- 161 De telles organisations se sont développées dans nos civilisations, en particulier pour affronter un certain nombre de risques bien identifiés. On peut citer les corporations de métiers qui organisaient la solidarité, les institutions financières qui permettent de gérer les investissements en partageant les risques financiers et libèrent les entrepreneurs, les assurances qui permettent de couvrir les risques de dommages... et les assurances sociales qui organisent la solidarité sur un plan global. Parmi ces organisations, la plupart sont fondées sur le principe de prévoyance. Celui-ci relève de la responsabilité individuelle qui fait de l'entrepreneur celui qui prend un risque raisonnable, le gère et qui se couvre en conséquence. Les assurances sociales ont vu le jour dans le cadre de la civilisation industrielle, basée sur le libéralisme, dont les développements ont créé des risques (accidents du travail, chômage massif) qui mettaient en cause sa pérennité. Leurs extensions sont celles dont nous profitons ou qui ont présidé à l'instauration des régimes communistes. Ce régime, qui a fait faillite en Union soviétique mais régit près de la moitié de l'humanité, serait intéressant à analyser plus profondément. Il s'inscrit, de par son fondement marxiste, dans la logique industrielle ; il se fonde sur le développement technologique et la confiance dans les sciences pour maîtriser les problèmes menaçant le bien-être individuel ; il fonctionne selon une hiérarchie qui ramène les décisions collectives à une logique de décision individuelle : celle du « père du peuple » et des experts. En France, nous n'avons pas de père du peuple, mais nous avons des experts derrière lesquels se cachent la plupart des décisions qui affectent la collectivité.

- 162 H. Jonas n'a pas échappé à la fascination que peut provoquer l'exercice de la responsabilité par une organisation de type communiste (et dictatorial). Selon lui, seule une telle organisation serait capable d'étendre la notion de prochain suffisamment pour prendre en compte l'environnement. Son principe de responsabilité consiste à suivre l'évolution historique: partant des humains traités comme des sous-humains, il étend la responsabilité aux animaux, aux plantes, puis à la planète. Cette responsabilité reste individuelle, c'est-à-dire qu'un « bon père » se sent responsable, non seulement de ses enfants, femmes, esclaves, animaux domestiques, mais aussi de ce qui ne lui appartient pas.

Catastrophes naturelles ?

- 163 On peut se demander si l'évidence selon laquelle le principe de responsabilité doit être remplacé par un autre principe ne s'impose pas en raison de la simple démographie. En voici un exemple simple qui nous ramène à des considérations économiques sur lesquelles nous pouvons proposer quelques éléments de l'application du principe de précaution. La baie de Naples est très belle ; il est donc naturel que des humains aient

envie d'y habiter. Il se trouve que le Vésuve la surplombe, ce qui fait que décider de s'installer sur ses flancs représente un risque. Un bon père de famille peut cependant décider de s'y installer; il prend ce risque individuellement (ou avec son conseil de famille). Il peut trouver un assureur qui couvre partiellement le risque de dommage qu'il court pour l'aider à prendre cette décision. L'assureur joue sur la diversification : ce sont les primes des gens qui ne sont pas sur les flancs du Vésuve qui rembourseront les dommages en cas d'éruption et, inversement, les primes du Napolitain couvrent celles des autres. Mais il y a aujourd'hui deux millions d'habitants à Naples, dont deux cent mille au moins sont en zone risquée. L'assureur peut se réassurer, mais pas suffisamment pour couvrir les dommages d'une telle population. Il y a là un problème de responsabilité collective et, de fait, l'assurance est implicitement gérée par la collectivité parce qu'en cas de sinistre, ce sera l'État italien et la Communauté européenne qui rembourseront les dommages. Il y a plusieurs constatations à tirer de cet exemple :

- 164 1) la démographie modifie les risques. La probabilité d'éruption est la même, mais les dommages potentiels ont été multipliés. Cette remarque est valable pour toutes les catastrophes dites naturelles ;
- 165 2) cette catastrophe n'est pas plus naturelle qu'une autre : il y a une responsabilité qui a été prise en autorisant les gens à prendre le risque d'habiter sur les pentes du Vésuve ;
- 166 3) la responsabilité est collective, le risque le devient aussi ;
- 167 4) il est géré, si l'on peut dire, en ponctionnant une population qui n'a pas choisi de prendre ce risque et ne profite pas des côtés positifs de ce lieu d'habitation pour rembourser les dommages en cas de sinistre. Cela n'est possible que par la force d'un État coercitif qui joue, pour faire passer la pilule en cas de malheur, sur « aime ton prochain comme toi-même ». Mais peut-être que ceux qui remboursent aimeraient bien que les Napolitains les fassent profiter de leurs maisons avant le sinistre ?
- 168 Un autre exemple, aussi simple, complète le tableau : on laisse des gens construire des maisons au bord d'une rivière. Pour réduire le risque d'inondation, on construit des berges, on canalise. Ce faisant, on modifie le cours du fleuve, ce qui a des conséquences pour les habitants qui sont en aval et surtout qui fait courir un risque plus grave (avec une probabilité plus faible mais des dommages plus élevés) en cas de grosse crue. On retrouve alors les éléments précédents auxquels s'ajoute celui-ci :
- 169 5) l'environnement a été modifié sans que l'on puisse savoir quels sont les impacts de cette modification sur le débit, la biodiversité, les riverains en aval, ainsi que sur le fleuve confluent, voire sur la mer....
- 170 Or, ces impacts, même si on les néglige pour eux-mêmes (on ne se sent pas responsable de l'état de l'environnement en soi, et on ne pêche pas, on ne chasse pas et on n'est pas attaché aux traditions !), portent ou porteront sur des humains. Ceux-ci peuvent ne pas en être conscients, on peut s'organiser pour le leur cacher, ou tout simplement ne sont-ils pas encore nés. C'est là que joue le principe de responsabilité exposé par H. Jonas. Mais c'est là aussi que nous pouvons réfléchir aux moyens d'évaluer ces impacts en termes de risques, même en l'attente d'études scientifiques suffisantes sur l'environnement. On peut surtout s'interroger sur la manière de répartir ces risques (financiers) entre les individus concernés. Il y a des gens qui ne pensent qu'à leur confort à court terme, il y a des gens qui n'ont pas d'enfants, il y a des gens qui n'aiment pas l'humanité, ni la planète, mais il y en a d'autres qui ont des goûts différents et qui sont prêts à payer (pas seulement en termes monétaires directs) pour que leurs valeurs soient respectées.

171 Ni la science économique ni la science politique n'ont de solution indiscutable pour résoudre ce type de problème de décision. En revanche, la science économique découvre quelques propriétés qui permettent de donner une idée de la manière de calculer les risques. Il s'agit d'ébauches, qui présupposent l'existence d'organisations sociales qui sont vraisemblablement implicites dans les modèles, mais qui ont l'avantage de donner une idée de ce qu'on peut faire, de ce qu'on pourrait organiser, de ce que la science juridique et la science politique pourraient élaborer, avec l'aide des sciences sociales, de l'anthropologie, de la psychologie et de l'histoire, pour utiliser au mieux les résultats des sciences physiques, chimiques et biologiques.

