Le courrier du CNRS 51

Auteur : 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.

Présentation

Date(s)1983-06
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

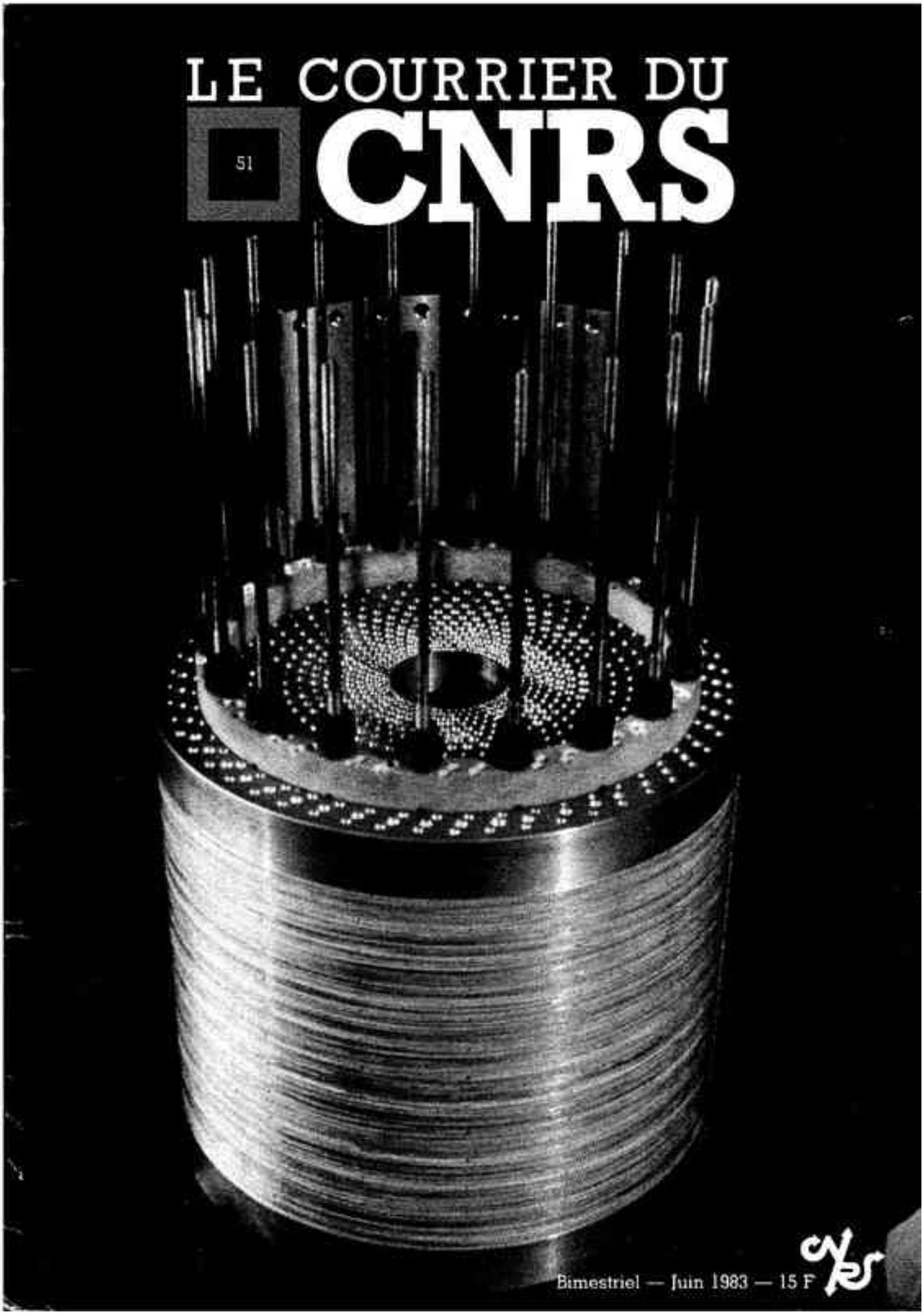
N° ISSN0153-985x

Description & Analyse

Nombre de pages52
Notice créée par Valérie Burgos Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 09/12/2024

LE COURRIER DU CNRS

51



Bimestriel — Juin 1983 — 15 F

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, quai Anatole France – 75700 Paris – Tél. : 555.92.25.

Directeur de publication : Goéry Delacôte
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 – 65 F pour l'étranger (voir bulletin p. 27-30).
Tout changement d'adresse doit être signalé au secrétariat de rédaction.
Revue bimestrielle comportant cinq numéros par an.
Nous remercions les auteurs et les organismes qui ont participé à la rédaction de ce numéro.
Les intertitres et les chapeaux 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 : ODT, 41 avenue de Friedland – 75008 Paris.
Réalisation ALLPRINT, 8 rue Antoine Chantin – 75014 Paris.
C.P.A.D. 303 – ISBN 2-222-03335-7 – ISSN 0153-985 X. © Centre national de la recherche scientifique.

Page 1 de couverture : Bobine de Bitter interne d'un aimant 10 MW, 20 T. (Service national des champs intenses, p. 45).

Page 4 de couverture : formes primitives de la vie sur la Terre âgé : 800 millions d'années environ. *(voir descriptif, encadré p. 36).*

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

LE COURRIER DU
51 CNRS
Bimestriel — Juin 1983

CNRS
Délégation du Siège
Service Logistique
Dépôt des Archives Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette
Tél : 01 69 82 39 17

CNRS
Dépôt des Archives
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette

Le point	4	La valorisation de la recherche : de l'usine au laboratoire... du laboratoire à l'usine.	Jean-Jacques Duby
A propos	8	Nouvelle synthèse de la vitamine A : une réussite de la coopération CNRS-Université-Industrie	Marc Julia
Dossier	11	Les laser vainqueurs de l'agitation thermique	Bernard Cagnac
A la recherche	19	Les gènes sauteurs	Jean-Claude Bregliano
Le courrier des lecteurs	24		
Au-delà des frontières	25	La vie dans les planètes telluriques ?	Jacques Blamont
A la découverte	37	L'hydrogène vecteur d'énergie : évolution et perspectives	Claude Gleitzer
Réflexion sur	41	Les échecs scolaires, marginalisation et identifications culturelles chez les migrants de la seconde génération	Georges Vignaux
Service	46	Le service national des champs intenses, Hochfeld-Magnetlabor de Grenoble	Guy Aubert
Bibliographie	52	Les Éditions du CNRS	

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

La valorisation de la recherche : de l'usine au laboratoire... du laboratoire à l'usine.

Du concept au produit, du laboratoire à l'usine, le but de la Direction de la valorisation et des applications de la recherche est d'aider le chercheur à franchir le passage de la théorie à l'application et à l'industrialisation.

Jean-Jacques DUBY

La recherche française a été profondément marquée par le colloque national de 1982. De ce colloque se sont dégagées, à travers les contributions de milliers de chercheurs, ingénieurs, techniciens et industriels, des aspirations et des propositions qui sont à la base de la loi d'orientation et de programmation de juillet 1982. Le législateur a reconnu dans ce texte, l'importance de la fonction sociale des travailleurs de la recherche, importance qui repose sur leur responsabilité sociale. Pour citer le rapport général du colloque, cette responsabilité est d'abord « la découverte et l'innovation, mais ses frontières débordent largement le stade premier de la mise en lumière de faits nouveaux ou de la mise en œuvre de nouvelles techniques pour recouvrir les activités de transferts de tous ordres qui en sont le prolongement naturel ».

Les missions du CNRS, telles qu'elles sont énoncées dans le décret organique de novembre 1982, reflètent cette complémentarité entre « l'avancement de la science » et « l'application et la valorisation des recherches » pour « le progrès économique, social et culturel du pays ». Le législateur a ainsi explicité la contribution que le CNRS peut – et doit – apporter au pays dans la compétition économique internationale. Le rôle de la direction de la valorisation et des applications de la recherche est de favoriser le passage de la théorie à l'application, du laboratoire à l'usine, du concept au produit.

Le CNRS peut contribuer de deux manières à la compétitivité de l'industrie française : d'une part, en résolvant les problèmes fondamentaux qui bloquent le progrès d'une technologie ; d'autre part, en alimentant l'industrie d'innovations issues de ses laboratoires. Dans le premier cas, il s'agit d'attaquer par l'amont une difficulté apparue en aval, par exemple, de mieux comprendre la physico-chimie des membranes microbiennes pour améliorer les procédés de fermentation. Dans le second cas, il s'agit d'accompagner vers l'aval la valorisation d'un résultat, par exemple, d'industrialiser un nouveau procédé de synthèse.

□ Jean-Jacques Duby est directeur de la valorisation et des applications des résultats de la recherche au Centre national de la recherche scientifique.

De la recherche fondamentale au progrès technologique

Cette première démarche n'est pas différente dans son essence de la recherche fondamentale : qu'on l'appelle pure, appliquée, finalisée, technique, il s'agit toujours de recherche. Elle nécessite d'abord une connaissance par le CNRS des problèmes qui se posent à l'industrie et par l'industriel des directions de recherche du CNRS. Elle implique ensuite un dialogue entre chercheurs et industriels pour définir le problème, déterminer les axes d'approche et lancer les programmes de recherche correspondants.

La Banque des connaissances et des techniques, organisme commun entre le CNRS et l'Agence nationale de valorisation de la recherche (ANVAR), en publiant les annuaires du CNRS, en tenant à jours les bases de données CNRS-LAB et LABINFO, en renseignant les industriels qui cherchent le laboratoire susceptible de les aider à résoudre leurs problèmes, assure l'information des industriels sur les activités de la recherche. Les clubs thématiques du Comité des relations industrielles (CRIN) permettent aux industriels de différents secteurs et aux chercheurs de différentes disciplines de cerner un même problème technologique et de proposer des approches de solution ; certains groupements de recherches coordonnées ou actions thématiques programmées y ont eu leur origine.

Enfin une collaboration est nécessaire entre la recherche fondamentale du CNRS et la recherche finalisée de l'industrie pour que le relais soit bien passé de la première à la seconde. Les groupements scientifiques auxquels le CNRS, d'autres organismes de recherche et des entreprises industrielles apportent des ressources intellectuelles et matérielles, permettent cette coopération sur des thèmes d'intérêt commun ; les accords-cadres passés entre le CNRS et les grandes entreprises remplissent la même finalité.

De l'innovation à l'industrialisation

La démarche est en revanche différente lorsqu'il s'agit de faire passer un résultat du laboratoire à l'usine. Comment se pose en effet le problème de l'industrialisation ?

Le rôle du chercheur est de montrer l'existence d'une loi, d'un phénomène, d'un produit. Il peut montrer parfois la faisabilité – d'un procédé, d'un appareillage –. Son travail se concrétise par une publication, quelquefois – rarement – par un brevet.

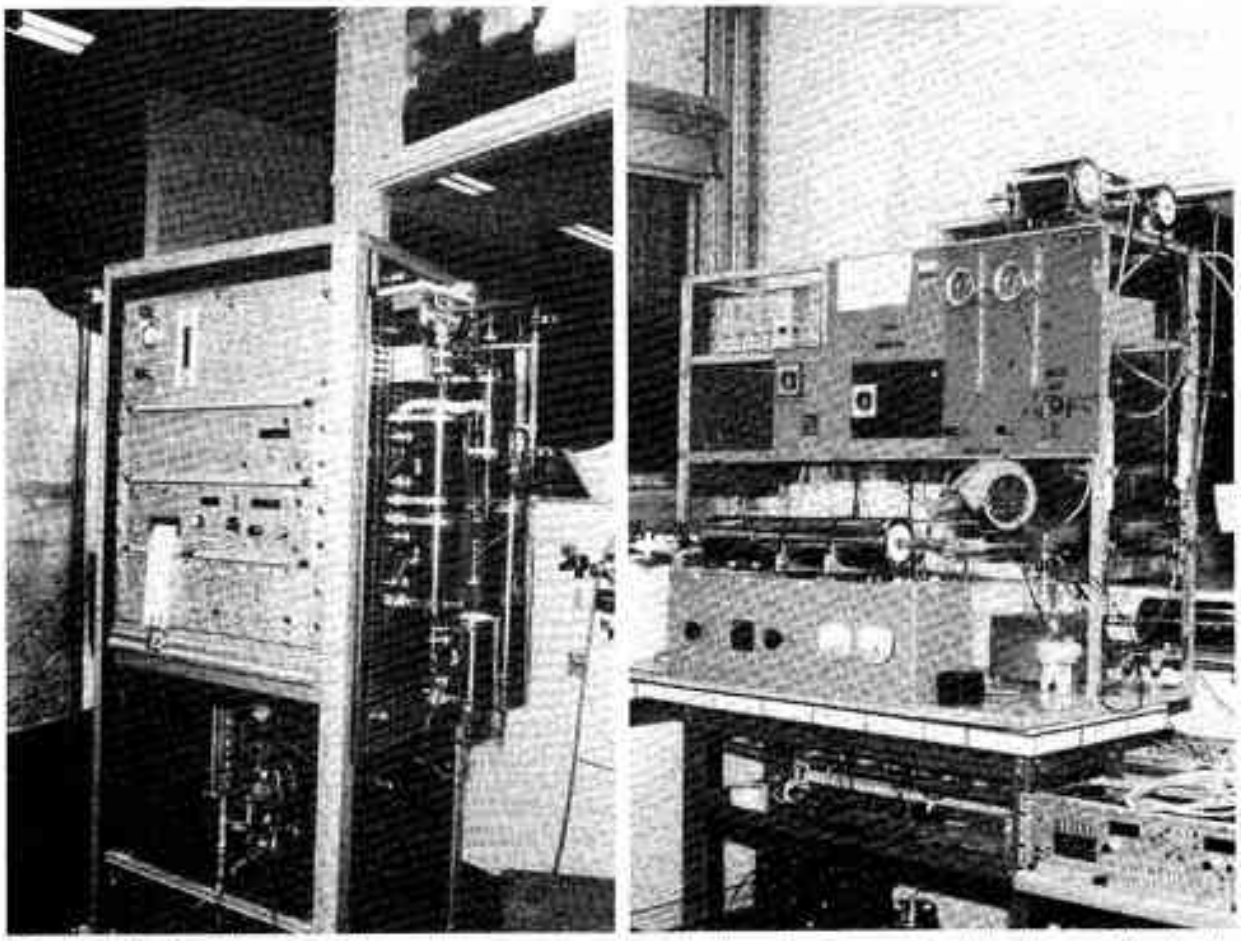
Le rôle de l'industriel est de fabriquer et commercialiser un produit. Pour chaque produit mis sur le marché, il lui faudra donc avoir défini un dossier de fabrication (comment le faire), un plan de commercialisation (comment le vendre), un plan d'utilisation (comment s'en servir), un plan de maintenance (comment l'entretenir).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

On comprend dès lors que le passage du produit issu du laboratoire de recherche au produit commercialisable demande un travail considérable de « développement » : développement du produit, des outils de fabrication ; calcul des coûts de production et des investissements nécessaires ; étude du marché, de la compétition, des prix, du profit ; étude des facteurs humains et ergonomiques ; calculs de fiabilité ; développement d'outils et de procédures de maintenance. Ces études et développements ont donné naissance à des disciplines techniques spécialisées : ingénierie de développement, de coûts, de fabrication, de fiabilité, de maintenance. Elles sont menées en général dans les bureaux d'études et les laboratoires de développement de l'industrie.

On peut donc penser en première analyse qu'il revient à l'industriel d'assumer l'entière responsabilité du développement : cela ne fait-il pas partie de sa mission, et n'en a-t-il pas les moyens humains et financiers ? Il existe toutefois des raisons, humaines, techniques, économiques et politiques, pour que le CNRS ne s'arrête pas systématiquement aux résultats de laboratoire, mais progresse, plus ou moins loin selon les cas, vers l'industrialisation :

– humaines, car le transfert de connaissances s'opère mieux de personne à personne, et un chercheur aura plus de chances de voir le résultat de ses recherches passer dans l'industrie s'il participe personnellement à ce transfert ;



De la conception à la réalisation. Un micro-analyseur automatique de soufre et d'oxygène mis au point par le Service central d'analyse de Solaize.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

– techniques, car les décisions prises en amont, tôt dans la conception, pèsent lourd dans les qualités et le coût du produit final : un produit bien conçu sera facile à fabriquer et à maintenir, tandis que des fortunes dépensées en développement ne « rattraperont » jamais une erreur « à la base » ; plus tard dans la vie du produit, le chercheur qui l'a conçu sera mieux à même de l'améliorer à la lumière des résultats d'utilisation ;
– économiques, car la valeur ajoutée du travail de développement est considérable et la contribution du CNRS à cette phase de l'industrialisation peut augmenter les ressources propres qu'il tire des redevances ;
– politiques enfin, car le CNRS répond ainsi à la volonté du législateur de travailler à la valorisation de ses recherches.

A l'inverse, il ne faudrait cependant pas conclure que le CNRS doit aller systématiquement jusqu'au bout du processus d'industrialisation : si cela est souhaitable dans certains cas, tout comme le développement dans l'industrie l'est dans d'autres, une continuité de solutions intermédiaires existent entre ces deux extrêmes.

Un éventail de solutions

A une extrémité de cet éventail de solutions, le CNRS n'intervient pas ; au plus, s'il a pris un brevet, il se borne à vendre une licence de ce brevet à un industriel.

Sa première forme de participation peut être l'intervention personnelle d'un chercheur, d'un ingénieur ou d'un technicien, soit à temps partiel (CNRS-consultant), soit à temps complet (mise à disposition) : c'est le rôle du bureau d'échanges de personnel de la Direction de la valorisation et des applications de la recherche d'aider ce genre d'opérations.

Le CNRS peut s'impliquer davantage en passant avec un industriel une convention de recherche qui définit les apports personnels et matériels de chaque partie. Il importe alors que les intérêts du CNRS et de l'inventeur en matière de propriété industrielle soient explicitement protégés dans le texte de la convention, afin qu'ils reçoivent leur juste part des bénéfices. Réciproquement, les équipes de recherche travaillant dans le cadre de la convention devront respecter une certaine confidentialité de leurs résultats. Différentes formes de contrat industriel sont bien connues et couramment utilisées par les unités de recherche. Mais elles sont encore trop souvent juridiquement déficientes quant à la protection des intérêts du CNRS et de ceux de l'Université, s'il s'agit d'une unité associée, et aux droits des chercheurs. C'est le rôle du service des relations avec l'industrie de la Direction de la valorisation et des applications de la recherche d'aider les laboratoires à assurer cette protection.

Dépassant le cadre d'une simple convention laboratoire/industriel, la participation du CNRS à la valorisation peut se faire à l'intérieur d'un groupement scientifique ou d'un groupement d'intérêt public (GS ou GIP). Cette dernière structure peut déjà être un embryon d'entreprise industrielle, avec la possibilité d'embaucher du personnel et d'avoir une activité commerciale – il est vrai dans des limites assez précises et sous contrôle de l'Etat –. Le statut juridique du GIP peut en particulier être bien adapté à l'implantation de centres de transfert de technologie, où des équipes mixtes CNRS/industrie collaborent au développement de prototypes industriels. Le premier GIP créé (temps fréquence) en est un exemple.

Enfin, pour aller jusqu'au bout de cette démarche de coopération industrielle, le CNRS peut utiliser la possibilité qui lui est offerte par la loi d'orientation et de programmation de participer au capital d'une filiale. Il peut ainsi renforcer sa crédibilité vis-à-vis du monde productif, contribuer à la création d'entreprises et développer ses ressources propres. Le service groupements et filiales, nouvellement créé au sein de la direction de la valorisation et des applications de la recherche, a pour responsabilité d'aider à la mise en place de ces structures et de suivre leurs activités.

Il n'est cependant pas nécessaire pour le CNRS de collaborer avec un industriel pour progresser vers l'industrialisation. Il peut dans certains cas faire tout ou partie du chemin seul. On peut par exemple imaginer qu'un certain nombre d'ingénieurs, techniciens ou administratifs (ITA) se spécialisent dans les problèmes de reproductibilité, de coût, de marché, de rentabilité, de fiabilité, etc... Ces ITA pourraient être affectés à un centre de transfert de

LES BREVETS CNRS EN 1982

En 1982, 71 brevets ont été déposés pour le compte du CNRS. Ils se répartissent ainsi :

– mathématiques, physique de base	7
– sciences physiques pour l'ingénieur	15
– chimie	33
– sciences de la vie	15
– sciences de l'homme	1

Ce chiffre place le CNRS au sixième rang des déposants français de brevets en France, au dix-neuvième rang en comptant les déposants étrangers. Il n'inclut pas les inventions CNRS brevetés au nom d'un industriel.

LES CONVENTIONS – CADRES

Les conventions – cadres offrent, comme leur nom l'indique, un cadre juridique et administratif aux actions de recherche que le CNRS veut mener en commun avec d'autres organismes : organismes publics, entreprises industrielles, centres techniques,... Elles contiennent notamment des clauses relatives aux échanges ou mises en commun du personnel, aux publications, à la propriété industrielle.

Tout accord de collaboration entre le CNRS et ces organismes peut donc se référer aux conditions générales de la convention – cadre envisagée.

Sur le plan scientifique, la convention – cadre prévoit l'existence d'un comité mixte au niveau des directions générales des deux signataires qui assure la définition et le suivi d'une politique globale de coopération à long terme.

QU'EST-CE QU'UN GROUPEMENT SCIENTIFIQUE ?

Un groupement scientifique (GS) est une structure souple permettant de réunir sur un programme de recherche précis plusieurs laboratoires du CNRS, propres ou associés, et des organismes extérieurs, industriels et administrations.

L'objectif est de réunir les compétences et les moyens suffisants pour l'exécution de ce programme, de coordonner les équipes qui y participent, d'assurer la diffusion et le transfert des résultats dans les meilleures conditions.

La création d'un GS se concrétise par une convention de collaboration multipartite fixant les apports respectifs des différents organismes.

Quarante-deux GS sont actuellement constitués et se répartissent ainsi :

– mathématiques, physique de base	2
– sciences physiques pour l'ingénieur	8
– chimie	5
– terre, océan, atmosphère, espace	4
– sciences de la vie	6
– sciences de l'homme et de la société	17

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

technologie, à un gros laboratoire ou à un groupe de laboratoires, pour avancer le développement de produits issus de la recherche, de manière à mieux assurer le transfert ultérieur vers l'industrie et à augmenter la part de valeur ajoutée au CNRS. On peut aussi concevoir que le CNRS puisse assurer la fabrication, l'industrialisation, la commercialisation de certains produits de haute technicité, à grande valeur ajoutée par l'intermédiaire d'une filiale propre. Il s'agit de produits dont le marché est limité à un petit nombre d'organismes spécialisés connus et dont la production ne nécessite pas des investissements incommensurables avec des investissements de laboratoire. De tels produits existent, par exemple en biochimie ou en instrumentation. Là encore, le but de l'opération serait d'assurer jusqu'au bout le succès de l'opération de transfert et d'augmenter les ressources propres.

Quelle que soit la démarche suivie et la forme adoptée par la valorisation, celle-ci passe par les personnes. C'est pourquoi la direction de la valorisation et des applications de la recherche poursuit activement la mise en place des chargés de mission à l'industrie (CMI) qui, dans les régions, en liaison avec les délégués régionaux du CNRS et de l'ANVAR, sont chargés d'aider les laboratoires dans leur tâche de valorisation. C'est pourquoi a été créée également la commission interdisciplinaire de valorisation, qui pourra donner au sein du comité national un avis sur les activités de valorisation des chercheurs et éventuellement des laboratoires.

L'intérêt des personnels et des unités

La valorisation des recherches du CNRS peut contribuer à la compétitivité économique de notre pays. Elle peut aussi contribuer au développement du CNRS, en apportant de nouveaux sujets de recherche et des ressources supplémentaires. Elle peut enfin apporter aux chercheurs, ingénieurs, techniciens, des possibilités de développement individuel et d'évolution de carrière, auxquelles on peut ajouter – s'il n'y sont pas insensibles – des possibilités de gains matériels pour eux-mêmes et pour leur laboratoire : sur les trois dernières années, les redevances des seuls brevets CNRS gérés par l'ANVAR se sont élevées à quatre millions de francs.

