

Le courrier du CNRS 45

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

52 Fichier(s)

Les relations du document

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

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS 45, 1982-05

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

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

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/140>

Présentation

Date(s)1982-05

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

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

Information générales

LangueFrançais

CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x

Description & Analyse

Nombre de pages52

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 06/12/2024

LE COURRIER DU 45 **CNRS**



Depot des archives
de la Délégation Par Michel Ange
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette

Bimestriel — Mai 1982 — 15 F



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

15, quai Anatole France - 75700 Paris - Tél. : 555.92.25.

Directeur de publication : Wladimir Mercouroff

Secrétaire de rédaction : Martine Chabrier-Elkik

La vie des laboratoires : Véronique Brossollet

Entretiens : Monique Mounier

Comité de rédaction : Martine Barrère, Georges Chevallier, Robert Clarke, Michel Crozon, Bernard Dormy, Elisabeth Gordon, Gilbert Grynberg, James Hiéblot, Gérard Lilamand, Jacqueline Mirabel, Jean-Claude Porée, Jean-Claude Ribes, Janine Rondest, Jean Tavlitzki.

Abonnement et vente au numéro, le numéro 15 F.

Abonnement annuel : 55 F - 60 F pour l'étranger (voir bulletin p. 27-30).

Tout changement d'adresse doit être signalé au secrétariat de rédaction.

Revue bimestrielle comportant 5 numéros par an qui paraîtront ainsi pour l'année 1982 : n° 44 - mars, n° 45 - mai, n° 46 - juillet, n° 47 - septembre, n° 48 - novembre.

Nous remercions les auteurs et les organismes qui ont participé à la rédaction de ce numéro.

Les intertitres et les chapreaux introductifs ont été rédigés par le secrétariat de rédaction.

Les textes et illustrations peuvent être reproduits sous réserve de l'autorisation du directeur de la publication -

Direction artistique : Prest'Agence, 75 rue de Villiers, 92200 Neuilly-sur-Seine.

Réalisation ALLPRINT, 8 rue Antoine Chantoin, 75014 Paris.

C.P.A.D. 303 - ISBN 2-222-03095-1 - ISSN 0153-985 X. © Centre national de la recherche scientifique.



◀ Page 1 de couverture :

Mésange bleue à l'entrée d'un nichoir artificiel
muni d'un dispositif photographique automatique.
Cliché J. Blondel (voir p. 18)

CNRS
 Délégation du Siège
 Service Logistique
 Dépôt des carnets - Bâtiment 19
 1 avenue de la Terrasse
 91191 Gif-sur-Yvette
 Tél : 01 69 82 39 17

Réflexion sur	4	La reconnaissance automatique de la parole	Jean-Sylvain Liénard, Joseph-Jean Mariani
A la découverte	12	La théorie des martingales	Paul-André Meyer
A la recherche	16	Comment les oiseaux parviennent-ils à coloniser les îles et à y survivre ?	Jacques Blondel
Le point	24	Les collisions proton-antiproton	Bernard Aubert
A propos	34	Le charbon : matière première de substitution au pétrole et au gaz naturel	Henri Charcosset
Dossier	40	Le CNRS et les composites	Claire Dupas
Relations industrielles	44	Les relations du CNRS avec l'Industrie	François Magne, Georges Chevallier, Guy Pieuchard, Anne de Garidel
Bibliographie	51	Les éditions du CNRS	

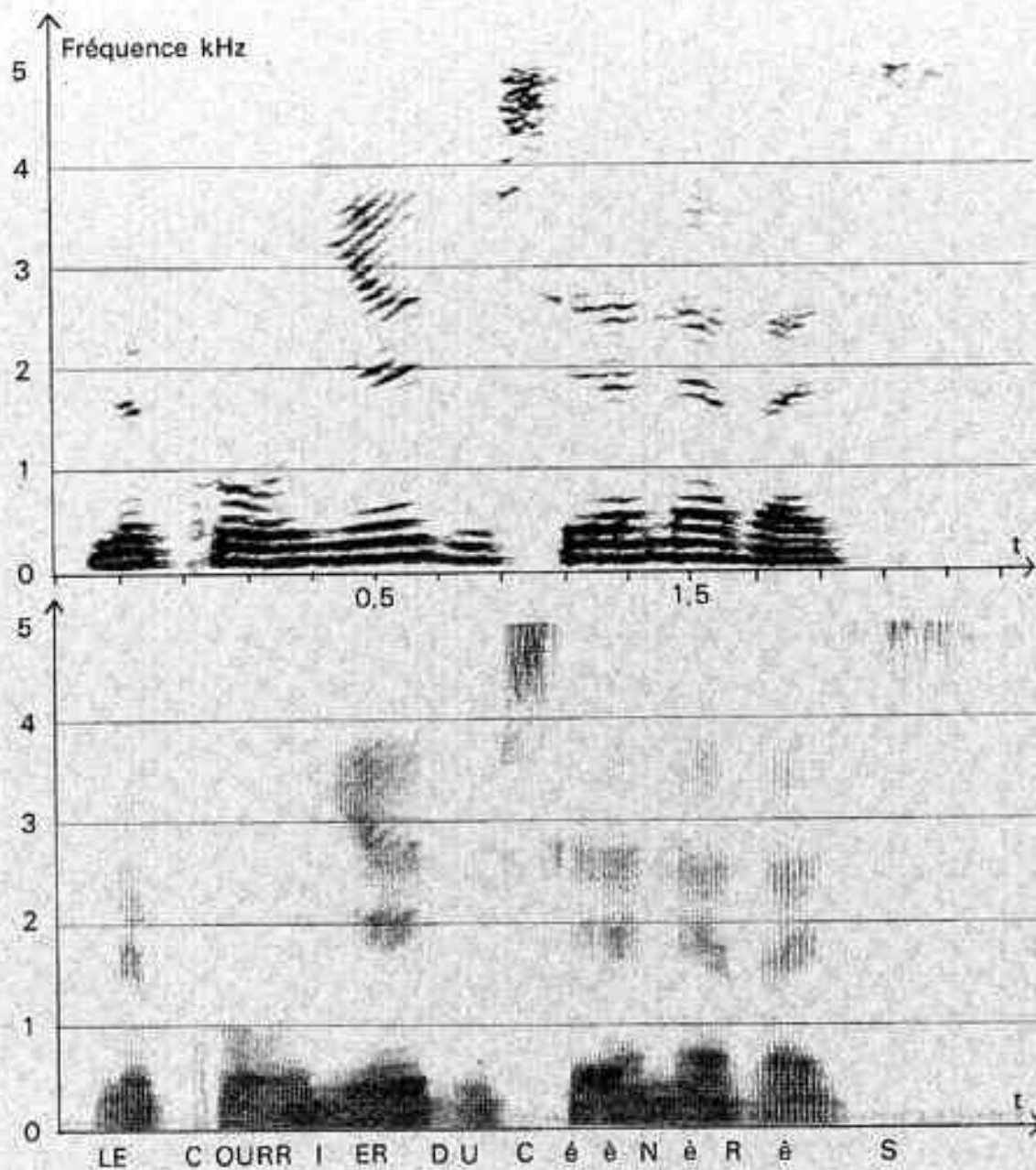


Fig. 1 - Sonagramme de la phrase « Le Courrier du CNRS », prononcée par une voix masculine, et analysée selon deux modalités différentes : en haut (analyse en bande étroite) on discerne bien les composantes fréquentielles (harmonique) dont l'espacement correspond au fondamental F_0 , auquel est liée la hauteur de la voix. En bas on discerne mieux les événements brefs et les formants.

La reconnaissance automatique de la parole

Pour spectaculaires que soient ces machines parlantes ou entendantes,
la limite de leurs performances rappelle
que le problème fondamental du traitement automatique de la parole
reste encore, en grande partie, une « terre inconnue ».

Jean-Sylvain LIENARD, Joseph-Jean MARIANI

La reconnaissance automatique de la parole est à la mode. Longtemps considérés comme marginaux, les chercheurs en communication parlée voient depuis quelques années affluer industriels, journalistes, utilisateurs potentiels de machines parlantes ou commandées par la voix. Il n'est guère de domaine où de telles machines n'aient pas d'application possible, qu'il s'agisse de tâches de conception, de commande, d'inspection ou de vérification, dans lesquelles les mains et les yeux sont occupés ; de tâches de bureau, dans lesquelles la manipulation de l'information sous forme vocale pourrait réduire les volumes de papiers ainsi que le travail de dactylographie ; de tâches de communication, comme la consultation orale, par téléphone, de systèmes de renseignement (météo, bourse, banques de données, de gestion, états des stocks, des ventes) ou de réservation (voyage, spectacle...) ;

□ Jean-Sylvain Lienard, maître de recherche, Joseph-Jean Mariani, attaché de recherche, Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (LIMS, ORSAY).

d'aide aux handicapés sensoriels ou moteur ; d'enseignement assisté... D'immenses marchés se profilent à l'horizon, dans les domaines de l'électro-ménager, des loisirs, de l'automobile, du jouet, de la téléphonie.

Cet engouement est lié à l'informatisation de notre société, à l'extension du réseau téléphonique et aux progrès de la micro-informatique. Mais il est dû aussi à la fascination qu'exerce sur l'homme de notre siècle l'idée que les machines puissent maîtriser le langage. Déjà, dans l'antiquité, des statues – habilement manipulées ou sonorisées par des prêtres – étaient vénérées pour leurs oracles. Au 13^{ème} siècle Saint Thomas d'Aquin aurait détruit la « tête parlante » fabriquée par le moine Albert, et considérée comme impie. Descartes ne pensait-il pas que le don de parole est en dernière analyse ce qui fait l'originalité de l'homme par rapport aux animaux, considérés comme des machines ?

Il est donc nécessaire de préciser la portée et les limites des machines de parole : on sait actuellement faire des

machines parlantes, qui transforment en parole intelligible mais inexpressive un texte écrit en français ; on sait faire des machines qui écoutent et reconnaissent un nombre limité de mots ou de phrases prononcées par une même personne, avec certaines contraintes sur l'élocution et les tournures permises ; mais on est très loin de pouvoir concevoir des machines véritablement douées de parole comme Hal, le super-ordinateur du film de S. Kubrick : « 2001, l'odyssée de l'espace ». Le fossé qui nous sépare d'une telle réalisation est celui-là même qui sépare l'intelligence artificielle de l'intelligence « naturelle ». Il est d'ordre fondamental ; personne ne sait s'il pourra être comblé, ce qui rend ces recherches d'autant plus passionnantes.

Dans le présent article nous tenterons de montrer en quoi consiste le signal de parole, et pourquoi sa reconnaissance par une machine est difficile. Nous décrirons brièvement les réalisations actuelles, obtenues au prix de certaines hypothèses simplificatrices, et nous présenterons quelques directions de recherche adoptées en France, notamment sous l'égide du CNRS.

Un peu d'analyse de la parole

Le signal de parole a une structure assez compliquée. On peut en donner une représentation à deux dimensions, appelée « sonagramme », qui ressemble un peu à une partition de musique (fig. 1) : le temps figure en abscisse et la fréquence en ordonnée, du grave à l'aigu.

Le noircissement est d'autant plus intense que l'intensité au point consi-

déré est importante. Sur la figure 1a nous voyons d'abord un ensemble de raies harmoniques ; à un instant donné, la distance verticale entre deux raies successives, ou entre l'origine des ordonnées et la première raie (ou fondamentale), représente la fréquence de vibration F_0 des cordes vocales. Le son produit par les cordes vocales est riche en harmoniques (composantes sinusoïdales dont la fréquence est multiple de F_0). Certains de ces harmoniques ont une densité renforcée, à un instant donné, par les résonances (modes propre de vibration) du tuyau sonore un

peu particulier formé par le conduit vocal. Ces résonances s'appellent des « formants ». Les trois premiers formants donnent au son issu des cordes vocales un timbre ou « couleur » perçu par notre appareil auditif comme caractérisant telle ou telle voyelle. Ainsi la voyelle « a » est perçue à partir des deux formants F_1 et F_2 proches l'un de l'autre dans la région de 1000 Hz ; dans « i » on trouve deux formants très éloignés, l'un, F_1 , vers 300 Hz et l'autre, F_2 , vers 2000 Hz. Le son « ou », possède ses deux formants ramenés dans le grave, vers 300 et 600 Hz.

Comme l'ensemble de l'appareil vocal (la langue, les lèvres, les dents et la voile du palais) est très mobile, les formants évoluent très rapidement. Leur évolution même est porteuse d'information et contribue partiellement à la perception des consonnes. Mais le sonagramme révèle la présence de sons qui n'ont pas une structure harmonique. Le « s », par exemple, apparaît comme du grisé : c'est un bruit, un mélange aléatoire de plusieurs fréquences aiguës provenant de l'écoulement de l'air en un point de rétrécissement – de constriction – du conduit vocal. Ce bruit peut coexister avec la vibration des cordes vocales, ce qui donne lieu aux consonnes constrictives « sonores » ou « voisées », comme le « z ». Le « k », comme les autres consonnes occlusives, provient d'une occlusion momentanée du conduit vocal. Il comporte un silence très court, suivi d'un bruit très bref (explosion) puis un bruit d'écoulement et l'apparition du voisement.

La représentation fournie par le sonographe varie si celui-ci est réglé différemment, comme le montre la figure 1b : les filtres d'analyse sont moins sélectifs en fréquence que les précédents, mais réagissent plus vite en temps, et à chaque ouverture des cordes vocales correspond une trace verticale (impulsion) sur le sonagramme. La fréquence fondamentale F_0 n'apparaît plus sous forme de raies, mais sous forme d'une succession régulière d'impulsions, colorées par les formants. Ce réglage permet aussi de voir plus nettement les bruits d'explosion des consonnes occlusives, ainsi que certaines transitions d'un son au suivant (dans « l », « r », « n », par exemple).

On distingue habituellement deux sortes d'information dans le signal de parole. L'une, dite « segmentale », concerne le contenu phonétique du signal, tel qu'il pourrait être noté par un auditeur ne se souciant pas du sens ni de l'orthographe. Mais il ne faut pas imaginer qu'il existe une correspondance simple entre un segment du signal et le phonème (voyelle ou consonne) que l'on note en regard. Selon le contexte, le locuteur, la vitesse d'élocution et le soin de l'articulation, les formants d'une voyelle vont prendre des fréquences et des intensités très différentes, au point qu'un « a » dans certains contextes aura les mêmes caractéristiques physiques qu'un « o » dans un autre contexte... Un tel phénomène n'a en réalité pas de quoi surprendre, car des effets comparables existent dans le domaine visuel. C'est pourquoi il est important de ne pas confondre le phonème, unité

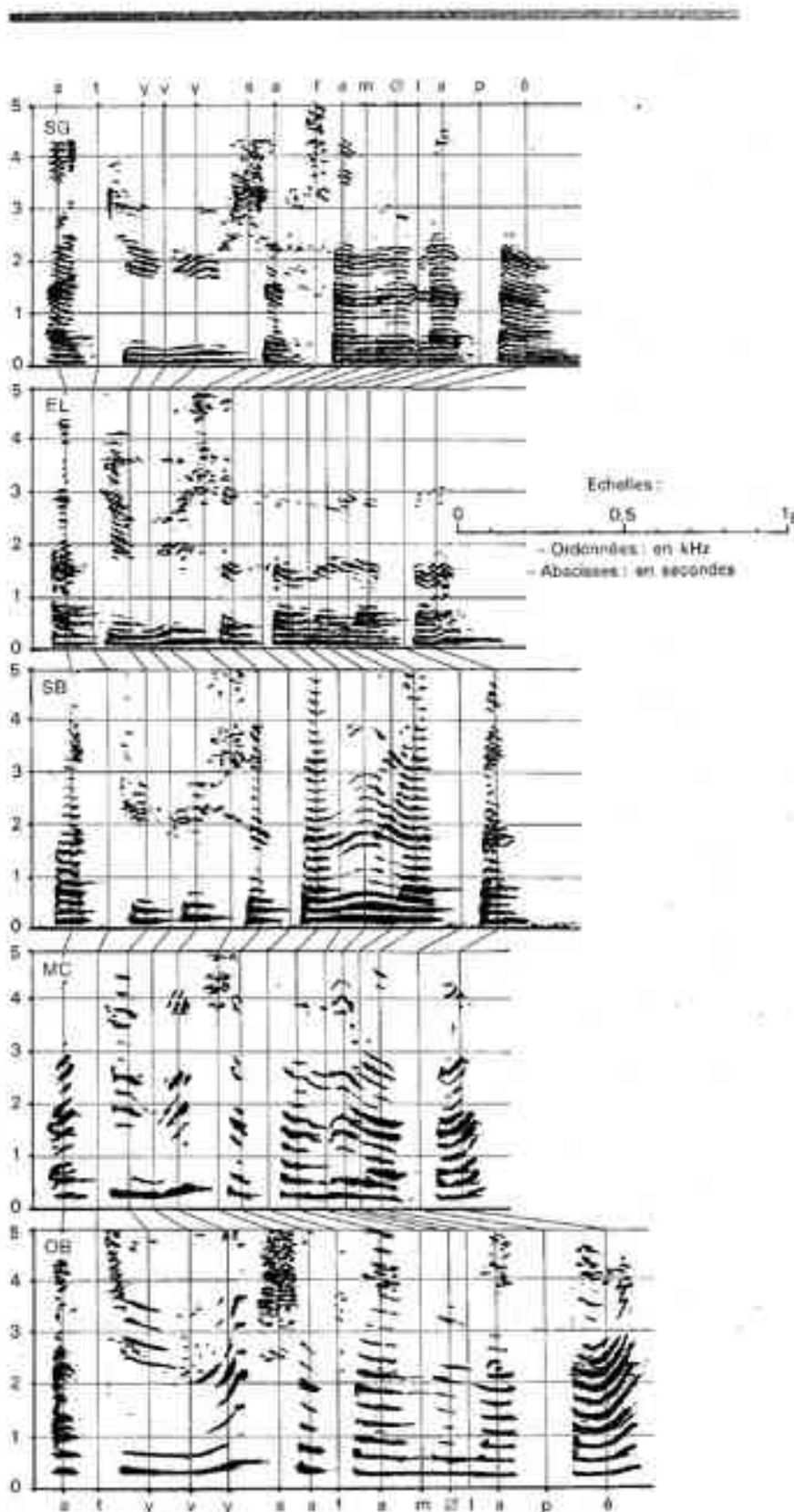


Fig. 2 – Variabilité de la voix selon le locuteur – La même phrase (« As-tu vu ce fameux lapin »), prononcée par différents locuteurs. De haut en bas : deux voix masculines, deux voix féminines, une voix d'enfant (5 ans).

Fig. 3 – La reconnaissance par mots : phrases d'apprentissage et de reconnaissance. ►

abstraite de la phonétique, avec sa réalisation physique dans le signal. Cette erreur à long terme fait piétiner la reconnaissance automatique.

L'autre type d'information (supra-segmentale) concerne des portions de signal plus larges que le phonème et reçoit le nom d'information prosodique. Elle se manifeste dans l'évolution de F_0 , dans la répartition des pauses et de la durée des phonèmes successifs, et dans l'intensité du signal. Mais sa structure n'est pas encore bien comprise. Elle permet un découpage du discours en « unités prosodiques », qui semblent liées aux structures de dialogue entre deux interlocuteurs, à la syntaxe, au sens (accent d'insistance), au lexique (accent tonique), voire même à l'information phonétique (microprosodie).

Les difficultés du problème

Elles sont de trois sortes. Tout d'abord le signal est continu, et les phonèmes ne peuvent pas en général être mis en correspondance avec des segments du signal ; la réalisation physique de chaque phonème dépend fortement de ce qui précède et ce qui suit, si bien qu'il est même difficile de déterminer des unités physiques du signal.

Ensuite pour un même message phonétique la variabilité du signal est considérable, même si l'on se limite à un seul locuteur ; celui-ci peut parler plus ou moins fort, plus ou moins vite, plus ou moins nettement, avec une voix plus ou moins aiguë, sans même être conscient des variations qu'il introduit ainsi

dans son émission. A fortiori, d'un locuteur à l'autre on ne retrouve dans les sonagrammes que de vagues ressemblances, bien difficiles à formaliser (fig. 2).

Enfin le signal de parole comporte plusieurs niveaux de décodage, comme le message écrit que l'on peut déchiffrer point par point, lettre par lettre, mot par mot, ou dans lequel on peut chercher des structures grammaticales, ou sémantiques. Ces niveaux sont tels que chaque information élémentaire d'un niveau donné est constituée par un assemblage particulier des éléments du niveau inférieur. Le signal physique de parole est donc la résultante de structurations de divers niveaux, répondant à des contraintes de nature acoustique, physiologique, perceptive, linguistique, sémantique, discursive... Le problème est que ces niveaux présentent un large recouvrement, et que le langage parlé ne se donne pas la peine, en situation courante, de se structurer complètement à tous les niveaux. Ainsi la parole est souvent mal articulée, des syllabes entières sont indistinctes, des hésitations et des pauses peuvent apparaître à des endroits peu orthodoxes, des phrases ne sont pas terminées ou n'achèvent dans un murmure, tout cela sans que le message soit altéré, dans la mesure où l'interlocuteur a compris ou est censé en avoir compris le sens grâce au contexte et aux structures de haut niveau.

En bref la parole est indissociable du contexte de la conversation et de l'interaction entre les deux interlocuteurs ; elle comporte des structures à plusieurs niveaux et sa redondance permet une variabilité très grande à tous les ni-

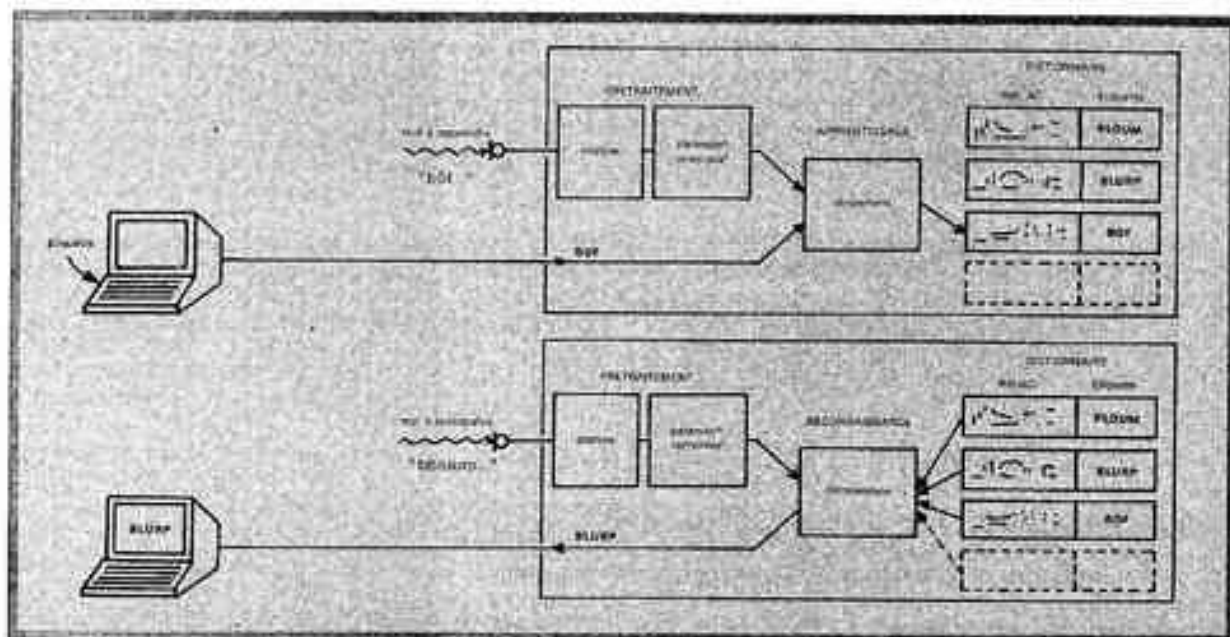
veaux. Voilà qui permet de comprendre pourquoi sa reconnaissance par les machines est si difficile.

Une simplification : la reconnaissance par mots

Entre 1950 et 1965 beaucoup de chercheurs ont nourri l'illusion que la parole était constituée d'une suite d'états physiques bien distincts et reconnaissables. Lorsqu'il a fallu admettre que les choses étaient plus compliquées, certains se sont tournés vers des recherches plus en amont – sur la perception, la linguistique, etc –, d'autres ont posé des hypothèses simplificatrices. Parmi celles-ci, la limitation à un petit nombre de mots prononcés isolément par un même locuteur a conduit à la reconnaissance par mots.

Chaque mot est considéré comme une entité caractérisée par des paramètres de niveau acoustique (par exemple, un sonagramme numérique simplifié, c'est-à-dire une succession de spectres). On ne cherche pas à en reconnaître le contenu phonétique, mais seulement à comparer la représentation acoustique d'un mot aux représentations de mots enregistrés préalablement dans la machine, lors d'une ou plusieurs passes d'apprentissage (fig. 3).

Pour restreindre qu'elle soit, cette approche n'est quand même pas évidente à traduire dans le fonctionnement d'un algorithme vraiment efficace. En effet, si l'on demande à une même personne de répéter à quelques instants d'intervalle le même mot avec la même élocution, on n'obtient pas des représentations acoustiques exactement superposables.



La principale différence porte sur l'échelle de temps, qui se trouve modifiée, non seulement dans la durée totale de l'émission, mais aussi localement, dans la durée de chaque phonème. Pour que la comparaison de deux émissions représentant le même mot ait un sens, il faut compenser ces variations temporelles. Il existe deux méthodes, la première consiste à extraire de la représentation acoustique des indices indépendants du temps, ce qui oblige implicitement à localiser certains constituants phonétiques de la séquence, avec les aléas que cela suppose, la seconde, appelée « comparaison dynamique », consiste à ajuster non linéairement les échelles de temps des deux séquences, en progressant de gauche à droite à des vitesses différentes dans chaque séquence, ces vitesses étant réglées par la recherche d'une plus grande ressemblance à chaque pas de comparaison. On définit ainsi un « chemin de comparaison » dans la matrice des notes de ressemblance entre tous les spectres d'une séquence et tous les spectres de l'autre (fig. 4). La note obtenue en faisant la somme des notes observées le long du chemin est largement indépendante des distorsions temporelles, et permet de classer correctement le mot inconnu par rapport aux mots représentés en mémoire.

C'est sur ce dernier procédé que repose le système MOISE de reconnaissance par MOts ISolés du Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences pour l'ingénieur, qui est maintenant industrialisé par une petite société avec l'aide de l'Agence nationale de valorisation de la recherche (1). Face à ses concurrents américains et japonais, MOISE exhibe des performances très satisfaisantes (moins d'1 % d'erreur) et un prix compétitif, grâce à quelques particularités dont la principale est d'effectuer une normalisation préalable de la durée de chaque séquence, compression qui privilégie les transitions acoustiques aux dépens des états stables. Il ne s'agit pas là d'une simple astuce technique, mais de l'application d'une idée fondamentale développée au laboratoire dans divers domaines notamment en synthèse de la parole.

L'utilisation d'un appareil de reconnaissance par mots isolés oblige à une élocution particulière : chaque mot doit être séparé du suivant par une pause de quelques dixièmes de seconde. La méthode de comparaison dynamique permet, moyennant un volume de calcul plus important, de localiser et reconnaître un mot faisant partie d'une séquence continue : c'est la reconnais-

sance par mots enchaînés, qui est évidemment beaucoup plus souple pour l'utilisateur, mais qui présente aussi des limitations. En effet, la méthode suppose que les mots servant de références aient été prononcés isolément ; lorsqu'un mot se trouve enchaîné avec d'autres, le début et la fin sont modifiés par les enchaînements. On retrouve ici le phénomène de coarticulation qui limite la reconnaissance des phonèmes. Tant que la suite de mots enchaînés est prononcée assez lentement le processus de comparaison

d'aborder plus en profondeur la reconnaissance de la parole continue. Un autre ensemble d'hypothèses et de contraintes a conduit aux études sur la « compréhension automatique de la parole continue ».

Une autre voie de recherche : la compréhension automatique de la parole continue

Cette approche repose sur l'idée suivante : si l'on ne sait pas reconnaître les phonèmes, c'est parce que le signal acoustique ne contient pas

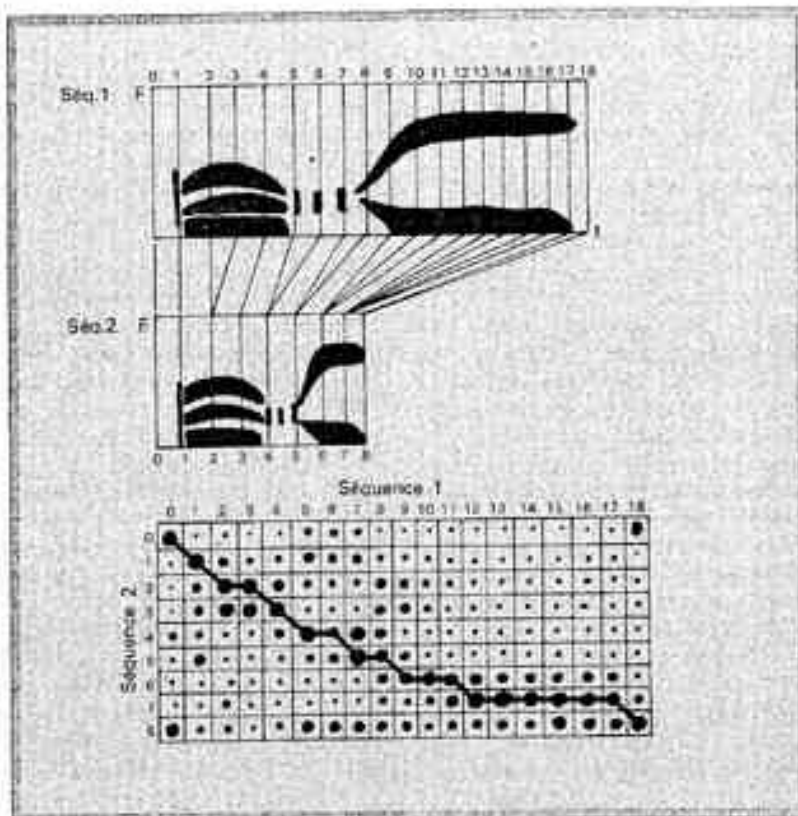


Fig. 4 - Principe de la comparaison dynamique - Le mot « PARIS » est décrit acoustiquement par un sonagramme schématisé. Seule diffère l'échelle de temps d'une séquence à l'autre. La comparaison dynamique permet d'éliminer ces différences, en cherchant à chaque instant un maximum de ressemblance. Dans la matrice de comparaison la grosseur de la tâche qui se trouve à l'intersection d'une ligne et d'une colonne représente la ressemblance entre les spectres correspondants dans les deux séquences.

dynamique peut négliger les débuts et fins de mots. Mais à partir de deux mots par seconde, les effets de la coarticulation s'étendent à tout le corps du mot, qui ne ressemble plus guère à ce qu'il était en prononciation isolée, et les performances chutent brutalement.

Malgré leurs limitations, les méthodes ou appareils de reconnaissance par mots se répandent car, joints aux systèmes de synthèse (2), ils donnent une nouvelle dimension à la communication avec les machines. Cependant les chercheurs ont conscience, depuis une quinzaine d'années, qu'il est nécessaire

toute l'information du niveau phonétique, car l'auditeur y supplée par sa connaissance des structures du discours, notamment sur les plans lexical

(1) - Voir dans le Courrier du CNRS n° 43, page 43 - une photographie de cet appareil en démonstration à INOVA (avril 83).