Le calcul économique

172 Le calcul économique, l'analyse coûts-bénéfices, la rationalisation des choix budgétaires, voilà différentes appellations pour ce qui est souvent considéré comme une boîte noire derrière laquelle se cachent les décideurs publics, ou individuels, pour justifier des choix qui ne font pas l'unanimité et qui n'ont pas toujours fait preuve de l'efficacité attendue. Mais de quoi s'agit-il ? Tout simplement d'un ensemble de méthodes qui ont pour but de calculer les bénéfices attendus de projets, bénéfices que l'on puisse comparer aux coûts de réalisation. Ces méthodes évoluent parallèlement aux développements de la science économique et des moyens et méthodes de calcul. Toutefois, elles s'adaptent aussi aux autres connaissances scientifiques, notamment celles qui font des apports technologiques, mais aussi celles qui permettent de mieux comprendre les comportements humains. Le calcul économique développé sous Colbert n'a pas grand-chose à voir avec ce qu'il est de nos jours, mais il a toujours pour vocation d'aider à prendre des décisions, publiques ou privées. Aider, éventuellement justifier ou du moins expliquer, mais sans prétention à se substituer aux décideurs individuels et, *a fortiori*, collectifs. Bien qu'elles soient parfois sophistiquées, ces méthodes n'ont pas vocation à être enfermées dans une boîte noire ; elles gagnent au contraire à être mieux connues et à apparaître aux côtés des solutions qu'elles préconisent.

173 L'émergence de nouvelles techniques industrielles, de nouveaux instruments de gestion, mais aussi celle de principes d'éthique – tel le principe de précaution – qui se substituent aux précédents, nécessitent une remise en cause permanente des méthodes d'analyse des coûts et des bénéfices. S'il est un fait que de nombreuses administrations se cantonnent dans des comportements qui ont fait leurs preuves, en d'autres temps, il ne faudrait pas jeter le bébé calcul économique avec l'eau du bain des méthodes révolues ! Le calcul économique peut, et doit, se référer à toutes les avancées les plus récentes de la science économique et des autres sciences. On ne peut pas demander aux administrations de connaître des avancées qui ne sont pas enseignées couramment à l'Université ni dans les écoles d'ingénieurs, mais on peut souhaiter qu'elles cherchent à savoir si des méthodes existantes peuvent aider à résoudre les problèmes qui se posent à elles. Le calcul économique qui a été enseigné il y a trente ans n'est qu'une introduction à celui qui devrait être présenté aujourd'hui.

174 Le principe du calcul des coûts et des bénéfices que l'on veut comparer repose sur un principe d'efficacité face à la rationalité individuelle: toute décision qui aurait été prise avec un autre critère que celui qui est calculé serait dominée par celle qui optimise notre critère.

175 Cela signifie que, si un individu ou une organisation mettait en cause la décision prise, on pourrait lui montrer que l'on peut obtenir des bénéfices nets de cette décision, supérieurs à ceux de la décision qui optimise son propre critère.

- 176 Le principe de rationalité est le suivant: si un bien  $x$  a une valeur future  $X$  et si  $K$  est son prix présent, l'achat de tout bien  $x'$  ayant la même valeur future  $X$ , mais ayant un prix  $K'$  supérieur à  $K$ , est une décision dominée par celle qui consiste à acheter le bien  $x$ . En effet, en achetant le bien  $x$ , on pourra le revendre au prix  $X$  et acheter  $x'$  en ayant réalisé un bénéfice  $K' - K$ . Le principe s'applique aussi bien dans le cas où  $x$  est un contrat dont les paiements futurs sont représentés par une variable aléatoire  $X$  et dont le prix présent est  $K$  et  $x'$  un autre contrat de mêmes paiements  $X$  et de coût  $K'$ .
- 177 Concernant un bien  $x'$  qui n'est pas négocié mais dont le bénéfice futur que l'on en dégagera est supposé être égal à  $x$ , la décision de l'acquérir ne peut se faire qu'au coût  $K$ . En effet, si ce bien est évalué, sur la base d'un critère individuel, à une somme présente  $K'$  supérieure à  $K$ , on obtiendra, en acquérant  $x$  un bénéfice futur supérieur de la quantité  $(K' - K)(1 + r)$ , où  $r$  est un taux d'intérêt de marché, à celui procuré par  $x'$ . Si  $K'$  est inférieur à  $K$ , il n'est pas non plus nécessaire de l'acquérir puisqu'en empruntant la somme  $K - K'$  au taux  $r$ , on pourra acheter une quantité supplémentaire  $(K - K')/K$  du bien  $x$  en obtenant un bénéfice futur  $X + X(K - K')/K - (1 + r)(K - K')$  qui est nécessairement égal à  $X$ . En effet, puisque  $r$  est un taux de marché sans risque, il est au plus égal au taux de rendement d'un bien:  $(X - K)/K = r$ . L'utilisation, dans le calcul, d'un taux d'escompte de marché plutôt que d'un taux individuel exprimant la préférence pour le temps ou pour le risque est justifiée par un raisonnement identique.
- 178 L'extension de ce principe à un univers incertain et dynamique peut se faire grâce aux développements récents de la théorie financière. Les modèles permettant de déduire le prix théorique d'un contrat dérivé d'autres instruments financiers sont fondés sur la théorie économique des équilibres et sur une formalisation des processus de prix semblable à celles utilisées en physique (processus de Wiener, approximation binomiale, processus de Poisson, etc.).
- 179 Par extension, certains risques, naturels ou pas, mais dont on connaît le processus, peuvent être évalués par résolution de systèmes d'équations différentielles stochastiques. De plus, ces modèles dynamiques sont particulièrement adaptés à l'évaluation des options (décisions futures dépendant d'arrivées d'information). La théorie des options réelles<sup>17</sup> regroupe différentes techniques qui sont utilisées pour les investissements industriels, notamment pour prendre en compte les aspects dynamiques des problèmes de décision dans l'incertain.
- 180 Par ailleurs, la même théorie, lorsqu'il est possible de trouver un actif financier négocié (ou un portefeuille) qui couvre un risque, nous permet d'évaluer ce risque par le prix de l'actif de couverture (le coût de formation du portefeuille de couverture). Ce principe général d'évaluation des risques suggère alors différentes méthodes de construction de portefeuilles d'actifs négociés qui couvrent ces risques. Ces méthodes sont fondées sur des données passées. Elles peuvent l'être aussi sur des relations de cause à effet entre des conséquences futures et des phénomènes observés par le passé. Dans tous les cas, la construction du portefeuille de couverture d'un risque est fondée sur des méthodes statistiques et l'évaluation qui s'en déduit n'est qu'une indication « compte tenu des connaissances scientifiques du moment ».
- 181 La description de l'incertitude qui définit les risques au sens économique du terme doit être le fruit d'une coopération entre les sciences qui décrivent les phénomènes, celles qui décrivent les comportements humains et celles qui en étudient les lois et le fonctionnement sociopolitique. Tout au bout de la chaîne des connaissances, le calcul

économique permet de comparer différentes décisions et de trouver celles qui aient un coût « économiquement acceptable ».