CHARGES DE MISSIONS AUX RELATIONS INDUSTRIELLES

Alsace	Jean-Pierre Bouley	Maison de l'innovation 2, rue Brûlée 67000 Strasbourg cedex Tél. : 88/22.23.96
Aquitaine	Françoise Joly	Délégation régionale de l'ANVAR 11, rue Boudet 33000 Bordeaux Cedex Tél. : 56/81.82.82
Franche-Comté	Claude Paulin	Laboratoire de physique et de métrologie des oscillateurs 32, avenue de l'Observatoire 25000 Besançon Tél. : 81/50.39.67
Haute et Basse Normandie	Jean-Claude Ferrer	CORIA-Faculté des sciences Place Emile Blondel, BP 67 76130 Mont-Saint-Aignan Tél. : 35/89.43.40, p. 412-414
Ile-de-France – Ouest	Kira Sipek	Institut de recherche en économie de la production (IREP) Université de Paris X Nanterre 2, rue de Rouen – Bât. G 92001 Nanterre Tél. : 725.92.34, p. 802
Ile-de-France	Anne Lizman	Domaine du CNRS 91190 Gif-sur-Yvette Tél. : 907.78.28 ou 388.53.70
Languedoc-Roussillon	René Foglizzo	Administration déléguée du CNRS Route de Mende, BP 5051 34033 Montpellier Cedex Tél. : 67/63.91.30, p. 381
Lorraine	Bernard Maudinas	Maison de l'innovation 93, rue de Metz 54042 Nancy Cedex Tél. : 83/37.45.58
Midi-Pyrénées	Gérard Jugie	Administration déléguée du CNRS 16, avenue Edouard Belin 31054 Toulouse Cedex Tél. : 61/53.22.88
Nord-Pas-de-Calais	Francis Wallart	Laboratoire de spectrochimie infrarouge et Raman 59655 Villeneuve d'Ascq Tél. : 20/91.92.22
Poitou-Charente	Robert Longeon	Laboratoire d'énergétique solaire 40, avenue du Recteur Pineau 86022 Poitiers Cedex Tél. : 49/46.26.30
Provence-Côte d'Azur-Corse	Elio Fiesla	Administration déléguée du CNRS 31, chemin Joseph Aiguier 13402 Marseille Cedex 09 Tél. : 91/71.90.42, p. 604
Rhône-Alpes-Est	Jean-Paul Boisson	Institut des sciences nucléaires 53, avenue des Martyrs 38026 Grenoble Cedex Tél. : 76/47.66.36
Rhône-Alpes-Ouest	Pierre Vergnon	2, avenue Einstein, BP 1335 69609 Villeurbanne Tél. : 78/89.30.52

Pour toute question concernant la valorisation, contactez le chargé de mission de votre région.

La valorisation est dans l'intérêt de tous. C'est aussi la responsabilité de tous – ingénieurs, techniciens, administratifs, chercheurs dans leurs métiers de recherche ; responsables d'unité et de département dans leurs décisions ; membres du Comité national dans leurs évaluations –, dans toutes les disciplines, des sciences exactes aux sciences humaines et sociales. L'engagement personnel de chacun fera le succès de tous.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Nouvelle synthèse de la vitamine A : une réussite de la coopération CNRS-Université-Industrie

Ce nouveau procédé, mis au point dans un laboratoire, puis industrialisé par une grande firme, illustre bien l'association réussie d'une recherche fondamentale et d'un problème industriel.

Marc JULIA

L'existence de la vitamine A naturellement présente dans diverses graisses animales (beurre, huile de foie de morue, ...) et son rôle indispensable à la croissance des animaux ont été soupçonnés dès 1913.

En 1920, il a été montré que le bêtacarotène était abondant dans de nombreuses plantes (notamment carottes) et dans le règne animal et agissait comme pro-vitamine A. Molécule double (40 carbones) de la vitamine A (20 carbones) le carotène est transformé en celle-ci dans le foie. Mais ce n'est qu'au cours des années 1930 qu'a pu être faite l'identification chimique de la vitamine A et en 1935 qu'a été reconnu son rôle essentiel dans la vision.

Les premières synthèses industrielles de la vitamine A remontent aux années 1950 et à présent pratiquement la totalité de la production mondiale est fabriquée par synthèse chimique.

Une difficulté de la synthèse réside principalement dans le fait que la chaîne latérale de cette molécule comporte une succession de quatre doubles liaisons ce qui conduit à seize isomères géométriques possibles. Or, seul est actif biologiquement l'isomère dont toutes les doubles liaisons sont dans la géométrie « trans » ; il faut donc obtenir un composé « trans » pur et au moindre coût.

Le procédé mis au point par le professeur Marc Julia est caractérisé essentiellement par l'emploi de réactifs qui, par leur encombrement propre, orientent la réaction chimique dans la bonne configuration géométrique. La pureté stéréochimique, les rendements et les coûts s'en trouvent améliorés.

□ Marc Julia, professeur à l'université de Paris VI dirige le laboratoire des réactions sélectives – Laboratoire de chimie – Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond – 75231 Paris Cedex 05.

Le nouveau procédé satisfait la condition de « convergence ». Dans la synthèse de molécules complexes, une meilleure efficacité est obtenue en préparant des éléments préfabriqués (synthons) aussi élaborés que possible et en les attachant le plus tard possible de sorte que le minimum d'étapes porte sur la totalité de la molécule cible.

Il se pose alors forcément un problème : en effet les points d'attache préparés sont normalement de la même polarité, or il n'est pas aisé de réaliser une nouvelle liaison entre deux atomes de même polarité (équation 1). Une solution consiste en le renversement de la polarité d'un des groupes. Des solutions ont été apportées à ce problème (Corey, Biellmann et Stork).

Une caractéristique du nouveau procédé est l'emploi de sulfones. Un mode d'accès commode aux sulfones est la substitution d'alcools ou de certains de leurs dérivés, comme les halogénures, par les sels d'acides sulfiniques, en particulier arylsulfiniques, très accessibles, (équation 2). Dans les sulfones obtenues le proton en x est rendu fort acide par le groupe sulfonyle. Sous l'action de bases courantes il se forme un carbanion (équation 3) : le carbone qui était électrophile dans le produit de dé-

NOUVELLE SYNTHESE DE LA VITAMINE « A » : UNE REUSSITE DE LA COOPERATION CNRS-UNIVERSITE-INDUSTRIE DANS LE DOMAINE DE LA RECHERCHE

Signature, mercredi 30 juin 1982 de contrats de coopération scientifique entre des représentants de la recherche publique (Ecole normale supérieure de Paris, Agence nationale de valorisation de la recherche (ANVAR), CNRS et le groupe Rhône-Poulenc).

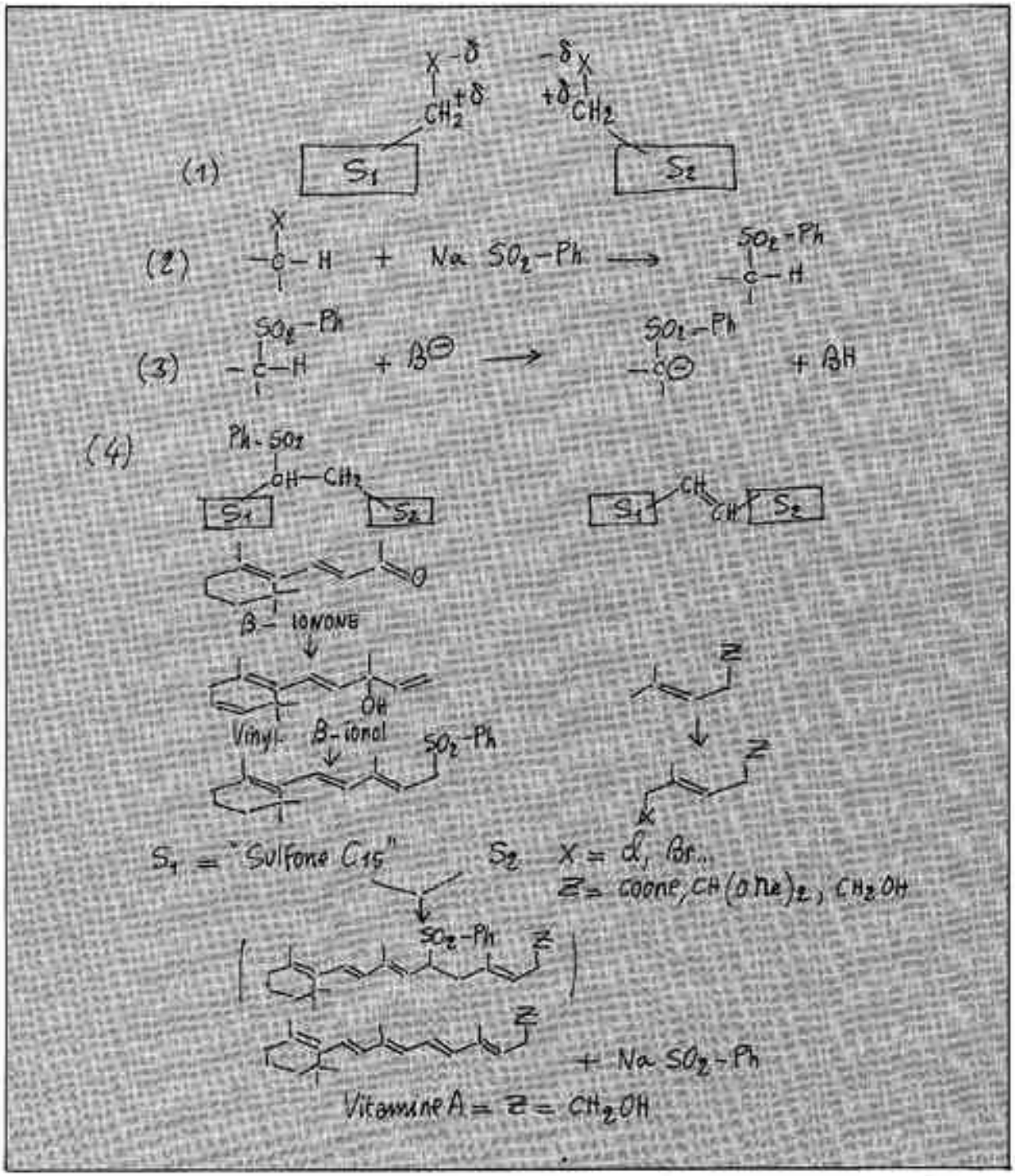
Ces accords concrétisent une longue coopération scientifique entre les laboratoires du professeur Marc Julia et le groupe Rhône-Poulenc. Cette coopération a permis aux centres de recherche de Rhône-Poulenc d'élaborer un nouveau procédé de synthèse de la vitamine A. Le procédé est original sur le plan chimique et sur le plan technologique ; il a donné lieu à plusieurs brevets déposés tant par Rhône-Poulenc que par l'ANVAR pour le compte du CNRS. Il a conduit à la réalisation d'une nouvelle unité automatisée de l'alimentation équilibrée sur le site de Commentry (AEC) dans l'Allier, filiale à 100 % du groupe Rhône-Poulenc. Cette société est spécialisée au sein de la division santé du groupe dans les additifs pour l'alimentation animale, domaine dans lequel elle est le premier producteur mondial. En particulier elle se place parmi les leaders pour la fabrication d'acides aminés (premier rang mondial pour la méthionine) et des vitamines (premier rang pour la vitamine B12, deuxième rang pour la vitamine A, troisième rang pour la vitamine E).

Aux termes des contrats, Rhône-Poulenc versera à l'ANVAR des redevances en échange de l'utilisation de certains brevets. De plus, ces contrats aboutiront à renforcer la collaboration entre le groupe industriel et le laboratoire du professeur Marc Julia.

Cet exemple de transfert réussi entre un laboratoire universitaire associé au CNRS et l'industrie, avec l'aide de l'ANVAR, dans sa mission de la valorisation de la recherche publique, illustre bien l'importance pour l'économie française d'une recherche fondamentale de qualité.

La loi d'orientation et de programmation du Ministère de l'industrie et de la recherche permettra d'accroître et de faciliter de telles opérations.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

part est maintenant fortement nucléophile. Le renversement de polarité est ainsi effectué, c'est la première propriété des sulfones qui est mise à profit.

Le groupe auxiliaire ainsi introduit doit naturellement être écarté pour parvenir au produit final. C'est ici qu'intervient une deuxième propriété du groupe sulfonyle : il peut être arraché très aisément dans certains cas, en même temps qu'un proton sur le carbone d'à côté, ce qui conduit à l'attachement des synthons par une liaison double (équation 4). L'avantage d'une telle démarche dans la synthèse d'une molécule comme celle de la vitamine A qui comporte cinq doubles liaisons est évident. Il s'agit justement d'un cas où l'élimination est aisée. Ceci illustre une nouvelle démarche qu'on peut appeler la « substitution-élimination ».

Dans cette élimination le groupement sulfonyle est éliminé sous forme d'anion sulfinate qui est justement le réactif nécessaire au début des opérations de sorte que le groupe auxiliaire est simplement recyclé. C'est une troisième propriété très précieuse des sulfones.

Le premier synthon, comportant quinze carbones, est la « sulfone C15 » : on l'obtient en deux étapes efficaces à partir de la β -ionone produit de départ utilisé pour tous les procédés industrialisés (équation 5). Elle se présente sous forme d'un solide cristallisé ce qui facilite la purification et assure l'homogénéité stéréochimique « trans » nécessaire.

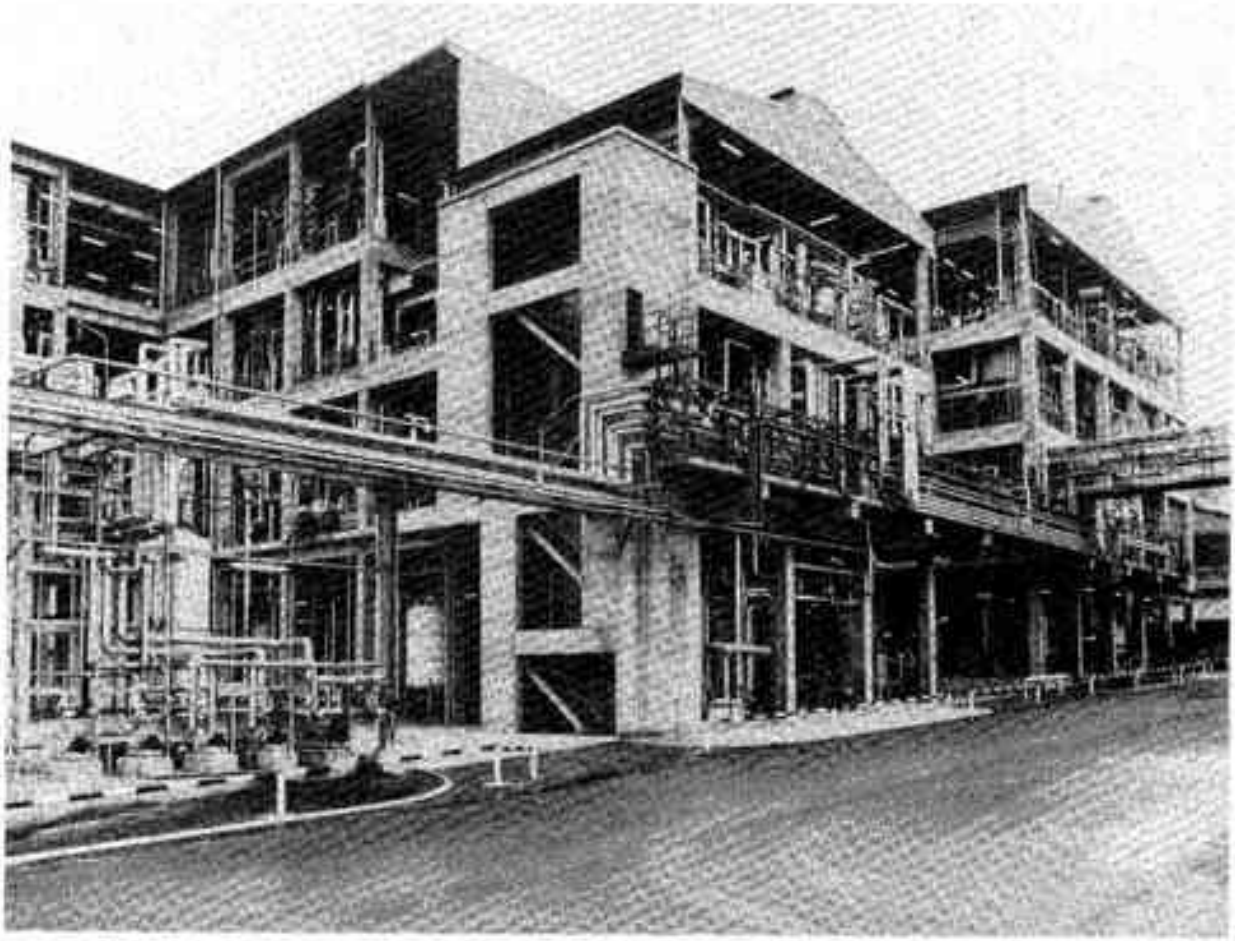
Le deuxième synthon comportant cinq carbones peut être préparé sous plusieurs formes avec des fonctions terminales diverses, acide ou ester, aldéhyde ou acétal, alcool enfin. Ceci apporte une grande souplesse dans la mise en œuvre des procédés. Quand c'est nécessaire une opération aisée transforme le groupe terminal en alcool ou ester qui sont les formes désirées de la vitamine. L'acide correspondant suscite d'ailleurs un intérêt considérable par ses applications thérapeutiques.

La condensation et l'élimination se font ensuite pratiquement en une seule opération. Le produit est obtenu très pur avec la stéréochimie convenable pour les doubles liaisons.

Ce résultat a pu être obtenu d'une part par une innovation scientifique apportant des moyens inédits à la synthèse chimique mais aussi par la reconnaissance d'un problème industriel susceptible d'en bénéficier.

De bonnes relations entre laboratoires universitaires et industriels sont donc indispensables. La confiance et l'estime mutuelles ont été à la base de ces relations.

Il y a beaucoup d'autres problèmes qui attendent des solutions nouvelles. L'association de la recherche dite fondamentale et de l'efficacité industrielle devrait permettre d'en résoudre efficacement quelques autres.



Atelier NAVAS – Nouvelle unité automatisée de l'alimentation équilibrée – Commentry-Allier – (photo Rhône-Poulenc DIC).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Les laser vainqueurs de l'agitation thermique

La réduction de la marge d'incertitude sur les longueurs d'ondes émises par LASER a permis de gagner plusieurs ordres de grandeur dans le domaine des mesures de haute précision et rend des services considérables dans des domaines très variés.

Bernard CAGNAC

L'EFFET DOPPLER-FIZEAU

L'effet Doppler-Fizeau se produit chaque fois qu'une onde, de nature quelconque, est émise ou reçue par un appareil en mouvement ; nous en faisons tous l'expérience lorsque nous attendons le passage d'un train à un passage à niveau : les ondes acoustiques émises par le train nous paraissent plus aiguës quand le train s'approche de nous, et changent brusquement de tonalité lorsque le train est au plus près ; pour nous paraître plus graves lorsque le train s'éloigne de nous.

Cet effet s'explique facilement de la façon suivante (fig. a) : lorsque le train émetteur de vibrations acoustiques s'approche de nous, les vibrations qui ont été engendrées plus récemment ont moins de chemin à parcourir pour arriver à notre oreille ; elles mettent moins de temps à nous parvenir et elles rattrapent une partie de leur retard. C'est-à-dire que l'intervalle de temps, séparant l'arrivée à notre oreille des vibrations anciennes et l'arrivée des vibrations récentes est plus court que l'intervalle de temps séparant les émissions de ces mêmes vibrations par le train. Notre oreille compte donc le même nombre de vibrations pendant une durée un peu plus courte ; et le son lui paraît de fréquence plus rapide, c'est-à-dire plus aigu.

Lorsque le train s'éloigne de nous, le même phénomène se produit en sens inverse (fig. b) : les vibrations plus récentes ont plus de chemin à parcourir ; elles mettent donc plus de temps pour nous parvenir et elles augmentent leur retard sur les vibrations anciennes. Notre oreille compte donc le même nombre de vibrations pendant une durée plus longue ; le son lui paraît de fréquence moins rapide, c'est-à-dire plus grave.

Si la direction de propagation de l'onde fait un angle θ avec la vitesse v du véhicule, seule compte la composante $v \cos\theta$ de la vitesse sur la direction de l'onde ; il est alors facile de calculer la fréquence apparente ν :

$$\nu = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v \cos\theta}{c}\right)$$

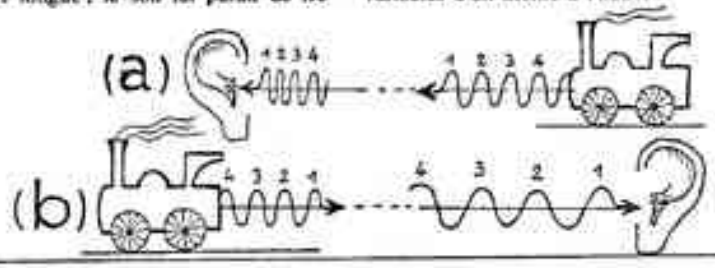
où ν_0 est la fréquence d'émission, et c la vitesse de propagation de l'onde. Si le véhicule se rapproche, il faut prendre le signe +, et la fréquence est plus grande que ν_0 ; si le véhicule s'éloigne, il faut prendre le signe –, et la fréquence apparente ν est inférieure à la fréquence d'émission ν_0.

Le même phénomène se produit lorsqu'il y a émission d'ondes lumineuses par les atomes en mouvement. Comme les atomes ont des mouvements dans tous les sens, avec des vitesses plus ou moins grandes, ce décalage de fréquence est variable d'un atome à l'autre. L'énergie lumineuse émise par les atomes se répartit autour de la fréquence normale ν_0 sur un certain intervalle de fréquence dont la largeur $\Delta\nu_D$ est appelée largeur Doppler, et qui est proportionnel à la vitesse moyenne des atomes. Les phénomènes atomiques sont définis avec des précisions bien supérieures à cette largeur $\Delta\nu_D$; et sont, en fait, masqués par le brouillage que constitue l'effet Doppler-Fizeau.

Le même brouillage se produit bien sûr si, inversement, on éclaire les atomes avec un LASER de fréquence ν_L, parce que les atomes qui reçoivent la lumière, et qui ont des vitesses variables, « voient » cette même lumière avec des fréquences apparentes

$$\nu = \nu_L \left(1 \pm \frac{v \cos\theta}{c}\right),$$

variables d'un atome à l'autre.



Nous avons déjà expliqué, dans le précédent numéro, les deux principaux avantages des LASER sur les sources lumineuses traditionnelles : la très forte intensité lumineuse liée à la directivité du faisceau LASER et la sélectivité en longueur d'onde. Nous avons aussi vu l'intérêt en spectroscopie des LASER à colorants, parce que la longueur d'onde sélectionnée peut être facilement accordée à chaque transition atomique étudiée (le lecteur peu familier de ces notions se reportera utilement à l'introduction et au premier paragraphe de ce précédent article, dans le *Courrier du CNRS* n° 50 – mars 1983).

Cette sélection de longueur d'onde peut être contrôlée avec une très grande précision ; et la marge d'incertitude sur la longueur d'onde émise par un LASER peut être facilement réduite, jusqu'à être mille ou dix mille fois plus petite que celle d'une source lumineuse conventionnelle. Nous avions signalé ce phénomène, mais nous manquions de place pour en développer les conséquences qui sont pourtant très importantes, puisqu'elles ont permis de gagner plusieurs ordres de grandeur dans le domaine des mesures de haute précision. C'est cette lacune que nous voulons aujourd'hui combler.

Dans toutes les expériences de haute précision, l'onde lumineuse est émise ou absorbée par les atomes d'une vapeur à faible pression : ainsi, chaque atome se trouve pratiquement isolé dans l'espace et n'est perturbé que durant de très courts instants par des collisions sur la paroi du récipient qui contient la vapeur, ou par des collisions accidentelles sur d'autres atomes.