(2) - Le Terminal Vocal du laboratoire intégré MOISE et un synthétiseur de parole dénommé ICOLLO (IC Ophono LOGiciel), brevet Anvar. Ce dernier, qui permet de transformer en parole n'importe quel texte donné en français orthographié, ne doit pas être confondu avec les « parlers parlantes » qui apparaissent actuellement sur le marché, et qui, pour merveilleuses qu'elles soient de technicité, ne sont que reproduire un vocabulaire limité, initialement promu par un locuteur en chair et en os.

et syntaxique. Par conséquent on va se contenter d'une reconnaissance phonétique imparfaite, et l'on va étudier des processus permettant de réduire l'éventail quasi-infini des phrases possibles, et de comparer les plus probables à l'information phonétique ou acoustique disponible.

On définit donc un langage restreint, composé de quelques dizaines ou centaines de mots, et de quelques dizaines de règles syntaxiques. Si ces règles forment un sous-ensemble de la grammaire de la langue utilisée, on dit que l'on a défini un langage « pseudo-naturel » ; on a un langage artificiel si les règles sont établies sans références explicites à la langue en s'efforçant d'en éliminer toute ambiguïté (exemple : langage de programmation).

Cette voie de recherche a été la première fois explorée en France (3). Elle a été particulièrement active aux États-Unis, entre 1971 et 1977, dans le cadre du projet ARPA-SUR (Speech Understanding Research) lancé par des spécialistes de l'intelligence artificielle. En France de nombreuses études ont été menées sur le sujet depuis 1970, essentiellement par des informaticiens. Citons, parmi bien d'autres, les systèmes Keal du Centre national d'études des télécommunications (Lannion), Myrtille de l'Université de Nancy, Arin de l'Université de Toulouse, Esope du Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur.

Les systèmes diffèrent largement les uns des autres. Ne pouvant les décrire tous, nous nous limiterons à indiquer les grandes lignes du système Esope, qui reconnaît des phrases simples, comme par exemple les phrases suivantes, extraites d'un projet d'application à un standard téléphonique automatique proposé dans Myrtille I : « Pouvez-vous me passer Monsieur Dupont ? » ou « Je voudrais le poste n° 223 ». Le vocabulaire est limité à une quarantaine de mots, la syntaxe est de type artificiel, l'application est interactive et fonctionne en temps réel sur un gros ordinateur. Le système répond par synthèse de la parole.

Dans une première étape on cherche à localiser des éléments de nature phonétique dans le continuum du signal. Pour cela on compare le spectre obtenu à un instant donné à ce qu'il était 30 ms auparavant : si l'on est dans une période de stabilité, sur une voyelle par exemple, ou dans le silence d'une consonne occlusive, la ressemblance est très forte. En étudiant l'évolution de cette ressemblance au fil du temps, on constate qu'elle passe par des mini-

mums indiquant les instants de transition. On en déduit une segmentation approximative du signal en éléments acoustiques liés plus ou moins étroitement aux phonèmes ou à des groupements de phonèmes. Selon les réglages on peut trouver quelques segments manquants, ou quelques segments excédentaires.

La seconde étape consiste à affecter à chacun de ces segments une ou plusieurs étiquettes phonétiques. Cette opération est faite par référence à un dictionnaire d'états stables ou de transitions provenant de l'analyse de la parole du même locuteur.

On va ensuite rechercher dans le tableau des candidats-phonèmes ceux qui sont susceptibles de former des mots du vocabulaire autorisé, selon les enchaînements permis par la syntaxe. Cette opération est rendue très difficile par le fait que pour un segment donné le « bon » phonème peut très bien être absent de la liste des candidats, soit qu'une segmentation ait été omise, soit que la réalisation acoustique ait été mal reconnue, soit que le phonème en question n'ait effectivement pas été prononcé (fig. 5).

C'est ici que sont développées diverses « stratégies de compréhension ». Si l'on progresse de gauche à droite, on peut garder à chaque instant la meilleure solution, et revenir en arrière en cas d'impossibilité ; ou conserver plusieurs solutions en parallèle et interdire les retours arrière, grands consommateurs de temps de calcul. On peut aussi procéder par « îlots de confiance » en faisant le chaînage à partir des segments dont la reconnaissance est la plus certaine. La stratégie peut être descendante, c'est-à-dire tenter d'identifier le signal à une phrase autorisée par le langage — en somme chercher dans le signal une vérification de la phrase la plus probable à chaque instant — ou ascendante, c'est-à-dire former à partir du signal des mots-candidats sans être absolument sûr a priori que l'on obtiendra une phrase du langage. Cette dernière stratégie est plus riche en ce qu'elle permet d'envi-

sager la reconnaissance d'informations qui ne soient pas totalement prévisibles au niveau supérieur ; mais elle suppose que la qualité des informations disponibles au niveau phonétique soit excellente.

Nous voici revenus au problème principal. Aussi puissants que soient les algorithmes de compréhension, qui utilisent judicieusement les informations de divers niveaux, ils sont inefficaces si les informations disponibles au niveau phonétique sont de mauvaise qualité. Rappelons que l'auditeur humain peut reconnaître à ce niveau pratiquement tous les phonèmes lorsque le locuteur n'a pas une prononciation trop relâchée. Tant que nos machines feront plus qu'un pourcentage d'erreur faible à ce niveau, la « compréhension de la parole continue » apparaîtra comme irréalisable pratiquement, sauf dans les cas où il est possible et légitime d'imposer au locuteur des contraintes sévères sur son élocution, sur l'étendue de son vocabulaire, sur la syntaxe, et sur le sens de ce qu'il dit dans un contexte donné.

Quelques directions de recherche

On aura compris, à lire ce qui précède, que les chercheurs considèrent maintenant comme prioritaire le problème de la reconnaissance au niveau acoustique-phonétique : comment passer automatiquement du signal à sa notation phonétique avec un taux d'erreur minime et quel que soit le locuteur. Cette recherche suppose une étroite collaboration entre des spécialistes de divers horizons : informaticiens, acousticiens, phonéticiens, psychologues. Une telle collaboration existe en France depuis de nombreuses années, au sein d'un groupe du GALT (groupement des acousticiens de langue française). La reconnaissance acoustique-phonétique est le principal axe de recherche du groupement de re-

(3) — J.P. Tubach — Thèse d'Etat, université de Grenoble, 1970.



Fig. 5 — Exemple de treillis phonétique — Chaque candidat phonème reconnu est accompagné de sa note de reconnaissance ce qui n'apparaît pas ici. Le phonème exact est encadré. Le signe S désigne le silence. Ce treillis correspond à la phrase : « Pourrais-je parler à Durand ? ».

LE GRECO « COMMUNICATION PARLÉE »

Ce GRECO, créé en 1981, entérine le vaste mouvement de recherche existant en France depuis une douzaine d'années sur le sujet. Dirigé par J.P. Haton, professeur à l'Université de Nancy I, il a été constitué autour d'un noyau de six laboratoires : le CERFIA (Université de Toulouse), le CNET (Lannion), le CRIN (Nancy), l'ENSERG (Grenoble), l'Institut de Phonétique (Aix-en-Provence), et le LIMSI (Orsay). Sa vocation première est de coordonner les travaux en matière de traitement automatique de la parole, essentiellement sur le plan de la recherche fondamentale ; mais il a aussi pour mission d'assurer une meilleure concertation entre les diverses disciplines dont relève la communication parlée et, à ce titre, il intéresse l'ensemble des équipes françaises. La communication vocale entre l'homme et la machine étant d'un énorme intérêt potentiel en informatique, il bénéficie aussi de l'aide de l'Agence de l'Informatique.

Trois axes de recherche à long terme ont été retenus. Le premier concerne le codage acoustico-phonétique, c'est-à-dire l'ensemble des processus, naturels ou artificiels, qu'il faut mettre en œuvre pour passer du signal acoustique à sa représentation sous forme d'une séquence de symboles phonétiques (perception, reconnaissance), vice-versa (phonation, synthèse). Le second est relatif à la prosodie, aspect encore mal connu, essentiel dans le dialogue parlé, qui se manifeste à tous les niveaux de structuration du signal de parole. Le troisième axe vise à définir les spécifications et le mode de fonctionnement d'un système futur de communication homme-machine par la parole, compte-tenu de l'évolution actuelle des recherches fondamentales, des classes d'application et de la technologie prévisible à moyen terme.

Pour pouvoir progresser dans ces axes, il est nécessaire de fournir aux équipes des matériaux communs, qui permettent de travailler sur les mêmes données, d'échanger des programmes, et de comparer des résultats. Une vaste base de données de français parlé est actuellement en cours de réalisation avec la participation de nombreux spécialistes français, un tel ensemble de données n'a jamais été collecté de façon aussi systématique, et son exploitation permettra une coopération effective des diverses équipes. Par ailleurs, une action est menée pour recenser les équipements existants, et aider les chercheurs à choisir des matériels et logiciels compatibles. Enfin le GRECO organise ou participe à des symposiums sur des sujets entrant dans ses axes de recherches.

cherches coordonnées « communication parlée », récemment créé par le CNRS. Pour pouvoir jouer efficacement son rôle de coordination des recherches, le groupement met actuellement sur pied une base de données sur les structures acoustiques et phonétiques du français parlé.

Un autre axe de recherche, encore peu exploré dans l'optique de l'automatisation, se trouve dans la prosodie. Présents à tous les niveaux de structuration du signal, les phénomènes prosodiques ont surtout une très grande importance dans la conduite du dialogue entre deux interlocuteurs. Les lois en sont encore mal perçues, et peu formalisées ; elles relèvent autant des sciences du comportement que de la phonétique et de la linguistique. Mais il est certain que la prosodie est la manifestation de ce qu'il y a de spécifique dans la communication parlée par rapport à la communication écrite, c'est-à-dire l'interactivité, la spontanéité, et la possibilité d'exprimer de nombreuses nuances de sens.

L'approche du type « compréhension automatique de la parole » peut être envisagée, malgré les restrictions mentionnées plus haut, dans le cadre de la communication homme-machine, lorsque le contexte, le vocabulaire, les tournures utilisables par l'opérateur sont limités par la nature même de la

tâche (pilotage « intelligent » d'une machine ou d'un robot, enseignement assisté, etc). On peut alors concevoir un système de communication orale entre l'opérateur et l'objet de son activité (fig. 6), système qui, à notre sens, doit nécessairement comporter un maillon central dans lequel les connaissances sur la tâche, sur l'environnement, sur l'opérateur et sur la conduite du dialogue seraient représentées de manière hautement abstraite (conceptuelle). Il est impératif qu'un tel système soit conçu de manière à réagir en temps « réel » (c'est-à-dire en moins d'une seconde), sinon on perd l'essentiel, qui est l'aspect interactif et spontané de la parole.

Enfin, même dans le domaine des systèmes élémentaires de reconnaissance, par mots isolés ou enchaînés, il reste beaucoup d'études et de recherches à mener : amélioration des performances, extension des vocabulaires utilisables, extension à plusieurs locuteurs, recherche de nouveaux algorithmes, plus souples et plus rapides, moins sensibles au bruit et aux conditions de prise de son ; étude d'utilisation en contexte réel (4), sous les aspects techniques et ergonomiques ; recherche des meilleurs créneaux d'application ; possibilités offertes par les microprocesseurs les plus récents et, plus généralement, par les circuits intégrés à très grande échelle (VLSI).

Enjeu économique : les machines, même les plus simples, mettant en œuvre le traitement automatique de la parole, sont susceptibles de très larges applications à condition d'admettre leurs limitations actuelles et de les utiliser à bon escient, dans leurs propres créneaux.

Enjeu technique : la puissance de calcul des ordinateurs et microprocesseurs et la facilité d'accès ne font que croître. Bientôt le problème ne sera plus tant de traiter l'information que de l'introduire en machine et de l'en sortir sous une forme directement assimilable par l'homme. La parole est l'une de ces formes, sans doute la plus spontanée et la plus riche en ce qui concerne l'interaction homme-machine, et aussi celle qui peut le plus facilement être transmise partout grâce aux réseaux téléphoniques et hertziens.

Enjeu scientifique : la communication parlée est un sujet multidisciplinaire, dont l'évolution est finalement conditionnée par la compréhension de certains mécanismes cérébraux - perception, cognition - et comportementaux - dialogue, interaction entre individus. C'est là un enjeu scientifique considérable, sans doute à très long terme : les expériences de synthèse, de reconnaissance et de communication homme-machine peuvent être considérées comme des modèles fonctionnels de ces mécanismes, certes indirects et rudimentaires, mais totalement maîtrisables et permettant l'expérimentation avec des données réelles.

Enjeu culturel : à l'évidence la communication orale avec les machines va se développer, même sous des formes limitées. En quelle langue ? Chaque langue à ses propres structures, et suppose des algorithmes spécifiques. Serait-il admissible qu'une langue - en l'occurrence l'anglais, dans le monde occidental - soit imposée ou renforcée par le biais des machines ? L'étude, en France, de machines parlant et comprenant le français, nous semble être une impérieuse nécessité culturelle.

(4) - Par exemple au laboratoire, on étudie l'utilisation de la commande vocale en avionique ; des essais en simulateur de vol sont en cours ; des essais en vol auront lieu prochainement (coordonnés par la Direction des recherches, études et techniques, en coopération avec les sociétés Crouzet et Verity).

BIBLIOGRAPHIE

- J.L. Flanagan, *Speech Analysis, Synthesis and Perception*, Springer Verlag, Berlin, 1972.
W.A. Lee, ed. *Trends in Speech Recognition*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1980.
J.S. Léonard, *Les processus de la communication parlée*, Mouton, Paris, 1977.

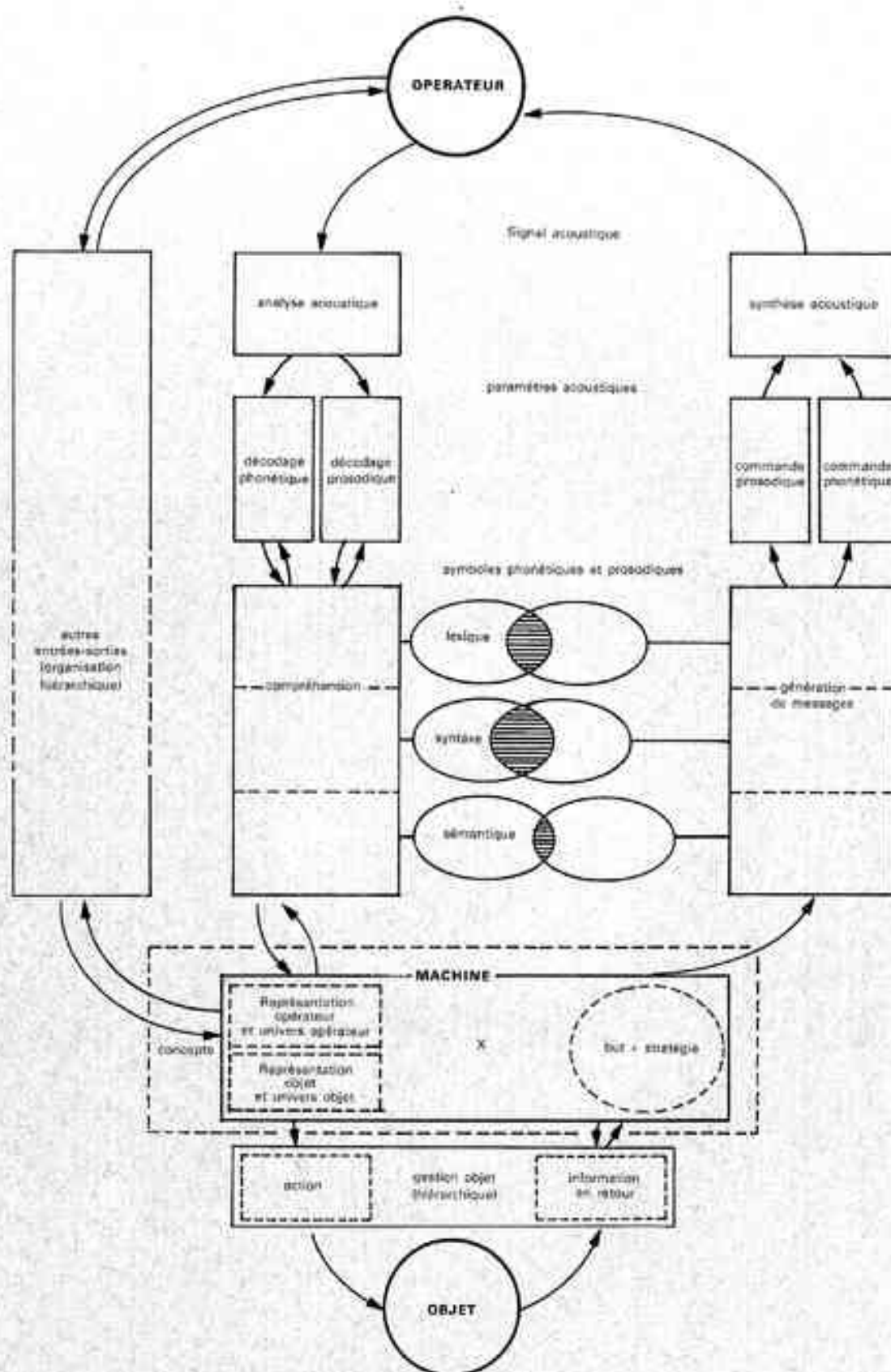


Fig. 6 - Organisation d'un système de communication parlée dans le cadre de la communication homme-machine.



La théorie des martingales

- La théorie des martingales qui s'est développée depuis une trentaine d'années est devenue un outil très puissant pour les probabilistes.
- Ses différents aspects et applications sont nombreux et dépassent largement le cadre des probabilités ; parmi ceux-ci on peut citer notamment l'étude du mouvement brownien et les intégrales stochastiques.

Paul-André MEYER

L'un des attraits du calcul des probabilités est son langage étrange, où les fonctions s'appellent variables aléatoires et les moyennes s'appellent espérances. Le mot de martingale est emprunté au vocabulaire des salles de jeu, mais (comme un ancien de la Mafia qui s'est retiré des « affaires ») il a fini par acquérir un statut tout à fait respectable. La théorie des martingales est devenue, en une trentaine d'années, l'un des outils les plus puissants dont disposent les probabilistes, et ses applications ne cessent de s'étendre, même à l'extérieur du calcul des probabilités.

La théorie des martingales a une histoire très simple : quelques remarques de Paul Lévy vers 1937, un petit livre très intéressant de J. Ville paru en 1939 (et dont l'influence a été restreinte par la guerre). Ensuite, pendant la décennie 1940-1950, le travail extraordinaire du mathématicien américain J.L. Doob, qui a démontré tous les théorèmes fondamentaux : les ouvrages modernes suivent encore (avec des améliorations sur bien des points) les grandes lignes de son livre « Stochastic processes », paru en 1953. Après cela, dans les années 1950-1960, la théorie des martingales a fusionné avec le calcul des intégrales stochastiques, créé vers 1945 par le mathématicien japonais K. Ito, et le nombre des publications consacrées à ces sujets a augmenté de manière vertigineuse — la place occupée par les publications en français dans ce domaine étant plus qu'honorable.

Il s'agit, bien sûr, d'un sujet qui utilise des méthodes mathématiques assez complexes, mais on peut songer à le

présenter à un public de non-spécialistes, car son contenu reste très proche de l'intuition courante, du langage du monde physique dans lequel nous vivons (à notre échelle, pas à celle des galaxies ou des microparticules). Je vais tenter de le faire.

Qu'est ce qu'une martingale ?

Le calcul des probabilités classique représente les phénomènes réels par des modèles du genre suivant : on dispose d'un énorme ensemble Ω (une « urne ») dont chaque élément ω représente un état possible d'un certain système. L'élément ω représentant l'état effectivement réalisé est tiré au sort parmi eux, suivant une certaine loi de probabilité P . Si nous posons à notre modèle, avant l'expérience, une question de la forme « est-ce que ω appartient à A », où A est une partie de Ω de structure raisonnablement simple, le modèle ne nous répond pas par « oui » ou par « non », mais par un nombre $P(A)$ compris entre 0 et 1, qui peut parfois nous aider à prendre une décision (s'il est voisin de 0 ou 1) mais le plus souvent ne sert pas à grand chose. Dans l'expérience, le hasard ouvre le poing et nous montre le véritable ω , et nous apprenons si nous avons correctement prédit les phénomènes.

De même, si f est une fonction de ω de nature assez simple, le modèle nous permet de connaître avant l'expérience, non pas la valeur exacte $f(\omega)$, mais seulement une moyenne $E[f]$ (E signifie espérance) renseignement sans grand intérêt si la dispersion de f — mesurée le plus souvent par la variance $E[(f-E[f])^2]$ — est grande. Quant à la moyenne $E[f]$ elle-même, on peut l'interpréter comme la constante λ qui minimise la dispersion $E[(f-\lambda)^2]$ de f autour de λ . Autrement dit, nous

cherchons à estimer la quantité inconnue $f(\omega)$ au moyen d'une fonction connue (une constante λ) aussi proche de la quantité inconnue que possible.

Maintenant, perfectionnons ce modèle en décrivant une succession d'expériences : à l'instant 0 nous ne savons rien, et nous estimons f comme ci-dessus. A l'instant 1, nous avons fait une expérience, le hasard n'a pas entièrement ouvert la main, mais il nous a appris quelque chose sur ω . Autrement dit, les fonctions connues ne se réduisent plus aux seules fonctions constantes, mais forment un certain ensemble C_1 de fonctions de ω . Nous pouvons donc affiner notre estimation de f en recherchant la fonction f_1 connue à l'instant 1 qui minimise $E[(f-f_1)^2]$: cette fonction est notée $E_1[f]$. De même à l'instant 2 l'espace des fonctions connues est C_2 , plus gros que C_1 , et nous avons une nouvelle estimation $E_2[f]$, etc.

Ce qui vient d'être dit en temps discret peut l'être aussi en temps continu : pour chaque t on a un espace C_t de fonctions connues, croissant avec t , et une estimation $E_t[f]$ de la fonction fixe f : $E_t[f]$ est une fonction connue à l'instant t , qui dépend aussi du hasard ω , puisque les informations sur ω acquises avant l'instant t ont été prises en compte dans le calcul de $E_t[f]$.

On peut vérifier sans peine que le système des fonctions $E_t[f] = f_t$ possède les propriétés suivantes : d'une part (par définition) f_t est connue à l'instant t ; d'autre part, si $s \leq t$, on a $f_s = E_s[f_t]$ (cohérence des prédictions). Ces deux propriétés ont un sens sans parler de f , et une famille (f_t) qui les possède s'appelle une *martingale*. Ce que nous venons de construire en est un exemple fondamental : la martingale des prédictions d'une fonction f .

□ Paul-André Meyer est directeur de recherche au CNRS et travaille à l'Institut de recherche mathématique avancée de Strasbourg.

◀ Cliché Viauand - Agence Gamma.

Nous en verrons d'autres plus loin.

On voit tout de suite sur cet exemple le genre de problèmes qu'un ingénieur pourrait se poser :

• Est-ce que f_t converge vers la vraie valeur f pour t grand ? Ce problème a été résolu par Doob il y a longtemps : d'une part, il est vrai que $f_t(\omega)$ converge vers la vraie valeur $f(\omega)$. Mais d'autre part (si l'on veut, du fait qu'il s'agit d'une meilleure approximation théorique : les « appareils » des mathématiciens n'ont aucune inertie !) f_t fluctue constamment autour de f . Comme nous le verrons dans un instant, f_t n'est même pas (en général) une fonction continue de t .

• Pourrait-on concevoir une machine qui calculerait l'estimation $E_t[f] = f_t$, en même temps que l'observation se déroule ? Ce problème exige certainement que f_t ait un comportement assez régulier en t (pour que l'on puisse par exemple tracer l'évolution de f_t sur l'écran d'un oscillographe relié à un ordinateur). Ici encore, la réponse théorique est positive, grâce aux travaux de Doob, mais la régularité de f_t semble un peu décevante : on peut seulement dire que les discontinuités de f_t sont des sauts, avec des limites à droite et à gauche.

À la réflexion, on s'aperçoit que cette situation est, au contraire, tout à fait satisfaisante : les discontinuités dans la prédiction ont un sens physique. Elles expriment que l'information peut nous parvenir, très réellement, de manière discontinue. Par exemple, la désintégration d'un atome radioactif (ou à une autre échelle la brusque rupture d'un corps sous tension, causant par exemple un tremblement de terre) est un événement imprévisible en un sens très fort, et l'éruption d'un tel événement à l'instant t modifie brusquement la prédiction $f_t = E_t[f]$; l'existence d'une limite à gauche et d'une limite à droite correspond à l'existence de prédictions « juste avant t » et « juste après t » qui peuvent être distinctes.

Il est certainement intéressant que le calcul des probabilités se soit doté d'instruments mathématiques permettant de parler de manière précise de ce genre de phénomènes, et même de mesurer dans certains cas la transformation du modèle probabiliste apporté par une prophétie (c'est-à-dire, par un enrichissement vers le futur des espaces C_t de fonctions connues à l'instant t). Mais je ne voudrais pas susciter trop vite l'enthousiasme des lecteurs de « Planète » : les applications de ces résultats sont purement mathématiques,

et n'ont aucun rapport avec la parapsychologie.

Plus profondément, l'idée fondamentale de Doob, consistant à munir le modèle probabiliste classique de la notion de « fonction connue à l'instant t » me semble destinée à un grand avenir, car elle décrit en langage mathématique le fait que, dans une « nature » décrite par un modèle probabiliste, il n'y a pas seulement des phénomènes, mais il y a aussi des observateurs. La notion de martingale dépend des espaces C_t , c'est-à-dire de l'ensemble des connaissances acquises par l'observateur à chaque instant.

Seconde interprétation des martingales

Revenons pour simplifier au temps discret, et imaginons un joueur qui joue dans un casino (ou sur le réseau routier, contre sa compagnie d'assurances) à divers jeux de hasard. Désignons par f_0 sa fortune initiale, par f_n sa fortune juste après la n -ième partie. L'espace C_n de fonctions connues contient au moins la fortune initiale f_0 et les résultats des parties d'ordre 1, 2, ..., n . Le gain du joueur à la n -ième partie est la différence $f_n - f_{n-1}$: avant la n -ième partie, c'est-à-dire à l'instant $n-1$, ce gain est inconnu aussi bien du joueur que de la direction du casino, mais celle-ci s'arrange en principe pour que le gain estimé du joueur à l'instant $n-1$, soit $E_{n-1}[f_n] - f_{n-1}$, soit toujours négatif (elle peut y arriver par la structure même des jeux, ou par la perception de taxes convenables). Cela n'exclut pas la possibilité de réaliser de beaux bénéfices aux dépens de la direction, grâce aux fluctuations aléatoires du jeu.

Lorsque le gain estimé est négatif, on peut dire que la tendance moyenne du système (f_n) est descendante, et la famille (f_n) est appelée une *surmartingale* (je ne tenterai pas de justifier ici cette terminologie un peu surprenante). Le cas des martingales correspond à $E_n[f_{n+1}] = f_n$ exactement, c'est-à-dire à une absence de tendance

moyenne, soit vers le haut, soit vers le bas. Si l'on veut, on peut considérer que les martingales expriment mathématiquement cette idée de *fluctuation pure*.

Cette idée intuitive s'étend au temps continu, mais demande à être un peu précisée : sous sa forme correcte, elle est distincte de celle de martingale, et un peu plus générale (pour le lecteur informé, disons qu'il s'agit de la notion de *martingale locale*). J'indiquerai plus bas l'exemple du mouvement brownien. Disposant de cette notion, il est clair que beaucoup de phénomènes physiques de nature aléatoire se laissent décrire par la superposition d'une fluctuation pure (un bruit dépourvu de sens) et d'un mouvement moyen (ou un signal, que l'on veut extraire du bruit). La théorie des martingales a aussi résolu – de manière très abstraite – le problème de la caractérisation de tels systèmes décomposables, et de leur décomposition unique en fluctuation pure et mouvement moyen, et ses méthodes commencent à pénétrer (par le processus habituel d'accoutumance et d'imprégnation lente) des milieux éloignés des mathématiques.

Le mouvement brownien

Une petite particule (tel un grain de pollen) placée dans un liquide au repos, reçoit d'innombrables chocs de la part des molécules du liquide, et on la voit sous le microscope, animée d'un mouvement très irrégulier (dans lequel les chocs individuels sont absolument indiscernables). La particule n'a pas plus de raison d'aller vers le haut que vers le bas, vers la droite que vers la gauche, il est donc raisonnable de penser que chacune de ses coordonnées est une fluctuation pure. En moyenne, la particule est immobile à chaque instant, ce qui ne l'empêche pas de bouger constamment. Si le liquide n'est pas au repos, ou bien si la particule a une masse un peu trop grande et descend lentement vers le

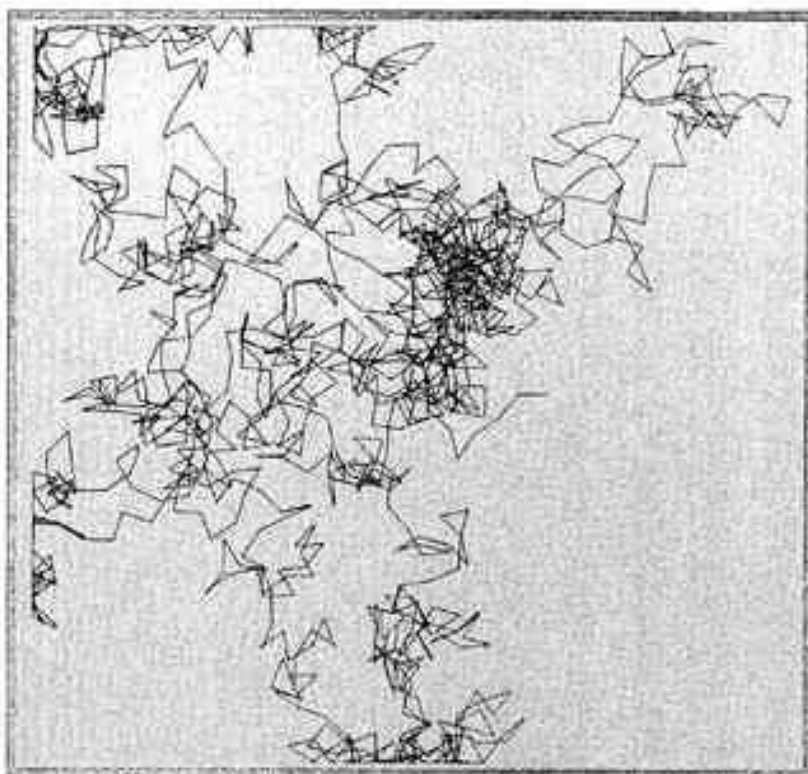
Parmi les chercheurs français en probabilités, une trentaine travaillent sur des sujets proches de ceux que l'on présente ici. Étant donné la petite taille des groupes de chercheurs en mathématiques, on doit considérer cela comme une forte concentration – et d'ailleurs elle parvient à attirer en France chaque année plusieurs visiteurs étrangers.

Le groupe le plus nombreux se trouve au Laboratoire de probabilités de Paris VI ; on en trouve aussi à Besançon, Grenoble, Orsay, Rennes, Rouen, Strasbourg... laboratoires qui bénéficient presque tous de l'association avec le CNRS.

Le CNRS, par l'intermédiaire de la Société mathématique de France, a subventionné partiellement les rencontres régulières des séminaires de probabilités (deux fois par an dans l'une et l'autre des universités mentionnées ci-dessus). Les publications du séminaire (en français pour la plupart) sont très bien diffusées à l'étranger, depuis quinze ans, par l'éditeur Springer.

fond du récipient, le mouvement aura une tendance (sens du courant, ou direction de la pesanteur) plus ou moins discernable sous les fluctuations. Si le liquide n'est pas partout à la même température, il y aura de plus une variation locale de l'intensité des fluctuations. Nous avons ici un point de contact important entre la théorie des martingales et la physique.