#### Conclusion

- 182 Le principe de précaution nous presse de prendre des décisions sans attendre « compte tenu des connaissances scientifiques du moment ». La science, ou la connaissance si l'on préfère, n'est pas l'apanage des sciences non-humaines, c'est avec toutes les connaissances dont nous disposons qu'il faut décider, et, ne rien décider ou ne pas le faire assez tôt serait souvent plus risqué que de le faire sans tarder. Les connaissances futures nous aideront à mieux gérer les situations qui se présenteront et dont certaines auraient été sous-évaluées malgré le soin qu'on aura pris de tenir compte de la possibilité de leur émergence. Ces connaissances seront le fruit d'interactions entre toutes les sciences, ce qui, en soi, nécessite une révolution dans les comportements. Cette révolution que nous voyons se faire dans les milieux politiques et scientifiques (à la suite de la prise de conscience des peuples à disposer de leur environnement !) est la première étape de la mise en pratique du « principe de précaution ».

#### Table ronde

- 183 La table ronde, animée par Girolamo Ramunni, rassemblait Gilles Bonin, professeur et directeur adjoint de l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie, Jean-Yves Bottero, directeur de recherche au CNRS, CEREGE, Jean Dufour, conseiller général des Bouches-du-Rhône et Louis-André Gérard-Varet, directeur d'études de l'EHESS et membre du Groupement de recherche en économie quantitative d'Aix-Marseille (GREQAM). La question de la demande sociale mais aussi son rôle dans la définition des questions que les scientifiques traitent ont paru à même d'amorcer la discussion.
- 184 J. Dufour s'exprime le premier. Il dit trouver dans l'intervention de R. Kast une idée qu'il fait sienne : il ne faut plus travailler en termes de juxtaposition de disciplines mais bien de construction d'objets communs entre disciplines. « Il me semble que la demande sociale s'exprime justement sur des questions qu'il s'agit de construire en commun. » Il ne s'agit pas de mettre en contact des mondes qui n'ont pas de contacts entre eux, mais de construire une nouvelle démarche scientifique, fondée sur la construction d'objets de référence.
- 185 La vision que l'on a de la manière de co-construire les objets de recherche a des conséquences importantes. « À partir du moment où on a défini un objet en commun, il y a vraiment une co-construction des savoirs possible. Il me semble que cette co-construction des savoirs est d'autant plus aisée que le premier terme a été bien posé. Je pense en outre que cela met en question la notion d'expert, de l'expert complètement en dehors, qui regarde et juge le monde. On voit bien dans les débats actuels, notamment ceux à propos de la "vache folle" ou des organismes génétiquement modifiés (OGM), qu'il y a des avis divergents qui sont formulés. Ce qui empêche que soit négligée la question de la responsabilité des scientifiques vis-à-vis de la société. Je pense que l'exercice de la science, de la construction des savoirs, change aujourd'hui d'échelle parce que cette demande sociale n'est plus cantonnée à quelques décideurs mais irrigue l'ensemble de la société. »
- 186 L.-A. Gérard-Varet intervient. Il souligne l'aspect de nouveauté qui implique de concevoir de nouveaux instruments en faveur de telle ou telle démarche. La relation expert décideur-société constitue le point central. En particulier, il faut savoir comment se définit le rôle des décideurs qui se situent à des niveaux divers : collectivités territoriales, appareil d'État, organismes supranationaux À l'occasion d'un travail mené sur l'action

collective face aux nouveaux risques, l'élément qui a frappé les chercheurs a été la nécessité de décomposer en niveaux différents d'espaces publics concernés. Certains problèmes sont de nature globale, comme la question de la couche d'ozone, d'autres sont apparemment locaux, comme les inondations. Mais il s'agit d'une « fausse localité » car les espaces publics concernés dépendent des dispositions collectives, nationales et des incitations qui sont décidées à ce dernier niveau. Les impacts sont locaux, mais les mécanismes qui déclenchent le processus ne le sont pas. Il est absolument nécessaire, dans le cas des risques environnementaux, « d'avoir une bonne décomposition de ce qu'on pourrait appeler une règle de subsidiarité de l'action collective ». Admettons que ce premier pas soit franchi, que l'on sache quel type de gestion relève d'un département, « il manque quelque chose : le mécanisme de signaux qui doivent déclencher l'intervention ; il y a une réflexion à mener : qu'est-ce qu'un état critique ? Les signaux qui déclenchent des dispositifs restent à mettre en œuvre ». L'une des raisons de ces manques est l'absence de formation commune. « Nous n'avons pas suffisamment de formations pluridisciplinaires. Les programmes de formation sur ces questions restent relativement spécialisés, voire très spécialisés; ces formations sont d'ailleurs assez difficiles à concevoir. Réaliser une formation pour ce que j'appellerais la gestion de l'environnement, sur des bases pluridisciplinaires vraiment intégrées, c'est assez délicat à mettre en œuvre mais je crois que c'est absolument nécessaire pour demain. »

- 187 Interviennent ensuite G. Bonin et J.-Y. Bottero. L'accent est mis sur les diverses procédures de décisions entre scientifiques et politiques. Certes, la formation est un élément crucial. Il faut reconnaître que des efforts vers une formation pluridisciplinaire existent depuis un certain temps, qui font qu'un étudiant en sciences dites dures va recevoir une formation de base en sciences économiques, et *vice-versa*. Il faudrait former des spécialistes mais avec des connaissances, avec une ouverture vers d'autres sciences et qui vont leur permettre de discuter de manière beaucoup plus sensée sur les problèmes avec, par exemple, des politiques.
- 188 Il est souligné que, dans le domaine de l'environnement, il y a eu une évolution considérable de la pensée et du mode de fonctionnement du chercheur. Il prend comme exemple les études sur la forêt méditerranéenne. Il y a trente ans, les naturalistes la voyaient comme une curiosité intéressante et ils développaient un certain nombre d'investigations naturalistes. Aujourd'hui, la forêt méditerranéenne a acquis une valeur qui pousse le chercheur écologue à essayer de répondre à un certain nombre de questions, mais d'une manière totalement différente. L'approche intellectuelle est modifiée car dans de nombreux domaines, au-delà de la dimension relevant des sciences dures, il y a une dimension sociale que le chercheur ne peut plus ignorer. Après ce premier tour de table, la parole est donnée à la salle. Plusieurs questions reviennent sur le rôle de la demande sociale dans le changement du regard porté par les chercheurs sur l'objet de leur recherche. J. Dufour remarque qu'il ne faut pas entendre la demande sociale au sens étroit, comme la demande de solutions immédiates à des problèmes, mais comme le constat que l'on vit « une mutation du monde ; la demande sociale appelle non pas des réponses technicistes mais une aide pour construire des réponses de caractère politique afin de modifier le cours des choses ». La demande sociale peut servir à construire de nouveaux objets de recherche et de nouveaux questionnements. « Cela est valable pour les scientifiques comme pour les politiques, car la demande sociale s'exerce sur ces deux groupes avec la même force. On demande aux scientifiques de résoudre le problème de santé publique, par exemple, et on demande aux politiques de résoudre ce

même problème. On est dans le même bateau. On a à traiter ensemble des problèmes, mais il faut que chacun joue son rôle dans sa spécificité. C'est une façon de dépasser la question de l'utilitarisme. »