□ Bernard Cagnac, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, est responsable d'une équipe au sein du Laboratoire de spectroscopie hertzienne (LA 18) de l'Ecole normale supérieure de Paris.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Les états énergétiques sont alors beaucoup mieux définis que ceux des atomes d'un milieu condensé (liquide ou solide), fortement perturbés par les interactions permanentes avec leurs voisins. Mais cet avantage des vapeurs diluées ne peut pas être exploité au mieux parce que les mouvements d'agitation thermique des atomes y sont importants, et, par effet Doppler-Fizeau (voir l'encadré), provoquent une assez grande incertitude sur la mesure de la fréquence de l'onde émise ou absorbée par les atomes. Cette incertitude est 100 à 1 000 fois supérieure à l'incertitude théorique qu'on obtiendrait avec des atomes immobiles. Pour exploiter au mieux les possibilités offertes par la finesse des sources LASER, il faut trouver un moyen de s'affranchir de l'effet Doppler. C'est un problème qui a suscité l'intérêt des spectroscopistes au cours des dix ou quinze dernières années ; et ils ont utilisé quatre solutions que nous allons décrire successivement.

Les jets atomiques

La méthode du jet atomique est plus ancienne que les LASER ; mais ce sont les LASER qui lui ont donné un important développement. Elle consiste à sélectionner des atomes dont les vitesses sont toutes parallèles entre elles et à **les éclairer suivant une direction perpendiculaire à leurs vitesses** (angle $\theta = 90°$ sur la figure 1), de telle sorte que les composantes de vitesses sur la direction de propagation soient nulles :

$$v_x = v \cos \theta = 0.$$

Dans ces conditions, l'effet Doppler est annulé et tous les atomes « voient » la fréquence de l'onde inchangée.

La formation de jets atomiques est obtenue très simplement par un alignement de diaphragmes troués dans une enceinte vidée d'air et c'est une technique utilisée couramment dans un grand nombre d'expériences de physique atomique. Pour annuler véritablement l'effet Doppler, il faut que la direction du faisceau lumineux soit parfaitement définie ; on ne pouvait l'obtenir avec les sources lumineuses anciennes qu'au prix d'une diminution considérable de l'intensité lumineuse ; les LASER au contraire envoient naturellement toute leur intensité lumineuse dans des faisceaux de direction parfaitement définie ; et cette directivité des faisceaux LASER en fait des outils de choix pour l'utilisation avec des jets atomiques. Ces techniques de jets atomiques ont été portées à un haut degré de sensibilité et de précision au Laboratoire Aimé Cotton ; elles ont permis des mesures de haute précision sur les

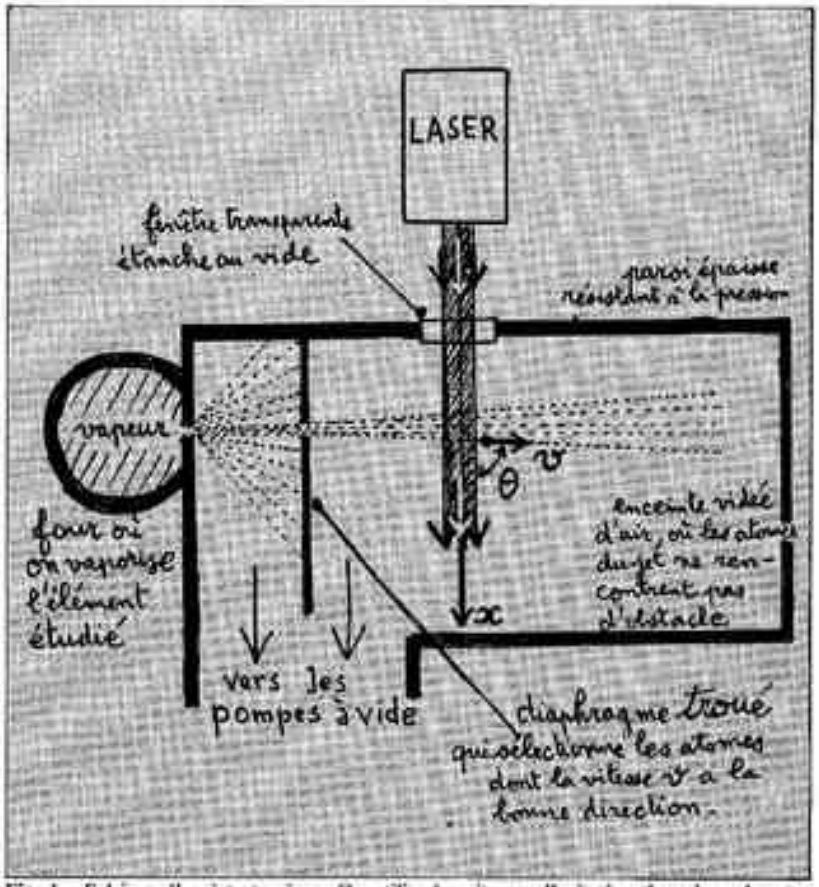


Fig. 1 – Schéma d'un jet atomique. On utilise les vitesses d'agitation thermique des atomes, normales à l'intérieur de la vapeur ; seuls passent à travers les deux trous les atomes dont les vitesses ont la bonne direction.

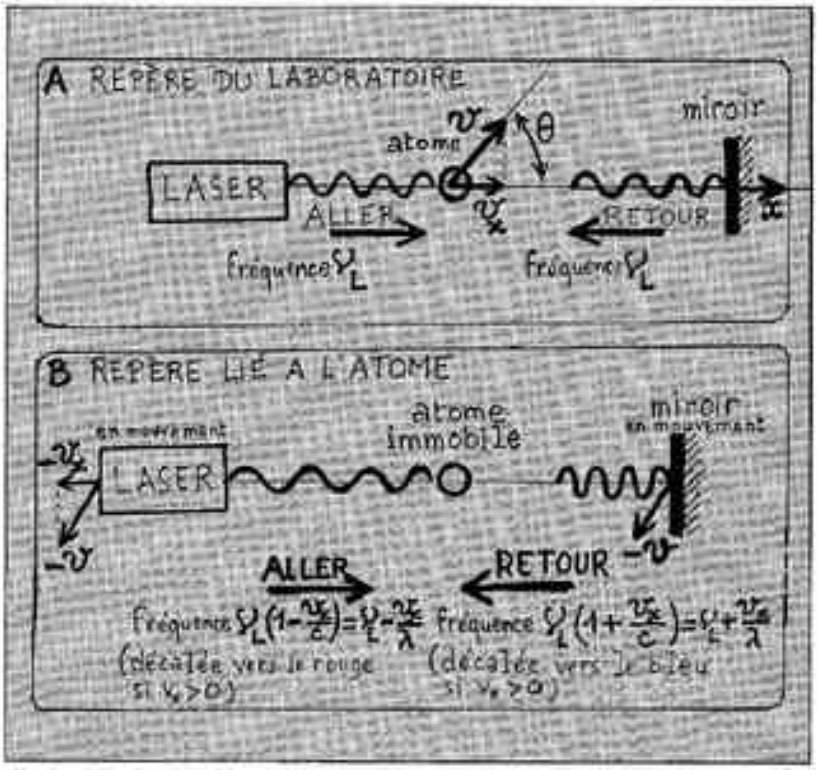


Fig. 2 – Effet Doppler-Fizeau dans le cas de deux ondes se propageant en sens opposés. A – dans le repère du laboratoire, les deux ondes aller et retour ont la même fréquence ν_L. B – dans le repère lié à l'atome, les deux ondes aller et retour sont vues avec des fréquences différentes, décalées en sens opposés.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

atomes artificiels instables dont on a parlé dans l'article précédent.

L'absorption saturée

La méthode d'absorption saturée permet de distinguer parmi les atomes d'une vapeur ceux dont les vitesses sont perpendiculaires au faisceau lumineux et de tenir compte seulement de ceux-là. Elle utilise dans son principe le fait que le décalage de fréquence Doppler **change de signe si l'on inverse le sens de propagation de l'onde.** C'est ce qui est représenté sur la figure 2 : l'onde lumineuse issue d'un LASER, à la fréquence ν_L, est réfléchie sur elle-même à l'aide d'un miroir ; et nous étudions son interaction avec un atome particulier dont le vecteur vitesses $\vec{v}$ a la projection $v_x = v \cos \theta$ sur la direction Ox du faisceau lumineux. Pour ce faire, nous raisonnons dans le repère lié à l'atome (figure 2b) en supposant que la composante v_x est positive : le LASER s'éloigne de l'atome et la fréquence apparente de l'onde aller est diminuée :

$$\nu_{aller} = \nu_L (1 - v_x/c) = \nu_L - v_x/\lambda$$

(longueur d'onde $\lambda = c/\nu_L$), le miroir au contraire se rapproche de l'atome et la fréquence de l'onde retour est augmentée :

$$\nu_{retour} = \nu_L (1 + v_x/c) = \nu_L + v_x/\lambda$$

(ces relations bien sûr sont algébriques, et restent vraies si la composante v_x est négative).

L'atome « voit » donc les deux ondes, aller et retour, comme ayant des fréquences différentes. Or l'interaction entre l'atome et l'onde se produit seulement quand la fréquence apparente est égale à la fréquence atomique ν_a de la transition énergétique $E_2 - E_1 = h\nu_a$; on en déduit que l'interaction se produit avec l'onde aller et avec l'onde retour pour deux valeurs différentes de la fréquence ν_L du LASER. L'atome ne peut donc pas interagir simultanément avec les deux ondes. Seuls font exception les atomes dont la composante v_x **est nulle puisqu'ils « voient »** les deux ondes avec la même fréquence inchangée ν_L. En définitive, les atomes dont **les vitesses sont perpendiculaires au faisceau lumineux** ($v_x = 0$) se distinguent des autres atomes par le fait qu'ils sont les seuls à pouvoir **interagir simultanément avec les deux ondes**, aller et retour (lorsque $\nu_L = \nu_a$).

Dans une expérience réelle d'absorption saturée (voir figure 3), on triche un peu sur les directions des deux ondes aller et retour, pour pouvoir les séparer en dehors de la cellule d'expérience et mesurer ainsi plus facilement leurs intensités lumineuses après la traversée de la cellule. Le faisceau retour a une très forte intensité lumineuse, capable de saturer la transition atomique $E_1 \to E_2$, c'est-à-dire d'exciter tous les atomes avec lesquels il est en interaction.

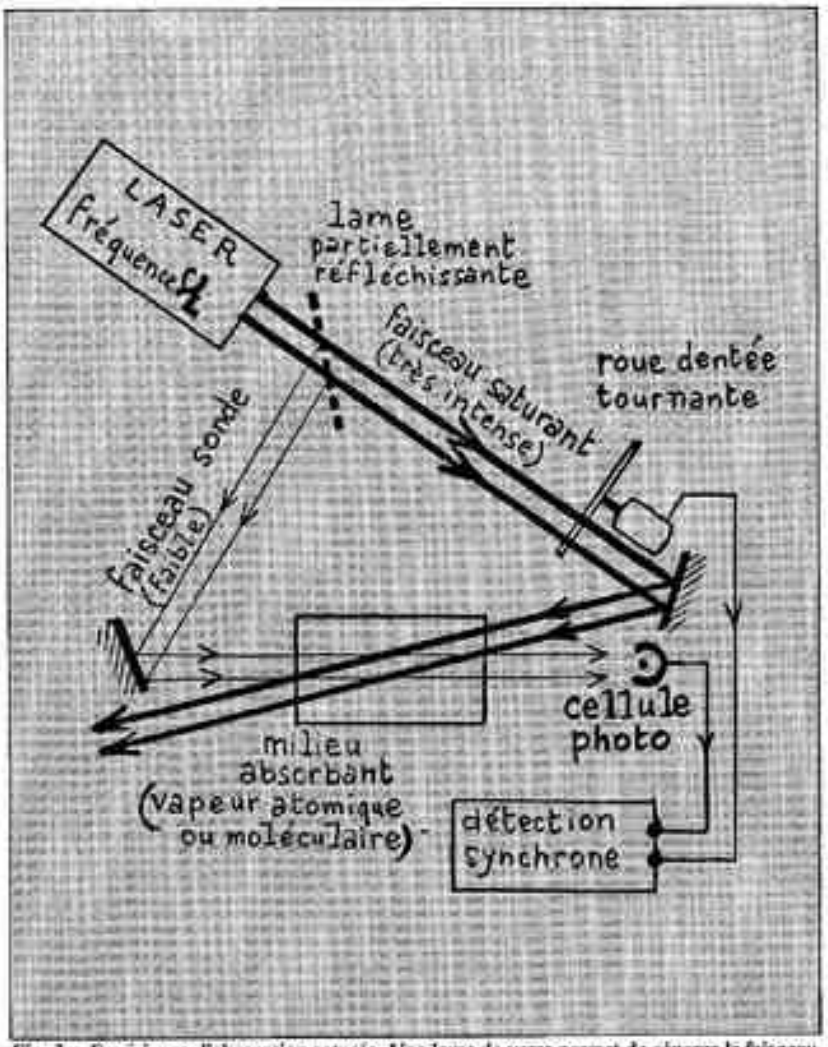


Fig. 3 – Expérience d'absorption saturée. Une lame de verre permet de séparer le faisceau issu du LASER en deux faisceaux distincts, d'intensités différentes ; un jeu de miroirs permet ensuite de les envoyer dans des directions presque opposées à travers la vapeur absorbante à étudier. Une roue dentée tournante permet d'interrompre périodiquement le faisceau saturant (de très forte intensité) et de comparer ainsi l'intensité du faisceau sonde, après traversée de la vapeur, selon que les atomes sont perturbés ou non par le faisceau saturant.

Lorsque les deux faisceaux lumineux interagissent avec les mêmes atomes (tels que $v_x = 0$), le faisceau-sonde interagit avec des atomes profondément perturbés et on montre que cela les fait apparaître comme plus transparents pour le faisceau-sonde (voir encadré p. 14) ; la cellule photoélectrique mesure alors une intensité lumineuse plus élevée. A ce signe on reconnaît que les deux faisceaux aller et retour sont en interaction avec les mêmes atomes. Ces atomes sont forcément ceux dont les vitesses sont perpendiculaires aux faisceaux lumineux ($v_x = 0$) et pour lesquels l'effet Doppler s'annule ; on peut donc affirmer que la fréquence ν_L du LASER est alors exactement égale à la fréquence atomique ν_a (voir figure (e) de l'encadré p. 14).

Cette méthode s'est développée autour de 1970 ; elle a animé une forte compétition entre laboratoires de spectroscopie et de métrologie du monde entier ; et elle a donné lieu à de nombreuses variantes. En France, elle a été d'abord développée à l'Université Paris-Nord dans le laboratoire de physique des lasers ; mais elle a reçu d'importantes applications dans de nombreux laboratoires. Citons en particulier le laboratoire de l'horloge atomique situé à Orsay et son essaimage vers Grenoble, le laboratoire de spectroscopie moléculaire optique et hertzienne de Bordeaux, le laboratoire Aimé Cotton.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

CLASSE DE VITESSE ET SATURATION

La notion de classe de vitesse sert à distinguer, parmi l'ensemble des atomes de la vapeur, la petite fraction d'entre eux qui sont en interaction effective avec une onde lumineuse parce que leur vitesse v_x leur fait « voir » une fréquence apparente égale à la fréquence atomique ν_a de la transition $(E_2 - E_1) = h\nu_a$, c'est-à-dire

$$\nu_a = \nu_L - \frac{v_x}{\lambda}$$

pour l'onde aller

$$\nu_a = \nu_L + \frac{v_x}{\lambda}$$

pour l'onde retour (fig. 2).

Chacune de ces deux relations établit une correspondance linéaire entre la fréquence ν_L du LASER et la vitesse v_x des atomes, que nous illustrons par la figure ci-dessous :

La courbe en gros points de la figure (b) représente la répartition des atomes entre les différentes vitesses v_x à l'équilibre thermodynamique : la probabilité $f(v_x)$ pour qu'un atome ait la vitesse v_x est représentée en fonction de v_x par une courbe de Gauss, symétrique quand on change le signe de v_x.

La correspondance entre la vitesse v_x' et la fréquence LASER ν_L est représentée, dans le cas de l'onde aller, par l'axe des fréquences (c), parallèle à l'axe des vitesses (b), et dont on a choisi l'échelle en sorte que : à la vitesse $v_x = 0$ corresponde la fréquence LASER $\nu_L = \nu_a$; à la vitesse v_x quelconque corresponde la fréquence

$$\nu_L = \nu_a + \frac{v_x}{\lambda}$$

Réinterprétée en utilisant l'échelle de fréquence (c), la courbe de Gauss de la figure (b) représente le nombre d'atomes qui sont en interaction avec l'onde aller issue du LASER à fréquence ν_L.

En réalité la fréquence d'interaction ν_a n'est pas déterminée avec une précision infinie : l'interaction se produit sur un certain intervalle de fréquence, centré autour de ν_a, et dont la largeur $\Delta\nu_N$ est appelée la largeur naturelle de la transition (le principe d'incertitude de Heisenberg permet de montrer que $\Delta\nu_N = 1/2\pi\tau_2$ où τ_2 est la durée de vie de l'état E_2). A cette largeur $\Delta\nu_N$, sur l'axe des fréquences, correspond, sur l'axe des vitesses, un intervalle de largeur $\Delta v_x = \lambda\Delta\nu_N$. Tous les atomes dont la vitesse v_x appartient à l'intervalle Δv_x interagissent avec l'onde et forment ce qu'on appelle la classe de vitesse v_x.

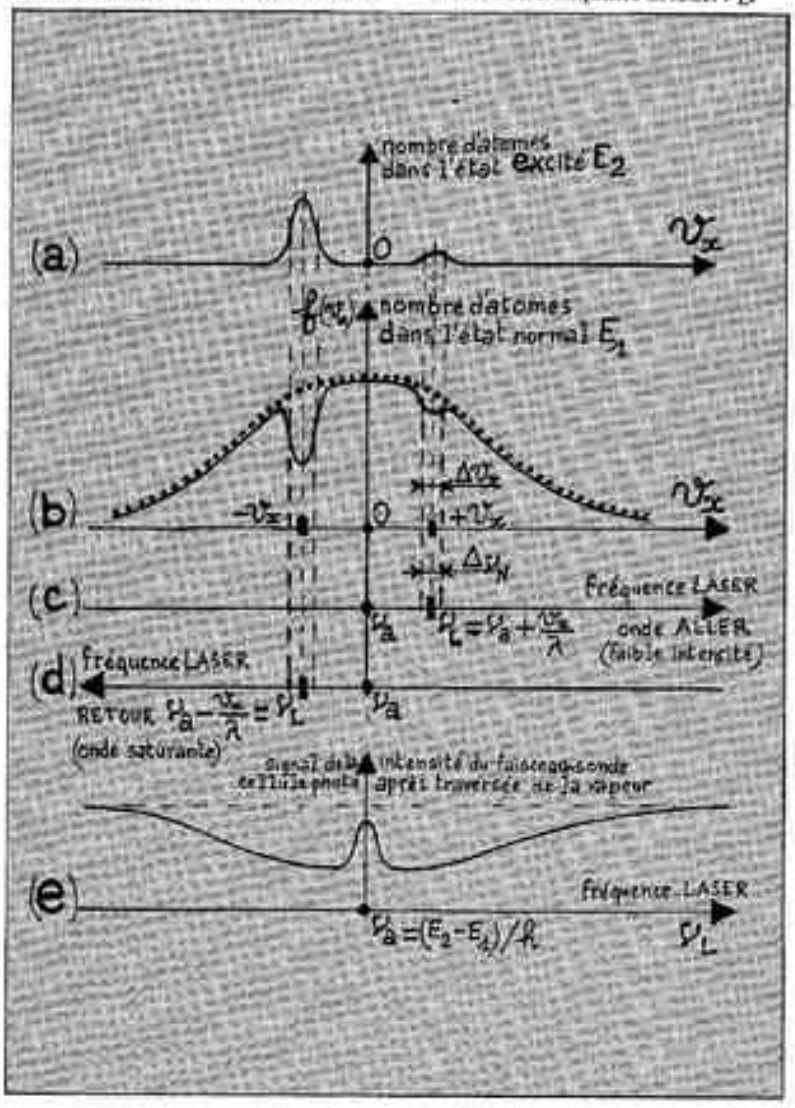
Dans le cas de l'onde retour, la correspondance est représentée par l'axe des fréquences (d) orienté en sens opposé, parce que, à la vitesse v_x, il fait correspondre la fréquence LASER

$$\nu_L = \nu_a - \frac{v_x}{\lambda}$$

A la même fréquence ν_L correspond maintenant la vitesse de signe opposé $-v_x$. L'onde retour interagit avec une autre classe de vitesse, symétrique de la précédente.

Nous supposons maintenant, conformément à la figure 3, que l'onde aller a une faible intensité (faisceau sonde) tandis que l'onde retour a une très forte intensité (faisceau saturant). L'onde aller n'excite dans l'état E_2 qu'une faible fraction des atomes de la classe de vitesse v_x ; et la plupart d'entre eux restent dans l'état normal E_1. Au contraire l'onde retour excite dans l'état E_2 un grand nombre d'atomes de la classe de vitesse symétrique $-v_x$; et la fraction d'entre eux qui restent dans l'état normal E_1 est notablement réduite. C'est ce que représentent les courbes en trait plein des figures (a) et (b).

Lorsque la fréquence LASER ν_L devient égale à la fréquence atomique ν_a, les deux classes de vitesse viennent se confondre en une seule (la classe des atomes de composante v_x nulle) et l'onde – sonde (aller) « voit » beaucoup moins d'atomes dans l'état normal E_1. Elle peut donc en exciter beaucoup moins de l'état E_1 à l'état E_2 ; c'est-à-dire que beaucoup moins de photons du faisceau sonde sont absorbés par les atomes de la vapeur. La vapeur apparaît comme plus transparente pour le faisceau sonde ; et l'intensité de ce dernier est donc moins affaiblie par la traversée de la vapeur. C'est ce qui explique l'allure de la courbe (a) représentant le courant de la cellule photoélectrique en fonction de la fréquence LASER ν_L.



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Les jets d'ions de grandes vitesses

La méthode du jet d'ions fortement accélérés s'applique bien entendu à la spectroscopie des ions (atomes ayant perdu un ou plusieurs électrons). Outre son intérêt fondamental, la spectroscopie des ions a de multiples applications dans l'étude des plasmas (milieux ionisés), qu'il s'agisse des plasmas naturels existant dans les étoiles (intérêt pour l'astrophysique) ou des plasmas artificiels réalisés en laboratoire (intérêt pour la fusion contrôlée). Deux idées différentes permettent d'effectuer des mesures à haute résolution.

La première idée consiste à utiliser la réduction des écarts de vitesse qui se produit naturellement lorsque les ions sont accélérés avec une tension électrique bien définie et qui est une conséquence de la variation quadratique de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse (voir encadré p. 16) : les ions à la sortie de l'accélérateur ont une vitesse v_A très grande, mais qui est très bien définie, avec une incertitude Δv_A extrêmement réduite, comparée à l'incertitude initiale qui existait dans la source d'ions.

La grande vitesse v_A des ions rend difficile l'utilisation d'un faisceau LASER perpendiculaire au jet, comme dans le cas d'un jet atomique. En effet les ions traverseraient le diamètre D du faisceau LASER tellement vite que l'interaction avec la lumière n'aurait pas un temps suffisant ($t = D/v_A$) pour se produire de façon notable. On préfère alors utiliser la bonne directivité du faisceau LASER pour éclairer les ions selon la longueur du jet (voir le schéma de la figure 4).

Avant d'accélérer les ions, il faut en effet les trier suivant leurs masses afin que les ions envoyés dans le jet soient tous identiques (même masse) et soient tous accélérés à la même vitesse v_A. Dans le séparateur d'isotopes qui effectue cette sélection de masse, les ions ont généralement des trajectoires courbées ; et il est donc très facile, en plaçant une fenêtre dans la paroi de l'enceinte à vide, au niveau de cette courbure, d'envoyer le faisceau LASER dans l'axe du jet.