Il existe en fait plusieurs modèles mathématiques du mouvement brownien physique, mais l'un d'entre eux (appelé *mouvement brownien* ou *processus de Wiener* par les mathématiciens) joue un rôle privilégié et sert dans la construction de tous les autres – plus corrects du point de vue de la description du phénomène réel. Le processus de Wiener est l'un des joyaux des mathématiques, et l'intérêt qu'il suscite dépasse de beaucoup les frontières du petit monde des probabilistes : il sert en théorie du potentiel, en analyse harmonique, en géométrie riemannienne, en mécanique quantique. Bien qu'il ait été étudié depuis soixante ans, par des mathématiciens aussi connus que Wiener, Itô, Kolmogorov, Doob, Chung... on ne cesse d'en découvrir des propriétés nouvelles.



Cette simulation par ordinateur du trajet d'une particule brownienne (que l'on a fait se réfléchir sur les parois d'une boîte carrée, afin qu'elle reste dans les limites de la feuille) a été tracée avec un pas volontairement trop grand, afin qu'on y voie quelque chose : chacun des petits segments de droite devrait être remplacé par une courbe aussi compliquée que la courbe toute entière.

L'intégrale stochastique

Revenons aux jeux de hasard, mais cette fois intéressons nous plutôt aux courses de chevaux. Dans le calcul de la fortune d'un joueur de tiercé interviennent deux paramètres : d'une part le résultat de la course, qui est annoncé par la compagnie, et d'autre part la nature de la mise, qui est déterminée par chaque joueur individuellement avant la course. Dans un monde où le montant du pari pourrait être déterminé après le jeu, on ne trouverait plus beaucoup de volontaires pour faire un travail régulier ! Dans notre schéma initial, la fonction p_n qui représente le montant du n -ième pari doit donc être connue, non pas à l'instant n (qui est celui où l'on prend connaissance du résultat de la course) mais à l'instant $n-1$. Un tel système de fonctions p_n est dit *prévisible*. Supposant pour simplifier qu'un seul ticket est joué à chaque fois, appelons f_n la fortune du joueur après la n -ième course, p_n le pari sur la n -ième course, g_n la fortune d'un joueur qui jouerait exactement les mêmes tickets mais en misant 1 franc à chaque fois (on suppose pour simplifier qu'un seul ticket est joué à chaque course). Nous avons entre f_n et g_n la relation :

$$(1) \quad f_n = f_0 + p_1(g_1 - g_0) + p_2(g_2 - g_1) + \dots + p_n(g_n - g_{n-1}).$$

Chaque terme est le produit d'un facteur « connu » par un facteur « non encore connu ». Ces sommes donnent lieu à des inégalités remarquables.

Mais la chose étonnante est la possibilité d'étendre la définition de sommes telles que (1) au temps continu, sous la forme d'intégrales stochastiques :

$$f_t = f_0 + \int_0^t p_s dg_s$$

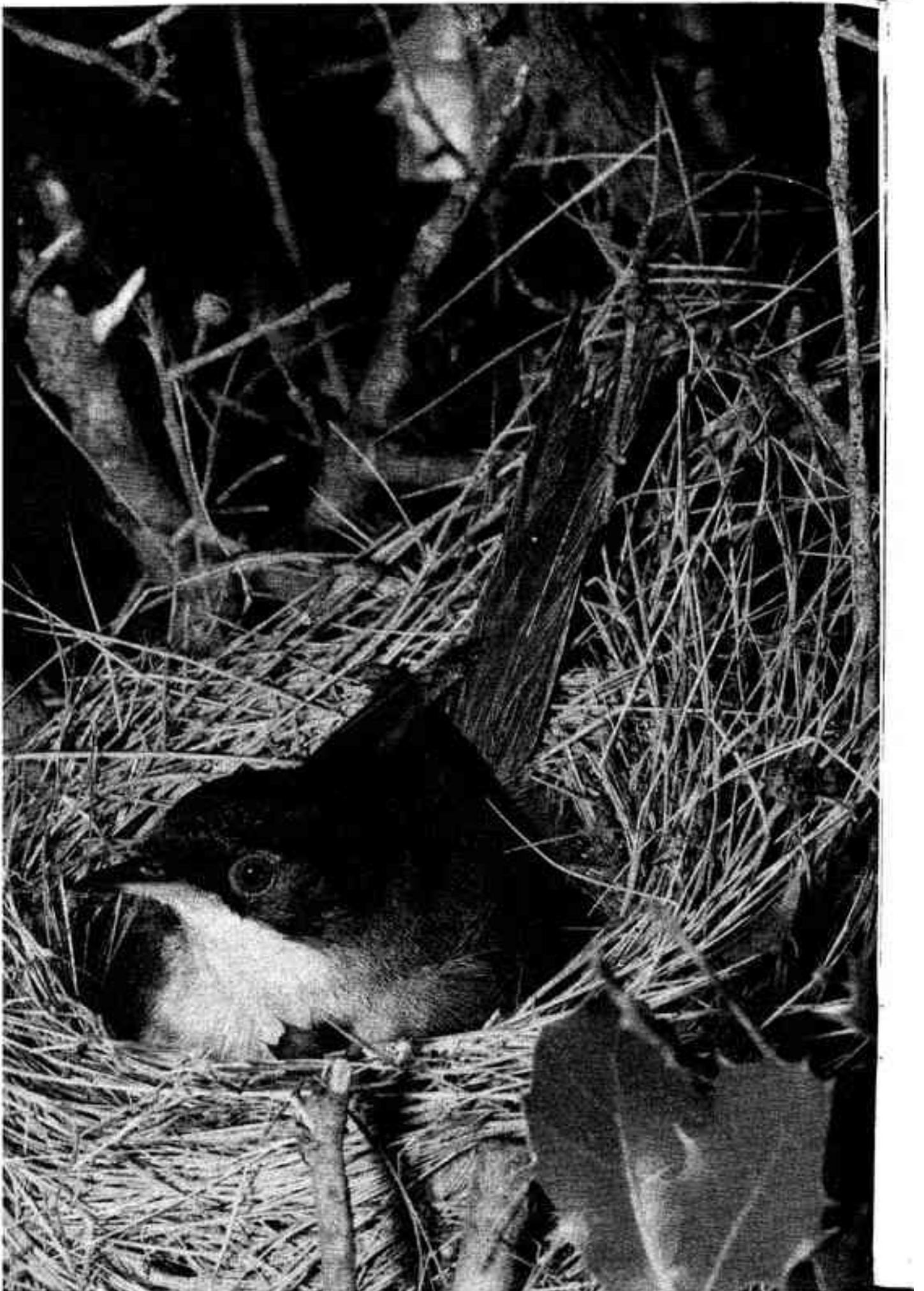
où le caractère prévisible de p_s – à définir de manière convenable en temps continu – joue le même rôle qu'en temps discret, et où g_s pourra être, par exemple, une martingale. Cette théorie, restreinte d'abord au cas du mouvement brownien, a pris récemment une beaucoup plus grande généralité, devenant ainsi le noyau d'un véritable calcul différentiel et intégral stochastique, en particulier une magnifique théorie des équations différentielles.

Cette courte présentation ne peut donner une idée des aspects de la théorie les plus importants pour les mathématiciens, tels que les remarquables inégalités sur les martingales et intégrales stochastiques. Elle tente seulement de faire sentir qu'un certain

nombre d'idées de base, de caractère très simple, sont peut-être destinées à atteindre un public scientifique plus large que celui des mathématiciens, ou même de connaître le sort des idées vraiment importantes, qui est de se banaliser.

BIBLIOGRAPHIE

- P. Lévy, *Théorie de l'addition des variables aléatoires*, Gauthier-Villars, Paris, 1937.
 J. Ville, *Étude critique de la notion de collectif*, Gauthier-Villars, Paris, 1939.
 J.L. Doob, *Stochastic Processes*, J. Wiley, New-York, 1953.
 Ces livres ont surtout un intérêt historique. Tous les livres de probabilités récents, de caractère général, contiennent un exposé de théorie des martingales (au moins en temps discret). En langue française, le livre classique, excellent, est :
 J. Neveu, *Martingales à temps discret*, Masson, Paris, 1972.
 Sur le mouvement brownien, un livre un peu ancien, mais toujours passionnant est :
 E. Nelson, *Dynamical theories of Brownian motion*, Mathematical Notes, Princeton University Press, 1967.
 Sur la théorie récente, presque tout (y compris les livres de l'auteur de cette note) est inaccessible aux non spécialistes. Un lecteur ayant peu de connaissances en probabilités, mais des notions de base en analyse fonctionnelle, pourrait essayer :
 M. Métivier et J. Pellaumail, *Stochastic Integration*, Academic Press, 1980.
 Pour des lecteurs ayant une certaine habitude des aspects « appliqués » des probabilités, on peut recommander :
 P. Bremaud, *Point Processes and Queues : Martingale Dynamics*, Springer, 1981.



Comment les oiseaux parviennent-ils à coloniser les îles et à y survivre ?

La compréhension des mécanismes de structuration et de régulation des peuplements animaux a considérablement progressée depuis une quinzaine d'années grâce à la théorie de l'équilibre dynamique proposée par Robert H. MacArthur et Edward O. Wilson.

La mise à l'épreuve de cette théorie sur ces espaces géographiquement limités et isolés que sont les îles a permis de faire d'étonnantes découvertes d'ordre écologique et évolutif comme on le verra dans ces pages à propos des oiseaux des îles de la Méditerranée.

Jacques BLONDEL

Lors d'une allocution présidentielle qu'il prononça en 1959 devant la Société des naturalistes américains, le professeur G.E. Hutchinson posa cette question en apparence triviale : pourquoi y a-t-il tant d'animaux sur la terre ? Parmi les différentes hypothèses que l'orateur proposa pour expliquer la diversité du monde vivant et, surtout, la variabilité de cette diversité, il en est une qui fut par la suite l'objet de débats passionnés et de recherches enthousiastes, celle de la superficie des milieux dont les espèces ont besoin pour y construire des populations viables. Le fondement théorique de ce problème est simple : pour survivre dans des milieux dont le climat et les ressources fluctuent de façon plus ou moins imprévisible, une population a besoin d'une certaine quantité d'espace ; à la limite, il faut au moins de quoi entretenir un couple reproducteur et sa famille. Si l'espace favorable est très étendu, la population sera représentée par un très grand nombre d'individus et même si localement une partie

de cette population s'effondre sous l'effet d'une catastrophe climatique ou alimentaire, les vides seront comblés par de nouveaux immigrants venant d'ailleurs. Mais lorsque le milieu est très exigu et isolé, les risques deviennent beaucoup plus sérieux car les probabilités d'extinction sont inversement proportionnelles au nombre d'individus, donc à la superficie des milieux. Autrement dit, pour chaque population, dans chaque situation particulière d'habitat, il existe un seuil critique d'abondance en deçà duquel sa survie devient problématique. La valeur de ce seuil est propre à chaque espèce : il faut beaucoup plus d'espace pour cent bisons que pour cent souris.

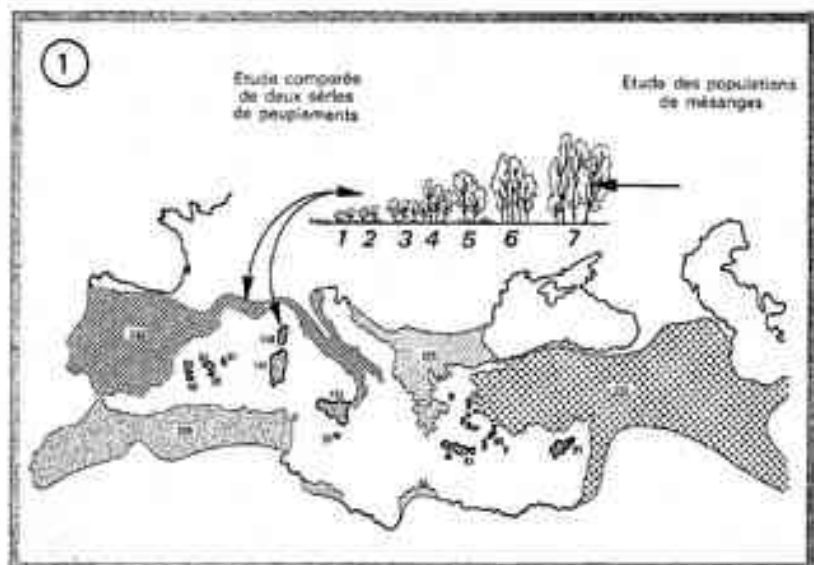
L'île de Port-Cros est un appendice du massif des Maures isolé à quelques centaines de mètres du littoral. Vingt espèces d'oiseaux terrestres seulement nichent régulièrement sur ce petit territoire de sept cents hectares mais l'ornithologue qui prospecte cette superficie en plein massif des Maures en découvrira bien davantage : trente-deux à

quarante-sept sur six échantillons examinés par Le Grand (1978). Pourquoi cette différence ? L'appauvrissement de Port-Cros serait-il dû à son statut insulaire ? Pour en avoir le cœur net, il faut reproduire l'expérience de Port-Cros à d'autres îles dont la superficie et le degré d'isolement sont différents. Par leur nombre et leur variété, les îles et les archipels représentent un théâtre fascinant où peuvent être testées quelques unes des plus belles hypothèses de biologie évolutive, en particulier celle de l'influence de la superficie sur la nature et l'évolution des espèces et des communautés. Or le monde vivant est un kaléidoscope de milieux plus ou moins vaste et isolés et l'« effet d'île » est universel, y compris en milieu continental comme nous le verrons en conclusion, car tous les intermédiaires existent entre les immensités boisées de la forêt boréale de conifères ou de la forêt amazonienne et les plus petites îles, qu'il s'agisse de celles qui parsèment l'océan Pacifique ou de modestes bosquets épargnés dans des « mers » de céréales

□ Jacques Blondel, maître de recherche au CNRS, Centre d'études phytosociologiques et écologiques Louis Emberger, travaille depuis une quinzaine d'années sur la structure et l'évolution des peuplements d'oiseaux méditerranéens. Participent à ces recherches P. Lienmann (CNRS), D. Du Bray, G. Le Grand, J. L. Martin, D. Michelland et J. M. Pagès.

Fig. 1 - Nombres d'espèces d'oiseaux nicheurs peuplant les différents secteurs géographiques continentaux et insulaires du Bassin méditerranéen. L'analyse des peuplements et des populations insulaires doit se faire par comparaison avec des situations continentales homologues, ici entre la Corse et la Provence.

◀ Fauvette mélanocéphale, l'un des passe-reux les plus répandus dans l'aire méditerranéenne continentale et insulaire.



comme en Beauce. Les différences entre ces « îles » ne sont que de degré mais non pas de nature.

Trois questions se posent :

– Comment se fait la colonisation d'une île ; le nombre d'espèces qui la peuplent est-il fonction de sa superficie et de la distance qui la sépare du continent le plus proche ?

– Les espèces qui habitent l'île sont-elles un échantillon aléatoire de celles qui vivent sur le continent ou bien existe-t-il une sorte de tri, certaines espèces ayant davantage de chances que d'autres de la coloniser ?

– La vie sur les îles s'accompagne-t-elle de modifications d'ordre morphologique, démographique, écologique et génétique ? Bref, existe-t-il des adaptations particulières qui favorisent la survie en milieu isolé et exigu ?

Ces questions se situent à trois niveaux différents d'analyse ; elles impliquent par conséquent des hypothèses et des méthodes différentes mais complémentaires qui seront abordées en agrandissant par trois fois, comme le ferait l'objectif zoom d'une caméra, l'échelle de perception des territoires concernés. Nous partirons d'abord de l'ensemble du Bassin Méditerranéen et de ses îles en analysant les grands traits de la distribution des avifaunes

(point de vue biogéographique à petite échelle), puis nous passerons au niveau des peuplements plurispécifiques (moyenne échelle) dans différents milieux d'une île choisie à titre d'exemple, la Corse, et nous terminerons par l'analyse comparée de quelques caractères adaptatifs de populations de mélanges dans deux biotopes homologues, l'un en Provence, l'autre en Corse (analyse à grande échelle).

Les peuplements d'oiseaux du Bassin Méditerranéen et le problème de la colonisation des îles

L'aire méditerranéenne couvre une superficie de quelque 2 970 000 km² et l'ensemble des masses continentales d'Europe, d'Asie-Mineure et d'Afrique du Nord qui encerclent les îles de cette « mer au milieu des terres » (médi-terranée) seront considérées comme les réservoirs qui alimentent ou ont alimenté les milieux insulaires. Sur cet ensemble de territoires découpés en secteurs pour les besoins de l'analyse, 335 espèces d'oiseaux nicheurs ont été répertoriées. Bien entendu, aucun secteur ne comprend la totalité de ces espèces (fig. 1) et leur répartition est très

inégale puisque sept seulement sont présentes absolument partout. Mais l'analyse de cette répartition qui nécessiterait de longs développements nous importe moins que ceci : il existe une relation hautement significative entre le nombre d'espèces peuplant une île et la surface de cette dernière (fig. 2). La superficie d'un territoire permet donc de prédire avec une bonne approximation le nombre d'espèces qui seront susceptibles de le peupler. En fait, ce phénomène est connu depuis bien longtemps puisque Darwin, Wallace et de Candolle l'avaient déjà remarqué au siècle dernier. Il est général pour tous les groupes et n'aurait donc rien de bien nouveau si les biologistes Preston (1962) puis MacArthur et Wilson (1967) n'en avaient donné une interprétation causale au moyen d'un modèle explicatif. Ce modèle stipule que le nombre d'espèces qui peuplent une île à un instant donné de son histoire est un équilibre, donc quelque chose de sujet à modification (par exemple par substitution d'espèces) entre le taux d'immigration de nouvelles propagules (organismes qui se dispersent) et le taux d'extinction. Si l'on représente sur un modèle les courbes d'immigration et d'extinction, la richesse à l'équilibre se situe à l'intersection des deux (fig. 3).

C'est la théorie de l'équilibre dynamique qui présente cette vertu première dans la démarche scientifique que de pouvoir être mise à l'épreuve, c'est-à-dire vérifiée ou réfutée. Si la courbe d'immigration reste constante, ce qui signifie que l'émission d'organismes issus de la source continentale reste constante et si la courbe d'extinction ne dépend, comme le propose le modèle, que du nombre d'espèces déjà installées sur l'île et des caractéristiques écologiques de cette dernière, sa superficie, sa distance à la source continentale et sa diversité physiographique (nombre de milieux), on doit pouvoir prédire la richesse à l'équilibre et le temps nécessaire à sa réalisation si par hasard quelque catastrophe est venue la perturber. De tels accidents naturels ou provoqués seraient alors un bon moyen de mettre le modèle à l'épreuve. Or il existe trois moyens de le faire : l'observation du repeuplement d'îles victimes d'un cataclysme destructeur comme une éruption volcanique ou un raz de marée, l'observation de ce qui se passe



◀ L'algie Jean le Blanc, grand rapace méditerranéen mais très mauvais colonisateur puisqu'il est absent de toutes les îles méditerranéennes.

quand on crée subitement une « île », par exemple au sein d'un massif boisé, et l'expérimentation directe dans la nature.

Le premier moyen est illustré par l'histoire des petits îlots de Long et de Ritter situés entre les grandes îles de Nouvelle Guinée et de Nouvelle Angleterre (Diamond 1974). Ces deux îlots volcaniques explosèrent et furent ensevelis sous un épais et meurtrier manteau de cendres. Long il y a deux siècles et Ritter le 18 mars 1888. Leur recolonisation par les oiseaux fut étudiée en comparant à différents intervalles de temps le nombre d'espèces réimplantées sur ces îlots à ceux qui peuplent des îlots témoins non détruits, ces derniers servant de base à la prédiction des richesses à l'équilibre. Or en 1974, Ritter ne comptait que quatre espèces contre seize prédites par le modèle (25 % de la richesse à l'équilibre) et Long, beaucoup plus anciennement détruit, avait retrouvé quarante-trois espèces sur les cinquante-sept prédites (75 %). Cet exemple permet non seulement de vérifier l'hypothèse d'une richesse à l'équilibre mais il permet aussi de calculer le temps nécessaire à la colonisation d'une île vierge (fig. 4).

Le deuxième moyen de tester le modèle est illustré par l'exemple de l'île de

Barro Colorado à Panama. Quand on termina le percement du canal, en 1914, la création d'un lac artificiel isolait d'un coup un lambeau de 16 km² de forêt dense humide subitement devenu une île alors que jusqu'alors une forêt homogène couvrait toute la région. D'après le modèle, ce nouveau statut insulaire devait entraîner des extinctions, le nombre d'espèces présentes au moment de la création de l'île devant être en excès sur la richesse à l'équilibre d'un territoire aussi petit (situation dite de sursaturation). C'est exactement ce que Willis (1974) démontra puisque les recensements antérieurs au percement du canal révélèrent l'existence de 202 espèces alors qu'il n'y en avait plus que 157 dans les années 1970. Quarante-cinq espèces se sont éteintes et Willis montra comment et pourquoi ces extinctions affectèrent en priorité les grandes espèces spécialisées dans des niches étroites.

Cet exemple est particulièrement instructif parce que l'île de Barro Colorado ne se trouve, tout comme Port-Cros, qu'à quelques centaines de mètres des forêts « continentales » d'alentour et il paraît bien surprenant que pour des animaux aussi mobiles que les oiseaux, une si petite étendue d'eau puisse faire office de barrière hermé-

que. C'est pourtant ce qui se passe, aucun des quelques milliers d'oiseaux bagués par Willis n'ayant été repris dans les forêts périphériques. De même, il faut apporter de très solides arguments pour vaincre l'incrédulité légitime de ceux qui doutent qu'une île aussi grande que la Corse, et aussi proche du continent (80 km des côtes de Toscane) puisse comporter des peuplements présentant indiscutablement le syndrome d'insularité évoqué plus loin.

Puisqu'à superficie identique, le nombre d'espèces sur les îles est inférieur à celui des continents voisins, certaines espèces sont exclues des premières. D'où l'alternative suivante : ou bien les espèces absentes sont de très mauvais immigrants incapables de franchir le moindre bras de mer, ou bien ils arrivent sur l'île, participant à la « pluie de propagules » émise par la source continentale mais ne parviennent pas à s'y implanter durablement.

Le premier terme de l'alternative est à la rigueur compréhensible pour les animaux terrestres comme les reptiles ou les mammifères qui ont bien du mal à traverser les étendues marines, beaucoup plus difficile à concevoir pour les oiseaux. Cela nous amène à une deuxième question.

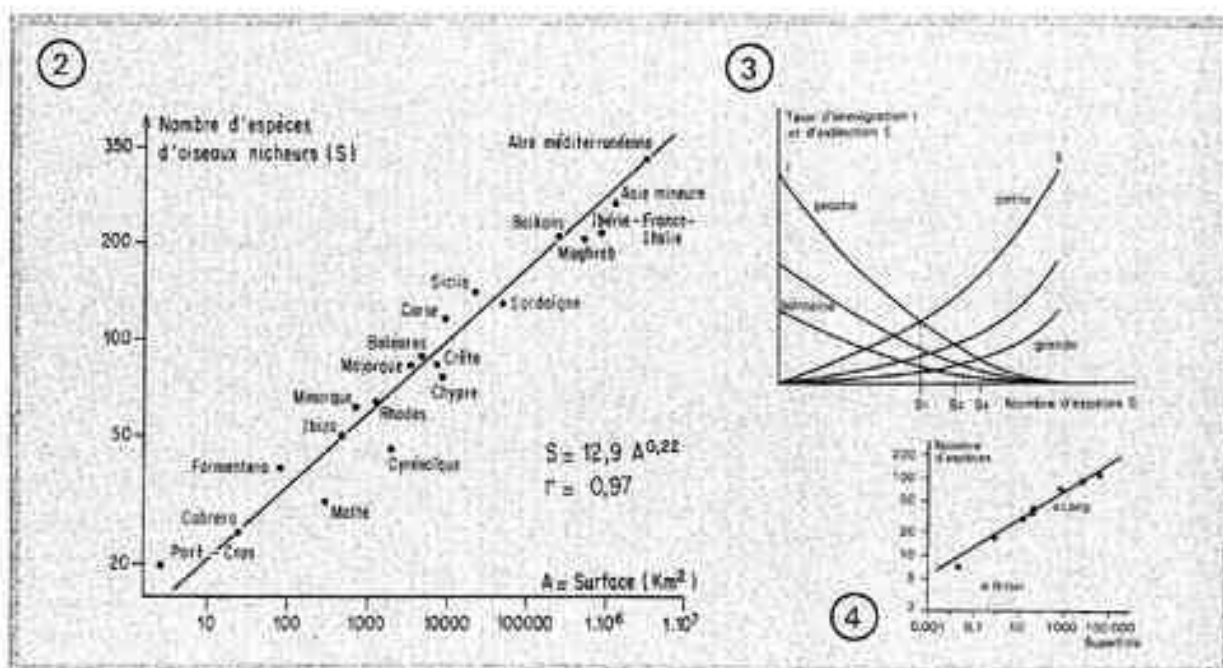


Fig. 2 - Relation entre le nombre d'espèces d'oiseaux peuplant les territoires continentaux et insulaires du Bassin Méditerranéen et la superficie de ces derniers (échelles logarithmiques).

Fig. 3 - Le modèle d'équilibre dynamique de MacArthur et Wilson. La richesse à l'équilibre S se situe à l'intersection des courbes d'immigration I et d'extinction E. Plus le nombre d'espèces déjà présentes sur l'île est grand, moins le flux de nouveaux immigrants est élevé et plus le taux d'extinction est fort. On voit que les taux d'immigration et d'extinction dépendent de la surface de l'île et de sa distance qu'il la sépare de la source continentale.

Fig. 4 - Les îlots de Long et de Ritter dont les oiseaux furent exterminés par une explosion volcanique retrouvent peu à peu leur richesse à l'équilibre qui ne sera atteinte que lorsque les points qui les représentent sur ce graphique auront rejoint la droite de régression.

*Toutes les espèces ont-elles
les mêmes chances
de s'implanter sur les îles ?*

Si nous examinons pour chacune des 335 espèces, l'espace qu'elle habite dans l'aire méditerranéenne, nous constatons que certaines ont une répartition très limitée alors que d'autres sont largement répandues partout. Or on constate que les peuplements insulaires sont en moyenne composés d'espèces dont la répartition est d'autant plus vaste que l'île est plus exiguë. A la limite, la petite île de Malte qui ne compte que trente-sept espèces ne possède que des espèces banales répandues absolument partout. Les peuplements des îles sont donc bien un reflet des peuplements continentaux d'où ils sont issus mais ce reflet est d'autant plus pâle que l'île est plus petite. Il existe donc un tri parmi les candidats à la colonisation que l'on peut démontrer en tournant d'un cran notre objectif zoom pour fixer l'analyse au cas de la Corse. A ce niveau, la démonstration exige une démarche comparative qui ne peut être faite qu'en confrontant la structure des peuplements dans deux séries homologues de biotopes, l'une sur le continent, l'autre sur l'île (fig. 1).

La Corse est survolée au printemps et à l'automne par des dizaines de millions d'oiseaux migrateurs qui font la navette, au rythme des saisons, entre l'Europe où ils nichent et les savanes d'Afrique où ils passent l'hiver. Or nombre de ces espèces ne nichent pas en Corse bien que les biotopes qui leur conviennent ne manquent pas et qu'elles y fassent même des haltes passagères lors de leurs migrations. Pourquoi ? Nous avons pu montrer (Blondel 1979) que sont favorisées dans leurs chances de colonisation :

- Les petites espèces qui, parce qu'elles sont petites, peuvent construire des populations plus nombreuses, donc moins vulnérables à l'extinction provoquée par les aléas de l'environnement que les grandes espèces dont chaque individu a besoin d'espaces en moyenne plus vastes pour survivre. Dans chaque famille, ce sont généralement les plus grandes espèces qui manquent sur les îles : le Hibou Grand-duc et la Huppe chez les Strigidés, le Pic noir et le Pic vert chez les Picidés. Le phénomène se retrouve à l'échelle des deux séries de biotopes étudiés à titre comparatif puisque le poids moyen des espèces est de 37 gr sur le continent contre 26 seulement en Corse.

- Les espèces qui parviennent à élargir la gamme des ressources exploitées. Les espèces rares et spécialisées dans des habitats et des ressources précis auront moins de chances de coloniser l'île ; ce sont précisément elles qui se sont éteintes les premières sur l'île de Barro Colorado. La démonstration en est apportée ici par le cas des Mésanges (tableau 1) : la Mésange huppée, rare sur le continent, est absente de l'île mais les Mésanges noire, bleue et charbonnière qui ont réussi leur colonisation ont considérablement accru la gamme des biotopes habités et ont réussi à augmenter leur densité.

Les Mésanges de Corse « agissent comme si » elles occupaient l'espace écologique laissé vacant par les espèces absentes et augmentaient l'abondance de leurs populations. Or ces deux adaptations complémentaires qui optimisent l'abondance des populations ont pour effet de diminuer les risques d'extinction aléatoire qu'encourraient les espèces rares et spécialisées à un biotope précis.

- Les espèces qui se situent à des

niveaux relativement bas dans les chaînes alimentaires. En effet, la prime aux densités élevées favorise les espèces qui se situent le plus près possible de la base des pyramides trophiques : consommateurs primaires, petits insectivores. Mais les grands prédateurs sont handicapés car, situés à l'extrémité supérieure des pyramides, ils doivent obligatoirement être beaucoup moins nombreux et plus gros que leurs proies. Faible densité et forte taille présentant de sérieux inconvénients, cela explique la sous-représentation notoire des prédateurs sur les îles. Les peuplements insulaires se caractérisent par un écrêtement des couches trophiques supérieures, donc un fléchissement de la fonction prédatrice.

- Enfin, l'analyse comparée des peuplements continentaux et insulaires révèle un autre trait tout à fait significatif : une forte tendance à la sédentarité.

Ce phénomène agit à deux niveaux :

- le niveau écologique par un recrutement préférentiel d'espèces sédentaires au détriment des espèces migratrices comme on le constate à l'aide des données obtenues le long de nos deux successions (tableau 2),

- le niveau évolutif par une tendance à la perte des structures de déplacement : beaucoup d'oiseaux insulaires volent peu ou mal et l'on connaît même dans les îles océaniques très reculées évoluant en vase clos depuis longtemps de multiples cas d'oiseaux qui ne volent plus du tout (aptérisme) : Kiwi de Nouvelle Zélande, nombreux Râles,...

D'aussi importants bouleversements dans la structure des peuplements insulaires ont d'importantes répercussions sur la dynamique et la régulation des populations. Pour les analyser, il faut passer à l'échelle des populations et utiliser des méthodes d'analyse démographique.