- 189 A. Pavé intervient alors pour demander que l'on précise cette question de la demande sociale. « Comment elle émerge, comment elle se forme, comment elle s'énonce. Ce sont des choses que l'on n'a jamais réellement étudiées. Le scientifique n'est pas complètement innocent dans l'expression de la demande sociale. Il en est souvent à l'origine. Il détecte les problèmes, c'est son métier pourrait-on dire, et il est capable de les énoncer. Ces problèmes sont récupérés, transformés. C'est ce qu'on appelle dans 90 % des cas la demande sociale. Quant à l'interdisciplinarité, je ne crois pas à des formations interdisciplinaires, mais à des formations disciplinaires fortes, avec des ouvertures pour créer une certaine sensibilité à d'autres domaines scientifiques. Je trouve tout à fait bizarre que les mathématiciens, et aussi les physiciens, ne sachent pas un petit peu de biologie, pour ne pas parler des sciences de l'homme et de la société. Ces ouvertures ne doivent pas remettre en cause une formation disciplinaire forte. La situation est d'ailleurs bien plus grave au niveau de l'enseignement secondaire. L'enseignement scientifique à ce niveau est tout simplement catastrophique. On enseigne des éléments de tout, et il vaudrait mieux réduire les programmes plutôt que de dispenser des sujets sans aucune structure. »
- 190 B. Hamelin souligne la place que peuvent jouer les écoles doctorales dans l'ouverture des jeunes doctorants à d'autres disciplines. À Aix-Marseille, l'école doctorale intitulée « sciences de l'environnement » oeuvre dans le sens de la connaissance mutuelle entre les différentes disciplines scientifiques concernées et il faudrait étendre cela aux sciences de l'homme et de la société, avec l'économie, les sciences juridiques et sociologiques. L'école doctorale est le lieu où l'on peut concilier une formation disciplinaire solide et la connaissance des autres approches. B. Hamelin soulève un autre problème : « Le niveau de réponse portée par la concertation interorganismes. Il faut aller vers des structures de concertation entre organismes qui traitent d'environnement. »
- 191 Pour L.-A. Gérard-Varet, il faut bien distinguer, sur la question de l'interdisciplinarité, entre formation et recherche. « Je crois que les questions en matière de recherche sont plus compliquées que ce qui semble être sous-entendu. Il y a des problèmes de choix de modèles, il n'est pas simplement question d'échanges à bâtons rompus. Il y a une question de modélisation. Une stratégie de modélisation tendant à incorporer des phénomènes physico-naturels et des mécanismes économiques est un enjeu en soi, non seulement du point de vue scientifique, mais aussi du point de vue des retombées pratiques. L'exemple que je veux citer est celui d'une invitation reçue en tant qu'économiste à évaluer, de mon point de vue, un modèle déjà construit, en faisant appel aux disciplines les plus diverses, de transfert de polluants sur une zone donnée. Il apparaît clairement que la démarche est complètement ridicule et on ne peut pas faire un travail économique de ce type. L'enjeu réel est de mettre les économistes dans le processus de modélisation et de collecte de données. » Opposé à une formation dite interdisciplinaire ou « affaiblie par mixité », car cela revient à donner un vernis superficiel qui peut conduire à des catastrophes, L.-A. Gérard-Varet explique que « l'environnement n'est pas un objet économique ; il y a des problèmes économiques de l'environnement mais il n'y a pas un objet économique environnement et, donc, ce sont des objets économiques spécifiques qui doivent être mobilisés pour traiter des questions d'environnement. Ce qui pose la question de la relation entre l'économiste et les objets naturels dans une situation qui, elle, n'est pas

complètement naturelle pour ledit économiste ou pour les autres spécialistes des sciences sociales. C'est dans ce sens-là, je crois, qu'il y a en même temps énormément de sollicitations qui naissent de la demande sociale et en même temps beaucoup de tri à effectuer. »

- 192 A. Pavé intervient pour préciser que la démarche interdisciplinaire est possible si ceux qui sont compétents dans leurs disciplines acceptent de faire l'effort de construire une représentation commune de l'objet sur lequel ils travaillent, en particulier l'objet environnement. La fabrication de modèles peut constituer le trait d'union entre spécialistes, pour se construire effectivement cette représentation commune.
- 193 J.-L. de Beaulieu remarque qu'une des difficultés consiste dans le vocabulaire. « Souvent les barrières entre disciplines sont des barrières de vocabulaire. Si on doit faire des opérations de formation, que chacun garde sa spécificité, mais qu'il apprenne à comprendre ce que dit l'autre, ce serait déjà un grand pas en avant. »
- 194 J. Dufour conclut cette table ronde en soulignant l'importance de la mémoire, élément constitutif de la demande sociale. Il plaide pour l'ouverture vers les sciences de l'homme et de la société : l'économie, la sociologie, la psychologie, mais en élargissant l'ouverture à la philosophie, à l'histoire des techniques et des sciences, à la littérature.

#### Conclusion

- 195 La parole est alors donnée à Christian Lévêque pour conclure les travaux de cette journée.
- 196 « Je crois que le mot conclure est un bien grand mot. Je vous propose plutôt qu'une conclusion des propos d'étape, par rapport à tout ce qui s'est dit et à tout ce qui reste à dire sur ces questions d'environnement.
- 197 Puisque cette réunion s'inscrit dans une démarche historique, il est bon de rappeler tout d'abord que le terme environnement est un terme qui a beaucoup évolué au cours des dernières décennies. Étymologiquement, l'environnement c'est ce qui nous entoure, et c'est vrai qu'il y a quelques décennies, on parlait essentiellement d'environnement à propos de l'atmosphère, des forêts, des rivières, qui étaient les milieux naturels avec ou sans l'homme. Progressivement, le terme environnement a pris un sens beaucoup plus précis, qui est l'environnement de l'homme. Je dirais, de manière un peu provocatrice, que c'est tout ce qui dérange le cadre de vie de l'homme, par rapport à une représentation idyllique du paradis perdu. En particulier, certaines activités humaines développent des nuisances qui sont de plus en plus mal supportées par une société qui souhaite un cadre de vie adapté à ses aspirations. Ces inconvénients étaient d'abord surtout d'ordre physique (des crues intempestives, des modifications du climat) et puis, de plus en plus, on s'est préoccupé de l'homme lui-même, de sa santé. Le concept d'environnement n'arrête donc pas d'évoluer, dans un contexte dynamique. Il est important de comprendre toute cette évolution qui a des conséquences opérationnelles évidentes.
- 198 Je vais prendre un exemple, qui est celui de la biodiversité. Il y a longtemps que les gens comptent, évaluent, décrivent les plantes et les insectes, qu'ils font des inventaires. Et puis, il y a une quinzaine d'années, on s'est rendu compte que les activités humaines détruisaient de manière inquiétante le milieu naturel et les espèces qui y vivent. C'est l'origine du concept de biodiversité : le fait que les activités humaines ont un impact et détruisent, avec une ampleur sans précédent (dit-on), de nombreuses espèces et de nombreux écosystèmes. On voit ainsi que la biodiversité est un véritable problème de société qui soulève la question des modes de développement dans un contexte de

développement durable. Les solutions sont bien évidemment à rechercher dans les modèles que les sociétés cherchent à promouvoir en matière de développement, ainsi que dans les priorités données à un certain nombre d'activités. La biodiversité, ce n'est donc pas l'inventaire des espèces, ni la connaissance plus approfondie du monde vivant. Ces activités peuvent être utiles à la conservation de la biodiversité, mais la vraie question est ailleurs : les causes de l'érosion de la biodiversité et les solutions pour y remédier sont à rechercher dans les dynamiques sociales. On peut faire de la recherche-alibi autour de cette question, mais c'est bien au niveau des comportements sociaux qu'on doit situer le problème de l'érosion de la biodiversité.