Bien entendu, les ions en mouvement « voient » une fréquence apparente : $\nu_L (1 - v_A/c) = \nu_L - v_A/\lambda$ qui est fortement décalée par rapport à la fréquence ν_L du LASER. Mais ce décalage v_A/λ est exactement le même pour tous les ions, puisque l'incertitude Δv_A sur la vitesse est très réduite. Il s'agit donc d'un décalage de fréquence collectif, qui n'est accompagné d'aucune incertitude et qui permet des mesures très précises. On peut alors utiliser les variations de la tension accélératrice pour faire varier la vitesse v_A des ions et réaliser ainsi l'équivalent d'une variation de fréquence du LASER.

Pour que cette première méthode soit efficace, il faut d'une part que les fluctuations de vitesse à l'intérieur de la source d'ions ne soient pas trop importantes, d'autre part que la tension accélératrice soit parfaitement stable ; et ces deux conditions ne sont pas toujours faciles à réunir. On peut alors utiliser une autre idée qui consiste à prévoir sur le jet d'ions deux zones d'interactions successives, portées à deux potentiels V et V' différents, et dans lesquelles les ions ont des vitesses différentes, qui leur font « voir » des fréquences apparentes distinctes pour la lumière LASER. On choisit les tensions V et V' en sorte que ces deux fréquences apparentes correspondent à deux transitions différentes du même ion : la première interaction sélection-

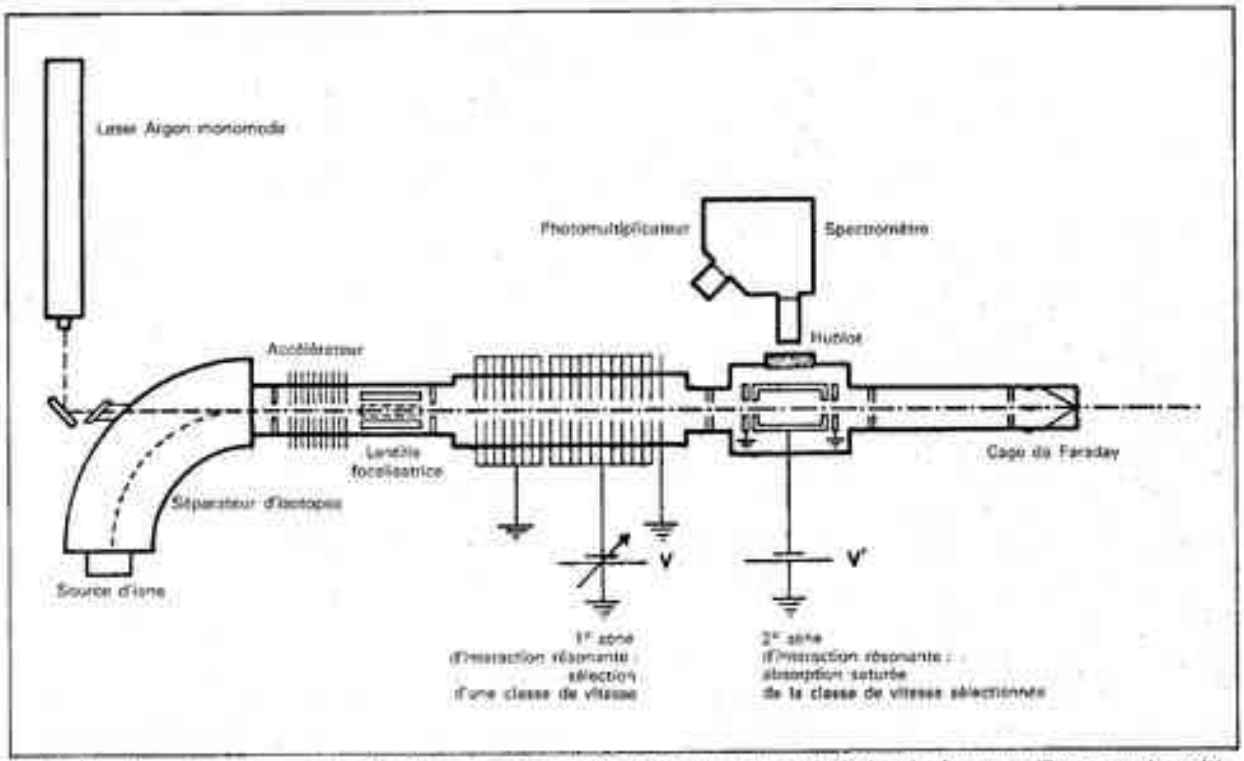


Fig. 4 – Expérience de spectroscopie sur jet d'ions. Les ions extraits de la source sont analysés dans le séparateur d'isotopes puis accélérés dans le tube accélérateur et focalisés grâce à une lentille électrostatique. Des pompes turbomoléculaires maintiennent un bon vide dans toute l'installation. Le faisceau LASER issu d'un LASER à argon monomode pénètre dans l'axe du faisceau d'ion par une fenêtre de Brewster. La chambre d'expérience est constituée de deux zones d'interaction successives électriquement isolées du reste de la machine. Chacune de ces sections est maintenue à un potentiel V (respectivement V') par rapport à la masse. Les photons émis par le faisceau dans la deuxième zone sont analysés par un monochromateur à réseau et recueillis sur un photomultiplicateur. (Figure extraite de « Images de la physique 1977, supplément au n° 26 du Courrier du CNRS »).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

ne parmi les ions une classe de vitesse (voir encadré) ; la seconde interaction se produit ensuite sur les ions sélectionnés, de vitesse bien déterminée, et permet donc une mesure de bonne précision. Celle-ci a l'avantage de ne dépendre que de la différence de potentiel V – V' qui est plus facile à contrôler. Cette méthode a été développée avec succès au laboratoire de spectrométrie ionique et moléculaire de Lyon.

REDUCTION DES ECARTS DE VITESSES D'IONS ACCELERES

La vitesse initiale v_0 d'un ion à l'entrée de l'accélérateur est déterminée par les collisions aléatoires qui se produisent à l'intérieur d'une décharge électrique dans la source d'ion. De ce fait, les vitesses initiales v_0 des différents ions ont des valeurs aléatoires ; et leurs énergies cinétiques $\frac{1}{2}mv_0^2$ se répartissent autour d'une valeur moyenne $E_M = \frac{1}{2}mv_M^2$ (v_M est la valeur quadratique moyenne de la vitesse). En négligeant quelques ions exceptionnellement rapides, on peut admettre que les énergies cinétiques $\frac{1}{2}mv_0^2$ se répartissent pour l'essentiel sur un intervalle compris entre 0 et $2E_M$ dont la largeur est $\Delta E = 2E_M = mv_M^2$ (voir figure).

Lorsqu'on accélère les ions de charge q avec la différence de potentiel U, on leur communique une énergie cinétique supplémentaire égale à qU, identique pour tous les ions, en sorte que leur énergie cinétique $\frac{1}{2}mv_A^2$ à la sortie de l'accélérateur vaut

$$\frac{1}{2}mv_A^2 = qU + \frac{1}{2}mv_0^2$$

(où $\frac{1}{2}mv_0^2 \ll qU$)

Les fluctuations de l'énergie cinétique accélérée $\frac{1}{2}mv_A^2$ sont donc les mêmes que celles de l'énergie cinétique initiale $\frac{1}{2}mv_0^2$: les valeurs de l'énergie cinétique se répartissent sur un intervalle de même largeur :

$$\Delta\left(\tfrac{1}{2}mv_A^2\right) = \Delta\left(\tfrac{1}{2}mv_0^2\right) = \Delta E$$

La parabole de la figure représente la relation quadratique existant entre l'énergie cinétique et la vitesse v :

$$E_{cin} = \tfrac{1}{2}mv^2.$$

On a représenté sur cette figure les incertitudes ΔE existant sur les deux énergies cinétique, initiale et finale (accélérée). La forme parabolique de la courbe a pour conséquence que l'incertitude Δv_A sur les vitesses accélérées est beaucoup plus petite que l'incertitude Δv_0 sur les vitesses initiales.

Cette propriété peut s'exprimer de manière plus précise. Comme la vitesse v_A est grande, les variations relatives de v_A sont faibles et nous autorisent à utiliser les classiques calculs d'erreur :

$$\Delta\left(\tfrac{1}{2}mv_A^2\right) = mv_A\Delta v_A = \Delta E$$

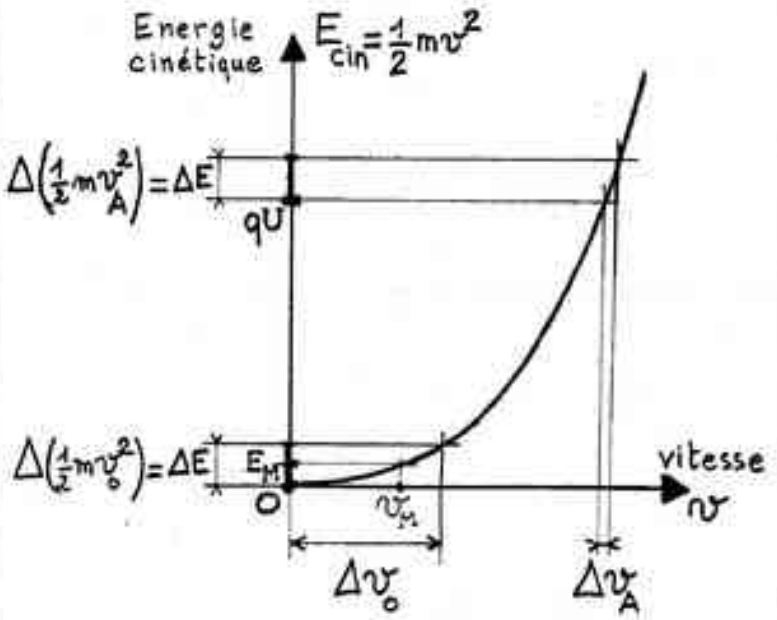
C'est-à-dire que les vitesses accélérées v_A se répartissent sur un intervalle de largeur :

$$v_A = \frac{\Delta E}{mv_A} = \frac{mv_M^2}{mv_A}$$

$$\frac{v_M}{v_A}\Delta v_0 \left(\frac{v_M}{v_A}\right)$$

Les fluctuations de la vitesse accélérée v_A sont réduite par le facteur :

$$\frac{v_M}{v_A} = \sqrt{\frac{E_M}{qU}}$$



Les transitions multiphotoniques

Cette méthode s'applique aux transitions à deux photons, dont on rappelle le principe sur la figure 5a, dans le cas d'un atome qui serait immobile : elles se produisent lorsque la différence d'énergie entre deux états de l'atome est exactement égale à la somme des énergies de deux photons $h\nu_L$ du LASER :

$$E_2 - E_1 = 2h\nu_L.$$

Si l'intensité de l'onde LASER est assez forte, l'atome peut alors transiter de l'état d'énergie E_1 à l'état E_2 en absorbant deux photons simultanément.

La suppression de l'effet Doppler utilise, comme dans l'absorption saturée, le fait que le décalage de fréquence Doppler change de signe si l'on inverse le sens de propagation de l'onde (voir figure 2). Les notions essentielles sont donc déjà acquises : et il sera facile de comprendre l'explication schématisée sur la figure 5b.

Si l'atome absorbe simultanément dans la même transition un photon de l'onde aller et un photon de l'onde retour, il absorbe une énergie totale : $h\nu_{aller} + h\nu_{retour} = h(\nu_L - v_x/\lambda) + h(\nu_L + v_x/\lambda) = 2h\nu_L$. On voit que les **deux effets Doppler de signes opposés se compensent exactement** et que la somme de deux photons a la même valeur pour tous les atomes, quelles que soient leurs vitesses v_x. La condition de résonance est obtenue en écrivant la conservation de l'énergie, et s'écrit de manière identique pour tous les atomes : $E_2 - E_1 = 2h\nu_L$.

La réalisation d'une expérience est schématisée sur la figure 6 : la probabilité des transitions à deux photons étant relativement faible, on l'augmente en concentrant la lumière du LASER au foyer d'une lentille. La lumière transmise à travers la vapeur est renvoyée en arrière et concentrée au même point grâce à un miroir concave dont le centre coïncide avec le foyer de la lentille. Sur le schéma de la figure 6, on détecte les transitions en recueillant la lumière de la fluorescence réémise spontanément par les atomes excités (la figure 5 nous rappelle que la longueur d'onde de fluorescence est différente de celle du LASER ; et ceci permet de la distinguer parfaitement avec un monochromateur) ; mais il existe d'autres possibilités de détection.

Cette méthode a déjà eu un grand nombre d'applications au laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'Ecole normale supérieure ainsi que dans plusieurs laboratoires américains ou allemands. La figure 7 donne un exemple

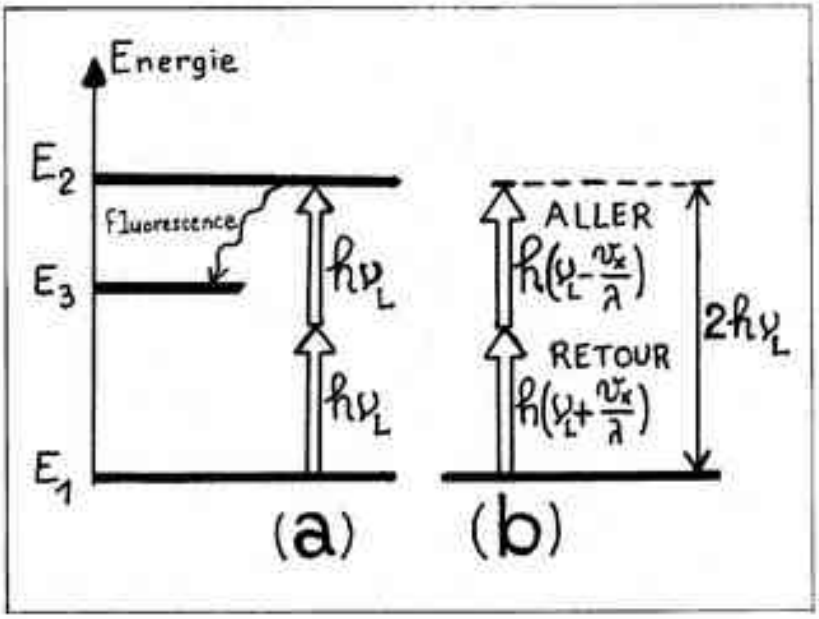
Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

d'enregistrement spectroscopique obtenu par la méthode à deux photons. On pourrait montrer des figures analogues pour chacune des trois autres méthodes supprimant l'élargissement Doppler. Cette figure illustre le gain en résolution et en précision que ces méthodes permettent d'obtenir.

Applications de la spectroscopie LASER à haute résolution

Les méthodes de spectroscopie sans élargissement Doppler ont permis la multiplication par un facteur compris entre cent et mille du pouvoir de résolution de la spectroscopie optique. Celle-ci n'est plus limitée maintenant que par la largeur naturelle des niveaux atomiques, précision ultime avec laquelle ils sont définis à cause de leurs courtes durées de vie (c'est une conséquence de la relation d'incertitude de Heisenberg).

Un grand nombre de résultats nouveaux ont été obtenus, concernant la structure interne des atomes ou des molécules, soit parce que le meilleur pouvoir de résolution a permis de sépa-



◄ Fig. 5 – Schéma énergétique d'une transition à deux photons sous l'action d'un LASER de fréquence ν_L.
(a) Cas d'un atome immobile.
(b) Cas d'un atome en mouvement soumis à deux ondes LASER se propageant en sens opposés. Le diagramme d'énergie est représenté dans le repère lié à l'atome (voir figure 2B).

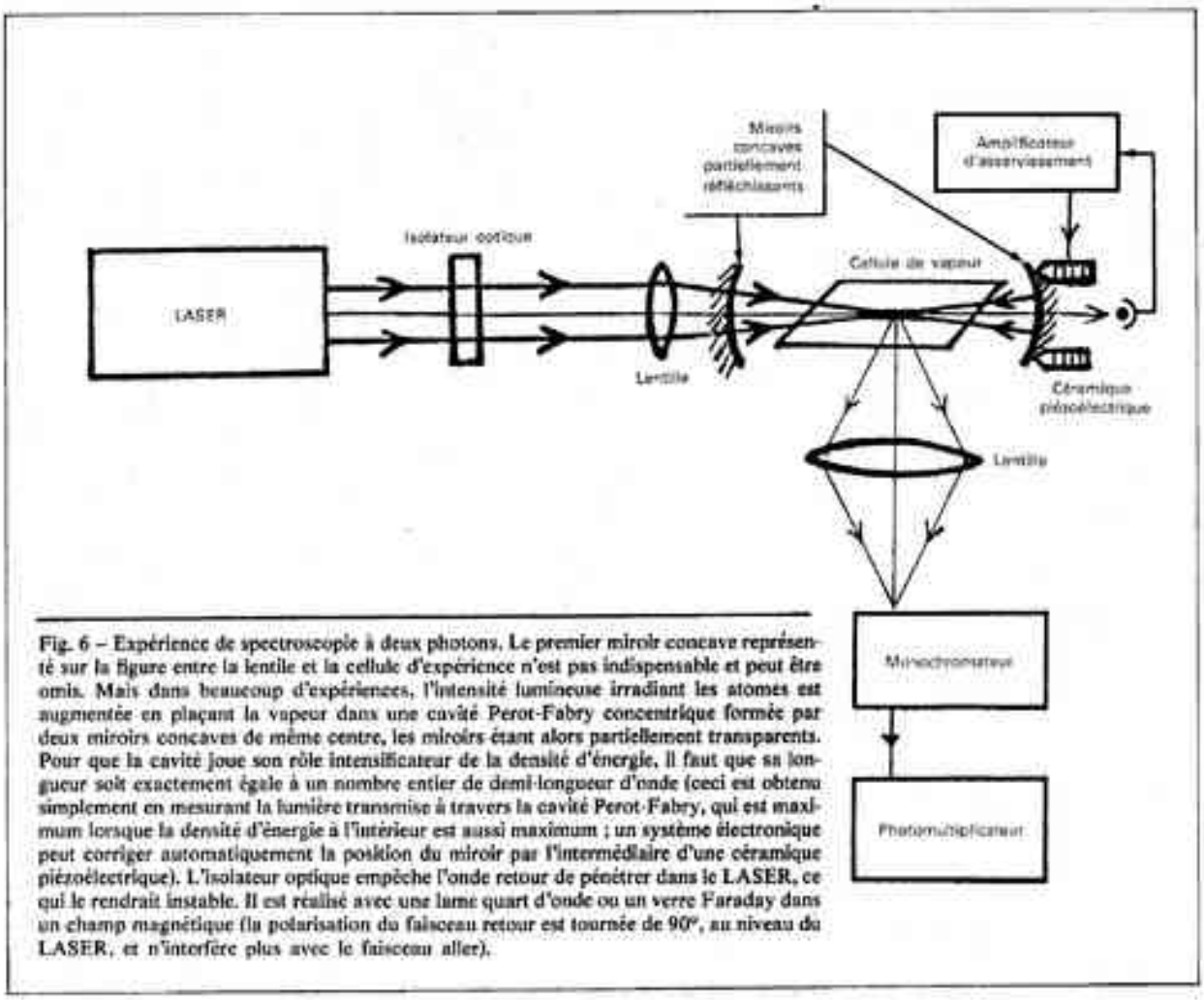


Fig. 6 – Expérience de spectroscopie à deux photons. Le premier miroir concave représenté sur la figure entre la lentille et la cellule d'expérience n'est pas indispensable et peut être omis. Mais dans beaucoup d'expériences, l'intensité lumineuse irradiant les atomes est augmentée en plaçant la vapeur dans une cavité Perot-Fabry concentrique formée par deux miroirs concaves de même centre, les miroirs étant alors partiellement transparents. Pour que la cavité joue son rôle intensificateur de la densité d'énergie, il faut que sa longueur soit exactement égale à un nombre entier de demi-longueur d'onde (ceci est obtenu simplement en mesurant la lumière transmise à travers la cavité Perot-Fabry, qui est maximum lorsque la densité d'énergie à l'intérieur est aussi maximum ; un système électronique peut corriger automatiquement la position du miroir par l'intermédiaire d'une céramique piézoélectrique). L'isolateur optique empêche l'onde retour de pénétrer dans le LASER, ce qui le rendrait instable. Il est réalisé avec une lame quart d'onde ou un verre Faraday dans un champ magnétique (la polarisation du faisceau retour est tournée de 90°, au niveau du LASER, et n'interfère plus avec le faisceau aller).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

rer des raies voisines qui étaient autrement confondues (voir figure 7), soit parce que la mesure de certains intervalles d'énergie avec une très grande précision relative (de l'ordre de 10^{-8}) permet une confrontation plus poussée avec des calculs théoriques perfectionnés.

Le perfectionnement des modèles théoriques atteint une précision de cet ordre pour les systèmes simples, à deux ou trois corps, analogues à l'atome d'hydrogène ou l'atome d'hélium. Mais dans la plupart des études de physique atomique ou moléculaire, on utilise plutôt la possibilité de séparer des raies très voisines ou d'observer de très faibles variations d'une raie isolée ; c'est par exemple : l'observation des raies « hyper-fines », qui permettent de mesurer des paramètres nucléaires ; l'observation de raies satellites qui apparaissent sous l'action de champs électromagnétiques intenses et qui permettent de mieux comprendre l'interaction entre ces ondes électromagnétiques et les atomes ; l'étude des phénomènes de collisions entre atomes, molécules ou ions, qui, indépendamment de leur intérêt théorique, ont des applications par exemple dans le domaine de la physique des plasmas ; il est probable aussi que la spectroscopie LASER trouvera des applications dans la séparation isotopique.

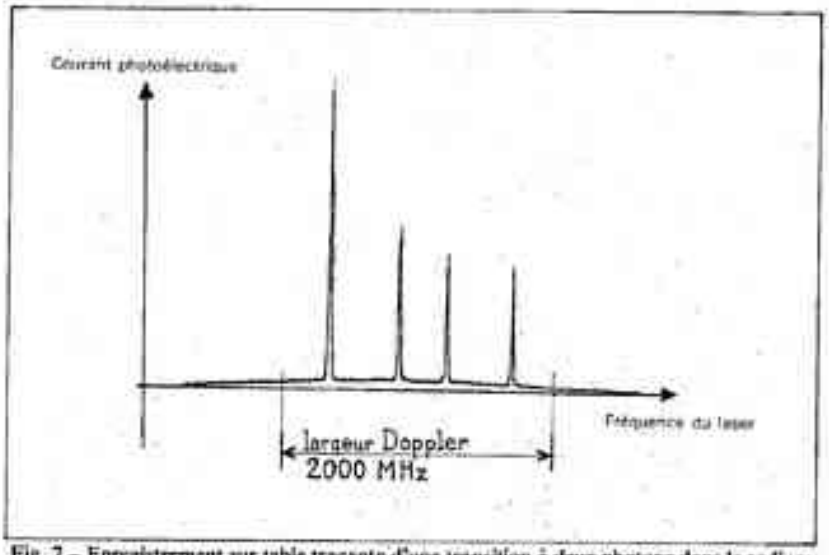


Fig. 7 – Enregistrement sur table traçante d'une transition à deux photons dans le sodium. Dans une expérience normale, avec élargissement Doppler, les quatre transitions voisines, que l'on voit ici, seraient totalement superposées et indistingables. Le piédestal arrondi sur lequel pointent ces quatre transitions représente précisément les transitions normales, avec élargissement Doppler, produites lorsque les atomes absorbent deux photons de la même onde aller ou de la même onde retour.

Applications métrologiques

On voit que les physiciens atomistes et moléculaires ont déjà tiré et tireront encore un large profit des méthodes de spectroscopie sans élargissement Doppler. Mais ce sont sans doute les métrologistes qui en ont tiré les résultats les plus spectaculaires. Lorsqu'on observe une raie atomique ou moléculaire avec un LASER, on peut utiliser le signal observé pour contrôler automatiquement la longueur d'onde du LASER et la maintenir au centre de la raie, chaque fois qu'elle a tendance à s'en écarter. Ces techniques d'asservissement permettent **d'obtenir des longueurs d'onde d'une stabilité incomparable.** Ainsi certaines longueurs d'onde du LASER hélium – néon peuvent être stabilisées sur des transitions des molécules d'iode et de méthane, observées en absorption saturée. Les comparaisons faites entre les laboratoires de métrologie de plusieurs pays montrent que ces longueurs d'onde sont reproductibles avec une précision relative meilleure que 10^{-10} ; et on peut espérer une précision de 10^{-11}. La définition actuelle du mètre étalon (d'après une longueur d'onde du krypton dans une lampe à décharge classique) n'atteint pas une telle précision. Elle est désormais périmée ; et ce sont ces LASER stabilisés qui servent déjà d'étalons de longueur dans la pratique des laboratoires, en attendant une nouvelle définition internationale.