*La démographie des Mésanges
en Provence et en Corse*

Il s'agit d'un vaste programme dont nous ne pouvons tout au plus évoquer ici que quelques éléments (fig. 5) qui concernent la démographie de la Mésange bleue. Les hypothèses à tester se résument comme suit : la réduction du nombre d'espèces en milieu insulaire, l'augmentation des densités et l'élargissement de la gamme de ressources exploitées doivent se traduire par un accroissement de la compétition entre individus avec, pour corollaire, un fléchissement de la production de jeunes, compensé par un allongement de la durée de vie des adultes et, par

TABEAU 1 : DISTRIBUTION ET DENSITES (NOMBRE DE COUPLES/10 HA) DES MÉSANGES DANS DEUX SUCCESSIONS ECOLOGIQUES (PROVENCE ET CORSE)

Stades de la succession	1	2	3	4	5	6	7
PROVENCE							
Mésange charbonnière					2,10	3,08	3,20
Mésange bleue							11,55
Mésange noire							0,18
Mésange huppée							1,76
CORSE							
Mésange charbonnière		1,60	1,70	2,55	3,59	2,62	4,87
Mésange bleue			0,52	0,20	1,33	7,86	14,15
Mésange noire					1,25	2,10	4,10

TABEAU 2 : POURCENTAGE D'OISEAUX SEDENTAIRES LE LONG DES DEUX SUCCESSIONS ECOLOGIQUES

Stades de la succession	1	2	3	4	5	6	7
PROVENCE	38	23	52	52	69	70	88
CORSE	91	83	80	88	96	99	97

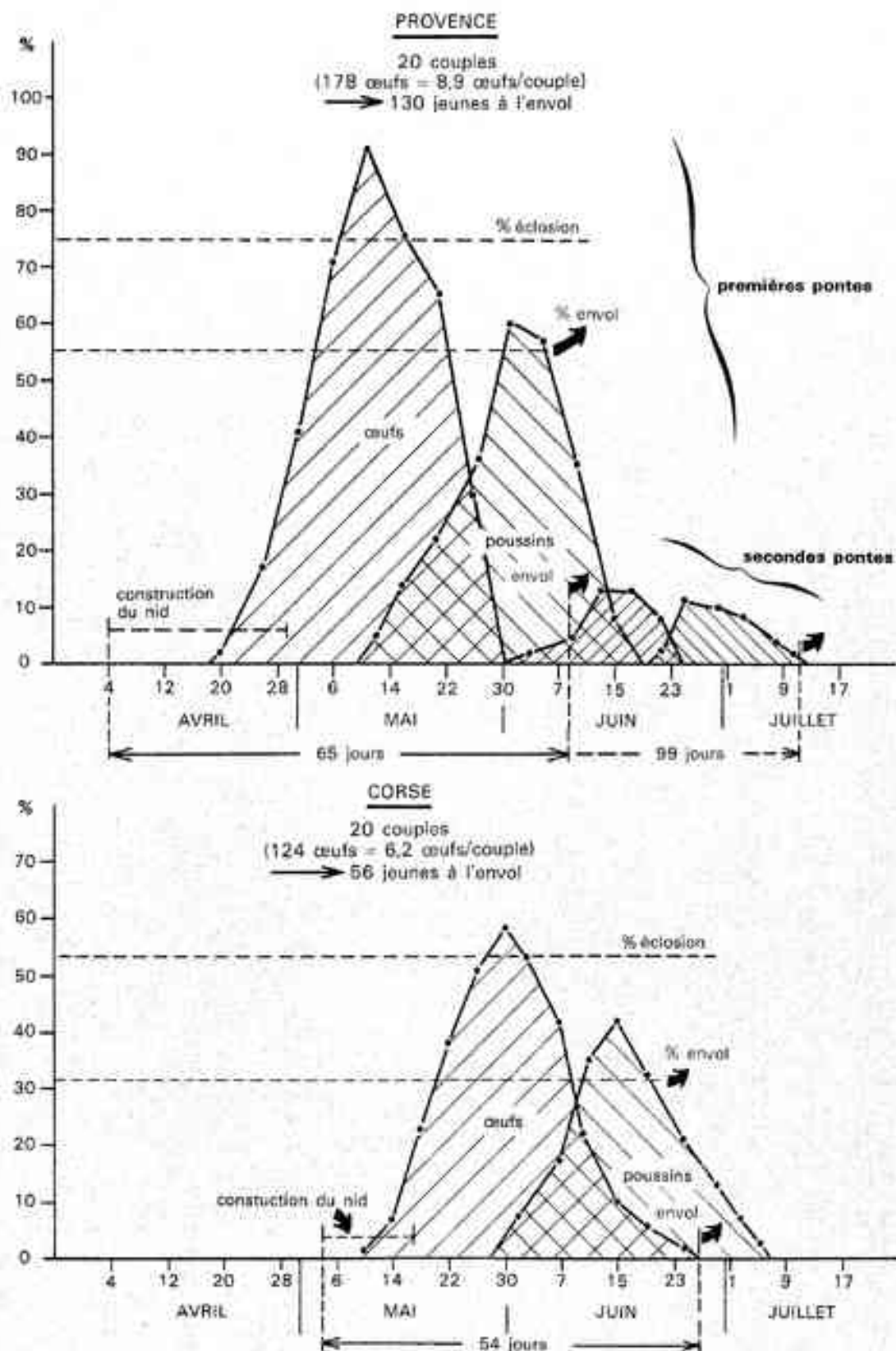


Fig. 5 - Démographie comparée de la Mésange bleue en Provence et en Corse. Les données de Corse sont calculées par rapport à celles de Provence. On remarque que tous les caractères de la reproduction sont affectés sur l'île : nombre inférieur d'œufs et de jeunes, reproduction retardée, absence de seconde ponte, cycle plus court.

conséquent, un ralentissement de la vitesse de renouvellement des populations. Nos mesures vérifient tout cela puisqu'on voit sur la figure 5 que chaque couple de Mésanges pond en moyenne 6,2 œufs en Corse contre 8,9 sur le continent et que la mortalité des jeunes est considérablement plus élevée en Corse puisque 20 couples ne produisent que 56 jeunes contre 130 sur le continent.

Enfin, le cycle reproductif commence plus tard (trois semaines) et est plus contracté dans le temps sur l'île que sur le continent. Sans nous étendre sur le déterminisme écologique de ces différences, on peut en conclure que l'effort de reproduction consenti par les populations insulaires est bien moindre que celui des populations continentales. C'est l'une des composantes majeures du syndrome d'insularité qui se caractérise par un faisceau d'adaptations donnant la prime à la survie d'adultes sédentaires en milieu exigu mais stable et saturé plutôt qu'à la production maximale de jeunes individus destinés à se disperser.

Le syndrome d'insularité et ses enseignements pratiques

La vie dans les îles implique de multiples adaptations acquises par sélection et qui ont pour effet de minimiser les risques d'extinction qui sont beaucoup plus sérieux que dans les milieux continentaux où les réserves de population et l'existence de refuges permettent aux populations de combler rapidement les déficits locaux. Quand une espèce a réussi à s'implanter sur une île, elle se trouve confrontée à de nouvelles conditions d'habitat et à de nouvelles constellations d'espèces. Elle va donc vivre une nouvelle expérience et sera contrainte à réagir à toutes ces nouveautés. Cinq mécanismes complémentaires aboutissant à un édifice éco-étho-démographique hautement intégré permettent de définir un « syndrome d'insularité » :

- sur-représentation des petits généralistes à large niche aptes à tirer rapidement parti de situations écologiques nouvelles, notamment celles qui seraient utilisées par les compétiteurs qu'elles trouveraient sur le continent.
- populations abondantes, gage de sécurité contre les risques d'extinction dus aux fluctuations aléatoires de l'environnement.
- variabilité génétique qui permet une adaptation rapide aux nouvelles situations écologiques, favorise l'exploitation de nouveaux micro-habitats et ac-

célière les processus de spéciation.

- sédentarité qui permet aux colonisateurs de s'accrocher au terrain conquis, d'éviter de sortir des limites d'un milieu favorable mais exigu et de participer à l'élaboration de communautés stables et fermées. La tendance évolutive à la perte des structures de dispersion sur les îles est un phénomène universel.

- allongement de la durée de génération ; le fléchissement de la production de jeunes a pour corollaire un allongement de la durée de vie des adultes et une diminution des variations numériques des populations, ce qui correspond à une stratégie de survie en milieu saturé.

Quels enseignements pratiques peut-on tirer de tout cela ? Si l'on n'a parlé que des îles vraies, c'est par commodité, mais il existe partout des « îles biologiques » : un bosquet épargné au milieu de vastes cultures, un jardin public dans une grande ville ou une réserve de dimensions modestes. Il est très symptomatique que l'île de Barro Colorado fut érigée en réserve intégrale dès 1923 pour préserver à jamais les trésors vivants qu'elle recelait alors. Cinquante ans plus tard, elle avait perdu, du seul fait de son nouvel état d'île dans un lac, 23 % de ses espèces, parmi lesquelles les plus rares, donc celles qui avaient le plus besoin de protection ! L'enseignement est clair et mérite réflexion : que va-t-il advenir des faunes forestières du Bassin de l'Amazonie quand on connaît les projets grandioses d'exploitation de la forêt. Or la forêt équatoriale recule aujourd'hui, sous le coup des tronçonneuses, au rythme de 11 à 40 ha/min ! Quelles surfaces devraient être mises en réserve pour assurer la survie de ces faunes forestières ? Dans nos pays de vieille civilisation où les grands blocs forestiers de jadis ont été morcelés et émiettés, les problèmes de préservation des espèces et des communautés, et de façon plus fondamentale encore, l'aménagement de l'espace naturel doivent se référer à cette notion de surface minimale nécessaire à la survie des populations, notamment celle des grands prédateurs. Si l'on veut créer une réserve pour protéger telle espèce ou telle communauté, il est nécessaire au préalable de s'assurer que sa superficie est compatible avec le maintien de populations viables à long terme. Or une diminution arithmétique d'espace conduit à un déclin géométrique de la valeur biologique des territoires qui restent. Inversement, la gestion du milieu naturel dans les îles exige de grandes précautions du fait des adaptations particulières des espèces qui les rendent fra-

giles. En particulier, la sous-représentation des prédateurs rend très dangereuses les introductions d'espèces, surtout quand celles-ci sont prédatrices ou risquent de le devenir (par élargissement adaptatif de leur niche). De multiples exemples d'introductions, volontaires ou non, se sont soldés par de véritables désastres biologiques car les animaux introduits, subitement plongés dans des biocénoses nouvelles pour eux et démunies de moyens de défense, se transforment en redoutables destructeurs : les Souris deviennent des Fouines, les Chats se transforment en Lynx et les Chiens en Loups ! La plus grande partie des espèces insulaires qui se sont éteintes depuis un siècle un peu partout dans le monde ont été exterminées par les animaux domestiques et commensaux de l'homme que ce dernier a introduit.

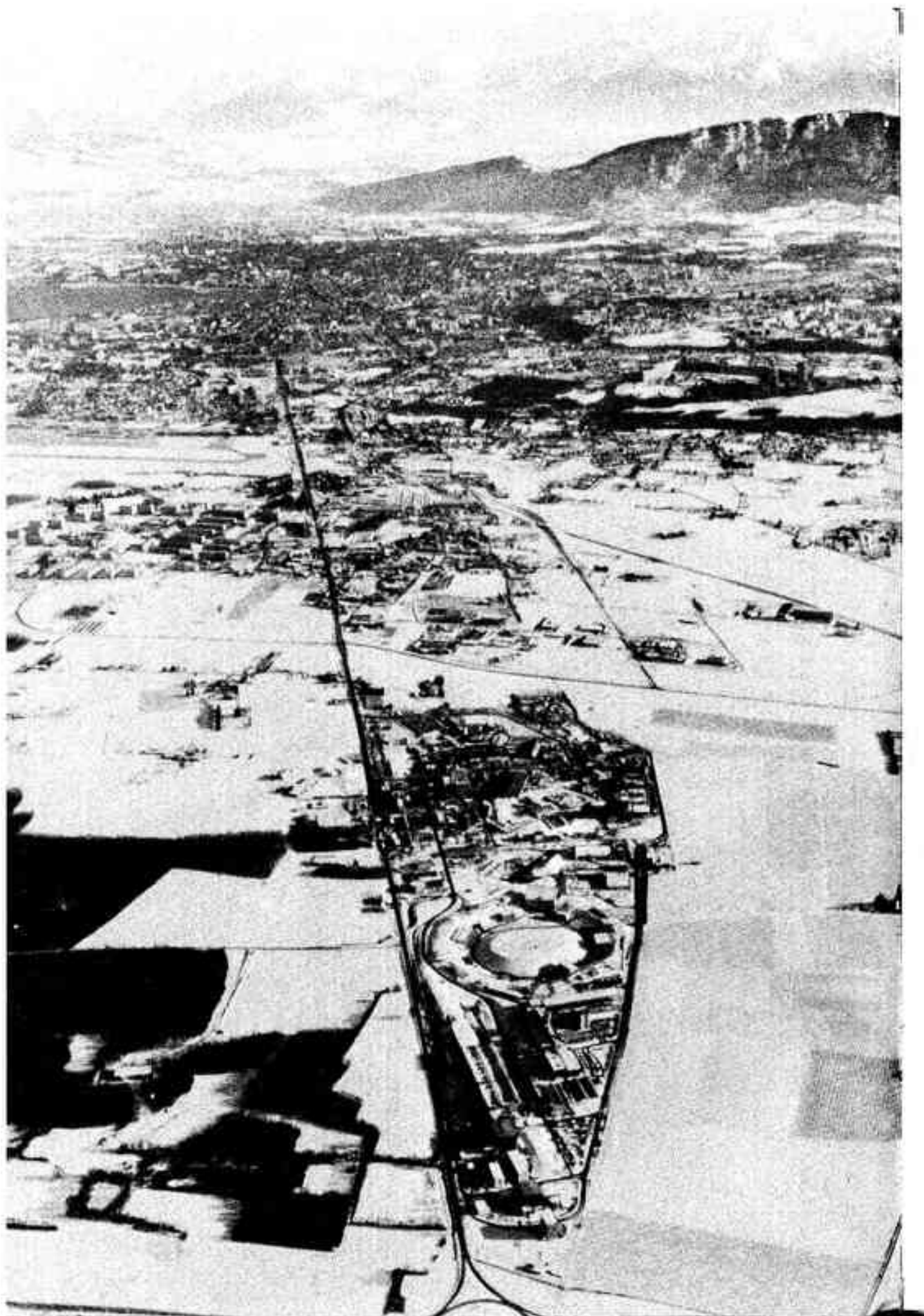
Depuis les propositions que le professeur Hutchinson formula en 1959, bien du chemin a été parcouru et nous disposons maintenant d'outils méthodologiques efficaces pour connaître et prédire les effets de l'exiguïté spatiale et de l'isolement sur les communautés vivantes.

BIBLIOGRAPHIE

- J. Blondel, *Biogéographie et Ecologie*, Masson, Paris 1979 ; Structure and dynamics of bird communities in Mediterranean habitats, in *Mediterranean-type shrublands*, (di Castri, Goodall et Specht, Eds) Elsevier, Amsterdam 1981 : 361-385 ; *Caractérisation et mise en place des végétaux dans le Bassin méditerranéen*, Caractérisation et localisation des écosystèmes méditerranéens, Proc. Workshop OTAN 1982.
- J. Blondel et J. J. Imbert, P. Insularité et démographie des Mésanges du genre *Parus*, (Aves) *CR Acad. Sci. Paris, Sér. D*, 289 : 161-164 (1980).
- J. Diamond, Colonization of exploded volcanic islands by birds: the supertrap strategy, *Science*, 184 : 893-896 (1974).
- D. Dubray, Quelques caractéristiques insulaires des peuplements d'oiseaux nicheurs des bois de Pin pignon de Petite Camargue, DIFA, Fac. Sci. Montpellier 1979.
- O.E. Hutchinson, *Hemage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals?* *Amer. Nat.* : 23 : 145-159 (1959).
- P. Henmann, The influence of insularity on fecundity in tits (*Aves, Paridae*) in Corsica, *Ecologia generalis*, sous presse 1982.
- C. LeGrand, *Recherches sur l'écologie des peuplements d'oiseaux nicheurs du massif des Maures*, Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. St Jérôme, Marseille 1978.
- R.H. MacArthur et E.O. Wilson, *The theory of Island Biogeography*, Princeton 1967.
- J.L. Marin, *Problèmes de biogéographie insulaire : le cas des oiseaux nicheurs terrestres de Corse*, Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. Montpellier 1980.
- D. Michelland, *Survie en milieu insulaire : quelle stratégie ? Le cas des Mésanges en Corse*, Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. Montpellier.
- F.W. Preston, The canonical distribution of commonness and rarity, *Ecology* 43 : 183-215, 410-452 (1962).
- E.O. Wilson, Populations and local extinctions of birds on Barro Colorado island, Panama, *Ecol. Monogr.* 44 : 133-169 (1974).

Aigle de Bonelli : ce beau et rare rapace strictement méditerranéen a réussi à coloniser certaines îles mais il est absent des Baléares et de la Corse. (Les photos illustrant cet article ont été prises par l'auteur). ►





Les collisions proton-antiproton

Pour sonder de plus en plus finement la structure de la matière, les physiciens des particules ont construit des accélérateurs de plus en plus grands.

Un nouvel accroissement de l'énergie vient d'être obtenu en utilisant les accélérateurs existants comme « anneaux de collisions ». Une nouvelle génération d'expériences à très haute énergie est maintenant en cours.

Bernard AUBERT

Les théories dites « de jauge » et la découverte des courants neutres (par une collaboration européenne où figuraient, sous l'impulsion d'A. Lagarrigue, les laboratoires de l'Ecole polytechnique et de l'Accélérateur linéaire), laissent entrevoir une nouvelle unification des théories physiques. Celle-ci engloberait les interactions électromagnétiques (déjà bien connues) et les interactions faibles (radioactivité) et fortes (cohésion du noyau atomique). Une des prédictions importantes de ces théories est l'existence de particules extrêmement « lourdes », appelées « bosons intermédiaires », Z^0 , W^+ et W^- (1), dont les masses seraient de l'ordre de 70 à 100 GeV. Or les accélérateurs existants ne permettent d'atteindre que des énergies utilisables de l'ordre de 30 GeV. A la conférence d'Aix-La-Chapelle en 1976, C. Rubbia, D. Cline et P. Mac Intyre ont proposé d'utiliser des accélérateurs existant actuellement, en anneaux de collision.

En effet, dans le choc d'un proton à grande vitesse, par exemple, avec un proton d'une cible fixe (bloc de matière), seule une petite partie de l'énergie incidente est utilisée dans le choc. Le reste constitue le mouvement de l'ensemble des deux particules qui interagissent et n'intervient donc pas dans la

réaction. Au contraire, si les deux particules sont de vitesse égale et opposée, toute l'énergie disponible est utilisée dans le choc. Par exemple, dans une collision de proton de 400 GeV sur un proton fixe, seulement 28 GeV sont utilisables alors que la collision d'un proton de 270 GeV contre un proton de 270 GeV libérera 540 GeV ; (c'est la même quantité produite dans un choc d'une particule de 1550 GeV (2) sur une particule fixe). Dans l'anneau magnétique d'un accélérateur, des particules de charge électrique identique tourneraient dans le même sens. Mais il se trouve que l'antiparticule du proton (l'antiproton) a une charge électrique négative égale mais opposée à la charge positive du proton. Les antiprotons tourneraient donc en sens inverse de ces protons sur le même anneau. L'anneau de l'accélérateur devient alors « anneau de collision ».

Produire et conserver les antiprotons

La difficulté principale pour pouvoir passer à la pratique est l'absence de source d'antiprotons. Les protons s'obtiennent facilement en déshabillant de leurs électrons les atomes d'hydrogène, mais les antiprotons eux, dans notre monde de matière s'annihilent très vite (dès qu'ils rencontrent un proton ou un neutron). Le problème est donc de produire des antiprotons en quantité suffisante et de les stocker pour réaliser des faisceaux d'antiproton intenses. Les antiprotons n'existent pas à l'état libre, il faut donc les produire et, une fois produits, les isoler et les garder. La production se fait en envoyant sur une cible matérielle un faisceau intense de 10^{13} protons de haute énergie. Ils produiront seulement

□ Bernard Aubert, maître de recherche au CNRS, travaille sur les collisions proton-antiproton (projet UA1) au Laboratoire d'Annecy-Le-Vieux de physique des particules.

(1) Voir par exemple : 1980-81 *Images de la physique*, supplément au n° 39 du Courrier du CNRS, p. 47.
(2) L'énergie est mesurée en électron-volt. 1 TeV représente 10^{12} électrons volts, 1 GeV représente 10^9 électrons volts.

◀ Site du Laboratoire du CERN à Genève où le projet de collisions proton-antiproton a été réalisé.

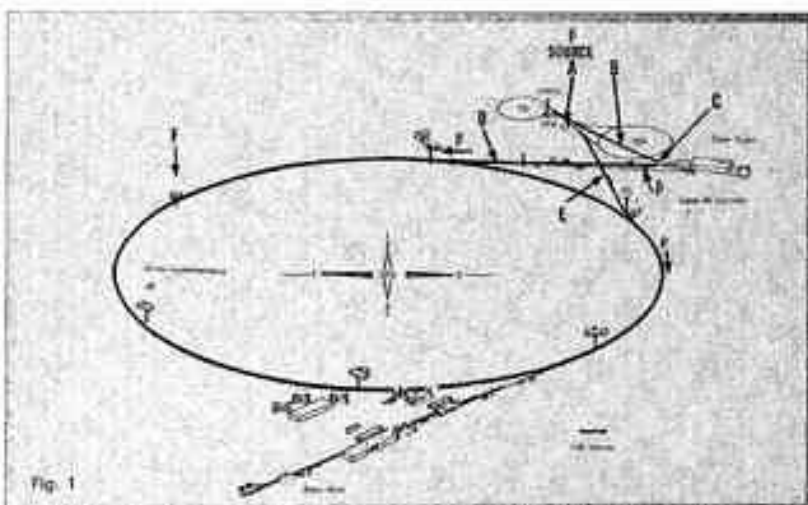


Fig. 1

Les liaisons complexes permettent tout un programme de physique. Les antiprotons sont accumulés en A, accélérés à 26 GeV dans le proton synchrotron PS, puis injectés, soit dans les ISR - B, soit dans le SPS - CD où ils seront accélérés de 26 à 270 GeV en même temps que les protons seront injectés.

10^7 antiprotons, mélangés à d'autres particules (celles-ci ont une durée de vie faible et s'éliminent d'elles-mêmes). De plus, ces antiprotons ont une distribution de direction et de vitesse qui rend peu efficace leur collecte. On ne peut accumuler et conserver que des particules de directions et de vitesses égales. Il est donc nécessaire de réduire cette dispersion : c'est ce qu'on appelle le refroidissement. C'est là que jouera donc le refroidissement mis au point par Simon Van der Meer que l'on appelle refroidissement stochastique.

La distribution des particules est observée dans une section de l'anneau, on calcule son centre de gravité et un

signal est envoyé de l'autre côté de l'anneau afin d'appliquer un champ électrique de correction qui resserrera les particules autour de la valeur moyenne. Il faut pour cela battre de vitesse des particules qui voyagent presque à la vitesse de la lumière. On utilise, d'une part, la différence de longueur entre un arc de cercle et la corde qui le sous-tend, d'autre part, des circuits électroniques spécialement rapides. Ce problème résolu on est capable de conserver sur une orbite de l'anneau d'accumulation la réserve d'antiprotons.

Pour qu'il y ait une bonne probabilité de collision de particules il faut un

grand nombre de particules et on va accumuler les antiprotons en recommençant des milliers de fois la même opération production-refroidissement. Pour cela la chambre à vide de l'anneau accumulateur est très grande comparée aux chambres des accélérateurs classiques et spatialement les opérations refroidissement et stockage se feront dans deux positions distinctes, (voir fig. 2). Le paquet d'antiprotons refroidis est déplacé pour être mis à l'abri des champs de refroidissement. Des milliers de paquets seront ainsi empilés les uns sur les autres jusqu'à l'obtention de quelques 10^{11} antiprotons. Le CERN possède donc ainsi

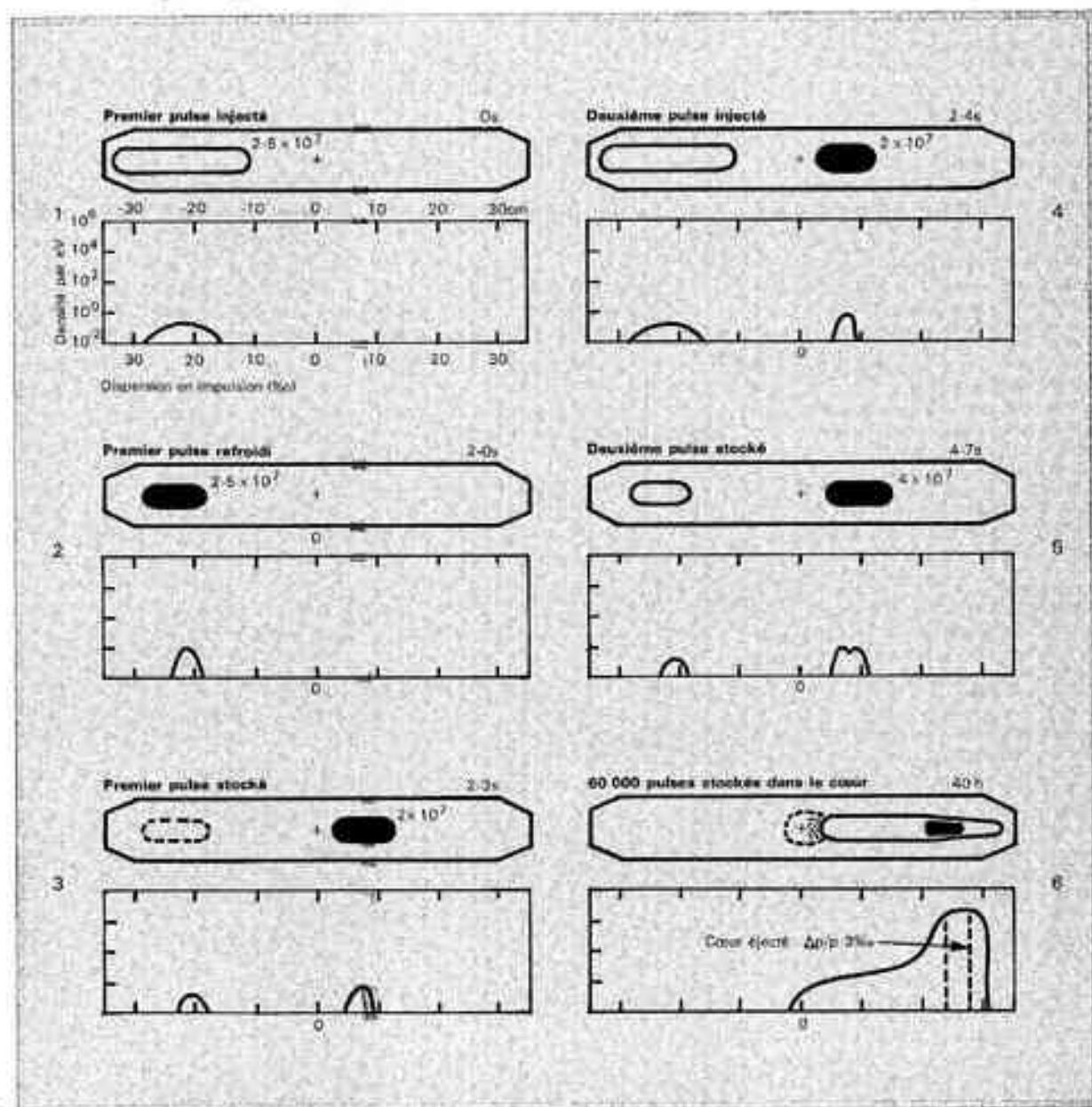


Fig. 2B - 1 et 2. une giclée (pulse) d'antiprotons est injectée, puis par un grand nombre de petites corrections, refroidie. La dispersion des impulsions se centre sur une valeur moyenne - 3. La première giclée est stockée dans une portion de la chambre à vide de l'anneau magnétique - 4 et 5. Une deuxième giclée est injectée, refroidie et stockée - 6. Après plusieurs heures, un grand nombre de particules sont stockées et prêtes à être accélérées.

une source d'antiprotons de 3,5 GeV. Comme il possède également un réseau d'accélérateurs et d'anneaux de collision reliés les uns aux autres, chaque machine pourra donc accélérer les antiprotons. Un programme complet se développe qui utilise des faisceaux d'antiprotons dans toute une gamme d'énergies : projet LEAR à 2 GeV, expériences aux anneaux de collision ISR de 31 GeV ou expériences au supersynchrotron (270 GeV) - (voir fig. 1).

Fig. 2 - Principe du refroidissement et du stockage. Le synchrotron à protons (ps) accélère une giclée de 10^{13} protons toutes les 2,4 secondes. Ces protons servent à produire à peu près 10^7 antiprotons qui sont injectés dans l'anneau de refroidissement et d'accumulation.

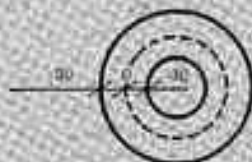


Fig. 2A - Anneau de refroidissement et de stockage. Les antiprotons (p) sont injectés entre 0 et 30. Ils sont refroidis (on réduit la dispersion en impulsion, donc l'étalement en rayon). Ils sont stockés à une énergie légèrement supérieure (rayon entre 0 et 30).

Les collisions proton-antiproton à haute énergie

Le but principal de cette entreprise est la collision à très haute énergie : 270 GeV. Les antiprotons sont envoyés dans le synchrotron qui avait accéléré les protons « parents » pour être accélérés à une énergie de 26 GeV, avant d'être enfin injectés dans le supersynchrotron qui, lui, les portera à l'énergie finale de 270 GeV. L'injection est le dernier écueil qui attend les antiprotons. Elle doit être réalisée au milliardième de seconde près, 10^{-9} s. Les deux machines, le synchrotron à protons (PS) injecteur et le supersynchrotron (SPS), doivent être réglées l'une par rapport à l'autre avec cette précision. Lorsque l'injection d'un type de particules est réalisée, il faut introduire en sens inverse les particules de l'autre signe sans perturber l'orbite précédente. Protons et antiprotons seront alors accélérés simultanément, tournant en sens inverse. Au moment voulu une légère déflexion permettra les collisions.

On caractérise la probabilité de collision de deux particules de faisceaux opposés par un nombre appelé luminosité. Plus la luminosité sera grande,

plus grand sera le nombre d'interactions. La luminosité prévue est de 10^{30} . Alors que le projet proposé a été accepté par la direction du CERN en 1978, la première injection dans le supersynchrotron a eu lieu en juillet 1981 et les premières manipulations, en décembre 1981, ont permis d'atteindre une luminosité de 5.10^{27} . Les premières expériences ont donc montré que les concepts sont corrects et que l'idée de C. Rubbia de 1976 était juste. L'utilisation, en revanche, est délicate et un long chemin de mise au point reste à parcourir pour obtenir la luminosité espérée.

L'article de la conférence d'Aix-La-Chapelle de 1976 était intitulé « Pouvons-nous voir le Z^0 avec les accélérateurs existants ? ». Il est sûr que la motivation principale du projet est la mise en évidence des bosons intermédiaires qui, d'après la théorie de Steven Weinberg et Abdus Salam, prix Nobel 1979, devraient exister avec une masse voisine de 80 GeV. Ces bosons ont une durée de vie très brève et se désintègrent en deux leptons. On ne peut donc les observer que par les produits de leur désintégration. Par exemple une paire d'électrons de masse effective de 80 GeV signerait l'existence du Z^0 . Cette existence confirmerait tout le formalisme d'unification de la théorie qui

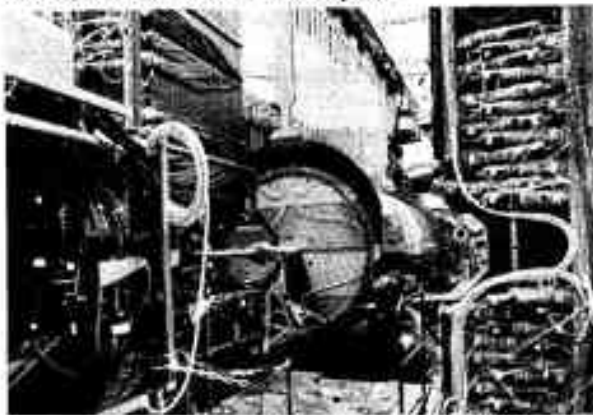


Le supersynchrotron à protons du CERN est un accélérateur construit dans un anneau de 7 km de périmètre. Il peut être utilisé comme un anneau de collision. Les protons et les antiprotons tournent dans la même chambre à vide mais en sens contraire. L'orbite est assurée par le champ magnétique produit par les aimants visibles sur ce cliché.

s'est révélé si fructueux cette dernière décennie.