- 199 Parce que nous sommes à Marseille, nous avons abordé aujourd'hui un certain nombre de grands thèmes en matière d'environnement. On a d'abord porté le regard sur la mer ; ensuite on l'a porté sur la forêt ; et puis très peu, juste par le petit bout de la lorgnette, sur la ville. Il s'agit de trois entités, trois échelles aussi, d'approche de l'environnement.
- 200 C'est d'abord tout ce qui est issu, en schématisant, des sciences de l'univers porteuses de la dynamique de l'environnement planétaire que nous voyons aujourd'hui se développer. Pendant longtemps on a dit que les sciences de l'univers parlaient d'environnement au sens large, pas de l'environnement de l'homme. Et puis on s'aperçoit qu'avec les changements climatiques, avec le problème du trou d'ozone, l'homme est directement concerné. C'est une question d'échelle, en sachant que les problèmes apparaissent au niveau planétaire, mais que c'est au niveau local que se trouvent les solutions concernant le gaz carbonique ou le méthane. On est dans une interaction global-local.
- 201 Ensuite, il y a une approche plus anthropocentrée qui est celle de l'environnement immédiat de l'homme, celle que nous avons essayé de pratiquer au niveau du PIREN, puis du Programme Environnement. L'homme est plus au centre des préoccupations, avec deux grands ensembles, qui correspondent aussi à des échelles différentes. D'une part, tout l'héritage historique de ce qu'on peut appeler l'environnement rural, héritage de l'écologie des milieux naturels qui s'est arrogé d'une certaine manière des prérogatives en matière d'environnement dit naturel, c'est-à-dire les forêts, les rivières, les lacs, les milieux côtiers. Soit dit en passant, il est regrettable que certains collègues pensent que l'écologie doive s'approprier les recherches sur l'environnement. L'écologie doit suivre sa propre dynamique, de même que les sciences de l'univers ont leur propre dynamique, avec bien entendu un certain nombre de secteurs d'application dans le domaine de l'environnement. D'autre part, il y a la ville, secteur beaucoup plus récent, qui a été davantage investi par les sciences sociales, avec de nombreux avatars. Il y a eu au CNRS un certain nombre de tentatives pour créer une section sur la ville, et pour créer des programmes Ville ; cela n'a pas toujours très bien marché. Mais la ville est un vrai problème d'environnement, bien que ce secteur au CNRS ne soit pas suffisamment pris en compte. Il y a beaucoup à faire en ce domaine.
- 202 J'essaie de toujours inscrire ces propos d'étape dans une perspective historique pour dire qu'il y a deux grandes tendances en science qui sont tout à fait apparentes dans le domaine de l'environnement. Il y a d'une part l'approche holistique des questions d'environnement, l'approche-système, comme on dit à l'heure actuelle. Cela nous vient des sciences physiques : il s'agit de comprendre comment fonctionne un système dans son ensemble, quelles sont les interactions entre les constituants du système, les boucles de rétroaction, etc. C'est le microscope de Joël de Rosnay, si vous avez lu son livre qui est excellent, me semble-t-il, pour l'éducation de tout un chacun. Cette approche système est présentée parfois sous l'aspect *ecosystem-management*, ou gestion intégrée, mais c'est

toujours la même idée : quand on touche à une composante, c'est l'ensemble du système qui va réagir. On en voit tout de suite les limites : il est difficile de tout étudier et il faut faire des choix sur le plan opérationnel. L'autre approche, toujours aussi traditionnelle, c'est le réductionnisme. On sélectionne un secteur que l'on va étudier et approfondir en détail. Il y a effectivement besoin, dans certains cas, comme pour le bruit, de répondre à des questions d'environnement par des approches sectorielles. Dans des domaines tels que l'utilisation des pesticides par exemple, on peut aussi répondre par les approches sectorielles. Mais ce n'est pas toujours le cas et pour beaucoup de questions liées à l'environnement, en réalité, on doit gérer un système de conflits où chacun des acteurs a des activités qui interfèrent sur celles des autres et à propos desquelles il faut faire des choix. La difficulté de l'arbitrage conduit à la difficulté de la prise de décision, d'où le fait que l'on reporte cette prise de décision en faisant appel à ce que j'appelais tout à l'heure de la recherche-alibi, c'est-à-dire qu'on demande plus d'informations parce qu'on ne veut pas prendre de décision tout de suite.

- 203 Voilà quelques perspectives que l'on pourrait essayer de creuser à l'heure actuelle dans une approche un peu historique des questions d'environnement. Ce qui me frappe néanmoins, c'est l'évolution rapide de la perception de l'environnement. La sensibilisation aux risques physiques de type crue, ou climat, n'a pas vraiment mobilisé les foules parce que les échéances sont lointaines, dans cent ou deux cents ans ; la biodiversité a mobilisé un peu plus le public pour des raisons affectives, éthiques : il y a un certain nombre de mouvements qui sont assez actifs, tels que les organisations non gouvernementales de protection de la nature, etc. Mais à l'heure actuelle, les gros problèmes d'environnement paraissent se focaliser sur la santé humaine. Il est intéressant de voir sur le Web ou dans certains journaux spécialisés le nombre de publications qui font état des maladies émergentes ou réémergentes. Il est tout à fait important de voir aujourd'hui le nombre de travaux qui touchent à la résistance, résistance d'un certain nombre de vecteurs aux pesticides par exemple, des bactéries aux antibiotiques, etc. Toutes les maladies émergentes liées aux transferts d'espèces, à de nouveaux contacts entre des espèces qui n'avaient pas de raison de se rencontrer autrefois, sont des vrais problèmes d'environnement au sens strict. Ce n'est plus ni loin ni exotique, c'est maintenant, c'est dans notre assiette, c'est dans notre quotidien. Et, de ce fait, on commence à se préoccuper un peu plus de ces questions.
- 204 Je voudrais pour terminer mettre l'accent sur un point dont on a beaucoup discuté. Le secteur de l'environnement, si on le compare à d'autres secteurs scientifiques, est un secteur qui est complètement désorganisé. Je vais prendre quelques exemples. La météorologie nationale est un secteur qui a pour objectif de faire de la prévision météorologique. Pour y parvenir, que fait-on ? On s'est organisé. On collecte de l'information, on la gère, on la traite, on vend même parfois de la prévision météorologique, avec un certain succès. Le domaine de l'environnement n'est pas très différent du domaine de la météo. On nous demande finalement de faire de la prévision, d'être capable de faire des recommandations à des gestionnaires, à des utilisateurs, en leur disant : voilà, nous, scientifiques, pensons qu'il serait préférable d'utiliser tel ou tel produit, ou bien de faire tel type d'aménagement. Mais on fait de la prévision parfois au doigt mouillé. Parce qu'on n'a pas l'information, ou que l'on ne gère pas l'information disponible sur le long terme. Le plus souvent, on fait appel à la mémoire de chacun. Mais quand on traite de questions aussi complexes et diverses que celles qui concernent l'environnement, il faudrait mettre en oeuvre une véritable approche systémique. Il est

clair que si l'on n'est pas capable de gérer l'information, de l'utiliser grâce à des modèles qui nous permettent effectivement de croiser l'économie et la physique, ou la biologie et la physique, alors on ne répondra pas correctement aux questions posées par la société. Chacun dans sa discipline sait parfaitement que les transferts d'échelle ne sont pas résolus, et qu'on se heurte à de vrais problèmes scientifiques pour y parvenir.