De ces LASER stabilisés, les métrologistes ont tiré une autre conséquence importante, concernant la vitesse de la lumière. Pour caractériser théoriquement une onde électromagnétique, on utilise indifféremment sa fréquence ν ou sa longueur d'onde $\lambda = c/\nu$. Mais dans la pratique des laboratoires, on mesure les longueurs d'onde λ des ondes lumineuses en les comparant avec une longueur d'onde étalon ; tandis qu'on mesure les fréquences ν des ondes radio en les comparant avec la fréquence étalon du césium qui sert à définir l'unité de temps. Pour des raisons techniques, il est difficile de mesurer des fréquences très élevées : les techniques simples de comptage sont limitées aux fréquences relativement basses (inférieures à 1GHz = 10^9 Hz ou cycle/seconde). Au-delà il faut utiliser des techniques de multiplication de fréquence (harmoniques) et de mélange de fréquence (addition ou soustraction par battements) qui posent de redoutables problèmes lorsqu'on arrive aux fréquences des ondes lumineuses (de l'ordre de 10^5 GHz).

Les métrologistes sont parvenus néanmoins à résoudre ces problèmes et ils ont réussi à mesurer directement, par comparaison avec l'étalon de temps, la fréquence ν d'un LASER stabilisé. Ayant mesuré sa longueur d'onde λ par comparaison avec l'étalon de longueur, ils en ont déduit la vitesse de la lumière $c = \lambda\nu$; ils ont ainsi gagné d'un seul coup un facteur 100 sur la précision, et ils donnent maintenant la vitesse de la lumière à 1 m/s près, avec neuf chiffres significatifs. C'est l'imprécision du mètre étalon qui limite la précision de leur mesure. Il n'est pas impossible que dans le futur ce soit un LASER unique qui serve à déterminer l'étalon de longueur (à partir de λ) et l'étalon de temps (à partir de ν).

Les physiciens réfléchissent d'ores et déjà aux expériences nouvelles que ces précisions ultimes vont leur permettre de lancer pour étudier des phénomènes impossibles à observer auparavant malgré leur importance fondamentale (par exemple des effets de relativité générale). Mais dans la plupart des études ces précisions ultimes ne sont pas indispensables ; et le mérite essentiel de ces nouvelles méthodes de spectroscopie LASER est d'apporter de nouveaux outils, d'utilisation relativement facile, qui ouvrent considérablement le domaine d'application de la spectroscopie. Cette ouverture ira encore en s'élargissant lorsque les progrès technologiques permettront aux LASER accordables de couvrir une zone de plus en plus vaste dans l'échelle des longueurs d'onde. Mais d'ores et déjà il n'est plus possible de compter les services que la spectroscopie LASER a rendu dans des domaines très variés : physique atomique, physique des plasmas, photochimie, physique nucléaire, géophysique...

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Les gènes sauteurs

Les chromosomes contiennent quantité de séquences d'ADN aux fonctions encore mystérieuses. Parmi celles-ci les éléments génétiques mobiles ne sont pas les moins surprenants. Ils révèlent une plasticité inattendue du matériel génétique dont il sera essentiel de comprendre toutes les implications, tant dans les régulations cellulaires que dans les mécanismes évolutifs.

Jean-Claude BREGLIANO

Des acquisitions récentes et convergentes de la génétique formelle et de la génétique moléculaire conduisent à introduire des modifications importantes dans les conceptions classiques sur l'organisation et la variation du matériel génétique (génome) ; modifications dont les prolongements sont encore largement imprévisibles. Les conceptions généralement admises jusqu'à ces dernières années étaient, dans les grandes lignes, celles élaborées entre 1900 et 1935 qui aboutirent à la théorie chromosomique de l'hérédité. On peut les résumer ainsi : les chromosomes sont le support de l'information héréditaire, ils sont constitués d'un arrangement linéaire d'unités génétiques, les gènes, occupant chacun une position précise et immuable. Les variations de ces structures interviennent selon deux modalités principales.

- Les mutations, qui peuvent soit concerner un seul gène et le transformer en une de ses variantes ou allèles, soit concerner tout un segment de chromosome qui peut être perdu ou avoir changé de position. Ces événements sont considérés comme ne pouvant intervenir spontanément qu'avec une très faible probabilité.
- La recombinaison générale, qui consiste en des échanges lors de la méiose entre chomosomes homologues reçus des deux parents. Ces échanges ne modifient pas en fait la position des gènes sur la carte chromosomique. Ils permettent de créer des combinaisons variées entre allèles de différents gènes.

Cette conception présentait donc une image relativement figée du génome en mettant l'accent sur sa stabilité, son invariance. Jusqu'à la fin des années 1970, rien n'est venu modifier sensiblement cette vision des choses. Quelques phénomènes d'instabilité ont bien été découverts et quelquefois très étudiés, mais ils sont restés isolés et, comme tels, ne pouvaient être intégrés dans une vision d'ensemble. Ils étaient les exceptions qui confirmaient la règle. Les progrès de la génétique depuis 1940 ont surtout porté sur une meilleure compréhension de la structure des molécules porteuses d'information génétique (l'acide désoxyribonucléique ou ADN, constitué d'un enchaînement de nucléotides), sur le mécanisme de la synthèse des protéines à partir de l'ADN (transcription en ARN puis traduction) (1) et sur les régulations du message génétique chez les bactéries et les virus. Durant la même période, plusieurs découvertes importantes, comme celle de l'information génétique propre aux organites cytoplasmiques (ADN des chloroplastes et des mitochondries (1)), ou d'associations héréditaires entre cellules eucaryotes et microorganismes qu'elles peuvent héberger, sont venues nuancer une vision strictement chromosomique de l'hérédité. Toutefois elles n'étaient pas de nature à modifier sensiblemennt les conceptions sur les mécanismes de la variation génétique.

Depuis quelques années, un tournant a été amorcé avec la découverte des « gènes sauteurs », éléments génétiques doués de mobilité. Nous sommes cette fois en présence de données qui démontrent une plasticité du génome insoupçonnée jusqu'ici. En fait, la toute première mise en évidence de ces éléments sauteurs n'est pas récente, elle remonte aux années 1940 avec le travail remarquable réalisé par Barbara Mc Clintock sur le maïs. Ce qui est nouveau c'est la démonstration de l'existence générale de ces éléments, d'abord chez les bactéries, puis chez les eucaryotes. Ce n'est plus l'exception qui confirme la règle, c'est la règle qu'il faut revoir ou tout au moins nuancer.

Les recherches dans ce domaine se sont multipliées en l'espace de quelques années. Actuellement le champ d'étude des éléments mobiles chez les organismes supérieurs est déjà très diversifié. Plusieurs catégories très différentes ont été mises en évidence. Nous allons tenter de donner un aperçu de quelques grands types parmi les mieux étudiés.

Le système des « cassettes »

L'un des systèmes de gènes sauteurs dont la finalité biologique est la plus évidente se rencontre chez les trypanosomes africains. Les trypanosomes sont des parasites unicellulaires responsables de maladies plus ou moins graves chez les mammifères, dont la maladie du sommeil. Ces organismes possèdent un système très astucieux leur permettant de déjouer les défenses immunitaires de leur hôte.

Toute la surface externe du trypanosome est recouverte d'un type particulier de protéine appelée VSG (variant surface glycoprotein). C'est ce manteau protéique qui confère au trypanosome ses propriétés antigéniques, car c'est lui qui est reconnu par les anticorps fabriqués par le système immunitaire de l'hôte, dont le rôle est de neutraliser toute attaque par des microorganismes. Si une espèce de trypanosome n'était capable de fabriquer qu'un seul type de VSG, elle n'aurait aucune chance d'infecter durablement un hôte. Mais chacune possède un répertoire de plus de 100 VSG, suffisamment différentes pour que les anticorps fabriqués contre l'une d'entre elles soient inefficaces contre les autres. Souvent, l'infection d'un mammifère par un trypanosome peut persister plusieurs mois, pendant lesquels on observe une oscillation périodique du nombre de parasi-

□ Jean-Claude Bregliano, professeur à l'université de Clermont-Ferrand II est responsable de l'équipe de génétique du Laboratoire « d'organisation du génome et régulations cellulaires chez les eucaryotes » (LA 360), Université de Clermont-Ferrand II, Laboratoire de génétique, les Cézeaux – BP 45 – 63170 Aubière.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

tes dans le sang. Elle est due à des vagues de multiplication du trypanosome, espacées de sept à dix jours et chaque vague correspond à un type sérologique distinct, c'est-à-dire à la fabrication d'un type particulier de VSG, l'un des éléments du répertoire. Pour se défendre, l'hôte est contraint à chaque fois de fabriquer un nouvel anticorps.

Quel est le mécanisme de cette variation ? Chaque trypanosome individuel possède tout le répertoire de gènes propre à l'espèce mais ne peut en exprimer qu'un à la fois. Tous les gènes de VSG sont stockés dans certaines régions des chromosomes sous forme de gènes non transcrits, silencieux comme des cassettes dans leur boîte de rangement. Il existe d'autre part dans le génome un site d'expression (le lecteur de cassettes) et un gène présent dans ce site peut fonctionner. Chacun des gènes en réserve dans la région de stockage peut, avec une probabilité non négligeable, fabriquer une copie qui se transpose au site d'expression. C'est ainsi qu'au cours d'une infection tous les gènes du répertoire de l'espèce pourront tour à tour être mis à contribution (fig. 1). Ce système astucieux n'est pas propre aux trypanosomes, on l'a mis en évidence également dans la détermination du « sexe » chez la levure de boulangerie. Tout donne à penser qu'il s'agit d'un mécanisme assez répandu.

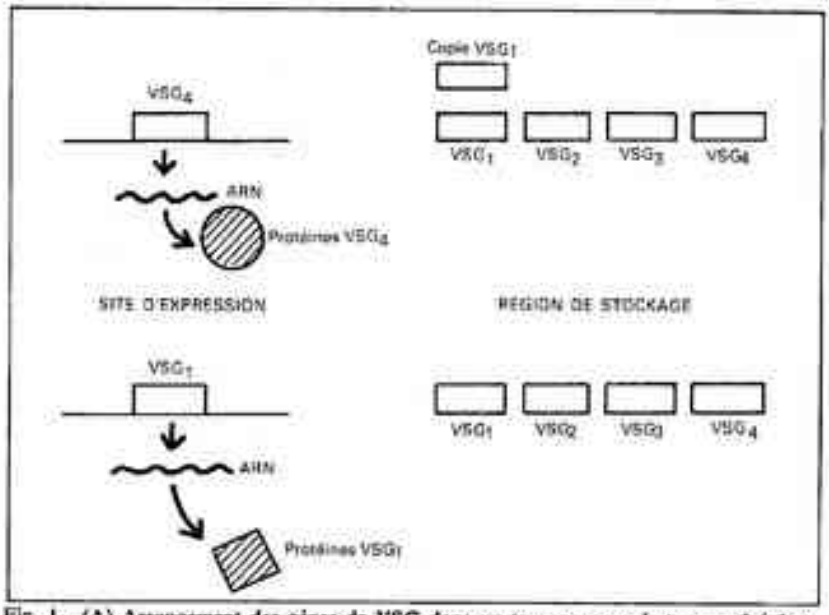


Fig. 1 – (A) Arrangement des gènes de VSG dans un trypanosome de type antigénique VSG 4 qui va passer au type VSG 1 par remplacement, au site d'expression, de la copie du gène VSG 4 par une copie de VSG 1. Le gène situé à ce site sera transcrit en ARN messager, lui-même traduit pour donner la protéine correspondante. Ce processus de biosynthèse des protéines n'a pas lieu dans la région de stockage.
(B) Arrangement des gènes de VSG, une fois le remplacement effectué.

Le système immunitaire chez les mammifères

Dans cette lutte sans merci que se livrent l'hôte et le parasite, chacun doit déployer des trésors d'ingéniosité pour déjouer les pièges de l'autre. Dans l'un et l'autre cas, c'est la capacité à faire varier les modèles génétiques qui sera la clé du succès ou tout simplement de la survie. Nous venons de voir la tactique mise en œuvre par le parasite. Du côté de l'hôte, c'est également un système d'éléments mobiles qui permet de fabriquer des anticorps spécialisés contre chaque nouvel antigène de l'agresseur. Mais cette fois on ne peut plus se contenter d'un mécanisme qui permettrait seulement un éventail de quelques centaines de protéines différentes. Les mammifères doivent pouvoir se défendre efficacement contre tout microorganisme capable de les infecter, virus, bactéries ou autres. Les défenses immunitaires, pour être vraiment efficaces, doivent être capables de fabriquer des anticorps contre tout antigène possible ; ce qui représente, d'après les estimations actuelles, un chiffre de l'ordre de 10^8. Le système des cassettes est inadapté, il est impensable que chaque individu possède un répertoire de 10^8 gènes destinés à neutraliser tous les antigènes possibles et imaginables. La solution mise en œuvre est tout autre, elle consiste à fabriquer d'innombrables variantes en combinant un petit nombre de séquences nucléotidiques de base, de l'ordre de quelques centaines probablement. Le système est très complexe et pas encore entièrement élucidé, nous tenterons simplement ici d'en schématiser le principe tel qu'il se dégage des travaux de ces dernières années.

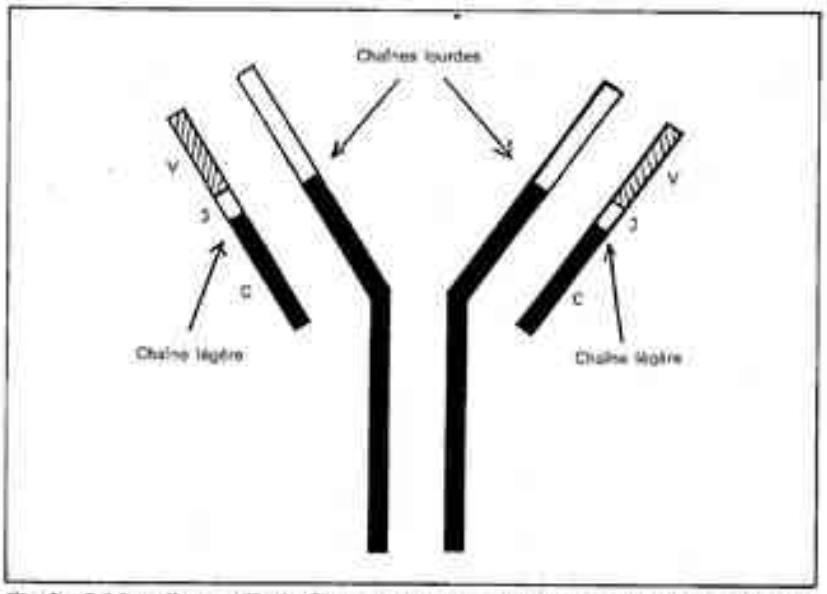


Fig. 2 – Schéma d'une molécule d'immunoglobuline, constituée de deux chaînes légères et deux chaînes lourdes identiques deux à deux. Chaque chaîne comprend une région variable (en blanc) et une région constante (en noir). La région variable des chaînes légères est elle-même constituée d'un segment V et d'un segment J. Pour les chaînes lourdes la situation est plus complexe, nous ne l'avons pas détaillée.

Les anticorps sont des protéines (les immunoglobulines) à la structure complexe, constituées de quatre chaînes d'amino-acides identiques deux à deux : les chaînes lourdes et les chaînes légères. Chaque chaîne est composée

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

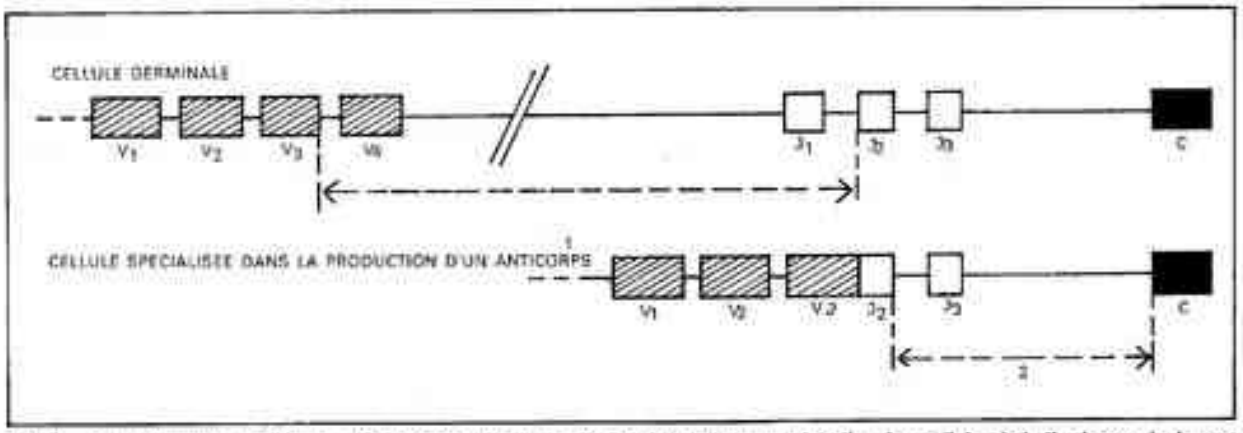


Fig. 3 – Arrangement des séquences d'ADN codant pour une chaîne légère d'immunoglobuline. Les cellules de la lignée germinale sont indifférenciées pour la production d'anticorps, elles comportent toute l'information génétique de base. Dans les lignées cellulaires productrices d'un anticorps particulier, il y a raccordement d'un segment V à un segment J par élimination de la séquence d'ADN intercalaire (séquence 1). Pour synthétiser une chaîne légère complète, il faudra encore raccorder la région variable, ici V 3 J 2, à la région constante C. Ceci n'est pas réalisé sur l'ADN mais sur l'ARN issu de la transcription, par élimination de la séquence 2. Les diverses combinaisons possibles entre segments V et J se feraient aléatoirement. Lors d'une attaque par un antigène particulier il y aurait multiplication sélective des cellules ayant réalisé la combinaison qui permet de produire l'anticorps « ad hoc ».

de régions variables et de régions constantes (fig. 2). La différence entre des anticorps dirigés contre des antigènes différents porte sur les régions variables. Le cas le plus simple est celui des chaînes légères où la partie variable est formée de deux segments V et J, codés par des séquences nucléiques du même nom. Les études moléculaires réalisées chez la souris ont montré que dans les cellules de la lignée germinale, ne fabriquant pas d'anticorps, il existe tout un ensemble de séquences V groupées sur un chromosome particulier et plusieurs segments J groupés dans une région voisine, séparée de cinq mille nucléotides environ de la précédente. Dans des cellules de souris spécialisées dans la production d'un anticorps particulier on trouve l'un des segments V qui est raccordé à un segment J, de manière à ne plus former qu'une seule séquence codante. Ce raccordement s'est fait par élimination de la séquence intercalaire qui normalement sépare les segments V et J raccordés (fig. 3).

Il s'agit là d'un mécanisme de mobilité différent de celui du trypanosome, il n'y a pas de transposition de copies des gènes intéressés mais réarrangements de séquences d'ADN par élimination de plusieurs milliers de nucléotides.

Les éléments répétitifs dispersés

Cette troisième catégorie de gènes sauteurs est très différente des deux précédentes par sa structure et par son rôle ; elle n'intervient pas dans la variabilité d'un caractère précis mais elle a des implications dans la plasticité générale du génome. De ce point de vue son impact sur notre compréhension de la variation génétique promet d'être, à long terme, très profond.

L'ADN chromosomique de tous les eucaryotes est composé de séquences uniques présentes en un seul exemplaire par lot de chromosomes et de séquences répétées un nombre de fois plus ou moins grand. Nous prendrons l'exemple de la Drosophile (la mouche du vinaigre chère aux généticiens), la mieux connue actuellement de ce point de vue. Dans cette espèce, 10 à 15% de l'ADN nucléaire est constitué de familles d'éléments mobiles représentées chacune par dix à cent copies dispersées un peu partout sur les chromosomes. Ces éléments sont loin d'être tous connus, nous mentionnerons deux catégories parmi les mieux étudiées.

• La famille FB, représentée par une trentaine d'éléments dans le génome dont la plupart ne semblent pas coder pour des protéines (fig. 4).

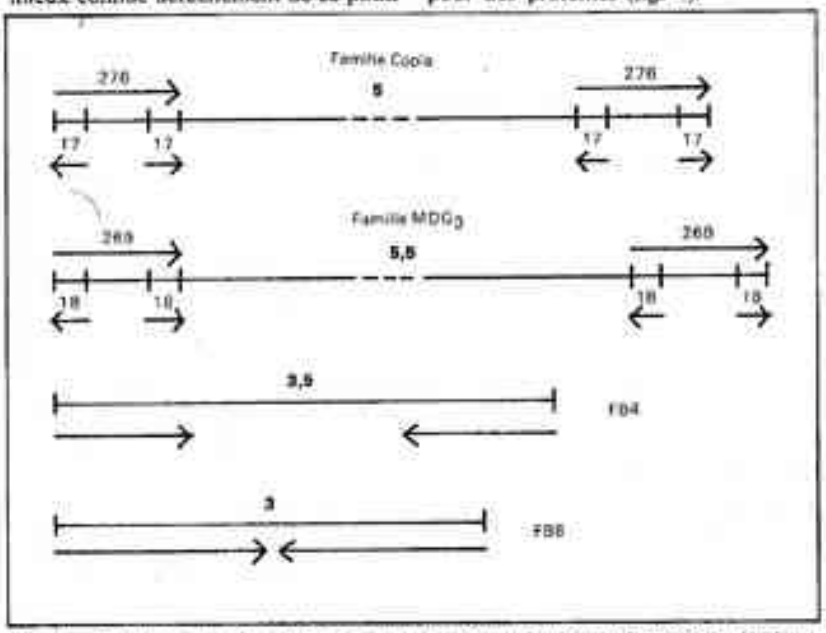


Fig. 4 – Quelques exemples d'éléments mobiles dispersés chez la Drosophile. En haut, deux éléments du type MDG. Pour les séquences situées aux extrémités, les flèches représentent l'orientation, les nombres indiquent la longueur en nucléotides. Les MDG comportent à leurs extrémités deux séquences identiques de deux cents à quatre cents nucléotides situés en même orientation. Ces répétitions sont elles-mêmes encadrées par deux courtes séquences identiques en orientation opposée (voir fig. 5). En bas, deux éléments de la famille FB, les séquences identiques qui les encadrent en orientation inverse présentent beaucoup de similitudes entre les différents éléments. La plupart des FB ne semblent pas pouvoir coder pour des protéines sauf peut être le FB4.
Le chiffre situé au milieu de chaque élément indique la longueur totale en milliers de nucléotides.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

• Les éléments du type « Copia », appelés aussi MDG (mobile dispersed genes) qui comprennent au moins une trentaine de familles représentant environ 8% de l'ADN total. Ils sont généralement transcrits en ARN, quelquefois très abondamment ; ils sont traduits en protéines *in vitro* et sans doute aussi *in vivo*. Il existe de nombreuses analogies entre ces MDG et certains virus de Vertébrés qui insèrent leur génome dans les chromosomes de leur hôte (les rétrovirus). Il est donc possible que ces éléments soient des rétrovirus devenus défectifs, c'est-à-dire ayant perdu certaines fonctions nécessaires à la production de formes virales mûres (fig. 4).

Les FB comme les MDG ont des structures typiques d'éléments transposables, tels qu'ils ont été décrits chez les bactéries (voir encadrés) (2). Leur transposition se fait donc probablement selon un mécanisme du même type c'est-à-dire qu'elle s'accompagne d'une duplication de l'élément dont une copie reste au site d'origine, tandis que l'autre effectue le « saut ». Ce mécanisme leur confère évidemment un pouvoir envahissant.