En plus de cette recherche, il existe de nombreux sous-produits. Va-t-on découvrir de nouvelles particules ou de nouveaux phénomènes? Les cosmiciens nous ont indiqué que dans leurs émulsions les événements très énergétiques présentaient des caractéristiques inhabituelles, le nombre de particules neutres par exemple. Mais leurs statistiques sont toujours si faibles qu'aucune étude systématique n'est possible. C'est maintenant par milliers que ces événements existent et que leur étude est en cours.

Enfin la constitution du proton et de l'antiproton est toujours une énigme pour le physicien. Pour la percer il faut étudier les sous-produits de l'interaction, leur nombre, leur distribution en vitesse, leur distribution dans l'espace.



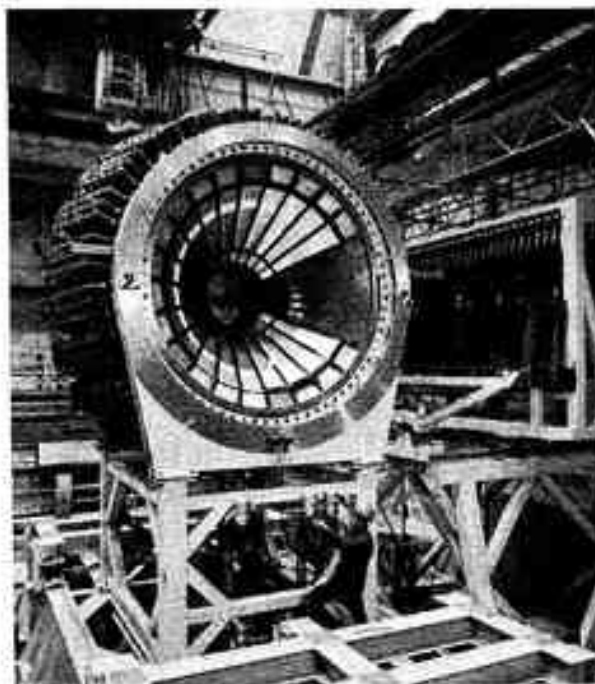
Le tube à vide dans les zones d'expérience passe à l'intérieur d'appareillage complexe. Ici une collaboration internationale UA1, comprenant dix groupes dont trois français (Annecy, Collège de France et Saclay) a construit un détecteur comprenant un cylindre de chambres à traces de 6 m de long et de 2,20 m de diamètre entouré de calorimètres pour mesurer l'énergie des particules secondaires produites. Lorsqu'il y a prise de données, les calorimètres visibles au premier plan encadrent complètement le cylindre dans lequel seront visualisées les traces.

Les expériences entreprises

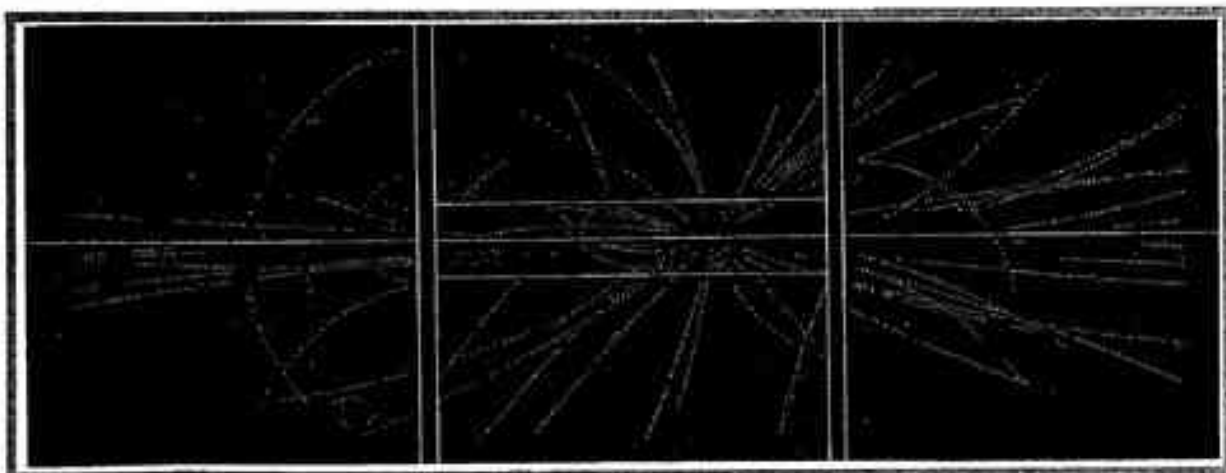
C'est donc un nouveau champ de physique qu'abordent maintenant quelques centaines de physiciens. Pour observer ces interactions deux zones ont été équipées. Le supersynchrotron étant souterrain, ce sont deux immenses cavernes qui renferment des appareillages importants.

Dans la première, située à 25 mètres sous terre, se trouvent deux expériences, la plus grosse et la plus petite. La première, appelée UA1, pèse plus de 1000 tonnes, elle a été construite par un groupe de physiciens de dix labora-

toires différents comprenant C. Rubbia, l'instigateur du projet et trois groupes français d'Annecy, du Collège de France et de Saclay. L'idée est non seulement de détecter le Z^0 mais d'avoir une très bonne information de l'ensemble de l'interaction. Pour cela un volume important est réservé à l'intérieur d'un champ magnétique à la visualisation des traces de particules produites par les collisions proton-antiprotons. Ces traces sont matérialisées par l'ionisation de gaz dans un cylindre de 6 mètres de long et de 2 mètres de diamètre. L'information est enregistrée sur des fils et on reconstruit



L'appareillage construit par la collaboration UA2 comprenant, entre autres, un groupe du LAL d'Orsay et de Saclay, détecte les gerbes électromagnétiques au moyen de calorimètres découpés en tranches convergeant sur la zone d'interaction.



Collision enregistrée dans l'appareillage UA1. Les particules produites ionisent sur leur passage le gaz des chambres à traces (argon et éthane). Cette ionisation est mesurée par de nombreux fils. L'information est enregistrée et les traces reconstruites. Une des premières surprises est le grand nombre de particules secondaires créées. Le proton et l'antiproton suivent la ligne centrale et se sont rencontrés au point origine de toutes les traces.

des traces. Autour de ce cylindre, des compteurs appelés calorimètres, absorbent les particules produites et mesurent l'énergie déposée par celles-ci. Enfin, à l'extérieur du champ magnétique, des chambres à fils détectent la présence de particules non absorbées qui pourraient être identifiées comme lepton μ . Cet appareillage se veut donc le plus universel possible et permet une très grande variété d'études.

La plus petite expérience, au contraire, est très ponctuelle dans sa recherche. Elle est réalisée par quelques physiciens du CERN et d'Annecy. Le but est d'identifier d'éventuels monopôles magnétiques : un aimant comprend normalement un pôle nord et un pôle sud. Un pôle isolé, s'il existe, serait appelé monopôle. On le recherche au moyen de feuilles de plastique kapton qui seraient endommagées par son passage.

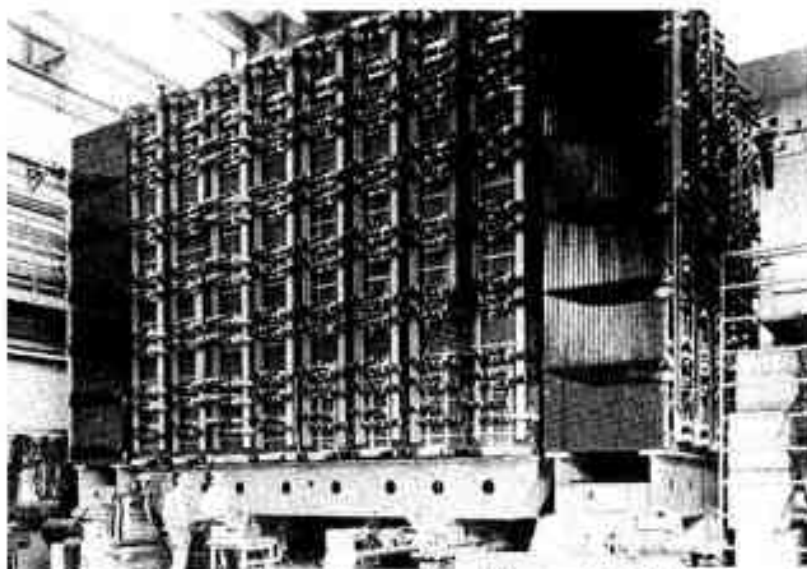
Dans la seconde intersection équipée, qui est une véritable grotte à 63 mètres sous terre, se trouvent trois expériences. Une expérience légère mesure la section efficace de diffusion élastique c'est-à-dire une interaction sans création de particules secondaires. Une seconde expérience a consisté à prendre quelques dizaines de milliers de photographies d'interactions au moyen d'une chambre à dard sans mesure des impulsions des particules, afin de faire une étude descriptive des collisions. Enfin, la troisième expérience appelée UA2 à laquelle participent des physiciens de l'accélérateur linéaire d'Orsay et de Saclay, s'est concentrée sur la recherche des bosons intermédiaires. Pour cela l'accent a été mis sur la détection et la mesure des électrons sortant de la collision.

On voit donc que l'ensemble de ces expériences est bien complémentaire.

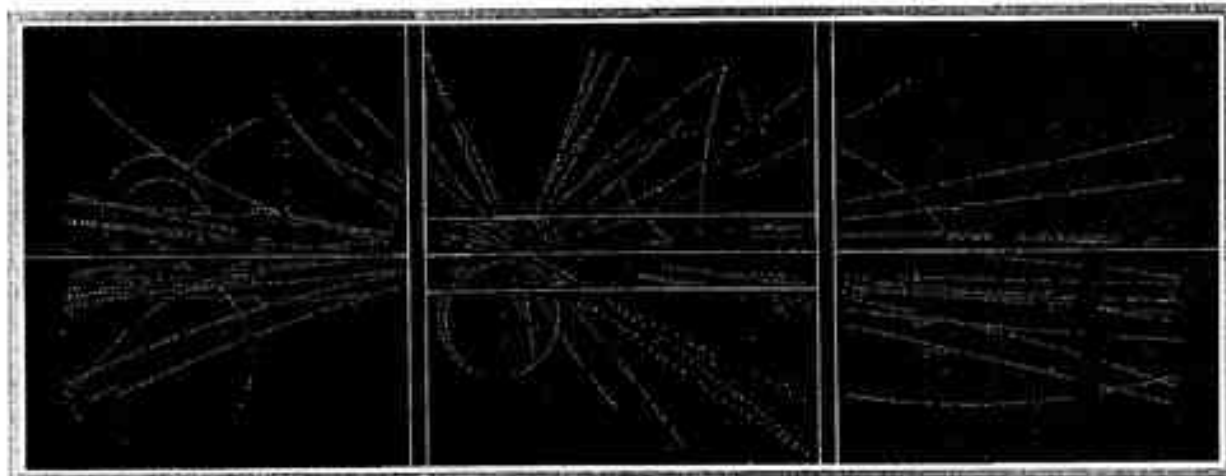
Toutes ont été calibrées et testées et les premiers résultats commencent à sortir. Avec la luminosité atteinte jusqu'à présent il n'est pas question d'identifier les bosons intermédiaires. En effet, la luminosité théorique de 10^{30} permettrait d'espérer seulement 10 bosons Z^0 par jour. Il faudra donc attendre les périodes de prises de données de 1982 pour pouvoir commencer d'approcher les mesures significatives.

Cependant quelques centaines de milliers de collisions ont été enregistrées en décembre 1981 et, de ces événements, on peut attendre une bonne moisson de résultats intéressants. Déjà on sait que dans ces collisions le nombre de particules secondaires est très élevé et qu'une grande énergie perpendiculaire à la direction de faisceau est émise principalement par un grand nombre de particules individuellement peu énergiques. Pour prendre une comparaison, le résultat du choc énergétique d'un proton sur un antiproton pourrait rappeler le choc de deux pots de confiture l'un contre l'autre.

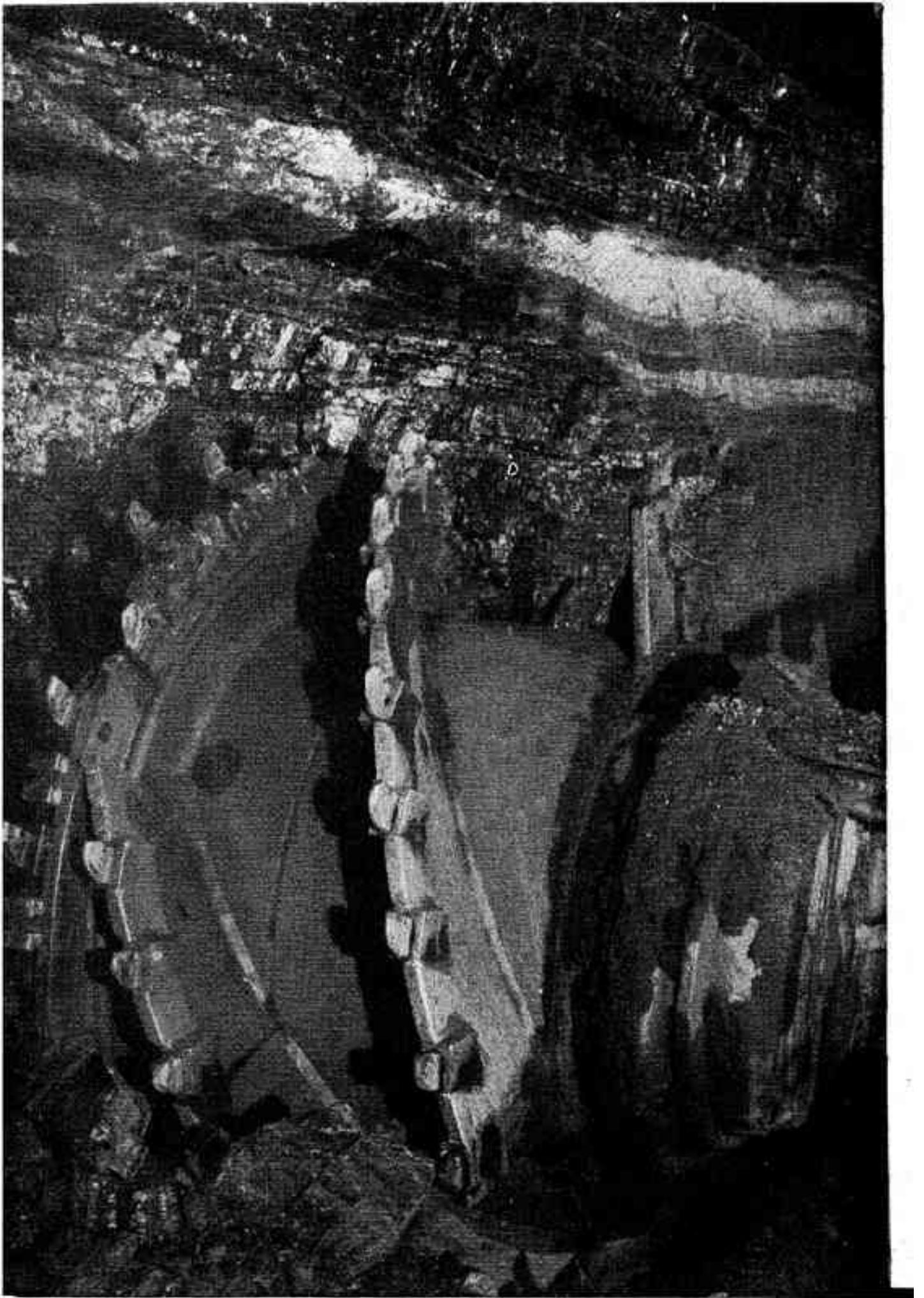
Grâce au travail et à la compétence d'un grand nombre de physiciens et d'ingénieurs du CERN et des pays européens, une idée originale de 1976 a permis de réaliser un projet de très grande technicité qui dote les physiciens des particules d'un moyen exceptionnel pour la compréhension des différentes forces et de la nature même du monde dans lequel nous vivons. Un projet analogue, en cours de construction aux Etats-Unis, n'entrera en activité que dans quelques années, ce qui permet aux physiciens européens et notamment français d'effectuer un grand pas en avant dans la connaissance de l'infiniment petit.



Appareillage utilisé pour observer les premières collisions proton-antiproton.



Un des premiers événements observés en laboratoire visualisant les produits secondaires d'une collision d'un proton de 270 GeV sur un antiproton de 270 GeV.



Le charbon : matière première de substitution au pétrole et au gaz naturel

Parmi les sources d'énergie capables de se substituer au pétrole et au gaz naturel, le charbon occupe une place importante. Son avenir est lié aux progrès scientifiques et techniques qui permettront de rendre convertibles les quelques millions de tonnes que renferme le sous-sol.

Henri CHARCOSSET

Depuis quelques années, nous assistons de par le monde à un véritable retour au charbon. Ce regain d'intérêt pour un combustible que le pétrole avait détrôné peut s'expliquer par l'abondance des réserves mondiales en charbon évaluées à au moins trois siècles au rythme de la consommation actuelle, contre trente et quarante ans respectivement pour le pétrole et le gaz naturel (1), et à la relativement bonne répartition de ces ressources à la surface de la planète (tableaux 1 et 2). Les réserves de la France représentent 0,4 à 0,5 % des réserves européennes. L'avenir des charbons français est lié aux progrès scientifiques et techniques qui permettront de rendre convertibles, dans un futur plus ou moins lointain, le milliard de tonnes que renferme son sous-sol. En 1980, la France a consommé cinquante millions de tonnes de charbon (tableau 4) dont 32,4 millions étaient importées (tableau 3).

Si le charbon reste surtout utilisé en sidérurgie, d'autres branches d'activité effectuent un début de retour au charbon. EDF reconvertit une partie de son parc de centrales thermiques au charbon (il en est ainsi par exemple de la centrale électrique minière de Gardanne) et prévoit la construction de nouvelles centrales utilisant ce combustible. Certaines industries, et notamment les cimenteries, ont amorcé un mouvement analogue. D'autres évolutions, à plus long terme, sont à prévoir, dont les échéances dépendent en particulier des résultats des recherches en cours sur la gazéification et la liquéfaction du charbon.

□ Henri Charcosset, maître de recherche au CNRS, est responsable du groupement de recherches coordonnées « Charbon ».

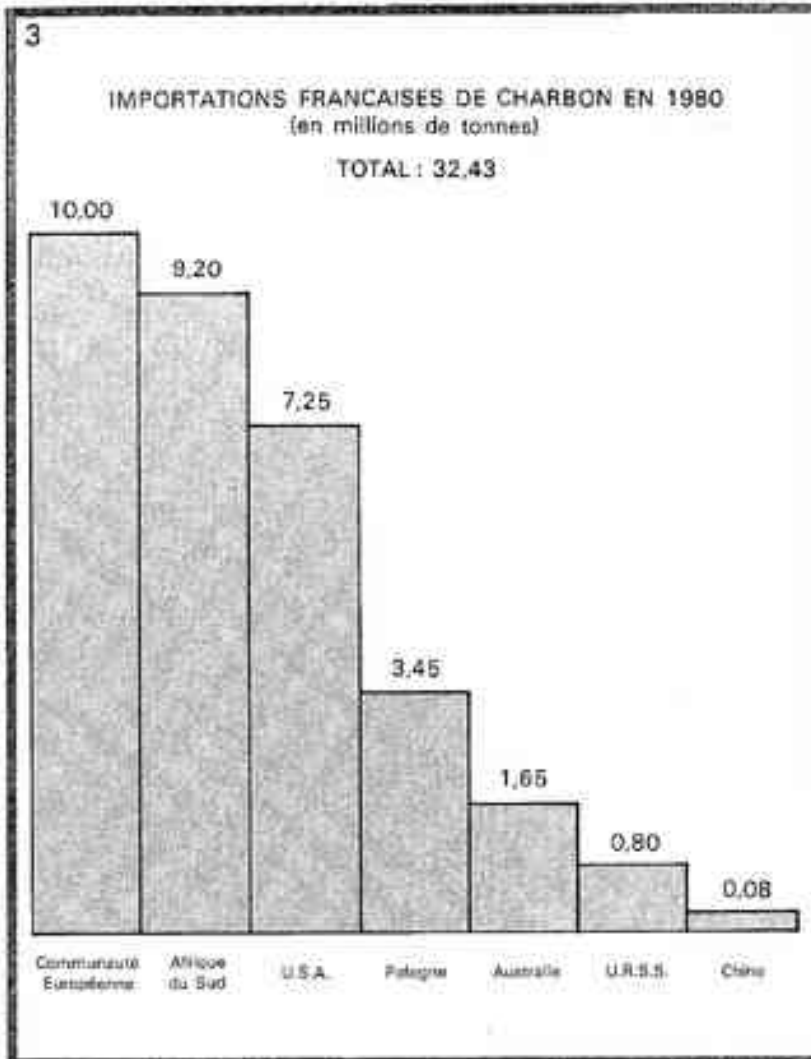
(1) Même si ces chiffres sont discutables en valeur absolue (les estimations des experts étant très variées), il reste certain que le rapport entre les réserves de gaz naturel et de pétrole d'une part, de charbon d'autre part, est de l'ordre de 1 à 10 ou même plus faible.

1 RESERVES MONDIALES DE CHARBONS (en millions de tonnes)			
PAYS	RESERVES RECUPERABLES	RESSOURCES TOTALES	
Europe	130 000	856 000	
U.R.S.S.	136 000	5 700 000	
Chine	90 000	1 000 000	
Etats-Unis	180 000	2 900 000	
Canada	5 000	500 000	
Amérique latine	5 000	40 000	
Afrique	18 000	60 000	
Asie (sans la Chine)	20 000	130 000	
Océanie	25 000	200 000	
TOTAL	527 000	11 176 000	

2 REPARTITION DES RESERVES ET PRODUCTIONS DE CHARBONS EN EUROPE (en millions de tonnes)			
PAYS	RESERVES RECUPERABLES	RESSOURCES TOTALES	PRODUCTION 1980
R.F.A.	40 000	290 000	87
Grande Bretagne	4 000	160 000	130
FRANCE	400	1 400	20,7
Belgique	120	250	6,3
Yougoslavie	17 000	22 000	0,4
Espagne	1 600	3 600	13
Finlande	4 300	33 000	—
Pologne	22 000	60 000	193
R.D.A.	29 000	30 000	0,1
Tchécoslovaquie	6 000	21 000	28
TOTAL	130 000	656 000	478,5



Haveuse Anderson simple tambour dans une taille à soutènement marchant Ferronstatik au siège de Folschviller. Photo Gilbert Friderich. (Cliché Charbonnage de France).



4

RÉPARTITION
DE L'UTILISATION FRANÇAISE DE CHARBON EN 1980
(en million de tonnes, mt).

TYPE D'UTILISATION	REMARQUES
Production d'énergie électrique : 27 mt. • 8,5 mt par les centrales électriques nucléaires. • 18,5 mt par EDF.	• La contribution d'EDF n'était que de 6 mt en 1973. • Utilisation possible de charbons très divers.
Sidérurgie : 15 mt. est sous forme de coke de haut fourneau, soit pour la fabrication d'agglomérés de minerai de fer.	• Les charbonnages de France ont développé des procédés originaux de cokéfaction (préchauffage et préchauffage) facilitant l'utilisation dans les cokeries des charbons peu cokillants comme les charbons français.
Secteur résidentiel : 4,2 mt. • poêles et radiateurs (2 mt); • chaudières collectives (0,4 mt) ou • individuelles (1,8 mt).	• Poêles et cuisinières utilisent surtout des anthracites et des bouillottes. Les chaudières peuvent utiliser le charbon-vapeur, de prix beaucoup plus bas.
Industrie (hors sidérurgie) : 3,5 mt. Sous formes très diverses. • chimie : le charbon étant injecté sous forme gazeuse dans les fours à coke. • charbonnages industriels (15 % environ des besoins industriels correspondants).	• Les cendres du charbon (charbon-vapeur) au lieu de constituer une gêne sont utilisées comme matières premières dans les chimie.

Comparé au pétrole et au gaz naturel, le charbon a le gros défaut d'être un solide, poussiéreux et friable. Pour faciliter son emploi, la solution la plus simple est de le broyer finement puis de le mettre en suspension dans un liquide, combustible de préférence. Les mélanges charbon-fuel par exemple - qui renferment généralement 30 à 40 % en poids de charbon - forment un produit pompable, que l'on peut utiliser dans des chaudières et des fours existants en remplaçant une partie du produit pétrolier par du combustible solide. Des recherches sont actuellement menées dans le but d'améliorer ces mélanges charbon-combustible liquide. Certaines d'entre elles visent à obtenir un broyage fin du charbon, afin d'abaisser la granulométrie du solide au dessous de trente microns. D'autres ont pour but de choisir des fuels assurant une bonne stabilité des suspensions et de trouver des surfactants capables d'éviter l'agglomération des particules de charbon. On travaille également sur l'épuration du charbon afin de pouvoir employer des solides riches en cendres et en soufre.

Une autre voie explorée pour faciliter l'emploi du charbon est de transformer ce solide en combustibles fluides, et notamment en gaz. Traité par de la vapeur d'eau, le charbon fournit de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$). Le mélange obtenu ($CO + H_2$) pourrait, dans le futur, constituer une source de combustibles gazeux et liquides, mais aussi servir d'intermédiaire de synthèse dans les grands procédés industriels, où il pourrait se substituer au gaz issu du pétrole, actuellement utilisé. La réaction décrite ci-dessus est fortement endothermique et nécessite un apport de calories qui est fourni par addition d'eau et d'oxygène (d'où le nom « d'oxyvaporogazéification » donné à la réaction). Ceci conduit à la combustion d'une partie du charbon par le processus exothermique $C + O_2 \rightarrow CO_2$. La maîtrise industrielle de l'oxyvaporogazéification, à très grande échelle, n'est pas aisée. Quelques procédés existent cependant. Le procédé Lurgi, qui date de 1936, opère sous pression (30 bars); les unités les plus récentes convertissent 1000 t/j de charbon avec un rendement assez faible (65 % par rapport au gaz potentiellement récupérable à partir du charbon) et ne peuvent pas utiliser tous les charbons. Une variante à fusion de cendre est en cours de développement.

Le procédé Koppers-Totzek, qui date de 1952 et opère à la pression atmosphérique, permet d'utiliser tout combustible fossile solide. On tente actuellement d'augmenter la pression à 15-20 atm.

Le procédé Texaco assure la gazéification avec un rendement supérieur à 90 % de tout charbon ou autre résidu carboné préalablement mis en suspension dans un liquide, par exemple de l'eau. Des unités pilotes de 150 t/j fonctionnent en Allemagne fédérale et aux Etats-Unis. Dans ce dernier pays, une unité de 1000 t/j devrait être opérationnelle en 1983.

Voyons d'abord les utilisations « classiques » du mélange $\text{CO} + \text{H}_2$. Le gaz industriel issu de l'oxyvapo-gazéification du charbon peut être employé tel quel comme combustible ; il possède toutefois un pouvoir calorifique inférieur à celui du gaz naturel. On peut faire varier la composition du mélange (c'est-à-dire le rapport CO/H_2) à l'aide de la réaction maîtrisée industriellement :



Ainsi, si l'on considère le processus global - oxyvapo-gazéification du charbon suivie d'une conversion du monoxyde de carbone obtenu - on constate que le charbon est source d'hydrogène pur. Cet hydrogène et le monoxyde de carbone préparés à partir du charbon pourraient être aussitôt intégrés à la production industrielle de grands intermédiaires que sont le méthanol et l'ammoniac (rappelons, pour donner un ordre de grandeur de l'importance de ces produits, que la production française de méthanol était de 344 000 tonnes en 1980, celle d'ammoniac de 2 034 000 tonnes en 1977).

De nouvelles utilisations du gaz industriel apparaissent également. Le mélange $\text{CO} + \text{H}_2$ pourrait servir de point de départ à un grand nombre de synthèses autres que celles du méthanol et de l'ammoniac. On pourrait par exemple l'employer dans la préparation directe d'alcools supérieurs (éthanol, propanol) qui, une fois mélangés à l'essence, formeraient des combustibles plus faciles à utiliser que le méthanol (qui aussi mélangé à l'essence). On pourrait encore l'utiliser pour synthétiser des essences, soit directement (par le procédé Fischer-Tropsch), soit en passant intermédiairement par le méthanol (procédé Mobil - voir 1981-Image de la chimie, supplément au n° 41 du Courrier du CNRS). Pour explorer toutes ces nouvelles possibilités de

synthèse, le CNRS a créé, dès 1977, un groupement de recherche coordonnées « CO ».

L'une des voies les plus prometteuse de transformation du charbon est la conversion en gaz naturel de synthèse (GNS). Au moins cinq procédés de gazéification du charbon fournissant du GNS sont actuellement mis au point au niveau du laboratoire. L'oxyvapo-gazéification, suivie de méthanisation, est à ce jour la plus proche du développement industriel. La vapo-gazéification, catalysée par la potasse (procédé mis au point par Exxon vers 1970) est attrayante car plus directe que l'oxyvapo-gazéification. Plus ancienne que la méthode précédente, la pyrolyse hydrogénante lente est malgré tout intéressante de par la simplicité de la réaction de base qui est en jeu ($\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$) ; mais elle ne paraît progresser que lentement en raison de son faible rendement de conversion. La pyrolyse hydrogénante éclair, qui, comme le procédé Exxon date de 1970-75, suscite un grand intérêt car elle s'accompagne de très faibles temps de réaction, ce qui a pour effet de réduire considérablement le volume des installations. De plus elle peut fournir des hydrocarbures aromatiques valorisables en même temps que le GNS. Enfin, un dernier procédé plus récent - l'hydroliquéfaction suivie d'autres traitements hydrogénants - étudié par le groupe d'étude de la conversion du charbon par hydrogénation - GECH (voir encadré), présente le double intérêt d'un taux de conversion élevé du

charbon et d'une coproduction modulable, suivant les besoins du moment, d'hydrocarbures liquides ou gazeux. Les résidus de tous ces procédés, à l'exception du premier, peuvent être oxyvapo-gazéifiés pour fournir le mélange $\text{CO} + \text{H}_2$ ou l'hydrogène pur nécessaire à la conduite des opérations.