- 205 Le grand enjeu, me semble-t-il, à l'heure actuelle, c'est de pouvoir mettre en place dans le domaine de l'environnement une coordination des activités qui soit un peu identique à celle de la météo, ou à celle que l'on connaît dans les géosciences, pour lesquelles il existe des observatoires. En hydrologie, on a un début d'organisation. Dans l'environnement, on ne l'a pas. On est devant un problème difficile qui est de savoir comment nous, communauté de scientifiques très hétérogène, parce que nous avons dans le domaine de l'environnement des compétences extrêmement diverses, allons nous organiser pour être capables d'utiliser l'information que nous collectons, de la gérer et de l'exploiter de manière à pouvoir mieux répondre qu'on ne le fait à l'heure actuelle aux questions qui nous sont posées par la société. C'est l'enjeu des années à venir, en France surtout, où nous constatons, j'ai parfois tendance à le dire, une paupérisation des recherches sur l'environnement.
- 206 Je conclurais sur ces quelques mots. La dimension historique pour moi a un énorme intérêt : on ne peut pas travailler sur l'environnement actuel sans se pencher sur le passé pour comprendre les effets retards, le poids des concepts et des paradigmes. Mais il y a les concepts, les idées, et puis il y a l'organisation. Et je suis de ceux qui pensent que dans certains domaines, que ce soit la météorologie, la fusée Ariane ou l'environnement, on ne peut pas répondre aux questions qui nous sont posées simplement par des appels d'offres de courte durée. Il faut organiser les recherches à long terme autour d'objets, comme le font d'autres collègues dans d'autres domaines, de manière à pouvoir faire avancer les connaissances en matière d'environnement. »

---

## BIBLIOGRAPHIE

### SÉLECTION BIBLIOGRAPHIQUE

- L. AFFRE, THOMPSON et M. DEBUSSCHE, « Genetic structure of continental and island populations of the Mediterranean endemic *Cyclamen balearicum* (Primulaceae) », *American Journal of Botany*, 84, p. 437-451, 1997.
- V. ANDRIEU-PONEL, P. PONEL, H. BRUNETON, P. LEVEAU, J.-L. DE BEAULIEU, « Palaeoenvironments and cultural landscape of the last 2000 years reconstructed from pollen and coleopteran records in the lower Rhône valley », southern France. *The Holocene*, 10, 3, p. 341-355, 2000.
- G. Aubert, *Les Ericacées en Provence. Répartition, édaphologie, phytosociologie croissance et floraison*, thèse ès sciences, université d'Aix-Marseille III, 283, p. 1976.

- C. BALLINI et G. BONIN, « Nutrients cycling on *Ulex parviflorus* Pourr. scrubs in Provence (south eastern France). I Nutrient supplies to the soil through litter and pluvioléchates », *European J. of Soil Biol.* 30 n° 3, p. 107-118, 1994.
- L. BARBARO, E. CORCKET, T. DUTOIT et J.-P. PELTIER, « Réponses fonctionnelles des communautés de pelouses calcicoles aux facteurs agro-écologiques dans les Préalpes françaises », *Canadian Journal of Botany*, 78, p. 1010-1020, 2000.
- M. BARBÉRO, *Études phytosociologiques et écologiques comparées des végétations orophiles alpine, subalpine et mésogéenne des Alpes maritimes et ligures*, thèse ès sciences, université d'Aix-Marseille, 1972.
- M. BARBÉRO et P. QUÉZEL, « Place, rôle et valeur historique des éléments laurifoliés dans les végétations préforestières ouest-méditerranéennes », *Ann. Botanica*, 52, p. 11-31, 1994.
- J.-L. DE BEAULIEU, M. COUTEAUX, A. PONS, M. REILLE, H. TRIAT-LAVAL, « Première approche d'une histoire postwürmienne de quelques taxons arboréens dans le sud-est de la France », *Rev. paléobiologie*, vol. spéc. p. 11-24, 1984.
- J.-L. DE BEAULIEU, J. CLERC, M. REILLE, « LateWeichselian fluctuations in the French Alps and Massif Central from pollen analysis », in N.A. Morner et W. Karlen (éd.) *Climatic changes on a yearly to millennial basis*, D. Reidel Pub. Comp., p. 75-90, 1984.
- J.-L. DE BEAULIEU et M. REILLE, « The last climatic cycle a la Grande Pile (Vosges, France) A new pollen profile », *Quaternary Science Review*, vol. 11 (4), p. 431-438, 1992.
- J.-L. DE BEAULIEU, H. RICHARD, P. RUFFALDI et J. CLERC, « History of vegetation, climate and human action in the French Alps and the Jura over the last 15 000 years », in *Dissertationes Botanicae*, 234, p. 253-275, Festschrift G. Lang. A. F. Lotter et B. Ammann (éd.), 1994.
- G. BONIN, « Contribution à la connaissance de la végétation des montagnes de l'Apennin centro méridional », thèse ès sciences, université d'Aix-Marseille III, 318 p., 1978.
- G. BONIN, M. BARBÉRO, R. LOISEL et P. QUÉZEL « Successions and regenerating after clear-cutting in French Mediterranean forest », *Terrestrial and Aquatic ecosystems, perturbation and recovery*, Rayera, Ellis Horwood Edit. Lim., p. 237-247, 1991.
- G. BONIN, R. LOISEL, « Effects of human impact in forestal environment : the tunisian case », in *Functioning and dynamics of perturbed ecosystems*, Bellan, Bonin, Emig Ed. Lavoisier (C. R. VI<sup>e</sup> congrès européen d'écologie), p. 609-623, 1995.
- J. Braun-Blanquet, *L'Origine et le développement des flores dans le Massif central de France*, 282 p., Lhomme Edit., Paris, 1923.
- R. CHEDDADI, J.-L. DE BEAULIEU « European Pollen Database », in *Global Palaeoenvironmental Data*, PAGES Workshop Report Series, 9 5-2, p. 57-60, 1995.
- R. CHEDDADI, G. Yu, J. GUIOT, S.-P. HARRISON, I.-C. PRENTICE, « The climate 6 000 years ago in Europe », *Climate Dynamics*, 13, p. 1-9, 1997.
- M. COUTEAUX, « Climatic and glacial fluctuations during the Late-Glacial and the Holocène in Oisans (Isère, France) », in *Climatic Changes on a Yearly to Millennial basis* (N. Morner et W. Karlen éd.), p. 91-94, 1984.
- 6 S. CRIQUET, A.-M. FARNET, S. TAGGER, J. LE PETIT, « Annual variations of phenoloxidase activities in an evergreen oak liner : influence of certain biotic and abiotic factors », *Soil Biology & Biochemistry* 32, p. 1505-1513, 2000.