Pour compléter ce rapide aperçu, il faut aussi signaler que chez la plupart des animaux existent des éléments mobiles courts, de trois cents à quatre cents nucléotides, qui n'ont pas la structure typique d'éléments transposables et qui transposent suivant un mécanisme tout différent. Le prototype est une famille dénommée ALU qui existe chez l'homme en trois cent mille exemplaires dispersés sur tout le génome. Il semblerait que leur transposition nécessite une transcription. L'ARN ainsi produit serait lui-même utilisé pour fabriquer un ADN duplex grâce à une enzyme dénommée « transcriptase reverse ». Cet ADN pourrait à son tour aller s'insérer dans les chromosomes.

Quel rôle pour ces éléments mobiles répétitifs ?

Contrairement aux gènes « cassettes » des trypanosomes ou aux gènes des immunoglobulines, aucune fonction biochimique précise ne semble leur être dévolue dans la biologie de leur hôte. On peut même

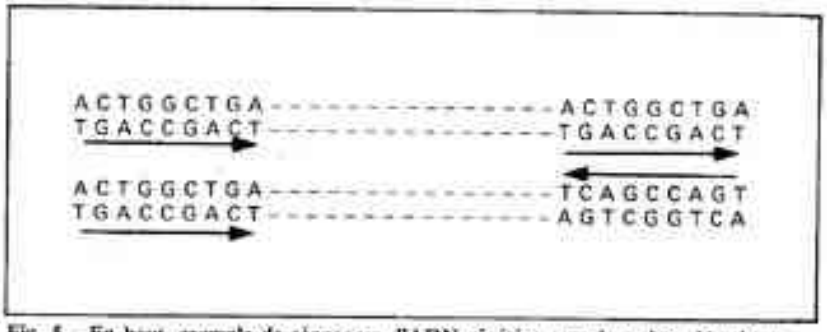


Fig. 5 – En haut, exemple de séquences d'ADN répétées en orientations identiques. En bas, les mêmes séquences placées en orientations opposées.

LES ELEMENTS TRANSPOSABLES BACTERIENS

Découverts depuis 1972, le nombre d'éléments connus n'a cessé d'augmenter depuis.

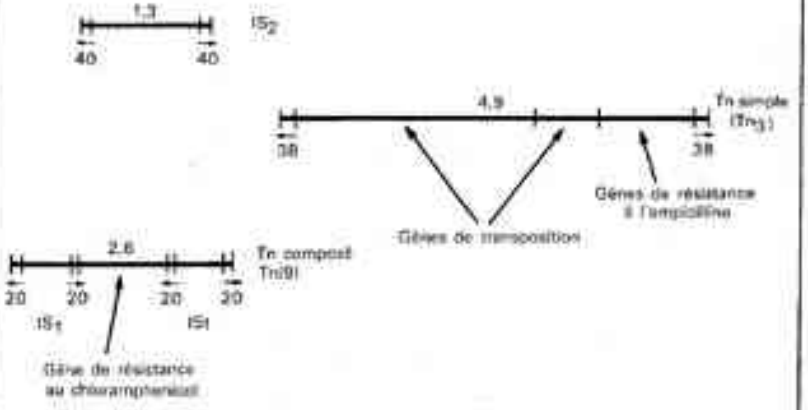
On peut distinguer trois grandes catégories.

Les séquences d'insertion ou IS qui sont de petits éléments de sept cents à mille sept cents nucléotides de long. Leurs extrémités sont constituées de 2 séquences identiques placées en orientation inverse dont la longueur varie de huit à quarante nucléotides selon les cas et qui sont indispensables à la mobilité. Les IS codent vraisemblablement pour deux protéines nécessaires à leur transposition.

Les transposons ou Tn dont la longueur varie de deux mille à vingt-cinq mille nucléotides. En plus des fonctions de transposition, ils possèdent un ou plusieurs gènes de résistance à des antibiotiques ou à divers produits toxiques. On peut distinguer deux sous-catégories : les transposons simples, encadrés comme les IS, par deux séquences identiques en orientation inverse et les transposons composés dont les extrémités sont constituées de deux IS identiques. Ces Tn composés ont probablement pris naissance à partir de gènes « ordinaires » qui se sont fortuitement trouvés flanqués de deux IS analogues. La souplesse adaptative permise par la mobilité des Tn est en partie responsable de la rapidité avec laquelle les souches microbiennes sont devenues résistantes aux antibiotiques. La transposition leur confère un pouvoir envahissant car elle s'accompagne d'une duplication, ceci est vrai aussi pour les IS.

La troisième catégorie est composée d'éléments d'environ quarante mille nucléotides de longueur qui sont à la fois des virus de bactéries (bactériophages) et des éléments transposables. Leur génome s'intègre dans le chromosome bactérien et se multiplie par transposition replicative, selon un mécanisme identique à celui utilisé par les IS et les Tn.

Schéma général de la structure des IS et Tn



Les flèches indiquent l'orientation des séquences identiques qui encadrent les éléments, avec indication de leur longueur en nombre de nucléotides. Le nombre situé au milieu de chaque élément indique la longueur totale en milliers de nucléotides.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

LES METHODES DE MISE EN EVIDENCE DES GENES SAUTEURS

Deux types de méthodologie ont été utilisés avec de nombreuses variantes pour chacun d'eux. Ils correspondent aux deux grandes méthodes d'approche du matériel génétique : la génétique formelle et la biologie moléculaire. De plus en plus, chaque fois que sur un cas précis cela est possible, les deux méthodes sont utilisées de façon complémentaire. Les deux exemples ci-dessous, choisis parmi les plus simples, illustrent ces deux types de technique tels qu'on peut les appliquer chez la mouche du vinaigre.

Depuis un demi-siècle, on sait cartographier des gènes sur les chromosomes ; la méthodologie de base consiste à mesurer la fréquence de recombinaison génétique entre deux gènes, considérée comme proportionnelle à la distance qui les sépare. Chez la Drosophile on peut affiner considérablement, grâce à l'existence des chromosomes géants (a). Certains généticiens ont pu observer que des gènes cartographiés à des emplacements précis étaient subitement devenus sauteurs dans certaines souches. On pouvait les repérer successivement à des emplacements très variés sur divers chromosomes. Le plus spectaculaire de ces éléments sauteurs est dénommé TE (transposing element), il est constitué de plusieurs gènes contigus. Une étude moléculaire en cours semble montrer que TE est encadré par deux FB identiques ; il s'agirait donc d'un cas typique où un groupe de gènes est devenu mobile après avoir été encadré par deux éléments transposables (voir texte).

Le deuxième type de méthode fait appel aux techniques de génie génétique. Actuellement, on sait cloner dans des bactéries des segments d'ADN issus de n'importe quel organisme. On peut ainsi isoler et multiplier un segment d'ADN de Drosophile, le rendre radioactif et l'utiliser comme sonde pour l'hybrider *in situ* sur des chromosomes géants (a). Cet ADN ira se fixer sur les régions du chromosome de séquence homologue ; on peut connaître ainsi le nombre d'exemplaires et la (ou les) position(s) de ce segment sur les divers chromosomes. Si on trouve plusieurs emplacements, variables d'une souche à une autre, il y aura de fortes présomptions que ce fragment contienne une séquence mobile. Il restera à faire une analyse plus fine pour le confirmer. C'est par ce type de méthode que les MDG et les FB ont été découverts.

imaginer qu'il s'agit d'ADN parasite, dont la présence est indifférente et dont le maintien est dû uniquement à leur pouvoir envahissant ; d'où l'épithète d'ADN « égoïste » que leur donnent certains généticiens. Cependant quelques faits expérimentaux récents sembleraient indiquer que, pour les MDG tout au moins, cette vision des choses est un peu courte. Certains travaux semblent montrer notamment que le nombre et la position des divers exemplaires pour une même famille de MDG ne sont pas neutres ; ils sont en corrélation avec la valeur adaptative des lignées de Drosophile étudiées (forte ou faible viabilité).

Il faut aussi noter que certains MDG ne sont abondamment transcrits en ARN qu'à certains stades du développement. Ce qui peut suggérer que cette expression n'est ni fortuite ni indifférente pour l'hôte.

Enfin, il faut tout de même constater que la seule présence physique de ces éléments dispersés dans le génome engendre certains mécanismes de variation génétique.

– Ils produisent des réarrangements chromosomiques, liés au mécanisme de transposition (inversions, délétions, translocations).

– Lorsque deux éléments identiques se trouvent encadrer un gène à comportement « orthodoxe », l'ensemble peut devenir sauteur. On peut les comparer à ces danseurs qui, dans les fêtes villageoises, entraînent tout le monde dans la danse, bras dessus, bras dessous.

– Leur insertion dans un gène ou dans son voisinage immédiat peut entraîner soit l'inactivation soit, ce qui est plus intéressant, une modification des conditions d'expression du gène. On a eu ainsi la surprise de constater que beaucoup de mutants spontanés de la Drosophile ne sont pas dus à des mutations au sens classique du terme mais à des insertions d'éléments mobiles.

Les éléments mobiles dispersés sautent-il souvent ?

La question de la fréquence de transposition est importante car celle-ci détermine la part relative des gènes sauteurs dans la variation génétique globale. Peu d'informations sont disponibles sur les FB et les MDG. Sur ces derniers il y a des données qui paraissent de prime abord contradictoires, tantôt ils semblent très stables, tantôt ils semblent sauter allégrement. Ces contradictions signifient en fait que la transposition n'est pas permanente et qu'elle est soumise à un contrôle génétique.

L'existence d'un tel contrôle est particulièrement flagrante pour d'autres éléments dispersés, ceux impliqués dans les systèmes dits de dysgénésie hybride. Le premier de ces systèmes, dénommé I-R, a été découvert à Clermont-Ferrand en 1970 à partir d'un phénomène d'interaction entre souches. Toutes les souches de Drosophile se répartissent en deux catégories I et R. Les souches I possèdent une famille d'éléments mobiles qui restent stables dans leur souche d'origine, mais qui transposent à très haute fréquence à la suite d'un croisement avec une souche R. Ils provoquent alors des taux de mutations et de réarrangements chromosomiques extrêmement élevés. Un deuxième système très analogue (P-M) a été découvert en 1975 aux Etats-Unis.

L'étude de ces systèmes d'interaction est généralement considérée comme très prometteuse, d'une part parce qu'ils permettent de coupler une étude génétique et une analyse moléculaire, ce qui n'est pas le cas des MDG ni des FB ; d'autre part parce qu'on peut étudier le contrôle de la transposition. Enfin la répartition géographique de diverses catégories de souches, qui n'est pas du tout aléatoire, permet d'espérer qu'il sera possible de comprendre le rôle évolutif des éléments transposables I et P.

L'existence d'un mécanisme de contrôle de la transposition est certainement générale pour tous les éléments mobiles. On en arrive donc à l'idée que tout génome a la possibilité soit d'être

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

stable, soit d'être le siège d'une variation considérable par l'intermédiaire des gènes sauteurs. Pour aller plus loin, il faudra maintenant étudier le système de contrôle et comprendre quelles sont les conditions qui assurent la stabilité génétique et quelles sont celles qui « excitent » les éléments mobiles. Nous aurons alors sans doute des ouvertures nouvelles sur les mécanismes d'adaptation et de spéciation.

Jusqu'où nous entraîneront les gènes sauteurs ?

La diversité et la complexité des résultats obtenus ces dernières années donnent à penser que nous ne sommes encore qu'au début d'une longue histoire ; il est beaucoup trop tôt pour mesurer toutes les conséquences qu'auront les éléments mobiles en biologie. Il paraît cependant déjà clair que dans tous les domaines de la génétique qui jusqu'ici étaient fondés presque exclusivement sur les conceptions classiques de l'hérédité, nous serons amenés à l'élaboration d'une théorie plus complète, qui permettra du même coup de comprendre un certain nombre de faits expérimentaux jamais bien expliqués. Ceux notamment où se manifeste une instabilité génétique peu compatible avec les conceptions actuelles.

Pour bien prendre toute la mesure de la réflexion qui s'impose, il faut savoir que les séquences mobiles ne sont pas les seules en cause. Les problèmes qu'elle posent s'insèrent dans le cadre plus vaste posé par le contenu en ADN des génomes d'eucaryotes. En effet, on ignore actuellement la fonction biologique réelle de la grande majorité de cet ADN.

Indépendamment de l'intérêt fondamental que représentera cet enrichissement de nos connaissances sur le matériel génétique, il faut s'attendre à des retombées importantes vers les biotechnologies. D'ores et déjà, l'élément P du système P-M est utilisé pour « greffer » des gènes chez la Drosophile. D'autres éléments transposables suivront et on disposera ainsi d'outils efficaces pour développer le génie génétique chez les eucaryotes. On peut aussi imaginer qu'à moyen terme ce potentiel de variabilité naturelle ignoré jusqu'ici, pourra être maîtrisé et utilisé en amélioration des plantes pour créer de nouvelles variétés. Dans le domaine des éléments génétiques mobiles tout est encore à découvrir, c'est le type même de thème où les recherches fondamentales d'aujourd'hui feront les biotechnologies de demain. Encore faudra-t-il résister à la tentation de brûler les étapes.

NOTES

(a) Voir *Courrier du CNRS* juillet 1981 n°41.
(b) La rapidité et la diversité des découvertes n'a pas permis de définir une terminologie précise pour les divers types d'éléments génétiques sauteurs. Il est sans doute préférable d'utiliser les termes de séquences mobiles ou éléments mobiles dans le sens le plus large, incluant toutes les catégories, et de réserver le terme d'éléments transposables à ceux dont la structure générale est analogue aux IS et Tn bactériens. L'identité de structure implique probablement une analogie dans le mécanisme de transposition.

BIBLIOGRAPHIE

(1) *Cold Spring Harbor Symposia of Quantitative Biology*. Vol. XLV 1980.
(2) *Annual Review of Genetics*. Palo Alto, Californie ; Vol. 15, 1981.
(3) Cornelis G. Les Transposons et Séquences d'insertion. *Bulletin de l'Institut Pasteur* ; Vol. 80, 3-59, 1982.
(4) *Mobile Genetic Elements*. 1983. Editeur James Shapiro. Academic Press. Londres-New York. San Francisco.

BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE PROPOSEE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose à titre expérimental de fournir aux lecteurs intéressés un des aspects traité par l'article : l'élément IS. La bibliographie comportera environ 90 références signalées dans la base PASCAL à partir de 1977.
La stratégie de recherche est ELEMENT IS et est disponible au CDST au prix de 130 F H.T. (154,18 F TTC) voir coupon réponse p. 30.

Le courrier des lecteurs

A la suite des articles de Monsieur Blondel « Comment les oiseaux parviennent-ils à coloniser les îles et à y survivre » publié dans le n° 45, mars 1982 et de Monsieur Coiffet « La robotique : vers une nouvelle révolution industrielle » publié dans le n° 47, septembre 1982, nous avons reçu la lettre suivante :

Le colloque de la recherche et de la technologie, la loi de programmation ont montré et montrent que le pays demande à la recherche de participer à une mutation économique et sociale. Malheureusement la perception des enjeux qui se jouent à travers la recherche du CNRS est difficile et souvent très mauvaise.

Deux articles parus dans des numéros du *Courrier du CNRS* me semblent avoir des implications qui ne peuvent rester sous-entendues. Ainsi l'article de Monsieur Blondel apparaît au profane comme un exercice académique de sociologie animale alors qu'en fait il conteste que la division de l'espace en zones « naturelles » et zones « à tout faire » soit une solution d'avenir. Cet article a donc, comme toute la recherche en écologie, un prolongement politique qui n'y apparaît pas explicitement, ce qui se conçoit car on ne peut tout dire à la fois, mais qui aurait pu faire l'objet d'un article d'accompagnement, d'un encadré, d'une ouverture en conclusion... Pourtant l'auteur et la communauté écologique, au sens scientifique, ont des choses à dire à ce sujet et en sont conscients.

De même l'article sur la robotique de Monsieur Coiffet posait nécessairement la question des conséquences de la diffusion de ce genre de machine et de l'avenir économique et social des hommes qu'elles doivent remplacer. Répondre à ces problèmes en disant en une phrase que les postes d'ouvriers disparaîtront à court terme me paraît trop léger, à la limite irresponsable ! Il est compréhensible qu'un seul article ne puisse aborder la question mais comment un article technique d'un tel impact peut-il être bien reçu par les partenaires sociaux s'il n'est accompagné d'un complément où le *Courrier du CNRS* témoigne que la communauté scientifique comporte aussi des spécialistes du monde du travail, des sociologues, qu'elle s'intéresse aux robots mais aussi aux hommes.

Il me semble essentiel qu'une revue scientifique destinée à un large public, plus large que le personnel du CNRS d'ailleurs, montre en quoi la recherche, sciences humaines incluses, peut avoir un impact positif sur la société. Ne pas le faire c'est faire le jeu des mouvements anti-sciences et obscurantistes qui face aux défis de l'heure ne peuvent proposer qu'une politique réactionnaire.

Bien sûr, pour être honnête, une opération d'ouverture aux préoccupations socio-politiques ne doit pas donner la parole à un seul homme car la caution scientifique doit alors être relativisée. Des articles complémentaires, voire contradictoires, un courrier des lecteurs, pourraient donner cette ouverture indispensable au débat démocratique sur les retombées de nos connaissances, de nos ignorances et de nos préjugés.

Sortir du refuge de la technicité est un effort difficile, mais ne pas le faire c'est rester enfermé dans notre petit monde.

Henri Condé
chargé de recherche au CNRS.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

La vie dans les planètes telluriques ?

Y a-t-il des organismes vivants sur Mars ? La NASA a consacré une mission pour tenter de répondre à cette interrogation. L'auteur, expert auprès de la NASA, nous présente les différentes étapes qui ont finalement déterminé que Mars offrait la surface la plus stérile du système solaire.

Jacques BLAMONT

Les trois planètes telluriques sont les planètes Vénus, Terre et Mars. Les propriétés respectives de l'atmosphère de chacune d'entre elles où un constituant, H_2O, peut exister aussi sous ses phases liquides et solides, sont présentées dans les tableaux 1, 2 et 3.

La différence essentielle entre l'atmosphère de la Terre et celle de ses sœurs, réside dans la quantité tout à fait anormale d'oxygène dans l'atmosphère de la Terre. Celle-ci est un mélange combustible qui contient des gaz comme l'azote ou des constituants mineurs riches en hydrogène, en soufre, en phosphore dont les réactions avec l'oxygène sont rapides. Elle n'est pas en équilibre et pourtant se maintient dans un état stationnaire, tout à fait différent de celui que l'on trouve sur les autres planètes, depuis des centaines de millions d'années.

Deux découvertes récentes ont renouvelé nos idées sur l'origine de la vie, celle de molécules organiques dans l'espace interstellaire et celle d'une quantité relativement importante de matière organique dans les météorites appelées chondrites carbonés. On peut ainsi imaginer qu'au moment où la Terre se forma, il y a 4,6 milliards d'années, un des derniers événements de cette formation fut la précipitation de météorites de dimensions suffisantes (de l'ordre de 1 à 100 cm de diamètre) pour supporter l'entrée dans l'atmosphère. Cette atmosphère, principalement constituée de gaz carbonique, était peut-être cependant beaucoup plus réductrice qu'aujourd'hui grâce à la présence d'oxyde de carbone et d'hydrogène. Les corps peuvent s'être combinés avec les monomères contenues dans les météorites pour former des macromolécules sous l'action d'un rayonnement solaire dont la partie ultraviolette pénétrait alors (en l'absence d'oxygène) jusqu'au sol.

On trouve les premiers indices d'une activité chimique comparable à celle des organismes procaryotes dans les plus anciennes roches sédimentaires comme celles d'Isua au Groenland, âgées de quatre milliards d'années et où l'on observe du carbone métamorphisé en graphite associé à des couches superposées de minéraux alternativement riches et pauvres en fer. La présence d'oxydes de fer suggère la production d'oxygène par la photosynthèse de microorganismes et cette idée est confortée par le degré élevé de fractionnement des isotopes stables du carbone C^{12} et C^{13} dans ces formations. La vie aurait ainsi commencé quelques centaines de millions d'années seulement après la formation de la Terre. C'est la vie qui a créé l'atmosphère de la Terre telle que nous la connaissons et qui la maintient dans un état de stabilité.

On trouve des bactéries fossilisées dans les terrains vieux de 3,2 milliards d'années de Fig Tree au Swaziland, puis à travers tout le Précambien moyen et supérieur, accompagnées alors de protoorganismes en forme de

PROPRIETES ORBITALES DES PLANETES TELLURIQUES

	VENUS	TERRE	MARS
Distance moyenne au soleil (UA)	0,72	1	1,52
Excentricité de l'orbite	0,0007	0,017	0,093
Variation de cette excentricité		0 à 0,06	0 à 0,14
Inclinaison de l'équateur (°)	< 3	23,5	25,2
Variation de cette inclinaison		22,1 à 24,5	14,9 à 35,5
Longueur de l'année (jours)	225	365	687
Rayons (km)	6049	6371	3390
Période de rotation (jours)	- 243	1,00	1,03

COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ATMOSPHERE DES PLANETES TELLURIQUES (pourcentage)

	VENUS	TERRE	MARS
CO_2	95	0,03	95
$N_2 + A$	5	78	3
O_2	$< 10^{-4}$	21	< 1
H_2O	10^{-4}	1	10^{-4}

PROPRIETES THERMODYNAMIQUES DE L'ATMOSPHERE DES PLANETES TELLURIQUES

	VENUS	TERRE	MARS
Distance moyenne au soleil (UA)	0,72	1	1,52
Flux disponible solaire (10^6 ergs cm^{-1} s^{-1})	2,6	1,4	0,6
Albedo	0,71	0,33	0,17
Température effective (°K)	244	253	216
Température réelle (°K)	750	288	218
Pression au sol (bars)	90	1	0,006

□ Jacques Blamont, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, dirige le Service d'aéronomie du CNRS – 91370 Verrières-le-Buisson.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

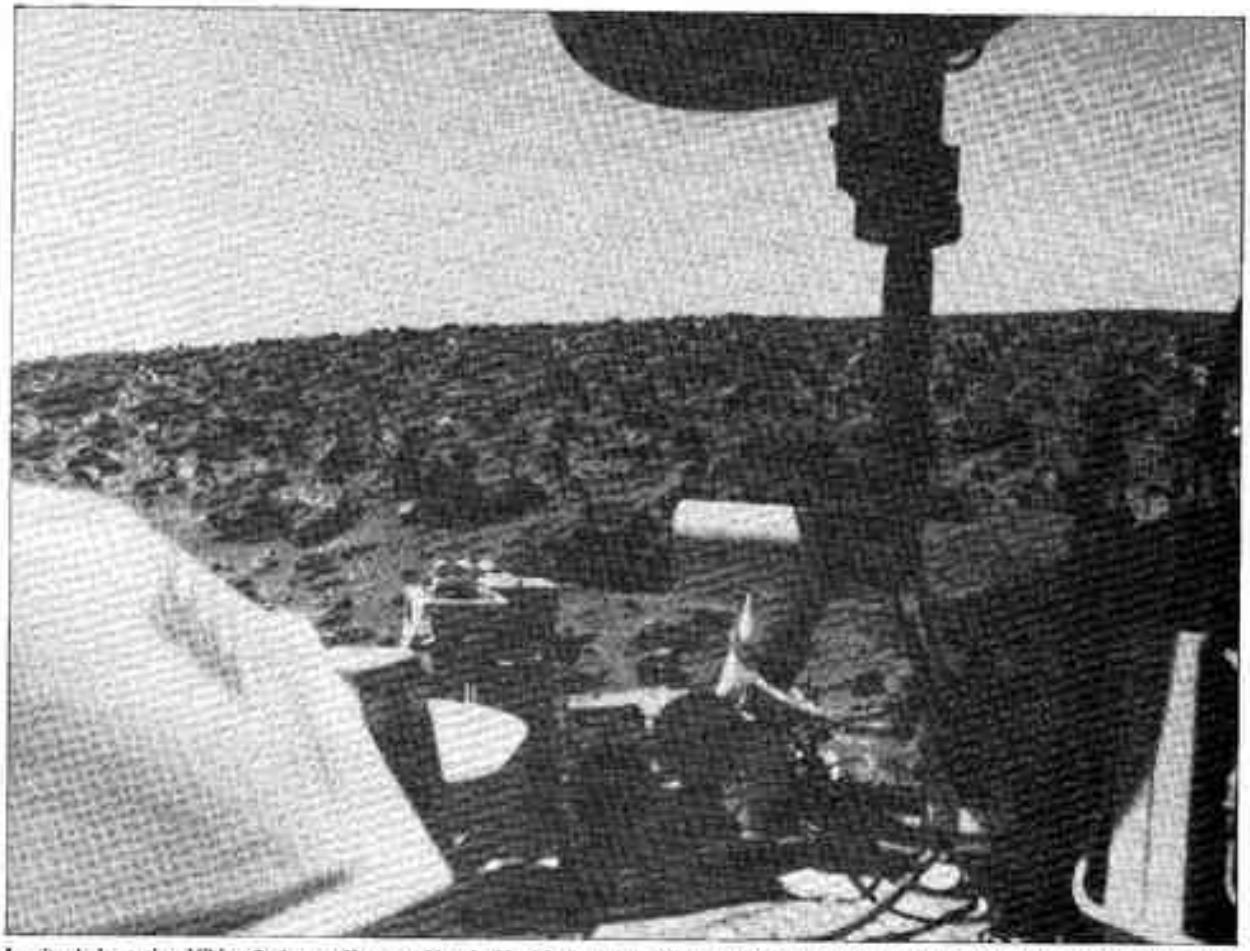
sphérules d'un diamètre de vingt à mille microns. Les premiers eucaryotes semblent être apparus vers la fin du Lipalien, c'est-à-dire il y a environ 650 millions d'années. Comme les molécules organiques ne peuvent exister que dans une gamme étroite de températures, les conditions climatiques sur la Terre ne peuvent avoir varié que dans une marge étroite depuis 3,5 milliards d'années. Même si, à l'origine, l'atmosphère était réductrice (ce qui n'est pas prouvé), le dégazage de la croûte a créé une grande quantité de gaz carbonique et d'eau, et le gaz carbonique a dû se déposer sous forme de carbonates à cause de la présence d'eau liquide. Quant à la présence d'oxygène moléculaire, c'est un résultat de l'action des êtres vivants, c'est-à-dire de la photosynthèse qui a dû se développer au Précambrien inférieur. Comme au Cambrien apparaissent soudain des organismes à coquille qui exigent, comme une étude récente des bassins anaérobies l'a montré, une concentration en oxygène dissous d'au moins 1 ml/litre à comparer avec 4 à 9 ml/litre en équilibre avec la présente atmosphère, l'atmosphère devait déjà contenir au moins 0,1 fois la quantité d'aujourd'hui c'est-à-dire à peu près ce qu'il faut pour établir une couche d'ozone de 0,2 atm/cm qui assure une protection satisfaisante des êtres vivants contre le rayonnement ultraviolet. Cette protection est donc vraisemblablement antérieure au Silurien et ce n'est peut-être pas à sa formation qu'on doit attribuer le développement soudain des eucaryotes à partir d'il y a cinq cent millions d'années, c'est-à-dire pendant le Silurien.