Préparer des hydrocarbures liquides

La gazéification du charbon n'est pas le seul moyen de transformer le solide en hydrocarbures liquides ou gazeux. On peut également avoir recours à l'hydroliquéfaction, technique plus récente et qui demandera encore d'importantes recherches fondamentales. Ce procédé consiste à mettre le charbon en suspension dans une huile de recyclage (donc provenant du charbon lui-même) et de la traiter à des températures de l'ordre de 450°C, sous des pressions d'hydrogène de l'ordre de 200 bars (tableau 5). Pour que les unités polyaromatiques du solvant, partiellement hydrogénées, puissent jouer leur rôle de stabilisateur des radicaux libres issus de la thermolyse du charbon, elles doivent pouvoir être réhydrogénées en continu au cours de l'hydroliquéfaction. Le principe de base de la réhydrogénation du solvant varie suivant les procédés (tableau 6). Les difficultés rencontrées dans ce domaine viennent de la grande diversité des charbons, de leur différence de réactivité, de l'insuffisance des connaissances actuelles de leur structure moléculaire et des relations entre leur structure et

LE GROUPE D'ETUDE DE LA CONVERSION DU CHARBON PAR HYDROGENATION (GECH)

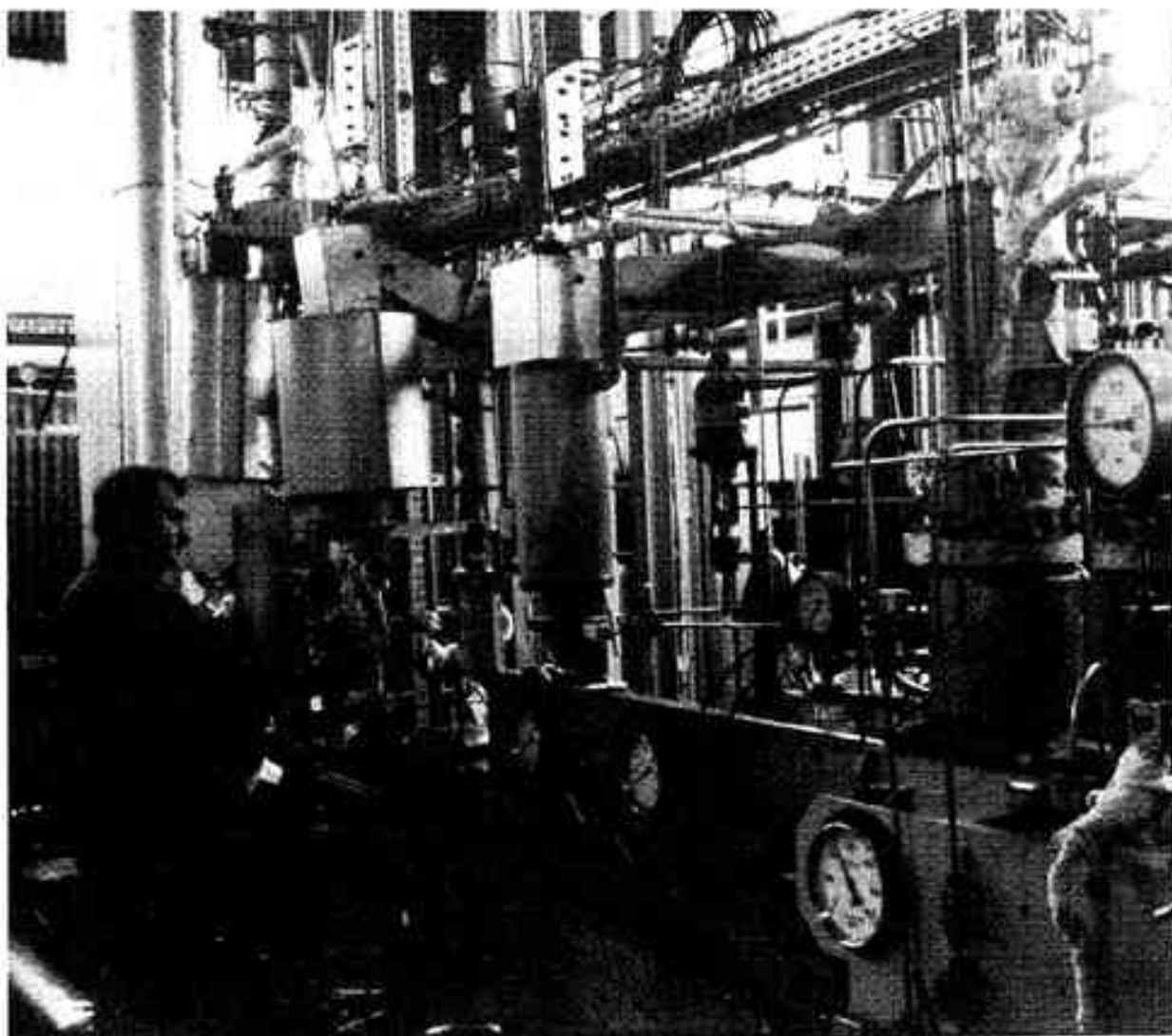
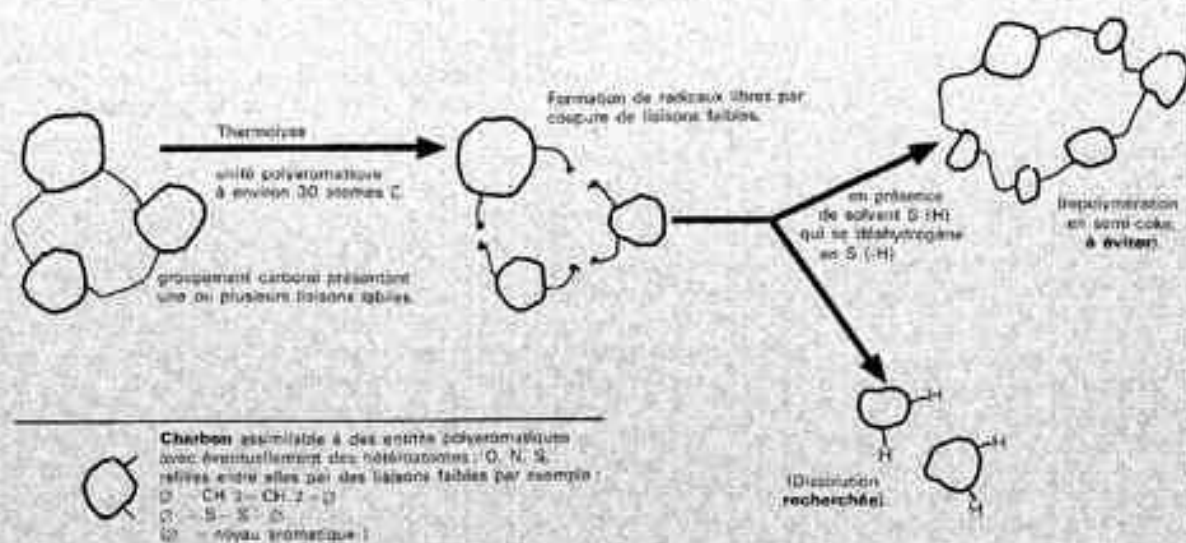
Ce groupe a été créé en juillet 1980 entre quatre organismes : le Gaz de France (GDF), les Charbonnages de France (CDF), l'Institut français du pétrole (IFP) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Son objectif est d'étudier la gazéification du charbon par un procédé qui consiste à hydrogéner le charbon en phase liquide puis à effectuer une hydrogazéification des produits liquides obtenus. Ces opérations conduisent à la préparation d'hydrocarbures liquides, éventuellement transformés ensuite en gaz riche en méthane. Le programme des travaux envisagés pour la période 1980-83 vise à déterminer un procédé valable et à faire son évaluation technico-économique.

Gaz de France et les Charbonnages de France mettent à la disposition du groupement les résultats d'études effectuées dans le cadre d'un précédent programme portant sur la gazéification par la chaleur nucléaire et abandonné depuis. Le CERCHAR (Centre de recherches de CDF), étudie plus particulièrement la première phase du procédé, l'hydrogénation primaire, à l'échelle pilote. L'IFP apporte son savoir faire pour le traitement et l'utilisation des hydrocarbures liquides, produits inévitablement obtenus en parallèle avec le gaz. Le CNRS, dont les laboratoires concernés sont regroupés au sein du GRECO « Charbon », est chargé des études fondamentales sur les étapes les moins connues du processus (dissolution du charbon, hydrogénolyse et méthanisation des produits primaires, génie chimique), ainsi que sur l'analyse de la structure des charbons et de leurs produits primaires de conversion.

5

SCHEMA DE BASE DE L'HYDROLIQUEFACTION DU CHARBON



Pilote d'hydroliquéfaction du Centre d'Etudes et de Recherches des Charbonnages de France. - (Cliché Murray).

leur réactivité. Dans l'approche américaine SRC II par exemple, le sulfure de fer contenu dans le charbon sert de catalyseur de réhydrogénation du solvant. Son activité catalytique est déterminée non seulement par la teneur en pyrite du charbon, mais aussi par la taille des particules de pyrite et par les impuretés que cette dernière contient. Il en résulte des variations, encore difficilement prévisibles, de la conversion du charbon en fonction du lot traité.

Les travaux du GRECO « charbon » ont pour objectif de résoudre certains de ces problèmes. Ils visent notamment

à établir des corrélations entre l'activité catalytique et les propriétés physico-chimiques de catalyseurs synthétiques au fer en hydroliquéfaction, et à modéliser certains des processus en remplaçant le charbon et/ou le solvant par des molécules plus simples mais néanmoins représentatives des types de liaisons trouvés dans les systèmes réels,

De nombreux problèmes restent à résoudre

Le développement de nouvelles voies de conversion du charbon est lié pour une grande part à l'amélioration

de nos connaissances sur cette matière première, très hétérogène. Nous avons déjà signalé que l'aptitude du charbon à s'hydroliquifier dépendait d'une de ses caractéristiques a priori secondaires (taille des particules et composition chimique exacte de la pyrite renfermée dans le solide). Il faudra également déterminer la forme exacte sous laquelle se trouvent les hétéroatomes (soufre, azote) de la matière organique, ainsi que les modes et les forces de liaison entre les matières organiques et minérales, afin de résoudre un certain nombre de problèmes concrets (amélioration de la séparation de la matière organique et de la matière minérale, réduction de la formation de gaz et de vapeurs toxiques...). En outre, il faudra se pencher sur les importants problèmes de corrosion des installations et de pollution atmosphérique liés à l'utilisation intensive du charbon.

La diversité des spécialités (chimie organique et minérale, génie chimique, catalyse...) qui interviennent dans la caractérisation des charbons et dans l'étude de leurs réactions primaires de conversion nécessite que toutes les activités en matière de charbon menées au CNRS soient bien coordonnées, ce qui justifie l'intérêt du GRECO « charbon ». Ces recherches doivent également être conduites en étroite collaboration avec celles effectuées par des organismes à vocation plus appliquée, ce que facilite un groupement tel que le GECH.

La France n'est d'ailleurs pas le seul pays à retrouver un regain d'intérêt pour les recherches fondamentales sur la structure du charbon et ses réactions primaires de conversion, comme en témoigne la reprise, après une interruption de treize ans, de la conférence internationale sur la science du charbon qui s'est tenue à Düsseldorf en septembre 1981.

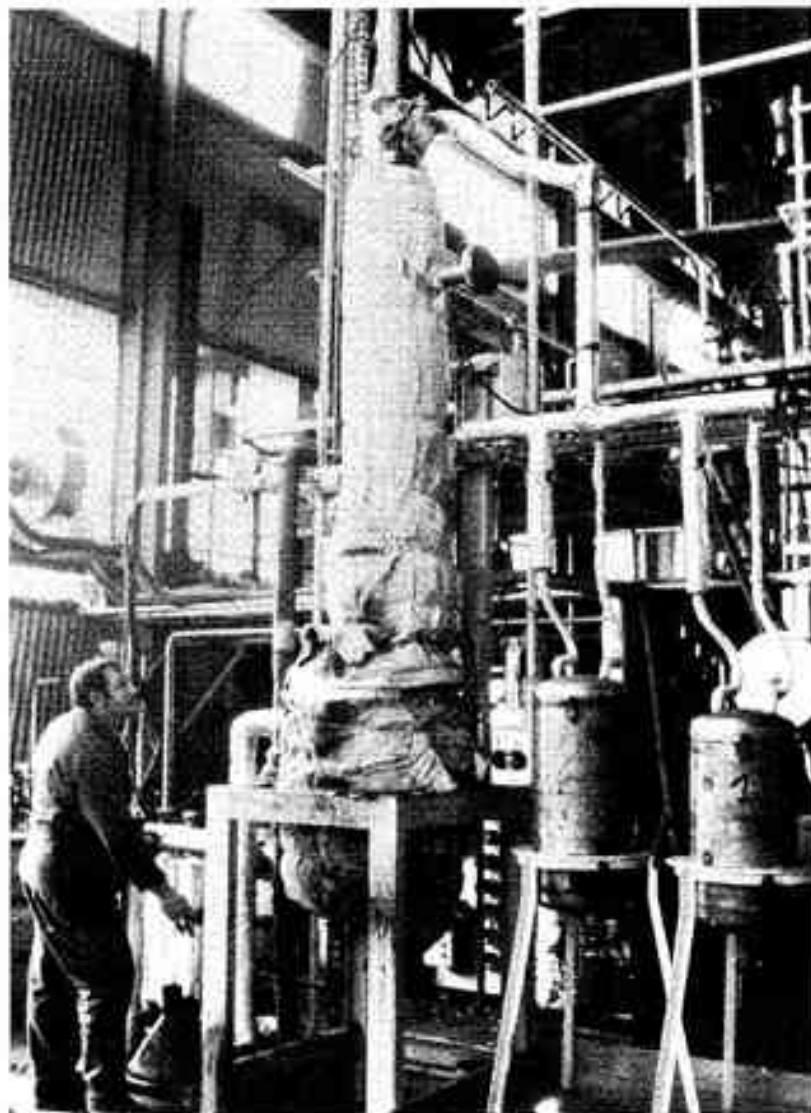
BIBLIOGRAPHIE

- R. Dumas, *Le renouveau du charbon*, Les objectifs scientifiques de demain, Masson 1981.
« Nouvelles sources d'énergie et de matières premières », *Images de la Chimie 1981*, Supplément au n° 41 du Courrier du CNRS.
P. Delmon et M. Turpin, *Techniques de l'énergie*, « Les techniques d'utilisation du charbon et leur développement », 1980, n° 39, p. 29.

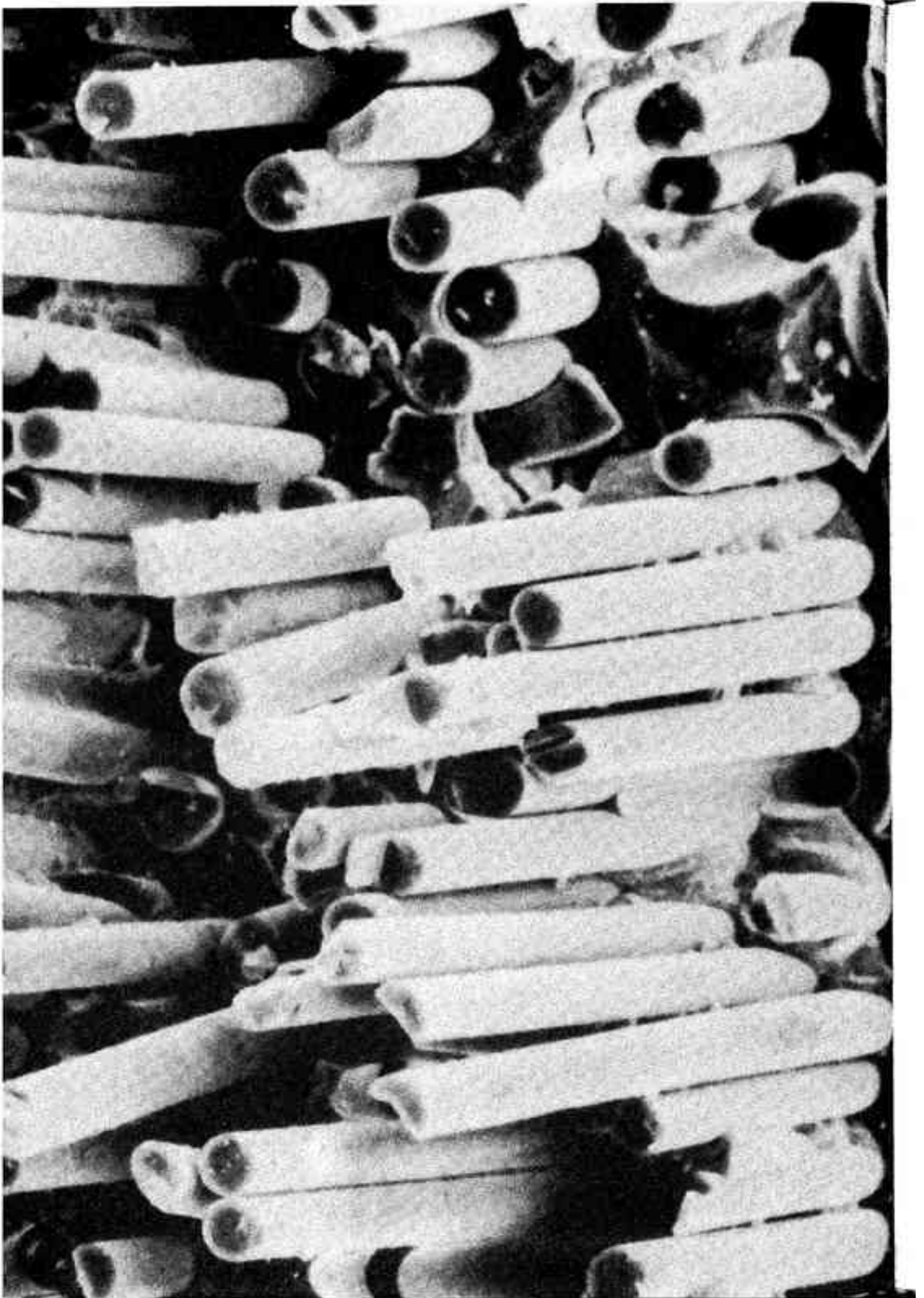
RENSEIGNEMENTS

Charbonnages de France, Service information et relations publiques, 9 avenue Percier, 87 395 08, 75360 Paris cedex 08 - Tél. : (1) 563.11.30.
GRECO Charbon : IL Charbonnet, Institut de recherches sur la catalyse, 2, avenue Eliecart, 69626 Villeurbanne Cedex - Tél. : (7) 893.34.71.
GRECO CO : M. Blanchard, Institut des sciences, laboratoire de chimie XL 40, avenue du recteur Pinet, 86022 Poitiers Cedex - Tél. : (49) 46.23.30.

6 PROCÉDES EN COURS DE DÉVELOPPEMENT DE L'HYDROLIQUÉFACTION DU CHARBON. MODE DE RÉHYDROGÉNATION DU SOLVANT DONNEUR D'H	
PROCÉDES	REHYDROGÉNATION DU SOLVANT
EOS	par hydrogénation catalytique séparée
SRC II	par catalyse au moyen de matières minérales du charbon, recyclées
H-COAL	par catalyse au moyen de catalyseurs nobles Co-Mo/Al ₂ O ₃



Tour de distillation du pilote d'hydroliquéfaction. - (Cliché Murray).



Le CNRS et les composites

Les composites, matériaux en plein essor
mais encore mal connus,
font à l'heure actuelle l'objet de nombreuses recherches.

Claire DUPAS

Récemment, le CNRS a organisé un séminaire sur les matériaux composites réunissant une centaine de participants venus de laboratoire du CNRS, de l'université, des écoles d'ingénieurs et de l'industrie. Le but de cette rencontre était de faire le point sur la situation en France dans ce domaine et de préciser quels sont, parmi les multiples problèmes rencontrés aujourd'hui par les industriels, ceux devant intéresser la recherche fondamentale et auxquels les laboratoires pourraient apporter une réponse.

Cette réunion s'inscrit dans le droit fil de l'action menée avec détermination par le CNRS depuis une dizaine d'années, et soutenue par la Délégation générale à la recherche scientifique et technique, en vue de participer au développement en France de la science des matériaux. Aujourd'hui, la politique du CNRS dans ce domaine prend une dimension nouvelle, avec la création du programme interdisciplinaire de recherche sur les matériaux (PIRMAT) (voir encadré).

Nous donnons ici, avec les composites, un exemple de thème soutenu dans le cadre de l'objectif matériaux. Très peu étudié dans les laboratoires du CNRS et de l'Université jusqu'à une époque récente, ce thème intéresse les chercheurs par les nombreux problèmes fondamentaux qu'il soulève ; leur résolution est nécessaire pour assurer un développement harmonieux de l'utilisation de ces matériaux.

□ Claire Dupas est chargée de mission au secteur « mathématiques et physique de base » du CNRS.

▲ Cette photographie montre le faciès de rupture d'un composite fibreux dans lequel fibres et matrice sont en carbure de silicium (travaux originaux du laboratoire de chimie du solide de Bordeaux industrialisés par la Société européenne de propulsion à Bordeaux - Cliché SEP).

UN NOUVEAU PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE : LE PIRMAT

Le 4 mars 1982, le Conseil du CNRS a décidé de la création du PIRMAT, Programme interdisciplinaire de recherches sur les matériaux. Le but de ce programme est de développer au CNRS des recherches fondamentales dont l'avancement peut être bénéfique à la résolution des problèmes de matériaux.

La science des matériaux connaît, depuis une vingtaine d'années, des développements considérables. Cette progression a plusieurs causes : avancée des connaissances de base, mise en place de grands projets technologiques (atome, espace, informatique), diffusion d'objets de toutes natures fabriqués dans des matériaux de plus en plus performants, concurrence dans les secteurs industriels traditionnels. Notre pays prend une part de plus en plus active aux progrès très rapides de cette science à l'échelle mondiale, en particulier afin d'assurer son indépendance dans l'approvisionnement en matériaux destinés, par exemple, à l'industrie mécanique ou électronique. Conscient de cet enjeu et du rôle essentiel que peut jouer la recherche de base dans cette voie, le CNRS s'est orienté, durant la dernière décennie, dans le sens d'un déclassement et d'une restructuration des recherches effectuées dans ce domaine au sein de ses laboratoires par les chimistes, les physiciens, les métallurgistes et les mécaniciens. Son double souci a été et demeure d'intégrer les efforts de recherche de spécialistes appartenant à des communautés différentes, et d'assurer un transfert efficace des connaissances entre ces communautés.

Parallèlement au soutien de base des laboratoires et à un important effort d'équipement en moyens lourds, le CNRS a mené une politique incitative, illustrée par des actions spécifiques intersectorielles, financées par les directions scientifiques des mathématiques et de la physique de base, de la chimie et des sciences physiques pour l'ingénieur. Des recherches coopératives sur programme et des groupements de recherches coordonnées ont pris naissance et diverses actions thématiques programmées ont attiré l'attention de la communauté scientifique sur l'intérêt d'un effort de recherche pluridisciplinaire. Depuis 1980, le programme des ATP Matériaux a fait l'objet d'un contrat entre le CNRS et la Délégation générale à la recherche scientifique et technique. Fort de ces expériences, les trois secteurs scientifiques du CNRS concernés au premier chef par les recherches sur les matériaux ont proposé et obtenu la création du PIRMAT pour donner une ampleur accrue à l'effort du CNRS dans ce domaine.

Le PIRMAT a été chargé de nombreuses missions : prospective et évaluation de la recherche sur les matériaux ; poursuite des efforts de structuration de la communauté scientifique concernée ; développement de la politique d'équipement des laboratoires en moyens mi-lourds d'élaboration et de caractérisation des matériaux, en collaboration avec le ministère de la recherche et de la technologie, le ministère de l'éducation nationale et les établissements publics régionaux ; poursuite et accroissement des actions incitatives (actions thématiques programmées, actions spécifiques, contrats de programme...) ; actions d'animation de la communauté (écoles d'été, publications...).

Pour atteindre ces buts, le PIRMAT a été doté d'une structure originale, s'appuyant très largement sur le comité national du CNRS. La cellule de direction comprend un directeur, responsable devant les trois directeurs scientifiques et un chargé de mission auprès de chacun de ceux-ci. Le Conseil, formation étendue, rassemble des membres des sections 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13 et 19 du Comité national, ainsi que des représentants des différents ministères et des organismes intéressés. Le Conseil aura ainsi une vision pluridisciplinaire de la science des matériaux. Inversement, par ses membres, il permettra au Comité national de mieux apprécier la carrière des chercheurs et la vie des formations impliquées dans ces recherches.

Qu'est-ce qu'un composite ?

De nombreux composites nous sont familiers. Ce sont tout d'abord certains matériaux naturels, comme le bois, composite de cellulose et de lignine, ou les os, composites de collagène et d'apatite. D'autres composites, de fabrication industrielle cette fois, ont envahi la vie courante depuis longtemps : citons, entre autres, le béton armé ou les contreplaqués. Depuis les années 50, des composites d'un type nouveau sont apparus : ce sont des matériaux comportant une armature de fibres résistantes noyées dans une matrice. Certains exemples en sont déjà connus du grand public, en particulier dans le domaine des articles de sport : raquettes de tennis, clubs de golf, cannes à pêche, skis, tirent désormais parti des performances en matière de résistance, légèreté, durabilité de ces matériaux. Par ailleurs, il existe d'autres composites pouvant intéresser l'industrie, comme les cermets ou les matériaux à phases plus ou moins dispersées (alumine-chrome ; alumine-carbure de silicium ; nickel-thorium...), ainsi que les composites obtenus par solidification dirigée, comme les eutectiques orientés ou les fontes blanches lamellaires.

Les composites à fibres peuvent être classés aujourd'hui en trois grandes catégories, selon la nature de la matrice englobant les fibres. Les plus étudiés sont les composites à matrice organique, soit thermodurcissable (époxydes, polyimides ...) soit thermoplastique, dans lesquels on note des fibres de verre, de carbone ou encore des fibres organiques, comme le kevlar. La seconde

classe est celle des composites à matrice métallique d'alliages légers, à base d'aluminium, de magnésium ou de titane, renforcés par des fibres de carbone, de carbure de silicium ou de bore. Enfin sont apparus plus récemment les composites céramique-céramique, à base de carbone, de carbure de silicium, d'alumine ou de silice ; ces matériaux encore mal connus sont actuellement en plein essor.

Les performances des matériaux composites résultent de la juxtaposition de deux phases, la matrice et les fibres, possédant des propriétés complémentaires, le matériau polyphasé final présentant généralement des caractéristiques originales par rapport aux deux constituants de départ. Les propriétés mécaniques des composites peuvent être très supérieures à celles des métaux, plastiques et céramiques conventionnels. Lorsque tel est le cas, les composites allient la légèreté à une résistance et une rigidité mécanique accrues, ce qui autorise un allègement des structures, et, partant, des économies d'énergies : ainsi, certains composites à matrice organique ont des performances supérieures ou égales à celles de l'acier, pour un poids quatre à cinq fois moindre. Jusqu'à présent, l'industrie aéronautique et spatiale a été pratiquement la seule à bénéficier de ces performances. La Société nationale industrielle aéronautique a utilisé avec succès des composites pour réaliser les pales et le moyeu de certains hélicoptères ; aujourd'hui, la Société européenne de propulsion développe pour ses lanceurs de nombreuses pièces en composite carbone-carbone, en particulier pour les tuyères. Des applications pourront être trouvées dans l'industrie automobile, comme le prouvent déjà les véhicules expérimentaux de Renault et Peugeot. Il faut mentionner également

l'utilisation de composites carbone-carbone dans le domaine médical où ils permettent de réaliser des prothèses bien tolérées par l'organisme.

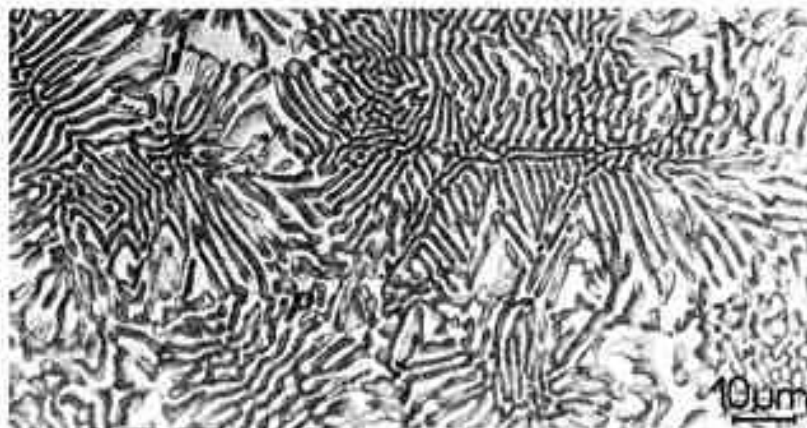
La tenue à la fatigue des composites fibreux, leur résistance à la propagation des fissures, constituent également des avantages essentiels, de même que leur stabilité thermique (composites à matrice métallique ou céramique), leur inertie chimique, et parfois leur biocompatibilité (composites carbone-carbone). Tous ces matériaux présentent des propriétés modulables, en fonction de l'utilisation prévue, avec la nature chimique de leurs constituants, la structure, la longueur et la répartition spatiale du renfort fibreux, ainsi que le revêtement dont on entoure parfois les fibres avant de les noyer dans la matrice (procédé d'« ensimage »).

De nombreux problèmes fondamentaux

Bien que l'utilisation des composites se développe largement au niveau industriel, les connaissances fondamentales concernant ces matériaux demeurent insuffisantes, ce qui rend encore très empirique, et par là même peu efficace, toute recherche d'amélioration des performances. La table ronde tenue au CNRS a permis de dégager de nombreux points sur lesquels un apport des fundamentalistes s'avère indispensable. On peut les regrouper en grandes catégories : la préparation, la structure et les propriétés physico-chimiques de la matrice et des fibres prises isolément ; la caractérisation du composite, le lien entre les propriétés microscopiques des constituants et les propriétés mécaniques macroscopiques du matériau ; la modélisation mathématique du comportement



On voit ici une pièce destinée à des essais de torsion, réalisée dans un composite carbone-carbone multidirectionnel à quatre directions de renforcement. Les différentes directions des fibres entrecroisées sont clairement visibles sur le cliché. Ce procédé de fabrication permet d'accroître la résistance mécanique des pièces réalisées dans ces matériaux (Cliché SEP).



Cette micrographie montre la structure très particulière d'un composite à matrice métallique, un eutectique de molybdène et de nickel obtenu par fusion aux hyperfréquences. Sur le cliché : 0,8 cm = 10 μ m (Laboratoire de cristallographie et chimie du solide, LA 251).

d'une pièce de composite soumise à des efforts. Enfin, la récupération et le recyclage des composites, en particulier de ceux destinés à l'industrie automobile, n'ont encore fait l'objet d'aucune étude scientifique. Il s'agit là d'un problème essentiel sur le plan économique : les gains énergétiques obtenus grâce à l'utilisation de composites sont en effet annulés si l'on prend en compte la récupération de ces matériaux... Des travaux de recherche s'imposent donc de façon urgente sur les processus de dégradation (catalytique, par micro-organismes...) des composites.

En ce qui concerne les matériaux de base, matrice et fibres, bien des études restent à accomplir en France. Actuellement, l'industrie française demeure tributaire des importations étrangères en fibres organiques (le kevlar est par exemple produit par DuPont de Nemours) et, pour une part importante, en fibres de carbone. Il est donc difficilement possible aux industriels de modifier les propriétés de ces dernières selon leurs besoins. Dans le domaine des résines, un effort important a déjà été accompli pour trouver des polymères nouveaux. Cependant, avant d'inventer des structures nouvelles, des problèmes restent à résoudre : citons la plasticité des polymères, leur résistance à l'impact et au cisaillement, ou la compréhension fine des mécanismes de polymérisation, qui devrait permettre de diminuer les temps de polymérisation, donc d'abaisser les coûts de fabrication. Par ailleurs, le comportement rhéologique des résines, la cinétique du durcissement, les processus chimiques du vieillissement ne sont pas encore totalement élucidés à l'heure actuelle.

En ce qui concerne les fibres de verre, dont 250 000 tonnes ont été produites en 1980 dans l'Europe des Neuf,

des interrogations subsistent : ainsi, aucune étude scientifique n'a été menée sur les méthodes de fibrage de verre pour éviter, par exemple, l'utilisation de coûteuses filières en platine. Enfin, l'ensimage à l'aide de polymères demeure critique, puisque des variations de quelques pour mille conduisent à des modifications spectaculaires de l'aspect du composite à l'état de produit fini et de sa résistance en flexion. Dans le cas des fibres de carbone, un traitement de surface permet également d'améliorer l'adhésion avec la matrice et devrait faire l'objet d'études plus détaillées.