- T. DUTOIT, E. GERBAUD, J.-M. OURCIVAL, « Field boundary effects on soil seed banks and weed vegetation distribution in an arable field without weed control (Vaucluse, France) », *Agronomie*, 19, p. 579-590, 1999.
- A.-M. FARNET M. Roux, J. LE PETIT, « Genotypic variations among isolates of *Marasmius quercophilus*, a white-rot fungus isolated from evergreen oak liner », *Can. J. Botany*, 77, p. 884-890, 1999.
- S. FAYOLLE, A. CAZAUBON, K. COMTE et E. FRANQUET, « "The Intermediate Disturbance Hypothesis" : application of this concept to the response of epilithon in a regulated Mediterranean river (lower-Durance, south-eastern France) », 1998, *Archiv. für Hydrobiologie*, 143, p. 57-77, 1998.
- J. GAMISANS, « *La végétation des montagnes corses* », thèses ès sciences, université d'Aix-Marseille, 295 p., 1975.
- M. GRUBER, « *La végétation des Pyrénées ariégeoises et catalanes occidentales* » thèse ès sciences, université d'Aix-Marseille III, 305 p., 1978.
- F. GUIBAL, « *Contribution dendroclimatique à la connaissance de la croissance du cèdre de l'Atlas dans les reboisements du sud-est de la France* », thèse 3<sup>e</sup> cycle, université d'Aix-Marseille III, 136 p., 1984.
- J. GUIOT, J.-L. DE BEAULIEU, R. CHEDDADI, F. DAVID, P. PONEL et M. REILLE, « The climate in Western Europe during the last Glacial/Interglacial cycle derived from pollen and insect remains », *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 103, p. 73-93, 1993.
- A. GUISAN, L. TESSIER, J.-I. HOLTEN, W. HAEBERLI, M. BAUMGARTNER, « Understanding the impact of climate change on mountain ecosystems ; an overview », in *Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains*, A. Guisan, J. I. Holten, R. Spichiger and L. Tessier (éd.). Publication hors série, n° 8, des Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, p. 15-37, 1995.
- G. JALUT, A. ESTÉBAN-AMAT, Y. RIERA, S. MORA, L. BONNET, T. GAUQUELIN, M. FONTUGNE, « Holocene changes in the western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain » *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160, p. 255-290, 2000.
- S. JOUSSAUME et J. GUIOT, « Reconstruire les chauds et froids de l'Europe, comment concilier modèles numériques et données ? », *La Recherche*, n° 321, p. 54-59, 1999.
- L. LAURENT, « Esquisse de la végétation des Bouches-du-Rhône pendant les temps géologiques », in *Les Bouches-du-Rhône. Encyclopédie départementale*, t. 1 et 2, 1932.
- R. LOISEL, « *La végétation de l'étage méditerranéen du sud-est continental français* », thèse es sciences, université d'Aix-Marseille III, 384 p., 1976.
- F. MÉDAIL, P. QUÉZEL, « Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin », *Ann. Miss. Bot. Gard.*, 84, p. 112-127, 1997.
- F. MÉDAIL, P. QUÉZEL, « The phytogeographical significance of S. W. Morocco compared to the canary Islands », *Plant Ecology*, 140, p. 221-244, 1999.
- R. MOLINIER et H. PRAT, « Remarques sur l'évolution de la végétation et du climat en Provence », *Bull. hist. nat Marseille*, 3, p. 91-125, 1943.
- J. ORGEAS, G. BONIN, « Variabilité des nutriments foliaires de *Quercus suber* dans différentes situations écologiques dans le massif des Maures (Var, France) et relation avec la production de liège », *Ann. sci. forest.*, 53 (2-3), p. 615-624, 1996.

- N. POINSOT BALAGUER, « Effect of undergrowth clearing on evergreen oak litter decomposition and colonization by microarthropods », *Pedobiologia*, 40, p. 289-301, 1996.
- P. PONEL, « Les Coléoptères du Quaternaire : leur rôle dans la reconstruction des paléoclimats et des paléoécosystèmes », *Bulletin d'écologie*, 24, p. 5-16, 1993.
- A. PONS, *Le Pollen*, PUF, « Que sais je? », n° 783, 126 p., 2e édition, 1970.
- A. PONS, « Contribution de l'analyse pollinique à l'étude des changements de végétation et de climat en Europe », *Sécheresse*, 4, p. 233-240, 1993.
- A. PONS et P. QUÉZEL, « A propos de la mise en place du climat méditerranéen », *C. R. acad. sci.*, Paris, 327, 1998, p. 755-760.
- A. PON et M. REILLE, « Originalité de l'histoire climatique des pourtours de la Méditerranée occidentale durant le Pléistocène supérieur par rapport à celle de l'Europe occidentale », *Bull. soc. bot. fr.*, 131, *Actual. bot.* (2,3,4), 1984, p. 69-76.
- R. QUÉZEL, « La végétation du Sahara. Du Tchad à la Mauritanie », *Geobotanica selecta*, vol. II, 1965, 333 p., 72 fig., 15 cartes et 93 tableaux.
- C. RATHGEBER, A. NICAULT, J. GUIOT, T. KELLER, F. GUIBAL et P. ROCHE, « Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climate change and CO<sub>2</sub> increase using a statistical model », *Global and Planetary Change*, 2000.
- M. REILLE, *Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord*, Laboratoire de botanique historique et palynologie édit., Marseille, 1992, 519 p., 446 pl. photos.
- M. REILLE, A. ANDRIEU, J.-L. DE BEAULEU, « Les grands traits de l'histoire de la végétation des montagnes méditerranéennes occidentales », *Écologie*, 27 (3), p. 153-169, 1996.
- G. DE SAPORTA, *Le Monde des plantes à l'apparition de l'Homme*, Masson, Paris, 1879, 416 p., 118 fig., 13 pl.
- G. DE SAPORTA et A.-F. MARION, *L'Évolution du règne végétal. Les Cryptogames*, Germer Baillière & Cie éditeur, Paris, 1881, 238 p., 130 fig.
- F.-H. SCHWEINGRUBER, *Tree Rings*, Kluwer Academic publishers, Dordrecht, 1987, 276 p.
- N.-J. SHACKLETON, « Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed », *Nature*, 215, p. 15-17, 1967.
- T. TATONI, F. MAGNIN, G. BONIN, et J. VAUDOUR, « Secondary successions on abandoned cultivation terraces in calcareous Provence, I.-vegetation and soil », *Acta Ecologica*, p. 431-447, 1994.
- N. THOUVENY, J.-L. DE BEAULIEU, E. BONIFAY, K.M. CREER, J. GUIOT, M. ICOLE, S. JOHNSEN, J. JOUZEL, M. REILLE, T. WILLIAMS et D. WILLIAMSON, « Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism », *Nature*, 371, p. 503-506, 1994.
- P. C. TZEDAKIS, V. ANDRIEU, J.-L. DE BEAULIEU, S. CROWHURST, M. FOLLIERI, H. HOOGHMESTRA, D. MAGRI, M. REILLE, L. SADORI, N.-J. SHACKLETON, T.-A. WIJMSTRA, « Comparison of terrestrial and marine records of changing climate of the last 500 000 years », *Earth and Planetary Science Letter*, 150, p. 171-176, 1997.
- R. VERLAQUE, E. MÉDAIL, P. QUÉZEL et J.-F. BABINOT, « Endémisme végétal et paléogéographie dans le bassin méditerranéen », *Geobios*, mém. sp. 21, p. 159-166, 1997.
- E. VIDAL, P. ROCHE, V. BONNET et T. TATONI, « Nest-density distribution patterns in a Yellow-legged gull archipelago colony », *Acta Oecologica* (sous presse) 2001.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LA MODÉLISATION DES FEUX DE FORÊT