L'absence d'oxygène et donc d'ozone, sur Vénus et Mars est une indication très sérieuse de l'absence de vie qui, sur ces planètes, semble bien aujourd'hui, en 1983, démontrée.

Nous passons rapidement sur le cas de Vénus dont la température au sol est de l'ordre de 475°C, ce qui exclut l'existence de chaînes moléculaires complexes. Si même on voulait croire qu'à l'altitude de 55 km, où la pression vaut 0,5 bar et la température 20°C, pouvaient flotter de telles molécules, la composition des nuages qui contiennent 85 % d'acide sulfurique rendrait impossible le développement de la chimie fine qui caractérise la vie. Et c'est pourquoi nous ne discuterons que le cas de Mars.

De Chryse à Utopie : les résultats de la mission Viking

La NASA a consacré à l'étude de l'existence de la vie sur Mars une mission, Viking, qui a coûté un milliard de dollars. Elle comprenait deux lancements identiques d'un ensemble constitué d'un satellite artificiel de Mars et d'une sonde qui se posait sur la planète en douceur. La première s'est posée le 20 juillet 1976 dans la région dite Chryse dans l'hémisphère nord, la deuxième un mois plus tard dans la plaine d'Utopie également dans l'hémisphère nord, mais à 176° de longitude de la première. La sonde de 1,5 m de diamètre et 0,5 m de



Le site de la station Viking 2. A première vue, Utopia Planitia, le site de Viking 2, ressemble à Chryse Planitia par son sol jonché de blocs rocheux. Cependant, ces blocs, dont les plus proches de la station mesurent une vingtaine de centimètres, ont des formes plus arrondies, et beaucoup d'entre eux ont un aspect alvéolaire. De plus, on note la présence de blocs de teintes différentes, et d'apparence plus massive, de même que celle de petits galets épars. L'antenne à grand gain visible à la partie supérieure de l'image est pointée vers la Terre ; elle assure les liaisons directes avec le réseau d'écoute (Deep Space Network) de la NASA (NASA/NSSDC).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

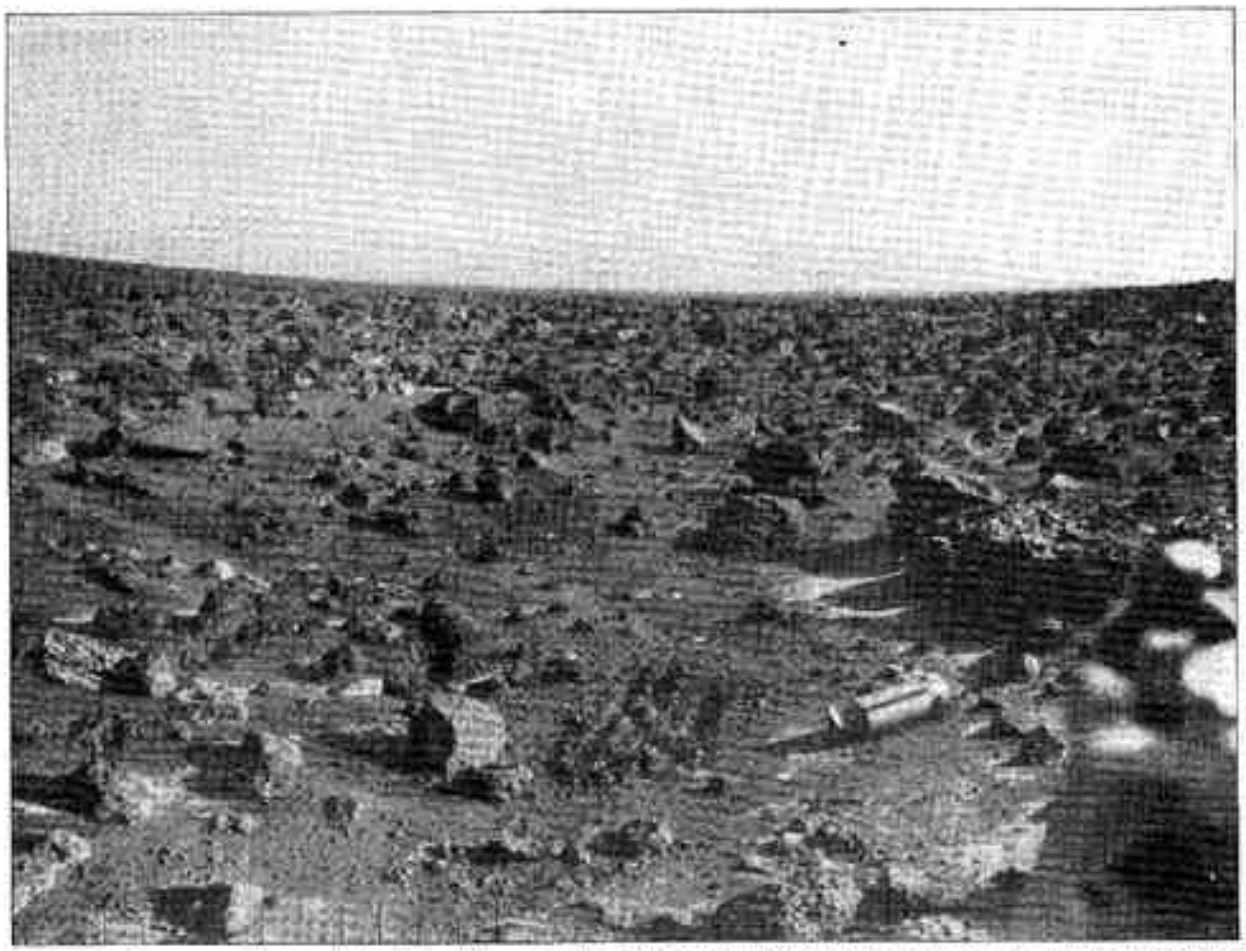
haut pesait 890 kg ; elle contenait l'équivalent de deux minicentrales électriques, deux centres de calcul, un studio de télévision, dont les deux caméras étaient situées à 1,6 m au-dessus du niveau du sol, une station météorologique, deux laboratoires d'analyse chimique (organique et inorganique), trois incubateurs séparés et un bras mobile de trois mètres de longueur muni d'une pelle à son extrémité qui permettait de gratter le sol, d'en extraire des morceaux et de les transporter dans le laboratoire et les incubateurs. L'ensemble avait été stérilisé à une température supérieure à 100°C.

L'analyse inorganique du sol faite par la méthode de fluorescence X montra que la composition correspond à celle des basaltes terrestres ou lunaires, avec certaines différences. Le point essentiel est que la présence d'H_2O occlus (1 %) la grande quantité de fer (13 % en poids), la quantité anormalement élevée de soufre (3 %) indiquent qu'il ne s'agit pas de lave basaltique originelle, mais d'une roche profondément altérée par son contact avec l'atmosphère : ainsi la roche martienne ressemble beaucoup plus à la roche terrestre qu'à la roche lunaire.

Pour l'analyse organique du sol, l'échantillon était placé dans un four, puis chauffé par étapes d'une à huit secondes à 50, 200, 350 et 500°C. Les gaz qui s'en échappaient pénétraient dans un chromatographe en phase gazeuse suivi d'un spectrographe de masse. Deux échantillons furent analysés à chacun des deux sites. Aucun composé organique, sinon des contaminants d'origine certainement terrestre, ne fut détecté au-dessus de la limite de sensibilité de l'instrument qui était de 10^{-9} : il y a moins de composés organiques sur Mars que sur la Lune et moins que l'apport des chondrites carbonés ne doit en fournir.

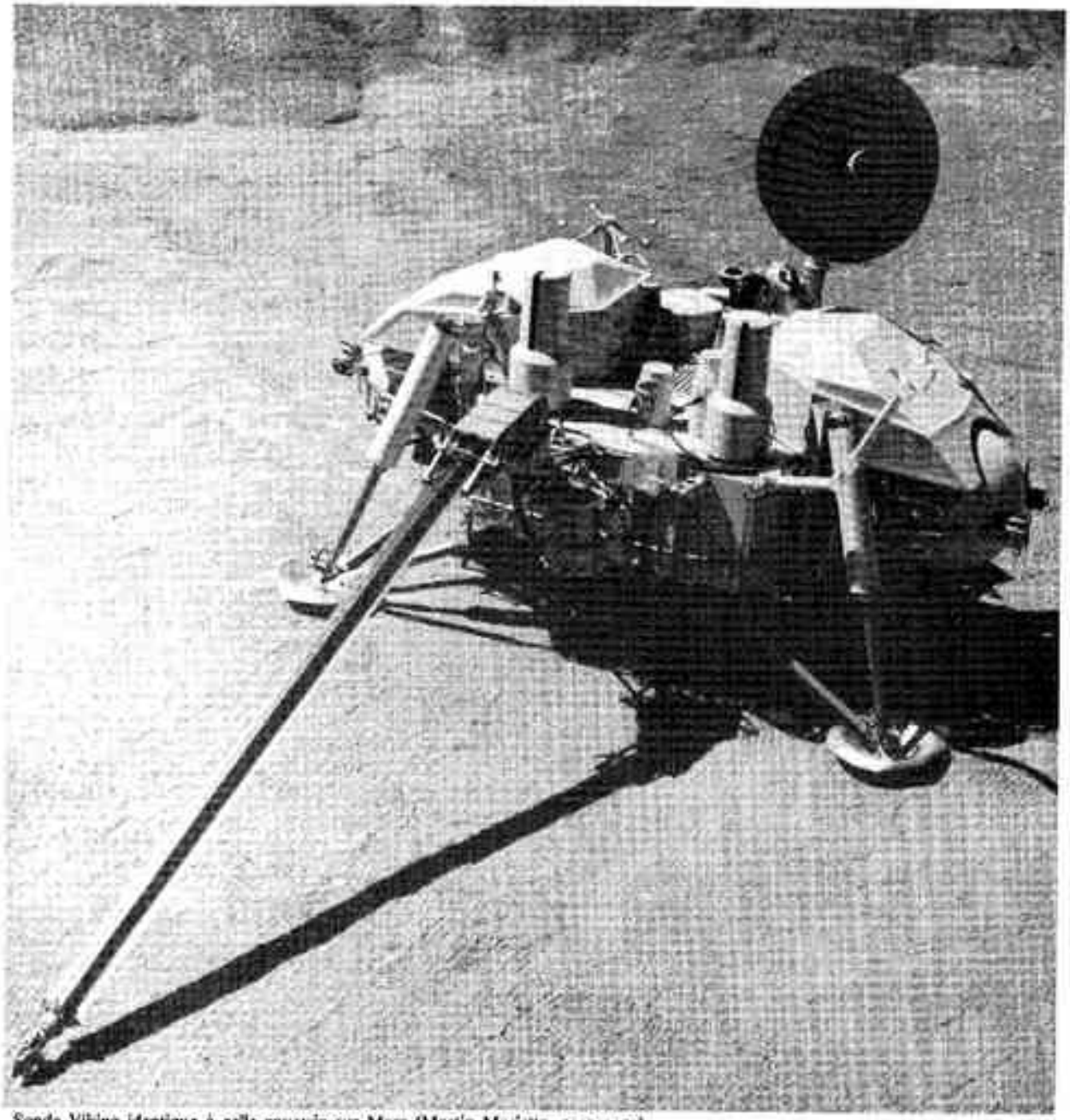
La non-détection des composés organiques n'exclut pas l'existence d'une population microbienne, car le seuil de détectabilité correspond à peu près à 10^6 bactéries terrestres. Mais sur Terre, le matériau organique recueilli dans le sol représente les produits passés et présents du métabolisme et non le contenu organique des êtres vivants eux-mêmes, qui est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} du total. Donc s'il existait des microbes dans le sol martien, il faudrait postuler un mécanisme inconnu sur Terre qui éliminerait leurs détritus sans les éliminer eux-mêmes. Cette expérience n'était pas conçue pour détecter du matériau vivant, mais son résultat laisse très peu d'espoir à ceux qui espéraient en trouver.

Trois expériences distinctes étaient dévolues à la recherche de la vie, avec l'hypothèse que la biologie martienne ressemblerait à la biologie terrestre en ce qu'elle serait fondée sur les chaînes carbonées et qu'elle comprendrait des bactéries en quantité appréciable. Les trois expériences étaient essentiellement des incubateurs portés à des températures de 8 à 26°C destinés à nourrir toute forme de vie présente dans le sol, même à l'état dormant et à détecter les produits de son métabolisme.



Analyse des changements d'aspect du site Viking 2. On peut voir, principalement à la base des rochers, la trace des condensats de couleur blanche accumulés périodiquement. L'objet métallique éjecté au pied de Viking est une coiffe protectrice du bras articulé destiné à la prise d'échantillons (NASA/NSSDC).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf



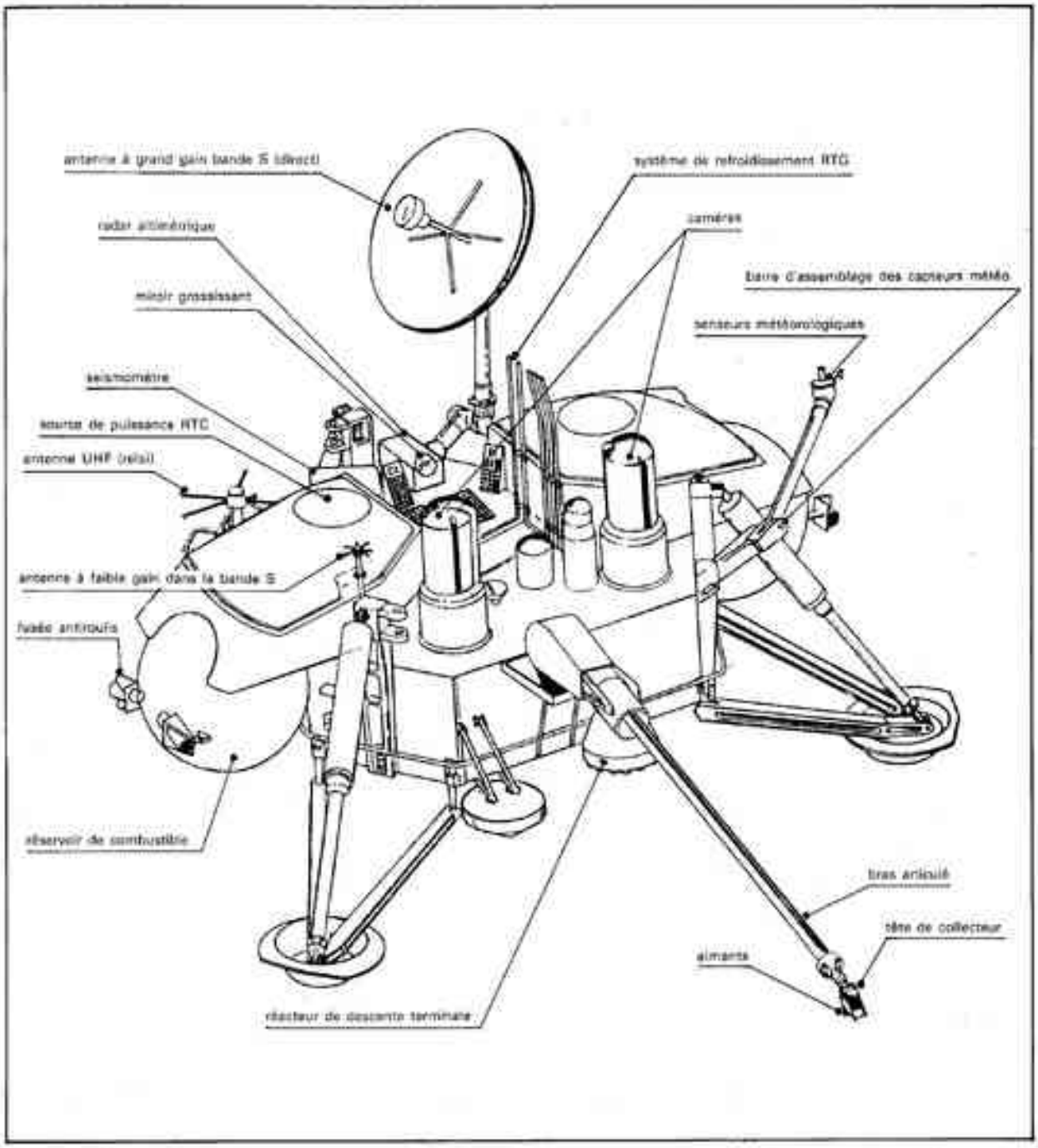
Sonde Viking identique à celle envoyée sur Mars (Martin Marietta, aerospace).

La biologie martienne ressemble-t-elle à celle de la Terre ?

La première expérience (dite PR, ou pyrolitic release) devait détecter la fixation du carbone par photosynthèse : on ajoutait du $^{14}CO_2$ radioactif à l'atmosphère confinée de l'incubateur au-dessus de l'échantillon de sol recueilli. Un volume de 0,25 cm³ de sol placé dans une cellule test de 4 cm³ à pression ambiante recevait la lumière d'une lampe à xénon haute pression dont le spectre s'étendait de 335 à 1000 nm (8 mW cm −2, c'est-à-dire 0,2 fois l'énergie reçue au point subsolaire sur Mars). Il était possible d'injecter 80 µ g de vapeur d'eau dans la chambre au début de l'expérience. 120 heures après injection de CO_2 radioactif, la lampe était éteinte et la chambre portée à 635°C. Les produits volatils étaient entraînés par un flux d'hélium dans la colonne d'un chromatographe en phase gazeuse pour analyse. Tout produit organique d'une activité biologique devait y être détecté.

La deuxième expérience (dite échange de gaz « GEX ») devait détecter les produits de déchet de la photosynthèse (O_2 et H_2O). A un échantillon de 1 cm³ placé dans une chambre scellée de 8,7 cm³ sous une atmosphère artificielle de 92 % d'hélium, 5,5 % de krypton et 3 % de gaz carbonique (pression de 200 mbar) était ajouté un mélange nourricier de composés organiques et de sels minéraux, et une quantité d'eau qui pouvait être choisie (pas du tout, un peu ou beaucoup). Le gaz au-dessus de l'échantillon après une incubation de plusieurs jours était entraîné par un flux d'hélium dans le chromatographe pour analyse. Puis l'expérience pouvait être recommencée.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf



La troisième expérience (dite émission marquée – labeled release, « LR ») devait détecter l'existence d'un **métabolisme hétérotrophe du carbone.** A l'échantillon était ajoutée une soupe nourricière contenant de nombreux substrats organiques (acides aminés) habituellement consommés par les bactéries terrestres et qui, de plus, étaient marqués par des atomes ^{14}C. La radioactivité du gaz environnant l'échantillon était mesurée en permanence pendant de nombreux jours (jusqu'à 80). Cette radioactivité ne pouvait provenir que d'une consommation de la soupe par les constituants du sol suivie d'une excrétion. Comme pour l'expérience GEX, l'échantillon était en contact avec la soupe et avec une certaine quantité de H_2O d'abord introduite sous forme de vapeur, puis de petites quantités liquides, enfin de grandes quantités liquides.

Interprétation des expériences

L'ensemble des trois expériences pesait 15 kg et occupait 0,03 m³. Toutes les expériences sur les deux sondes fonctionnèrent pendant huit mois à la perfection. Toutes donnèrent des signaux dus à une activité chimique, mais leur interprétation a présenté des difficultés.

Certains aspects sont cohérents avec les résultats que l'on attendrait d'une activité biologique comparable à ce qui est observé sur Terre.

Dans l'expérience PR, une quantité de l'ordre de la picomole de matière organique a été synthétisée pendant l'incubation de 120 heures en présence de lumière – il est vrai, dix fois inférieure à ce que produit le sol terrestre le moins réactif (échantillons antarctiques).

Dans l'expérience LR, la production de $^{14}CO_2$ est cohérente avec ce que l'on attend de l'activité biologique.

Dans les deux cas, cette activité n'est pas observée si l'échantillon a été préa-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

LA PLANETE MARS : ETAT DES RECHERCHES GEOLOGIQUES, GEOMORPHOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUE EN FRANCE

Les deux missions spatiales américaines, Mariner 9 (1971) et Viking (1974) ont obtenu une importante quantité d'informations sur la planète Mars, en particulier sur la géologie et la géomorphologie de la surface martienne (plus de 50 000 images ayant une résolution de l'ordre de la centaine de mètres ont été transmises par les deux engins Viking), sur la composition du sol et la dynamique de la surface (deux stations automatiques ont fonctionné à la surface de Mars pendant plusieurs années), et sur la structure interne (mesures altimétriques et de perturbations gravitionnelles des orbites des sondes spatiales). Grâce à ces informations, nous savons maintenant que la planète Mars (rayon équatorial : 3394 km ; densité : 3,9) est, dans l'état actuel de nos connaissance (la géomorphologie et la topographie de Vénus sont encore bien mal connues en raison de son atmosphère, mais des mesures altimétriques radar semblent indiquer l'existence d'une morphologie rappelant celle des régions continentales et océaniques terrestres), la planète tellurique qui présente le plus d'analogies géologiques et géomorphologiques avec la Terre : volcans boucliers, réseaux de failles, grabens, réseaux fluviatiles, champs de dunes, etc... Il était donc normal que cette planète attirât particulièrement l'attention des géologues, géomorphologues et géophysiciens, non seulement aux Etats-Unis, mais aussi en Europe et tout particulièrement en France.