Au niveau de l'élaboration et de la caractérisation du matériau polyphasé, les questions soulevées au cours de la dernière réunion du CNRS sont encore plus nombreuses ; elles reprennent en partie les thèmes retenus au cours d'une première réunion en mars 1978. Citons, pour l'élaboration, la mouillabilité des fibres par la matrice, ou le maintien de l'alignement des fibres durant la fabrication. La caractérisation de l'adhésion fibre-matrice doit être effectuée à l'échelle atomique, puis modélisée. Il faut ensuite relier les phénomènes interfaciaux se déroulant au sein du composite (développement et propagation de micromécanisme de rupture) avec ses propriétés mécaniques (rupture, fatigue, résistance aux chocs, phénomènes de collage, vieillissement, corrosion).

Certes, les laboratoires industriels disposent de techniques de caractérisation variées. La collaboration de laboratoires de l'université ou du CNRS est cependant recherchée, d'une part parce qu'elle offre des garanties d'indépendance vis-à-vis des entreprises concernées, d'autre part parce que la méthodologie même des tests doit être encore

soumise à la critique et améliorée. Ainsi, l'influence des effets de bord lors des tests de traction sur ces matériaux polyphasés n'a pas fait l'objet d'études approfondies, ce qui rend sujette à caution l'interprétation même de ces tests.

Enfin, au niveau théorique, des points essentiels doivent être résolus : dans quels cas faut-il accroître ou diminuer l'adhérence fibre-matrice, et pourquoi ? Comment définir la limite élastique d'un composite ? Comment relier numériquement la forme d'une pièce, la structure du composite dont elle est faite, et les contraintes auxquelles elle sera soumise ? Des programmes de calcul ne nécessitant pas des temps de machine prohibitifs restent à établir, et c'est là un champ de recherches ouvert aux mathématiques appliquées.

L'apport du CNRS au cours des dernières années

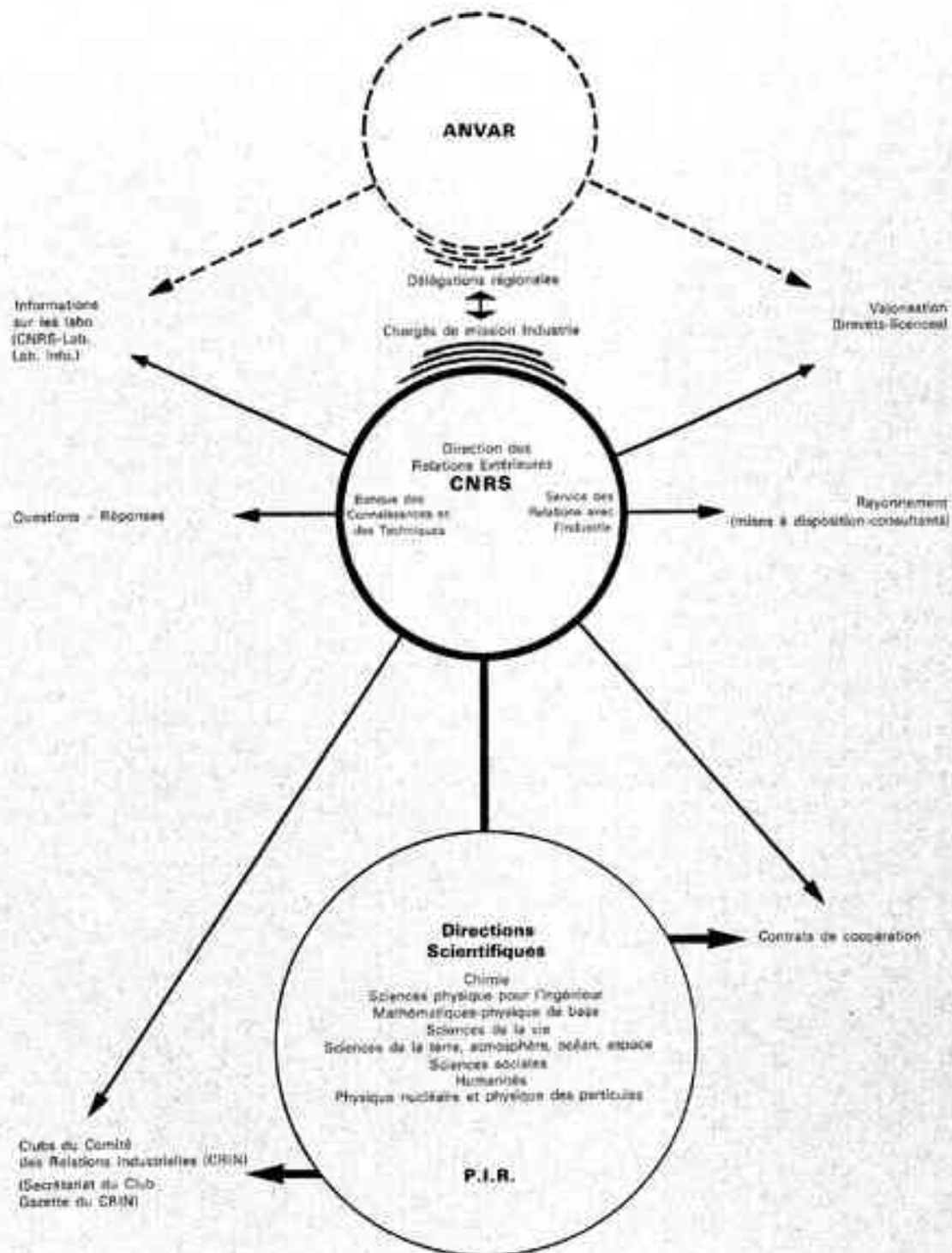
Depuis 1978, le CNRS a développé son action en faveur des matériaux composites, en menant tout d'abord une campagne d'information. Une première table ronde CNRS-université-industrie, en 1978, a rassemblé trente participants et permis de dégager des thèmes d'étude pour les spécialistes. En septembre 1979, une école d'été sur les composites à hautes performances a réuni pendant six jours quarante participants. L'importance de la table ronde de septembre 1981, animée par plus de cent participants, prouve le succès de ces premières entreprises. Aujourd'hui, des chercheurs de vingt-cinq laboratoires ou formations propres du CNRS, ou associés à cet organisme, participent à l'effort de recherche fondamentale sur les composites.

Parallèlement, le thème « composites » a été inscrit dans diverses actions thématiques programmées : physique et chimie de la matière condensée en 1978, physico-chimie des systèmes condensés en 1979, matériaux à propriétés physiques ou chimiques particulières depuis 1980. Vingt-sept déclarations d'intention ont été enregistrées au total, et neuf d'entre elles ont été retenues par les comités scientifiques de ces actions, obtenant au total une aide d'environ 1,3 MF qui venait s'ajouter au financement normal des laboratoires concernés. Les thèmes et les matériaux abordés dans ces projets, extrêmement divers, doivent permettre d'apporter les premiers éléments de réponse aux multiples questions fondamentales posées aujourd'hui par les matériaux composites.



La résistance des matériaux composites à la propagation des fissures constitue l'un de leurs atouts essentiels. La partie gauche de la micrographie met en évidence la propagation d'une fissure dans un composite de cobalt et de carbure de tungstène. Echelle : 1,5 cm = 10 µm (Laboratoire de cristallographie et chimie du solide, LA 251).

LES RELATIONS DU CNRS AVEC L'INDUSTRIE



Les relations du CNRS avec l'industrie

La politique des relations avec l'industrie

François MAGNE

Depuis plusieurs années, le CNRS n'est efforcé d'instaurer avec le secteur socio-économique une véritable coopération qui assure simultanément la liberté indispensable à une recherche de qualité. Cette politique est actuellement amplifiée. Elle se justifie par la double mission du CNRS. Mission culturelle, d'une part : la recherche de connaissances qui correspond au besoin primitif de l'homme de comprendre son environnement physique et social. Mission économique, d'autre part : le transfert de ces connaissances au secteur productif pour assurer le progrès économique et social.

Ainsi que l'a souligné le colloque national de la recherche et de la technologie, il s'agit pour le CNRS de faire bénéficier la communauté nationale de son potentiel scientifique et technique non seulement en offrant les fruits de la recherche mais en sollicitant du monde socio-économique un éclairage utile à la définition de thèmes de recherche. L'industrie et les services bénéficient ainsi de l'effet fécondant des résultats de la recherche et la recherche s'enrichit par les défis qu'ils posent.

Les échanges avec le secteur productif se conduisent schématiquement sous trois formes :

- l'information, la réflexion, la prospective ;
- la coopération proprement dite ;
- le transfert des compétences par les hommes.

□ François Magne, directeur-adjoint des relations extérieures du CNRS.



LE COMITÉ DES RELATIONS INDUSTRIELLES

Le Comité des relations industrielles (CRIN) présidé par Pierre Guillaumet, a été créé en 1973 par le CNRS afin d'initier les échanges entre la recherche de type universitaire et le secteur productif.

Sa mission répond aux quatre objectifs suivants :

- accroître et faciliter l'accès du secteur économique aux activités, aux programmes et aux résultats des laboratoires,
- informer les laboratoires des préoccupations des industriels, des défis technologiques, afin de fournir aux chercheurs un éclairage par l'aval,
- examiner les problèmes généraux de liaison et de transfert entre la recherche et l'industrie, notamment par la circulation des hommes,
- proposer tout type d'actions favorisant les relations recherche industrie.

Instance de concertation et de réflexion, le CRIN est structuré en clubs thématiques. Ces clubs, présidés par une personnalité de l'industrie et composés de chercheurs et d'industriels, sont de véritables lieux de rencontre et de réflexion entre laboratoires et entreprises.

Huit clubs sont actuellement formés autour des thèmes suivants :

- | | |
|--|-------------------------------|
| - informatique - automatique, | - pétrole, |
| - électronique, électrotechnique, optique, | - chimie, |
| - mécanique, | - biologie et génie chimique, |
| - thermique, | - sciences humaines. |

Le caractère interdisciplinaire des thèmes choisis permet l'adaptation nécessaire des échanges entre les disciplines de la recherche et les sous-branches industrielles.

Instance de propositions, les clubs CRIN formulent des recommandations qui sont présentées au comité exécutif du CRIN par le directeur adjoint des relations extérieures du CNRS, chargé des relations avec l'industrie. À ce comité, présidé par Pierre Guillaumet, siègent le directeur général du CNRS, certains grands responsables de l'industrie, du patronat, des ministères de la recherche et de la technologie, de l'industrie, de la défense. Les recommandations des clubs peuvent porter, par exemple, sur le développement de thèmes de recherche, la création de structures adaptées, le financement d'actions de coopération par le fonds de la recherche, la création d'écoles d'été...

Le comité exécutif se réunit tous les trois mois. Il examine les propositions des clubs et suggère des actions soit à la direction générale du CNRS, soit au ministère de la recherche et de la technologie, soit aux autres ministères présents, soit au Conseil national du patronat français ou aux industriels concernés.

L'information, la réflexion, la prospective

C'est dans un premier temps à une information mutuelle, une réflexion commune et à une prospective que doivent se livrer ensemble le milieu de la recherche et le milieu productif.

Ce dernier fait connaître au CNRS ses préoccupations à long terme pour déterminer les verrous technologiques et les lacunes correspondantes dans les connaissances de base et dégager de nouvelles orientations scientifiques.

La coopération proprement dite

Les contrats de recherche. Les contrats de collaboration entre laboratoires et industriels permettent de prendre en compte dans la recherche fondamentale les préoccupations de l'aval, assurent de meilleures conditions de transfert des connaissances et apportent des moyens supplémentaires aux laboratoires.

Les contrats sont évidemment négociables. Leur aboutissement dépend de l'intérêt scientifique du thème de recherche et des moyens respectifs des co-contractants. La direction des relations extérieures du CNRS entend développer et faciliter ce type de collaboration. C'est pourquoi un guide sera largement diffusé (1).

Sur des programmes d'une certaine importance, il est souvent fructueux de regrouper plusieurs équipes et une bonne part du tissu industriel correspondant. La formule des groupements scientifiques (GS) est alors très souhaitable. Les chargés de mission aux relations industrielles apporteront localement leur contribution aux développements de ces divers échanges.

La valorisation. Il s'agit de détecter, de recenser, d'apprécier au niveau technique et économique les inventions naissant des laboratoires. Très souvent la valorisation est effectuée avec l'Agence nationale de valorisation de la recherche (ANVAR). L'élargissement de la valorisation se fera grâce à une action régionale, une prospection plus systématique des laboratoires et des industriels, une connaissance plus approfondie du marché et les entreprises innovantes. Dans ces actions la collaboration étroite entre les chargés de mission aux relations industrielles et les délégations régionales de l'ANVAR est essentielle.

(1) Guide de la valorisation à l'usage des formations du CNRS et des chercheurs - mars 1982.

En sens inverse, le CNRS fait profiter les entreprises des connaissances qu'il a acquises ou développées dans ses laboratoires et dans les meilleurs laboratoires étrangers avec lesquels il est en relation.

Ces échanges d'informations doivent conduire, en commun, à une réflexion et prospective (corrélation entre les possibilités de la science, les besoins technologiques, les évolutions socio-économiques) pour dégager des thèmes de coopération.

Le comité des relations industrielles (CRIN), divisé en clubs thématiques, est actuellement l'instance centrale où

s'échangent ces informations et se conduit cette réflexion. En 1981, cinquante réunions ont rassemblé à chaque fois une dizaine de laboratoires et autant d'entreprises sur des sujets aussi variés que les enzymes, les échangeurs thermiques, les composants électroniques, l'automatisation, la synthèse organique ou encore les problèmes internes de l'entreprise.

Cette réflexion doit s'étendre notamment en région. Ainsi, des rencontres recherche-industrie seront organisées, sur des thèmes spécifiquement locaux, par les chargés de mission aux relations industrielles (voir encadré).

LES CHARGES DE MISSION AUX RELATIONS INDUSTRIELLES

Les chargés de mission aux relations industrielles sont progressivement mis en place dans les régions.

Leur rôle est d'une part de développer localement les échanges avec le secteur productif, d'autre part de transmettre les informations qu'ils recueillent pour une exploitation à l'échelle nationale : l'idée d'un laboratoire toulousain peut être utile à une entreprise strasbourgeoise.

Pour cela les chargés de mission :

- rencontreront les entreprises, leur feront connaître les laboratoires locaux qui peuvent les intéresser,
- recueilleront les informations valorisables dans les laboratoires, répercuteront cette information au Service des relations avec l'industrie et prospecteront localement les entreprises susceptibles d'être intéressées,
- initieront des contrats de coopération de recherche entre laboratoires et entreprises, - sensibiliseront les entreprises locales aux avantages du transfert de compétence par les hommes et parallèlement expliqueront aux laboratoires les mesures en faveur de la mobilité ; enfin répercuteront le fruit de ces démarches au bureau rayonnement et « CNRS-consultants ».

LA BANQUE DES CONNAISSANCES ET DES TECHNIQUES

La Banque des connaissances et des techniques (BCT), service commun au CNRS et à l'Anvar, a pour principale mission d'informer les entreprises sur le potentiel de connaissances des laboratoires de recherche.

Véritable SVP scientifique au service de l'industrie, elle met en contact gratuitement, par un système de questions-réponses, un industriel avec un laboratoire ou un chercheur qui travaille dans le domaine de ses préoccupations. Ce contact se concrétise le plus fréquemment par des conseils, mais aussi par des études scientifiques, voire même par des transferts de technologie ou de personnes.

De façon permanente, la BCT poursuit des activités d'information vers l'industrie notamment :

- la réalisation de l'annuaire du CNRS : répertoire par discipline ou par région des formations du CNRS et de leurs principaux axes de recherche. Cette base de données, accessible par terminal informatique sur le serveur téléystème sous le nom CNRS-Lab, doit être étendue à de nombreux autres laboratoires privés et publics (Lab-Info),
- la présence à des expositions ou colloques fréquentés par les industriels,
- la publication de la Gazette du Comité des relations industrielles (CRIN),
- le secrétariat du CRIN et ses clubs,
- la liaison avec l'Anvar pour la prime à l'innovation.

En situation d'interface, la BCT base toute son action sur la mise en présence des industriels innovateurs avec les scientifiques. Elle donne aux chercheurs une occasion supplémentaire de valoriser leurs travaux en confrontant leurs connaissances théoriques aux problèmes concrets des entreprises.

RAYONNEMENT - CNRS-CONSULTANTS

- Mise à disposition de chercheurs auprès d'entreprises,
 - Mise en contact de chercheurs et d'entreprises souhaitant être conseillés par des experts de haut niveau.
- Tél. : 555.92.25, poste 2169.

Le transfert des compétences par les hommes

Dans tous ces domaines de transfert la communication humaine joue un rôle fondamental : l'innovation doit souvent beaucoup à la mobilité des hommes, à l'arrivée d'idées et de méthodes nouvelles.

Le CNRS, conscient que le problème se pose en termes différents pour chaque entreprise, offre aux industriels trois solutions modulables :

- En premier lieu, le « rayonnement » permet de mettre à la disposition des entreprises des chercheurs à titre temporaire. Cette mise à disposition se termine souvent par un départ dans l'industrie (plus de cent mouvements vers l'industrie et l'administration en 1981).
- D'autre part, la possibilité est offerte aux industriels d'avoir recours à temps partiel à des chercheurs confirmés qui jouent le rôle de « consultants » pour leur stratégie de recherche. Cette forme de coopération permet à toute entreprise d'avoir accès à un réseau national

de compétences. Un bureau « CNRS-consultants », récemment créé, a dressé une liste d'une centaine de compétences-types disponibles intéressant directement les industriels.

- Enfin, le CNRS forme à la sortie de leur école de futurs ingénieurs de l'industrie sur des thèmes liés aux préoccupations des entreprises. La thèse de docteur-ingénieur dans un laboratoire et en liaison avec un industriel est une bonne formule pour le transfert de la recherche et la création de liens durables.

Les relations avec l'industrie vues par les directions scientifiques

Georges CHEVALLIER

Les directions scientifiques du CNRS assument, par secteur, la responsabilité de la politique scientifique et le suivi de l'activité des laboratoires.

A ce titre, elles sont particulièrement attentives à toutes les formes d'échanges avec les entreprises. Bien sûr, chacun des secteurs n'a pas le même flux de contacts industriels mais les principes généraux demeurent.

Il faut d'abord favoriser les actions contractuelles au niveau le plus décentralisé c'est-à-dire le laboratoire et les chercheurs. La part contractuelle des budgets de chaque formation est analysée et, tant qu'elle demeure dans une certaine limite, variable d'ailleurs avec chaque discipline, elle est un facteur positif d'appréciation de l'activité. A titre d'exemple, dans le secteur des « sciences physiques pour l'ingénieur »

la part contractuelle des crédits (hors salaires) reçue par une formation est sensiblement supérieure au tiers. Bien qu'issus souvent d'organismes publics ou para-publics, ces crédits correspondent à un fait majeur.

Il faut, ensuite, veiller à respecter une certaine cohérence interne et offrir une instance d'évaluation des résultats de cette collaboration. C'est le rôle des comités de direction des laboratoires et des commissions du comité national où sont nommées des personnalités extérieures dont l'activité s'exerce dans le secteur économique. Ces personnalités contribuent à apporter des éléments de jugement sur les résultats, souvent non encore publiés, des travaux sous contrats et à bien situer le sens de l'intervention de formations associées au CNRS. En effet bien que la finalité d'application soit inhérente à un contrat industriel, il ne convient pas d'encourager, sauf exception, des activités de service. Une équipe du CNRS doit contribuer à résoudre un problème

scientifique ou technique.

primé tant par les diverses instances nationales de prospective, que par la communauté scientifique elle-même ou le comité des relations industrielles (CRIN), créent des actions thématiques programmées ou des groupements d'intérêt scientifique en concertation avec le secteur économique. Des représentants de l'industrie siègent souvent dans les comités d'évaluation et de suivi.

Enfin, l'un des points forts mais le plus délicat des relations avec l'industrie est le transfert des compétences par les hommes. La direction scientifique joue un rôle essentiel notamment dans le choix des bénéficiaires des bourses de docteur-ingénieur du CNRS et de leur affectation.

Organes opérationnels, travaillant en étroite liaison avec les laboratoires, les directions scientifiques aidées de leur petit état-major de chargés de mission, considèrent comme essentiel, pour le devenir même de la science, de favoriser une coopération avec le secteur socio-économique.

[1] Georges Chevallier est chargé de mission auprès de la direction scientifique des sciences physiques pour l'ingénieur.

Par ailleurs, les directions scientifiques, pour répondre à un besoin ex-

Un exemple de valorisation

Guy PIEUCHARD

Un procédé et un dispositif de fractionnement de protéines par électrophorèse en convection forcée viennent d'être mis au point par M. Sanchez et son équipe au Laboratoire de génie chimique du CNRS à Toulouse. Cette invention est un exemple de la capacité d'innovation des chercheurs du CNRS et de la collaboration recherche-industrie. En effet, très rapidement après le dépôt du brevet français, des contacts ont pu être établis avec deux petites et moyennes industries françaises désirant exploiter l'invention dans deux domaines différents.

L'invention

L'intérêt essentiel de la découverte est de supprimer les défauts présentés par les procédés de fractionnement expérimentés jusqu'à présent et qui freinaient leur possibilité d'exploitation à l'échelle industrielle. Les procédés et appareillages mis au point à Toulouse permettent en effet :

- de réduire la durée du fractionnement (dix à vingt heures au lieu de plusieurs jours),
- de fractionner en continu d'où la possibilité d'une mise en œuvre pratique du procédé à l'échelle industrielle,
- de limiter les remélages des fractions séparées,
- de réduire les risques de déformation des membranes,
- de déterminer la meilleure géométrie de la cellule à adopter,
- de fabriquer des appareillages à faible coût.

Ses domaines d'application

Deux domaines d'application ont été dégagés actuellement :

- Le traitement de sang humain. Cette invention permettrait l'extraction de gammaglobulines du plasma humain (lutte contre les maladies infectieuses, traitement de certaines carences...) et l'association à une plasmaphérèse thérapeutique.

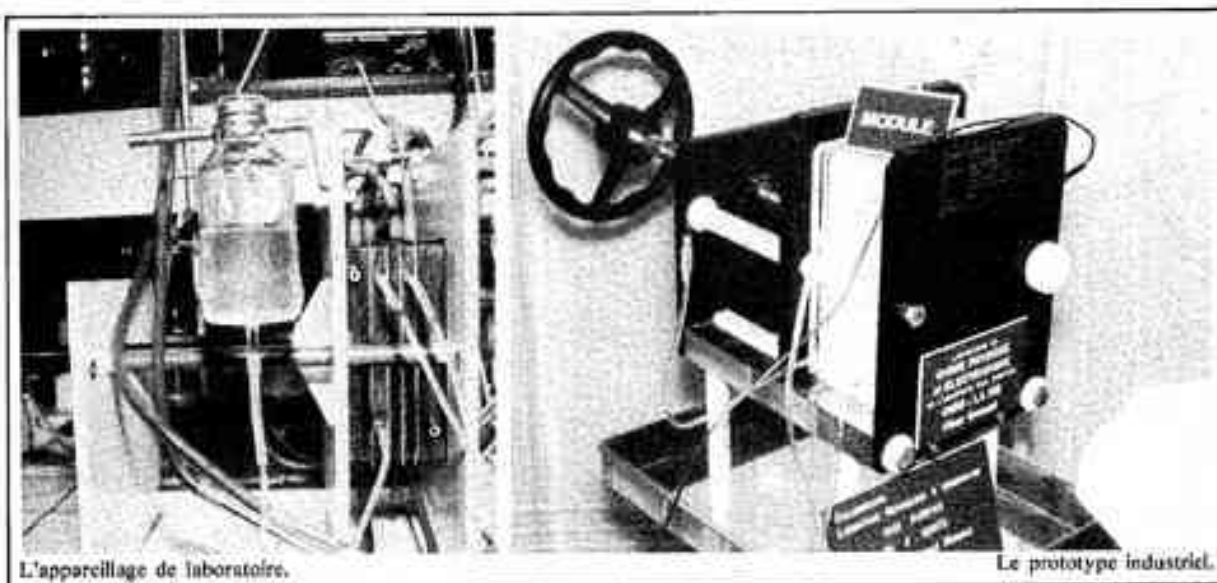
La plasmaphérèse est une technique classique d'épuration du sang. Le sang est séparé dès sa sortie du corps en deux fractions. L'une contient les glo-

bules rouges qui sont réinjectés aussitôt au malade, l'autre est le plasma qui contient les facteurs responsables de la maladie. Jusqu'à présent ce plasma est jeté en totalité et remplacé soit par un plasma de compensation, soit par une solution d'albumine. Le coût de ce traitement est très élevé (4 000 F par séance).

L'utilisation de la cellule de séparation mise au point à Toulouse permettrait de restituer au malade son propre plasma épuré des substances pathogènes. Ainsi seraient réduits les risques liés aux problèmes de tolérance et réalisée une économie importante (3 500 francs par séance). Une option sur licence a été concédée à la Mécanique méridionale médicale pour l'exploitation de cette invention. Un prototype construit par cette société est mis en évaluation au centre hospitalier universitaire de Purpan à Toulouse.

- Le traitement du sang animal. Cette invention permettrait d'obtenir, à partir du sang animal, des médicaments, des produits vétérinaires, des colorants et des réactifs de laboratoires. Des négociations sont actuellement en cours avec un industriel intéressé.

□ Guy Pieuchard, chef du service des relations avec l'industrie.



BREVETS

Le brevet est la forme la plus connue de la protection industrielle, quoiqu'elle ne soit pas toujours la plus efficace.

— Quelle assurance ? La délivrance d'un brevet n'est pas une assurance en soi : ni, bien sûr, une assurance de valeur technique, ni, comme on le croit trop souvent, assurance de validité juridique. Cette dernière se démontre in fine devant les tribunaux, soit quand le brevet est utilisé en défensive s'il est attaqué, soit quand il est utilisé en offensive envers un contrefacteur présumé.

Ces considérations sont valables non seulement en France, mais également dans les pays dits « à examen ».

● La demande de brevet. La demande de brevet doit être déposée ni trop tôt : les revendications doivent être soutenues par une description suffisante. Il est nécessaire que la recherche ait atteint des résultats précis et concrets. On ne peut revendiquer ni des suppositions ni des espoirs. Ni trop tard : le risque est évident de voir l'invention antériorisée par une équipe concurrente, soit par publication, soit par dépôt de brevet.

La demande de brevet doit également être : ni trop générale : un brevet de portée trop générale peut être considérablement affaibli si des contre-exemples peuvent être apportés à l'intérieur du domaine revendiqué.

Ni trop étroite : le brevet, alors très solide, peut souvent être assez facilement contourné.

● Un droit exclusif d'exploitation. Le brevet a pour but la large diffusion des inventions. En contre-partie le brevet confère à son titulaire ou à ses ayants-cause un droit exclusif d'exploitation. Ce droit appartient au premier déposant, personne physique ou morale.

● Brevet ou dossier technique ? Pour qu'un brevet soit efficace, c'est-à-dire qu'il conduise à une protection industrielle réelle, il faut qu'il soit possible d'en faire la police : en prouvant une éventuelle contrefaçon. Or il existe deux grandes catégories de brevets : les brevets de produits — les brevets de procédés.

Si la police est en général assez aisée pour les produits, elle est parfois plus délicate pour les procédés : il n'est pas toujours aisé dans ce cas de déceler et de démontrer une contrefaçon. Il peut donc être plus judicieux de valoriser parfois l'invention sous la forme d'un dossier technique qui reste confidentiel.

● Les critères de brevetabilité. La loi retient trois critères pour la brevetabilité : la nouveauté : à la date de dépôt, l'invention ne doit pas avoir été divulguée ou antériorisée, l'activité inventive : le brevet doit présenter une contribution originale et significative au delà des solutions même nouvelles mais qui découlent naturellement des techniques antérieurement connues, le caractère industriel de l'invention : ce qui relève de la connaissance pure ou les inventions dont une application concrète n'est pas indiquée et démontrée sont exclus de la brevetabilité.

L'avis d'un industriel

Parmi les entreprises de votre taille, vous êtes une de celles qui font le plus de recherches. Vous entretenez, par ailleurs, de nombreux contacts avec les laboratoires du CNRS. Quelle plus-value ces échanges vous apportent-ils par rapport aux informations que vous pouvez retirer des publications scientifiques ?

Nous sommes engagés, de fait, dans notre domaine d'activités, dans une course de vitesse, avec les États-Unis et le Japon bien sûr, mais aussi avec certains de nos partenaires de la Communauté Economique Européenne. Notre souci est d'accélérer l'évolution des connaissances scientifiques et industrielles et la coopération directe est indispensable.

Les publications scientifiques représentent certes un état précieux de connaissances sûres, un acquis irremplaçable pour aujourd'hui. Mais les produits de demain naîtront du mouvement des idées, souvent confus ou fluctuant, parfois turbulent ou capricieux. Seul le contact direct permet de confronter les préoccupations, les voies d'études envisagées, tout en préparant un transfert rapide vers l'application. Nous sommes très fiers d'avoir pu ainsi avec un laboratoire du CNRS de Bordeaux (chimie du solide) passer en cinq ans, du tout premier besoin ressenti, à la mise en place d'un four industriel unique à notre connaissance, capable de densifier à cœur une préforme poreuse avec du carbure de silicium infiltré en phase gazeuse. En outre, cet échange amène souvent à identifier des domaines connexes dans lesquels d'autres travaux peuvent être engagés, séparément ou en commun, selon le cas.

□ M. Lamieq dirige le département recherche et développement de la Société européenne de propulsion à Bordeaux qui emploie 1 700 personnes. Outre ses activités de propulsion proprement dite, cette entreprise est spécialisée dans la mise au point de composants très performants pour l'industrie spatiale et aéronautique et l'industrie automobile.

Un dialogue n'est fructueux que si chacun accepte de modifier ses vues initiales en fonction de celles exprimées par le partenaire et cela n'est pas toujours facile pour un industriel. Il nous faut cependant conserver une certaine souplesse d'esprit, car la recherche est une activité où l'inattendu est chose courante. Heureusement, nous disposons d'une palette d'applications suffisamment variée et nous pouvons laisser évoluer certaines recherches sans toujours en attendre un résultat trop précisément fixé.

Pour présenter la vision du côté des laboratoires, je ne suis pas très bien placé ; simplement, je constate que la plupart des chercheurs que je connais aiment à penser que leurs travaux peuvent déboucher sur des applications pratiques et sont prêts à choisir leurs sujets de recherche en tenant compte de ces possibilités.

La mobilité des chercheurs et la formation des docteurs-ingénieurs par la recherche sont deux modes de transfert que le CNRS entend développer. Quelle est votre expérience en ce domaine ? Quels sont, à votre avis, les freins qui peuvent entraver leur croissance ?

La mobilité des hommes est également une préoccupation de l'entreprise. Le phénomène est accentué chez nous par la mise en place continue de productions nouvelles, qui aspirent les hommes, y compris bon nombre de jeunes docteurs de tous niveaux que nous avons régulièrement embauchés. Le mouvement en sens inverse est assez rare, mais nous avons l'intention de faire bientôt l'expérience d'un retour vers la recherche, à l'extérieur de l'entreprise, pendant un an.

Les freins à la mobilité sont bien évidemment les disparités de statut et les rigidités d'ordre administratif qu'elles entraînent, ainsi que les différences de rémunérations qui peuvent être très importantes entre un boursier et un cadre embauché.

Vous avez passé avec le CNRS un certain nombre de conventions de recherche. Ces contrats vous semblent-ils représenter une forme de coopération efficace ? La réglementation en vigueur en ce domaine vous paraît-elle constituer un frein à leur développement ?

Ce qui compte tout d'abord pour l'industriel c'est d'être bien d'accord avec un responsable du laboratoire et le chercheur concerné sur le contenu technique des travaux. La forme contractuelle la plus directe nous conviendrait ensuite, mais c'est du côté des laboratoires que semblent exister bien des soucis de gestion et bien des craintes de prélèvements autoritaires au passage par l'entité gestionnaire.

Quels sont les critères qui déterminent pour vous le montant du financement de telle convention ?