- F. A. ALBINI, « Thermochemical properties of flame gases from wildland fuels », USDA Forest Service Research Paper, INT. 243, 42 p., 1980.
- F. A. ALBINI, « A model for fire spread in wild-land fuels by radiation », *Combust. Sci. and Tech.*, vol. 42, p. 229-258, 1985.
- N. J. DE MESTRE, E.A. CATCHPOLE, D. H. ANDERSON, R. C. ROTHERMEL, « Uniform propagation of a planar fire front without wind », *Combust. Sci. and Tech.*, vol. 65, p. 231-244, 1989.
- W. H. FRANSEN, « Fire spread through porous fuel from the conservation of energy », *Combustion and flame*, vol. 19, p. 9-16, 1971.
- A. M. GRISHIN, A. D. GRUZIN, V. G. ZVEREV, « Study of the structure and limits of propagation of the front of an upsteam forest fire » (traduit du russe), *Fizika Goreniya i Vzryva*, vol. 21, n 1, p. 11,-21, 1985.
- A. M. GRISHIN, V. G. ZVEREV, S. V. SHEVELEV, « Steady state propagation of the top crown forest fires » (traduit du russe), *Fizika Goreniya i Vzryva*, vol. 22, n° 6, p. 101-108, 1986.
- M. LARINI, « The complete physical models. Short Course on Forest fire Behaviour Modelling », Luso-Portugal, 21-22 novembre 1998.
- A. G. Mc ARTHUR, « Weather and grassland fire behaviour », *Aust. For. and Timber Bureau*, n° 100, 1966.
- D. MORVAN, J. L. DUPUY, B. PORTERIE, M. LARINI, « Multiphase formulation applied to the modeling of fire spread through a forest fuel bed », Symposium on Combustion, 30 juillet-4 août 2000, Édinburgh, Écosse.
- I. R. NOBEL, G. A. BARY, A. M. GILL, « Mc Arthur fire danger meters expressed as equation », *Aust. J. Ecol.*, vol. 5, p. 201-203, 1980.
- PORTERIE, D. MORVAN, J. C. LORAUD, M. LARINI, « Firespread through fuel beds : modeling of windaided fires and induced hydrodynamics », *Physics of Fluids*, vol. 12(7), p. 1762-1782, 2000.
- R. ROTHERMEL, «A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels », USDA Forest service research paper, INT. 115, 40 p., 1972.
- P. H. THOMAS, « Rates of spread of some wind-driven fires », *Forestry*, vol. 44, p. 155-175, 1971.
- R. O. WEBER « Modelling fire spread », *Prog. Energy Combustion Sci.*, vol.17, p. 67-82, 1991.

## NOTES

- 1.Cf. Claude GAZANHES, « Du Laboratoire de la guerre sous-marine de Toulon au Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille » in *La Revue pour l'histoire du CNRS*, n° 2, mai 2000, p. 24-35.
- 2.Sur l'INAG, voir Gérard DARMON, « La mise en place d'un institut national au sein du CNRS : l'INAG », *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, numéro 1, Éditions du CNRS, 1988.
- 3.Une bibliographie exhaustive sur cette question est disponible auprès du Comité pour l'histoire du CNRS. En regard de cette communication, vous trouverez une sélection des ouvrages de référence les plus récents.

4. Il s'agit de la première synthèse des connaissances sur les relations entre répartition des flores, climat et végétation dans son introduction à la *Flore de France*, de Costes, en 1901.
5. *La Distribution géographique des végétaux dans la région méditerranéenne française*, 1937.
6. *L'Origine et le Développement des flores dans le Massif central français*, 1923.
7. P. Quézel a publié de nombreux articles sur ces recherches, le plus récent étant « Floristic composition and phytosociological structure of sclerophyllous matorral around the mediterranean », in F. DI CASTRI, D.-W. GOODALL et R.-L. SPECHT (éd.), *Mediterranean-Type Shrublands*, Elsevier, Amsterdam, 1981, p. 107-121.
8. Hypothèse du doublement de concentration du CO<sub>2</sub>, atmosphérique dans le cadre du programme européen FORMAT.
9. Ces mots sont dédiés à la mémoire de Françoise Serre-Bachet, décédée en novembre 1995. Les auteurs remercient ceux qui ont contribué à l'histoire de l'IMEP et dont les noms ne peuvent pas tous être cités, et enfin ceux qui nous ont apporté leur aide dans la rédaction de cet historique (en particulier, G. Bonin, directeur adjoint de l'IMEP, T. Tatoni et F. Médail du groupe d'écologie du paysage).
10. P.-A. FAVRE, « Sur la condensation des gaz par les corps solides et sur la chaleur dégagée dans l'acte de cette absorption - Sur les relations de ces effets avec les chaleurs de liquéfaction ou de solidification des gaz », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1854, t. 39, numéro 16, p 729-733.
11. P.-A. FAVRE, « Recherches thermiques sur la condensation des gaz par les corps solides et la chaleur dégagée dans l'acte de cette absorption - Relations de ces effets avec les chaleurs de liquéfaction et de solidification des gaz », *Annales de chimie et de physique*, 1874, 5<sup>e</sup> série, t. 1, p 209-261.
12. Collaboration avec la société Comex.
13. Collaboration avec Aluminium-Pechiney.
14. Collaboration avec la société Lyonnaise des Eaux.
15. Premières lois de protection de l'environnement, voir le livre de Luc FERRY : *Le Nouvel Ordre écologique*, pour une analyse de ces lois dans le contexte de l'évolution du mouvement écologique.
16. Les conditions de Arrow : pour qu'une fonction des préférences individuelles sur des conséquences alternatives représente une préférence collective : 1) le domaine du choix collectif inclut tous les ordres de préférences individuels ; 2) la restriction de la fonction à un couple de conséquences n'est fonction que des préférences individuelles sur ce couple ; 3) si tous les individus ordonnent une paire de conséquences de la même manière, la préférence collective respecte cet ordre.
17. Voir notamment, L. TRIGEORGIS, *Real Options*, The MIT Press, Cambridge, 1996.

## INDEX

**Mots-clés** : environnement