La décision est prise à n'importe quel moment de l'année, lorsque le chercheur prévu signale qu'il va bientôt être disponible. Ce qui pilote le lancement des conventions est en effet la disponibilité des hommes, aussi bien chercheurs que responsables de laboratoires, bien plus que le financement, les gros investissements étant exclus bien évidemment. Il n'y a pas de liaison directe entre le montant du financement et l'intérêt de l'étude pour l'industriel, car le montant dépend de bien d'autres éléments qui vont des habitudes, sinon du style, du laboratoire et de la corrélation plus ou moins étroite avec ses grands axes de recherches, à l'existence d'un chercheur permanent intéressé ou à la nécessité de rémunérer un thésard. Nous souhaitons avoir nous-mêmes assez de temps et de gens disponibles pour pouvoir en entreprendre plus.

On estime souvent que les conventions de recherche posent des problèmes de propriété industrielle qui sont autant d'entraves à leur croissance. Ne vous semble-t-il pas plutôt que ces problèmes sont limités et facilement résolus ?

La propriété industrielle n'a guère posé de problèmes que lors de discussions a priori, un peu dans l'absolu.

Dans la pratique, cela s'est toujours bien réglé lorsque chacun parlait de choses réelles et précises, et bien connues de l'autre : le scientifique de son apport novateur, l'industriel de son effort en temps et en moyens pour passer de là à un produit que l'on puisse fabriquer et vendre, et de la multitude de détails de procédés ou de technologie qu'il lui a fallu maîtriser, qui ne font surtout pas l'objet de brevets, car ce serait les révéler aux concurrents, et qui restent des secrets de fabrication. Les chercheurs qui sont venus chez nous faire cette mise au point industrielle, à partir de leurs travaux de recherche, ont bien sûr fortement contribué à cette compréhension réciproque.

D'après votre expérience, les chercheurs acceptent-ils facilement de différer, voire de ne pas publier leurs travaux ?

La publication est un point extrêmement sensible des relations industrie-recherche. C'est une nécessité pour le chercheur, afin d'être reconnu par la Communauté scientifique. Pour l'industriel, c'est une fuite d'informations gratuites vers les concurrents. Vu de loin, le problème paraît insoluble. En fait, cela se règle assez bien : nous nous sommes résignés à voir partir plus d'informations que nous ne le souhaiterions, les laboratoires acceptent de nous montrer leurs projets de publications. Nous avons rarement demandé de différer et presque jamais de ne pas publier.

Les moyens de contact et de dialogues mis en place par le CNRS permettent-ils à un industriel de localiser aisément les compétences susceptibles de l'intéresser et d'y avoir un accès facile ? Y a-t-il des informations supplémentaires qu'à votre avis le CNRS devrait fournir à un industriel ? Par exemple définir des programmes de laboratoires.

Nous avons maintenant pris l'habitude d'interroger au clavier les banques de données mises en place, qui nous donnent les informations nécessaires pour décider un premier contact. Il faut

alors se déplacer et rencontrer les responsables.

En fait, il existe souvent un compte rendu d'activité sur trois ou cinq ans, dont la lecture préalable aurait parfois évité un voyage certes instructif, mais sans suite. Il serait intéressant de pouvoir disposer aisément de ces comptes rendus, ainsi que des programmes des laboratoires, s'il en existe. Cela préparerait mieux le contact ultérieur, nécessaire de toute façon pour sentir s'il existe ou non un thème d'études d'intérêt commun, parfois différent d'ailleurs de celui qu'on imaginait au départ.

Quelles sont les contraintes auxquelles les chercheurs doivent être plus particulièrement sensibilisés ? (coûts, délais, marchés, etc...)

Il me paraît illusoire que le chercheur scientifique soit préoccupé par des questions de coût futur de production ou de marché. Il manque à ce stade bien trop d'informations pour se faire des idées exactes et il ne faudrait surtout pas prendre des décisions d'orientation sur de telles bases.

Les délais, par contre, sont essentiels, tout au long de la chaîne qui conduit de la recherche à la production série, une décennie après. Tout cela est bien long, évidemment ; raison de plus pour se dépêcher dès le départ.

Enfin, le chercheur doit savoir que les conditions expérimentales qu'il a maîtrisées au laboratoire, à petite échelle, ne sont pas accessibles à l'industrie. La maîtrise du procédé, qui est parfois ressentie comme un long piétinement peu scientifique, est en fait une période difficile et coûteuse de mise au point de l'appareillage.

Mon impression générale est que notre collaboration avec des laboratoires de recherche nous a apporté, outre telle percée spectaculaire, une progression d'ensemble de notre savoir scientifique et un élargissement de nos vues. Notre tendance est d'augmenter ces coopérations et nous souhaitons trouver plus de disponibilité dans les laboratoires.

Propos recueillis par Anne de Garidel, chargée de mission auprès du directeur adjoint des relations extérieures.

Les Éditions du CNRS

Ces ouvrages sont disponibles en librairie ou au CNRS - 15, quai Anatole France, Paris 75700 et peuvent être consultés à la librairie des Éditions du CNRS tous les jours, sauf les samedis et dimanches, de 9 h à 12 h et de 13 h 30 à 17 h 30 (fermée au mois d'Août).

Sciences de la terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace

Méthodes de l'astrophysique : comment connaître et comprendre l'univers - L. Gougenheim - Préface de J. C. Pecker - L'astronomie science nouvelle pour les enseignants, est abordée par l'étude de la gravitation et de la lumière ; la connaissance de l'univers étant construite sur les rapports entre les lois de la physique avec les distances, le temps et les masses, on en dégage tout d'abord les mouvements astronomiques et ensuite les équilibres thermiques. L'évolution de l'univers suscite une discussion sur le temps et sur l'âge des astres. Éditions du CNRS - Hachette.

Contact Ile-de-France - Basse Normandie : évolution géodynamique - Y. De Wolf - Les marges occidentales du bassin de Paris : analyse d'un milieu périglaciaire de transition entre une frange occidentale océanique et une province orientale continentale ; explication et genèse de l'évolution de cette surface géologiquement simple mais aux formations superficielles complexes.

Sciences de la vie

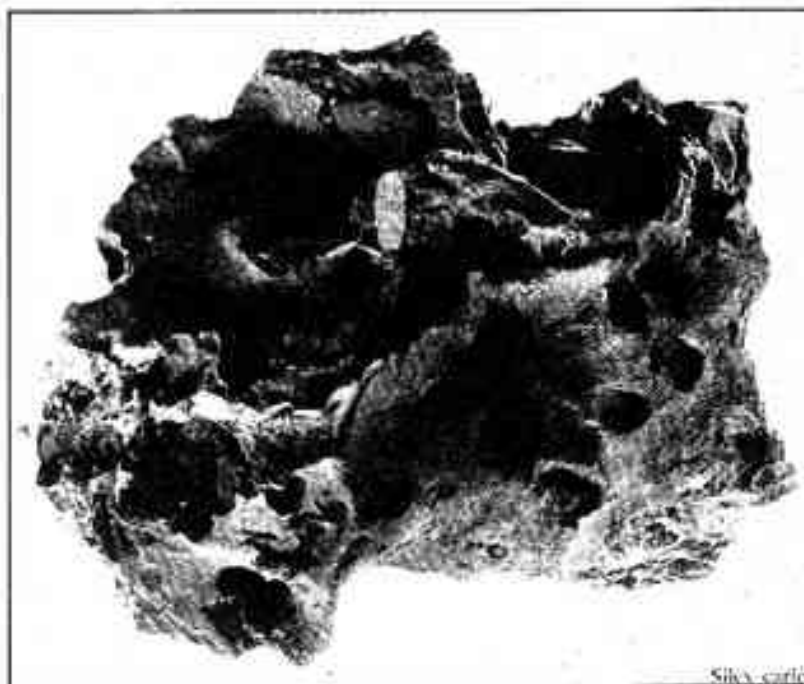
Vision moléculaire du monde - R. Daudel - La connaissance de la nature et les propriétés des molécules permet à l'homme d'acquérir une notion particulière du monde. Peut-on envisager la compréhension des comportements d'un objet inanimé, d'une plante, d'un

animal, voire de l'homme, en partant des données sur la vie des molécules ? La mécanique quantique et la prévision des comportements, comment rapprocher ces deux visions de la nature ? Éditions du CNRS - Hachette.

Culture de cellules eucaryotes - Répertoire des utilisateurs - Ouvrage collectif - Cet ouvrage regroupe les chercheurs utilisant la culture de cellules eucaryotes sous toutes ses formes (cultures d'organes, de tissus, de cellules), quelles que soient leurs orientations fondamentales. (Co-édition avec l'INSERM).

Les connaissances scientifiques écolo-

giques et le développement et la gestion des ressources et de l'espace - Ministère de l'environnement INRA CNRS - journée scientifique, 19-20 septembre 1979 - Responsable : M. Lamotte - Echanges d'informations autour du réseau Écologie et développement préoccupé de l'aménagement du territoire, mise en valeur des terres et des eaux, gestion et utilisations rationnelles des ressources naturelles, contrôle et surveillance de l'environnement. Recherche d'un statut et d'une formation appropriée en fonction des besoins actuels et prévisibles. Définition des bases d'une gestion applicables dans les cas les plus divers.



Le caractère de l'enfant en fonction de son mode de garde pendant les premières années - Monographies françaises de psychologie n° 55 - Geneviève Balleguier - Constat : dans toutes les civilisations l'enfant appartient dès la naissance à un réseau social et il existe différents modes de garde. Recherche : influence du mode de vie (garde, milieu...) sur le comportement de l'enfant dépendance du caractère (particularité et structure relationnelle du milieu). Enquête sur trois âges.

Villie - Morgon - Programme de recherches en sciences humaines dans la région Rhône-Alpes - J. Bonniel et G. Garrier - La population suit le rythme de l'évolution du vignoble, renforcement de la moyenne propriété, augmentation dans la spécialisation des cultures.

La croix-Rousse - Programme de recherches en sciences humaines dans la région Rhône-Alpes - Ouvrage collectif - La Croix-Rousse, image de l'art de la soie, l'industrie de la soie, mono-activité et conditionnement, espace et

activités économiques : la Grande-Côte, les pentes et le plateau.

Coutumes et rapports sociaux - étude anthropologique des communautés paysannes du Capcir - L. Assier-Andrieu - Organisation et fonctionnement de la vie humaine en montagne catalane. Reconstitution d'une communauté et du territoire en associant la tradition orale et l'information écrite (historique et juridique). Etude des coutumes domestiques du principe unitaire de cette société : la maisonnée.

Sciences sociales

Les flux d'investissement direct entre la France et les pays industrialisés (1965-1974) - Ouvrage collectif - Analyse géographique et sectorielle des mouvements de capitaux privés effectués, à l'occasion de l'implantation d'entreprises françaises dans neuf pays industrialisés, par les résidents et les non-résidents, et enregistrés sur la balance des paiements français.

Soierie lyonnaise (1850-1940) - Henriette Pommier - Présentation d'une exposition consacrée aux archives des maisons de soierie lyonnaise, l'industrie et le patrimoine artistique, pensée et images de la création des fabricants lyonnais, technique de fabrication et produit des métiers.

Croix-Lulzet quartier de Villeurbanne - Programme de recherches en sciences humaines dans la région Rhône-Alpes - Observation du changement social et culturel - B. Meuret - Voisinage agriculture-industrie. Expansion économique et logement social. Intégration du corps universitaire. La désertion des usines du sol villeurbannais et ses conséquences.

Journal de campagne de l'amiral Bauffremont Prince de Listenois dans les pays barbaresques (1766) - M. Chirac - Récit, anecdotes piquantes touchantes mais aussi développements techniques sont l'objet d'un journal dédié à sa femme par un militaire mondain. Les manuscrits du journal et du rapport officiel sont des témoignages historiques et économiques sur l'Empire ottoman à cette époque. Sont étudiés en première partie : la famille, l'homme et l'écrivain.



Le Grand Seigneur - dans le Sérail, avec le hachem-liman.



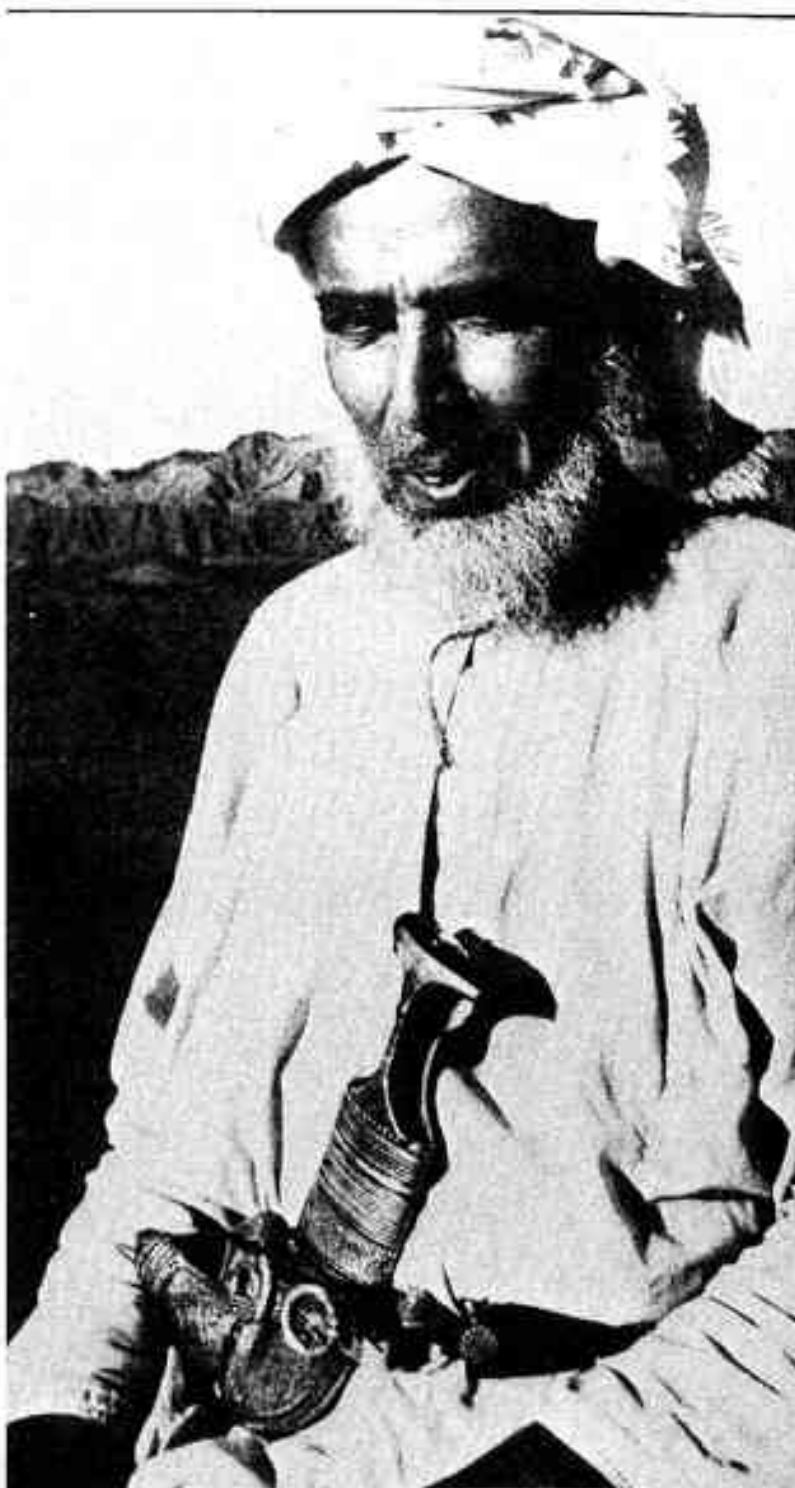
Comme au Yémen, tous les hommes « de tribu » omanais portent le poignard recourbé, appelé ici Khanjar, au-dessus de la tunique dishdasha. ►

La péninsule arabique d'aujourd'hui
Tome I - Direction : P. Bonnenfant -
La péninsule arabique : son évolution
et son importance actuelle : économie,
finance, stratégie, diplomatie, social,
religieux et culturel. Aspect géopoliti-
que, la place de l'Islam. Le pétrole :
histoire et conséquences : perspectives
et contradictions économiques, démo-
graphie, immigration, idéologie et pou-
voir, la modernisation, solidarité des
pays arabes, importance stratégique de
la péninsule.

Petite entreprise et croissance indus-
trielle dans le monde aux XXème siè-
cle - 2 volumes - Commission inter-
nationale d'histoire des mouvements
sociaux et des structures sociales -
Colloques : Strasbourg (1977), Chan-
tilly (1979), Bucarest (1980) - Histoire
de la petite entreprise dans le monde,
ses incidences sur la vie économique
sociale et idéologiques durant ces deux
siècles, son avenir au regard du gigan-
tisme industriel, souplesse et avantages
de celle-ci, innovation technologiques,
études portant sur 24 pays (conditions
et exemples variés).

Transformations sociales et dynamique
culturelle - Ethnologie sociale et psy-
chologie. Collection dirigée par Paul-
Henry Chombart de Lauwe - Prise de
conscience des groupes sans pouvoir :
identification de leur culture et leur do-
mination, formation d'idéologie, forces
actives de transformation, échanges
inter-groupes : transferts de connais-
sances, problèmes posés par les modè-
les culturels dominants. Exemples dans
divers pays de nouvelles communautés
de vie sociale : formes originales de re-
lations et de modes de décision.

Atlas historique de l'urbanisation de la
France (1811-1975) - G. Dupeux -
1811 : 30 000 000 de français,
4 000 000 dans les quelque 400 villes
de plus de 3 000 habitants. 1851 : la
population urbaine à crû de moitié (dé-
buts de l'industrialisation : textile sur-
tout, métallurgie ; le tourisme ; le phé-
nomène des banlieues). 1900 : les in-
dustries charbonnières et métallurgi-
ques se sont développées ainsi que le
commerce maritime. 1911 : près de
800 villes de plus de 3 000 habitants ;
les agglomérations de Paris, du Havre
et de Lille ont plus que sextuplé. 1975 :
55 000 000 de français, 34 000 000
dans les 1096 villes de plus de 3 00 ha-
bitants.



Conditions de travail et sous-
développement. Les industries agro-
alimentaires au Sénégal et au Togo -
Jean-Maurice Derrien - Etude d'un
secteur significatif l'agro-alimentaire.
Dépendance des pays sous-développés,
satisfaction des besoins essentiels des
salariés, les salariés face à des con-
traintes dont on ignore l'effet cumulatif
sur leur santé ou celle de leur famille,
réponse du système politique.

Givores - Programme de recherches en
sciences humaines dans la région
Rhône-Alpes - Observation du chan-
gements social et culturel - M. Garden
et J. Lequin - Ville industrielle et ou-
vrière en mutation, nouveau partage de
la population entre branches industriel-
les, sphère économique et comporte-
ments politiques. Le service d'archives
de la commune : à la recherche de la
tradition.

Indianité, ethnocid, indigénisme en Amérique latine – La question de la survivance ou de la résurgence d'identités ethniques. Ségrégation ou intégration des populations indigènes, éliminations de groupes ethniques. Revendications d'identités, identité nationale à partir des groupes ethniques et de l'attitude de la société dominante à leur égard.

Dossier de « La ville des expiations » de Ballanche – Jean René Derré – Etudes des procédures et des structures dans l'univers carcéral de la ville, leurs significations métaphysiques d'initiation et leur rôle social de repression. Ballanche et Joseph de Maistre. Positions de Ballanche à propos de Chateaubriand et de La Mennais. Inédits où Ballanche exprime son hostilité à Napoléon Ier, sa haute opinion du rôle de la France en Europe, ses positions face à la religion.

L'humérus et ses articulations chez les hominidés plio-pleistocènes – Cahiers de paléontologie (paléanthropologie) (deuxième cahier) – B. Senut – Comparaison de fossiles (scapula, humérus, extrémités proximales de l'ulna et du radius) d'hominidés plio-pleistocène (Afrique de l'Est et du Sud) avec des hominidés actuels (catarhiniens, platy-rhiniens). Mise en évidence de traits de valeur systématique et fonctionnelle : *australopithecus* utiliseraient ses membres supérieurs pour la locomotion, alors que dès le Pliocène supérieur *homo* aurait la morphologie de l'homme actuel.

Bibliographie de la littérature tunisienne des français (1881-1980) – G. Dugas – Inventaire des ouvrages littéraires relatifs au Maghreb inspirés en partie ou en totalité à des français par la Tunisie et les tunisiens, dans ou en dehors de leur propre pays, entre 1881 et 1980. Classement chronologique limité au genre romanesque, récits et témoignages.

Croissance urbaine – Mobilité et desserte des zones périphériques par les transports collectifs – C. Lacour, M. Barata, D. Leymarie – L'utilisation de l'espace selon des densités variables : urbanisation, concentration ou dédensification. Emergences de diverses zones (périphérie, centre) aboutissant à la nécessité de la mobilité. Les formes et les fonctions de cette mobilité (modes de déplacement, types de transports).

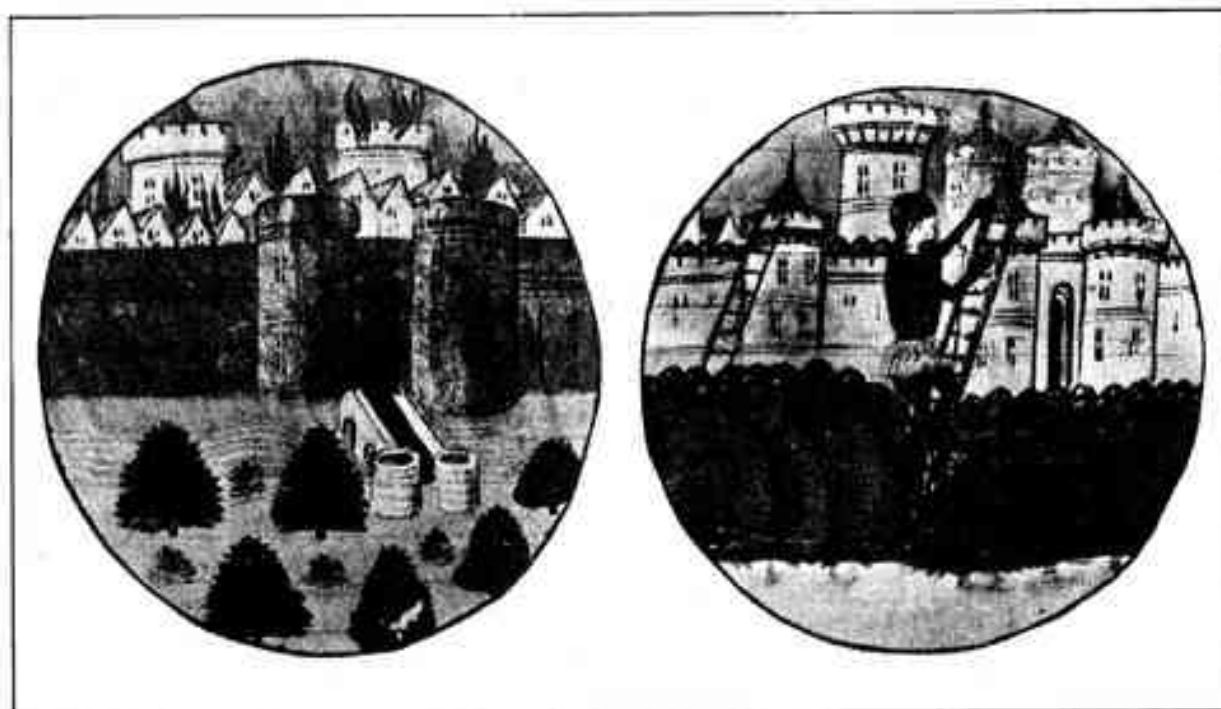
Les flux d'investissement direct entre la France et l'extérieur (1965-1978) – Mouvements internationaux de capitaux (2ème partie) – Responsable : P. Arnaud-Ameller, F. Marnata – Les recherches d'approvisionnement et de débouchés orientent les investissements, la croissance, la concurrence et le marché international des capitaux impliquent l'internationalisation des affaires. Etude du cas français (entrées et sorties de capitaux entre 1965 et 1978) : les liaisons avec les Etats-Unis, le Canada, la Suisse, l'Espagne et les pays de l'Union économique européenne.

Les sources en musicologie – (Journées d'études de la société française de musicologie à l'IRTH – Orléans – La Source – (9-11 septembre 1979) – Responsable : J. Glénisson – Contribution à l'étude des sources musicales manuscrites, conservation et exploitation en vue de la restitution et de l'interprétation de cette musique écrite antique et médiévale.

Antiquités africaines Tome 17 – 1981 – Ouvrage collectif – Recherches historiques et archéologiques sur l'Afrique du Nord de la protohistoire jusqu'à la conquête arabe. Dans ce tome, divers aspects de la romanisation de l'Afrique du Nord. 11 articles (8 en français, 1 en italien, 1 en anglais, 1 en espagnol).

Jeanne d'Arc – Une époque, un rayonnement – Colloque d'histoire médiévale – Orléans octobre 1979 – Jeanne d'Arc et son temps, la guerre de Cent ans, communications, situation d'Orléans, armement, armures, artillerie anglaise, les écossais, la hérauderie, l'université. La mission de Jeanne d'Arc, captivité, procès, condamnation, religion prophétisme féminin, Charles VII, P. Cauchon, itinéraires. Jeanne d'Arc et l'histoire nationale et internationale.

Médaille illustrant la destruction de Troie et la conquête de Jérusalem.



Les vitraux du centre et des pays de la Loire volume II du recensement des vitraux de la France - Corpus vitrearum - France - Inventaire général des monuments et richesses artistiques de la France - Recensement complet des vitraux anciens du moyen-âge au XVIIIème siècle dans le Centre de la France et les pays de la Loire (11 départements). Documentation de base historique, archivistique, bibliographie et iconographie. Mention des vitraux du XIXème et du XXème siècles existant dans les édifices conservant des vitraux anciens. Mention des vitraux déplacés et disparus. ►

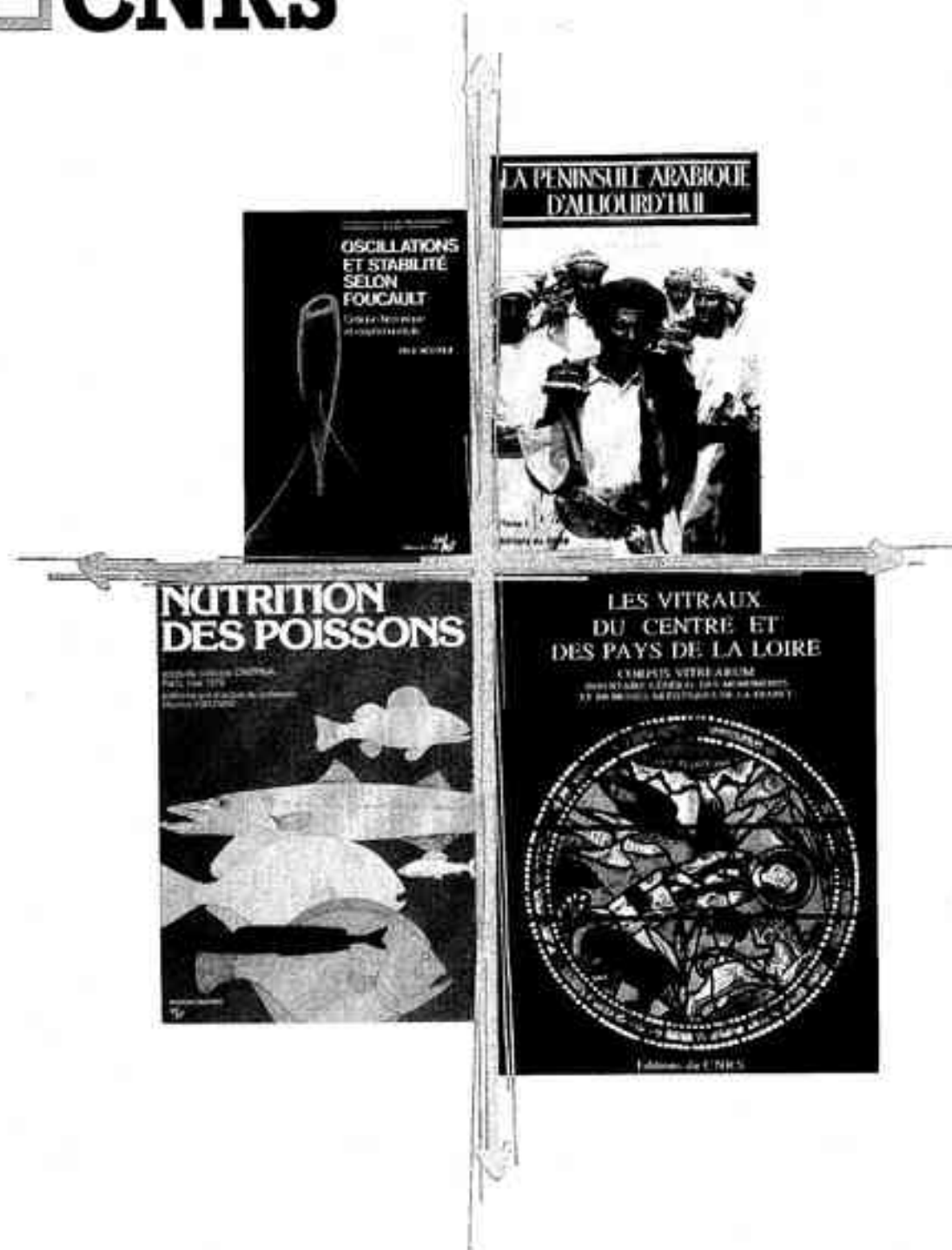
Les documents graphiques et photographiques : analyse et conservation - Processus de dégradation et de détérioration des documents : papiers, encres, photographies. Méthodes de rénovation et de conservation : procédés de restauration et traitements divers proposés, conditions de conservation (humidité, acidité, atmosphère).

Carte archéologique de la Gaule romaine au 1/200 000/fascicule XVI - Département de la Corrèze - Responsable : P. M. Duval, G. Lintz - Historique et mode de vie à l'époque romaine de cette partie du territoire des Lémovices (Limousin actuel). Répertoire des découvertes, canton par canton, établi à partir de l'archéologie funéraire et des sanctuaires de campagne. La carte signale les localités et reconstitue les voies romaines.

Fouilles et documents archéologiques en France métropolitaine - Gallia T. 39 - 1981 - fascicule 1 - Mise à jour des recherches archéologiques par site : tumulus (Corrèze), four (Aveyron) la ville à mosaïque (Eure-et-Loire), les bijoux d'or (Charente-Maritime), la grande mosaïque (Yonne), la mine de cuivre gallo-romaine (Ariège). Abord par sujet : le croissant-lunaire sur les monuments funéraires gallo-romain, esquisse d'une typologie des villas gallo-romaines du Berry.

Recueil général des mosaïques de la Gaule - III province de Narbonnaise 2 - Vienne - Xème supplément à Gallia - J. Lancha - La capitale des Allobroges et ses faubourgs : Sainte-Colombe et Saint Romain en Gal. Un des plus importants quartier urbains de la Gaule romaine mis à jour. Les mosaïques du site, influence et originalité des ateliers de Vienne, répertoire de canevases géométriques, répertoire végétal, dénombrement des mosaïques. ►





Dès 1950, le CNRS décide de créer les Editions du CNRS pour permettre aux scientifiques de publier leurs travaux. A l'heure actuelle, le catalogue des Editions du CNRS comporte 2 200 titres qui couvrent toutes les disciplines des sciences exactes aux sciences humaines. (Ce catalogue est disponible, sur simple demande, aux Editions du CNRS, 15, quai Anatole France - 75700 Paris).