Des chercheurs français appartenant au Groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS) du CNES à Toulouse, et au laboratoire de géologie dynamique interne (ERA 804) à l'Université Paris-Sud à Orsay, participent à l'exploitation des données Mariner 9 et Viking dans le cadre du « Mars Data Analysis Program » et du « Planetary Geology Program » de la NASA. Ces recherches sont soutenues par le CNES et par l'INAG (ATP de Planétologie).

Les chercheurs du GRGS exploitent les mesures d'anomalies de gravité en collaboration avec ceux du Jet Propulsion Laboratory (NASA-CALTECH) de Pasadena, pour établir des modèles de structure interne de la planète. La détermination du champ de gravité de Mars en harmoniques sphériques jusqu'au degré et ordre 18, a permis l'établissement d'une carte précise du géoïde martien (courbes de niveau tous les 50 m rapportées à l'ellipsoïde dynamique de référence).

L'organisation à Orsay (laboratoire de géologie dynamique interne) d'une photothèque planétaire renfermant plus de 150 000 images de diverses missions spatiales Mariner 6, 7, 8, 9, 10, Viking et Voyager, a permis de développer plusieurs programmes de recherches orientés vers l'étude structurale comparée des planètes telluriques et vers celle des satellites des planètes géantes (Jupiter et Saturne) et d'entreprendre en particulier l'étude de la tectonique martienne. D'autres groupes de recherches (université de Nantes, d'Orléans et de Reims) participent également à l'exploitation des données Viking disponibles à Orsay, pour l'interprétation de la géomorphologie martienne. Ces recherches se font en collaboration avec les chercheurs du US Geological Survey (Branch of Astrogeologic Studies) de Flagstaff (Arizona), avec ceux du Lunar and Planetary Institute de Houston (Texas), et avec ceux de diverses universités américaines.

Les études entreprises à Orsay portent sur l'interprétation des structures extensives (failles) situées en particulier à la périphérie du dôme (Tharsis) sur lequel se trouvent les principaux volcans martiens, sur l'origine du canyon équatorial de Mars (Valles Marineris), et sur celle des structures de type compressif (rides) observées dans les terrains anciens de l'hémisphère sud de la planète. D'après ces études, les réseaux de failles (normales et parfois décrochantes) résulteraient de plusieurs phases tectoniques dont la chronologie a été établie à partir de leurs modes de recoupements. Ces phases tectoniques sont liées aux mouvements de soulèvement du dôme de Tharsis.

Toutefois, aucune observation ne semble pouvoir indiquer l'existence passée ou actuelle d'une forme d'activité tectonique réellement comparable à la tectonique des plaques terrestres.

Les recherches entreprises en France sur la planète Mars, constituent une contribution à la connaissance de l'histoire générale des planètes telluriques dont fait partie la Terre. La poursuite de son exploration scientifique demeure l'un des objectifs des années 90, afin d'en étudier la surface (composition, âges), la subsurface (pergélisol) et la structure interne. Aussi, l'étude d'une nouvelle mission martienne constitue-t-elle une autre forme d'activité à laquelle participent les équipes de recherches françaises ayant déjà collaboré aux missions antérieures, et à laquelle elles souhaitent voir s'associer davantage de spécialistes français des sciences dites de la Terre.

lablement chauffé à 180°C pendant trois heures.

La difficulté principale provient de la réponse des échantillons à H_2O : au lieu d'augmenter le signal, l'addition d'eau à l'expérience PR l'inhibe totalement. Dans l'expérience LR, il suffit que la soupe humide ne touche qu'une petite portion de l'échantillon pour que la réaction prenne place et puis s'arrête définitivement, lorsque tous les réatifs présents au départ dans l'échantillon ont été épuisés. Il en est de même pour l'expérience GEX et surtout, dès que H_2O touche une petite portion de l'échantillon, une production tout à fait inattendue de 0,7 mol d'oxygène démontre la présence dans l'échantillon d'oxydants puissants.

L'addition de peroxydes, d'énergie d'activation de 35 à 43 K cal mol^{-1} à des échantillons terrestres, faite au laboratoire dans les modèles de rechange des expériences GEX et LR pour essayer de simuler après coup les réactions précédentes, a permis de les reproduire toutes sans qu'il soit besoin d'employer du matériel vivant. Si les résultats de PR n'ont pas été simulés abiologiquement, au moins un schéma réactionnel a été imaginé qui explique tous les détails des trois expériences de biologie.

Il repose sur l'introduction d'un complexe à sept coordinances de molécules H_2O_2 liées par un ion ferreux. Ce complexe se modifie lorsqu'on le chauffe en conservant beaucoup de liaisons OH et de l'oxygène absorbé. Dans l'expérience PR, il faut admettre que lors de la pyrolyse, une molécule de CO_2 s'ajoute au complexe.

Ce complexe se formerait sur Mars lorsque H_2O déposé par le givre est adsorbé et réduit les silicates en produisant H_2O_2 qui est alors chemisorbée.

A la température de 215°K, l'énergie d'activation de décomposition du peroxyde de 40 K cal mol^{-1} implique une durée de vie de 10^4 à 10^6 ans, c'est-à-dire que la concentration déduite des expériences Viking, de l'ordre de 10^{15}mol cm^{-3} de H_2O_2, correspondrait à 10^{13} – 10^{15}mol cm^{-2} H_2O_2 se décomposant chaque année et fournissant 10^{13}mol O_2 cm^{-2} par an par cm de sol, ce qui double la quantité de O_2 dans l'atmosphère en un an. Mais il n'est pas difficile d'imaginer des mécanismes de réabsorption par photooxydation qui compensent cette production.

Si rien ne démontre que ces peroxydes sont ceux qui existent sur Mars, tous les expérimentateurs s'accordent pour estimer que les signaux positifs obtenus sur Mars n'ont pas une origine biologique. Et ce jugement repose entre

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

autres sur l'existence certaine d'oxydants puissants (GEX), l'effet inhibiteur de l'addition de H_2O, l'absence de composés organiques, la simulation de GEX et LR par des réactifs non biologiques.

Mars, la surface la plus stérile du système solaire

La présence des peroxydes fait de Mars la surface la plus stérile du système solaire. Aucun organisme vivant sur Terre ne pourrait survivre à la combinaison des facteurs défavorables que sont la présence d'oxydants, les basses températures, l'absence d'eau liquide, l'absence d'oxygène et le puissant flux d'ultraviolet solaire. Un martien doit vivre profondément dans le sol pour se protéger de ce flux et de l'attaque des peroxydes, et ne dispose donc pas de lumière pour sa photosynthèse. Il lui faudra dépenser beaucoup d'énergie cependant car il lui faudra maintenir à l'état liquide son milieu intracellulaire, dans un environnement dont la température est très inférieure à 0°C : une sphérule de 2 µ de diamètre munie d'une isolation raisonnable doit assimiler et brûler 10^3 fois sa concentration d'équilibre en composés organiques par seconde pour maintenir sa température à 0°C quand l'environnement est à −40°C. Or c'est le cas : la température maximum d'été à 6 cm de profondeur est −35°C, à 24 cm, −50°C sur le site des sondes, il est vrai 15°C moins chaud que les mêmes latitudes dans l'hémisphère sud : rappelons qu'à −18°C sur la Terre, la croissance des bactéries est arrêtée.

Bien que les deux sondes aient donné exactement les mêmes résultats, tout en étant séparées de 176° de longitude et de 26° de latitude, ce qui démontre le caractère global des conditions physicochimiques qu'elles ont permis de décrire, il existe peut-être cependant des êtres vivants ailleurs que dans les lieux que nous avons explorés, à plus d'un mètre de profondeur, à l'état dormant, – ou dans le passé. Et c'est ainsi que nous sommes amenés à discuter du passé de Mars, un passé inscrit dans son paysage.

De nombreux aspects de ce paysage rappellent ceux qui sur Terre sont associés à des régions périglaciaires ou à des permafrosts riches en glaces : on y trouve beaucoup d'exemples de thermokarst (affaissement local de la surface produit par une fusion en profondeur de la glace sous-jacente), avalanches de débris mobilisés par l'eau, striation des fonds des canaux attribuables à un écoulement voisin de celui des glaciers, glissements de terrains. Ces données géomorphologiques supportent l'idée d'un permafrost s'étendant jusqu'à une profondeur de 1 à 3 km, car l'échelle des phénomènes est immense, ce qui correspond sans doute à des constantes de temps des cycles gel-débâcle de plusieurs siècles au lieu du jour ou de la saison sur Terre. D'où l'idée que **l'océan martien est enfoui dans le sol**, gelé en surface jusqu'à peut-être 1 ou 2 km, et donc là bien stable puisque dans un solide les phénomènes de transport sont limités, puis liquide en-dessous. Sa stabilité ne peut être perturbée que par des catastrophes.

Or ces catastrophes **ont eu lieu** comme le démontre la présence de gigantesques canaux d'écoulement dont la largeur varie de 10 à 100 km et la longueur peut atteindre 2000 km. Ils apparaissent à des sources localisées et traversent des terrains d'âge varié. Si aujourd'hui tout H_2O est stocké à l'état solide, soit dans le sol comme permafrost, soit dans les calottes polaires comme glace se sublimant ou se déposant selon la saison, ces canaux qui ne peuvent être dus à de la lave, démontrent qu'il y a eu beaucoup d'eau liquide dans le passé à la surface de Mars.

Tout d'abord, à l'origine, Mars a formé par dégazage une atmosphère beaucoup plus dense que celle d'aujourd'hui. L'enrichissement de l'atmosphère en ^{15}N montre que la planète a perdu au moins 90 % du N_2 dégazé. Or la quantité de N_2 présente dans l'atmosphère est déjà relativement grande. La Terre a dégazé 60 fois plus de CO_2 et 300 fois plus de N_2 que de H_2O. Donc même si le dégazage sur Mars a été beaucoup plus faible que sur la Terre (moins d'un quart certainement), peut-être à cause de l'absence sur Mars de déplacements tectoniques de plaques, tous les modèles donnent 10 à 100 fois plus de CO_2 qu'aujourd'hui dans l'atmosphère et une quantité d'eau liquide qui correspond à un océan recouvrant toute la planète avec une profondeur qui, selon les auteurs, peut varier de 10 à quelques centaines de mètres. Et cet océan a été absorbé par une roche rendue très poreuse par le violent bombardement de débris interplanétaires qu'a certainement subi la planète.

Les conditions actuelles ne permettent pas d'imaginer l'apparition de catastrophes. La pression au sol est de l'ordre de 7 mbar, avec des variations fort intéressantes, mais de petite amplitude. Les saisons sont très marquées par suite des fortes valeurs de l'excentricité de l'orbite et de l'obliquité de l'axe des pôles.

Dans l'hémisphère sud, l'hiver est long, le CO_2 de l'atmosphère a le temps de se précipiter, surtout autour du pôle, et il s'ensuit une baisse de la pression atmosphérique sur toute la planète. L'été y est bref, le CO_2 se sublime alors et lorsque la planète est au périhélie, juste au début de l'été, la pression atmosphérique atteint son maximum annuel. L'hémisphère ne sublime pas d'H_2O.

Dans l'hémisphère nord, l'hiver est court, la partie de la calotte polaire qui est constituée de neige carbonique se sublime au début du printemps, puis H_2O se sublime.

La source du H_2O de l'atmosphère martienne n'est pas la calotte, mais la surface de la planète de 30 à 70° latitude nord : il n'y a pas d'augmentation de H_2O dans l'hémisphère sud en été, bien qu'il soit plus chaud ! La circulation est donc fort complexe et il est possible qu'elle soit dominée par le transport des poussières qui, l'été, sont enlevées très haut dans l'atmosphère à partir des grandes dépressions de l'hémisphère sud et peuvent remplir tout l'atmosphère jusqu'à 40 km d'altitude.

Donc aujourd'hui, jamais d'eau liquide. Dans le passé l'existence des gigantesques écoulements liquides impose que de l'eau ait subsisté pendant très longtemps. Or pour qu'elle subsiste, il faut augmenter la température, c'est-à-dire la pression atmosphérique, car seul l'effet de serre peut augmenter la température. Pour une atmosphère de CO_2, il faut augmenter la pression de deux ordres de grandeur (jusqu'à quelques bars). Il a été suggéré qu'au moment des catastrophes, l'atmosphère avait une composition différente de celle d'aujourd'hui, qu'elle était partiellement réductrice et contenait NH_3 dont l'effet de serre, plus important, permet de maintenir H_2O liquide à une pression de quelques dizaines de mbars. Peut-être, après le dégazage et les éruptions volcaniques qui ont dû l'accompagner, a-t-il existé sur Mars un optimum climatique : la pression atmosphérique était plus élevée, l'eau pouvait jouer son rôle incomparable de solvant universel, il y avait abondance de CO_2, NH_3, H_2O dans l'air, la température était clémente. Peut-être alors, il y a trois milliards d'années, ces conditions ont duré assez longtemps pour permettre le développement de sphérules vivantes qui depuis se sont endormies au fond de glaciers enterrés ?

La photolyse des composés hydrogénés a entraîné la perte vers l'espace de l'hydrogène et donc la diminution de

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

l'atmosphère. Superposées à cette évolution à très long terme, doivent exister les oscillations climatiques de grande amplitude que crée la variation avec les conditions orbitales du flux solaire disponible : la précession de l'axe des pôles, les modifications de l'obliquité et la variation de l'excentricité orbitale. Depuis 1930, les changements climatiques sur la Terre sont attribués en grande partie à ces propriétés orbitales qui présentent des périodes de plusieurs dizaines de milliers d'années appelées cycles de Milankovitch. Dans le cas de Mars, l'obliquité et l'excentricité sont sujettes à des variations très importantes : l'obliquité varie avec une période de 1.2×10^5 années de 36° à 12° et l'excentricité de 0,005 à 0,141. Ce sont d'énormes changements qui peuvent multiplier par deux l'insolation du pôle. Une partie de H_2O et du CO_2 de l'atmosphère est gelée dans les calottes polaires. Lorsque l'obliquité descend à 11°, les volatils restent gelés aux pôles et la pression atmosphérique descend à 0,1 mb : lorsque l'obliquité augmente, la calotte polaire fond et la pression peut monter à quelques centaines de mbars. La valeur actuelle de 24° n'a pas réussi à augmenter beaucoup l'évaporation polaire et il faut sans doute une valeur bien plus élevée. Les cycles modernes d'insolation expliquent plutôt les petites modifications climatiques dont on aperçoit les symptômes dans les couches stratifiées des glaces polaires et la variation de leur extension en latitude : les grands canaux ne sont pas liés à cette fine échelle de temps et sont assez anciens comme le montre l'abondance des cratères qui les parsèment pour avoir été créés avant la disparition d'une atmosphère primitive : il ne pleut plus sur Mars depuis deux ou trois milliards d'années. Dans ces anciens temps, avant que la surrexion de la région de Tharsis accompagnée d'une colossale activité volcanique ait modifié toute la distribution des masses internes, l'obliquité peut avoir varié entre 9 et 45°, ce qui aurait eu des effets beaucoup plus importants sur la fonte polaire.

Même si une valeur de 34° de l'obliquité était suffisante pour amener le réveil de sphéroïdes dormants, il faudrait attendre 10^5 années avant qu'elle atteigne ce maximum. Nous ne verrons donc pas ce réveil – hypothétique – et je crois que la Terre est le seul endroit du système solaire où nous observerons la vie.

VALEURS DU FACTEUR D'INSOLATION SOLAIRE POUR DIFFERENTES VALEURS DES PARAMETRES ORBITAUX

Paramètres orbitaux		Position orbital	Luminosité solaire	Position spatiale	f
Excentricité	Obliquité				
0.093	25	Distance moyenne	1.0	Moyenne globale	1.0
0.093	25	Distance moyenne	1.0	Equateur	1,27
0.093	25	Périhélie	1.0	Equateur	1,54
0.14	25	Périhélie	1.0	Equateur	1,72
0.093	25	Périhélie	1.0	Moyenne globale	1,32
0.14	25	Périhélie	1.0	Moyenne globale	1,35
0.093	15	Distance moyenne	1.0	Pôle d'été	1,04
0.093	35	Distance moyenne	1.0	Pôle d'été	2,29
0,093	43	Distance moyenne	1.0	Pôle d'été	2,73
0,093	25	Distance moyenne	0.7	Moyenne globale	0,7

f est le rapport de l'insolation moyennée sur un jour pour une situation considérée à la valeur moyennée globale à la distance moyenne de Mars par rapport au Soleil.

FORMES PRIMITIVES DE LA VIE SUR LA TERRE
(photo 4 de couverture)

Portion de lame mince exécutée dans un échantillon minéralisé collecté dans le Précambrien terminal du Guelb er Richât de l'Adrar de Mauritanie, par Théodore Monod. Age : 800 millions d'années environ. Son étude a fait l'objet d'une note d'Edouard Boureau et Marcel Locquin (1) en 1980.

On remarque plusieurs groupes de forme irrégulière colorés en carmin par le réactif de Schiff après oxydation par l'acide périodique, caractérisant aussi les aldéhydes et témoignant de leur caractère initialement vivant.

Les groupes contiennent des petites sphérules de 3 à 4μ m appelées coccoïdes réparties de façon dense à la périphérie où ils amorcent un commencement de paroi en donnant déjà un caractère collectif et autonome.

Dans certains groupes clairs, les coccoïdes de la périphérie seuls sont colorés. On constate également que la coloration affecte non seulement la paroi des coccoïdes, mais également le mucilage accompagnateur.

(1) Edouard Boureau et Marcel Locquin, 1980. Recherches cytochimiques sur certains organismes du Précambrien africain. 105ème congrès national des sociétés savantes, Caen 1980, I : 7-19.

A moins que – si je peux finir par un peu de science fiction – à moins que l'homme désire s'installer sur Mars (ce que je pense qu'il fera au 21ème siècle) et qu'il décide d'y habiter. Il pourrait le faire à condition de projeter dans l'atmosphère une centaine de mégatonnes de fréon (bien sûr fabriqué sur place). Ce fréon produirait un effet de serre suffisant pour faire fondre les deux calottes polaires. Alors des profondeurs du sol martien surgiraient, pourquoi pas, les sphérules réveillées de leur long sommeil. Les vaisseaux spatiaux des colonisateurs les transporteraient sans le savoir jusque sur la Terre et, après la disparition des formes vivantes actuelles éliminées par ces fossiles dangereux et irrésistibles, tout pourrait recommencer.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

L'hydrogène vecteur d'énergie : évolution et perspectives

« Va-t-on, à long terme, vers une civilisation de l'hydrogène ? Le choc pétrolier de 1973 a stimulé les recherches dans ce domaine. Dix ans après, le moment est venu de faire le bilan et d'esquisser l'avenir ».

Charles GLEITZER

Dans « L'Ile Mystérieuse », Jules Verne écrivait en 1874 : *« Qu'est-ce qu'on brûlera plus tard à la place du charbon, demanda le marin ? L'eau, répondit Smith, mais décomposée en ses éléments constitutifs, et décomposée sans doute par l'électricité ... L'hydrogène et l'oxygène, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable, d'une intensité que la houille ne saurait avoir ... L'eau est le charbon de l'avenir ».*

Cette prédiction est fameuse. Elle est même prise pour devise par l'International association for hydrogen energy.

Mais, en fait, on ne s'avise jamais de citer les deux phrases suivantes du même texte :

« Je voudrais bien voir cela dit le marin.

Tu t'es levé trop tôt, répondit Smith »

Les travaux de recherche et développement ont été très actifs depuis 1973 dans le domaine de l'hydrogène, notamment dans le cadre de la Recherche coopérative sur programme « Vecteur hydrogène » ; parce qu'à long terme la civilisation de l'hydrogène est sans doute inéluctable, et qu'à moyen terme l'hydrogène permettra une utilisation plus rationnelle de l'énergie.

A condition de ne pas se réveiller trop tard !

Les motivations

Pourquoi « la civilisation de l'hydrogène » est-elle inéductable ? A cause de l'« effet de serre » dû à l'accroissement dans l'atmosphère du dioxyde de carbone provenant des combustibles carbonés (d'origine fossile ou végétale). D'après la NASA, si la consommation de matières carbonées continue à croître de 2 à 4 % par an (les pays en voie de déve-

□ Charles Gleitzer, directeur de recherche au CNRS, est directeur du Laboratoire de chimie du solide minéral (LA 158) de Nancy.

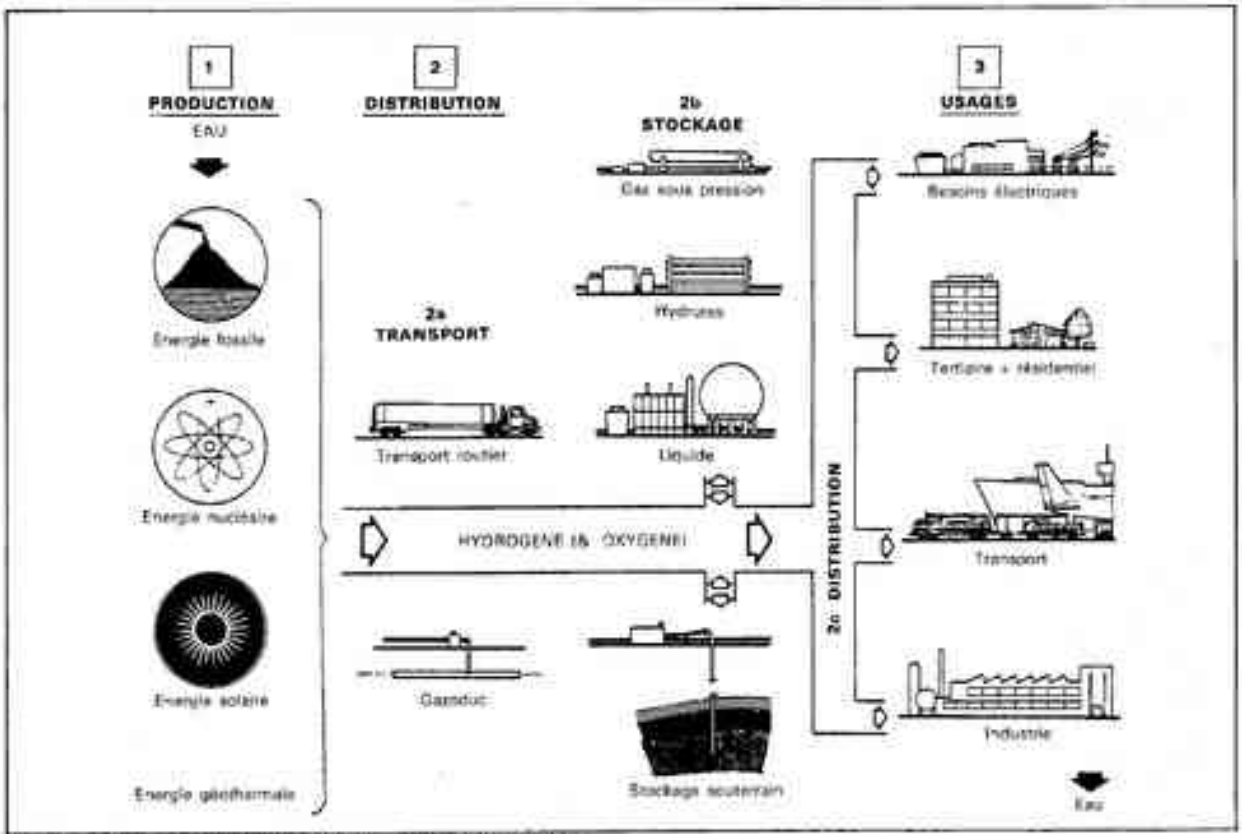


Fig. 1 – Schéma du système énergétique basé sur l'hydrogène.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

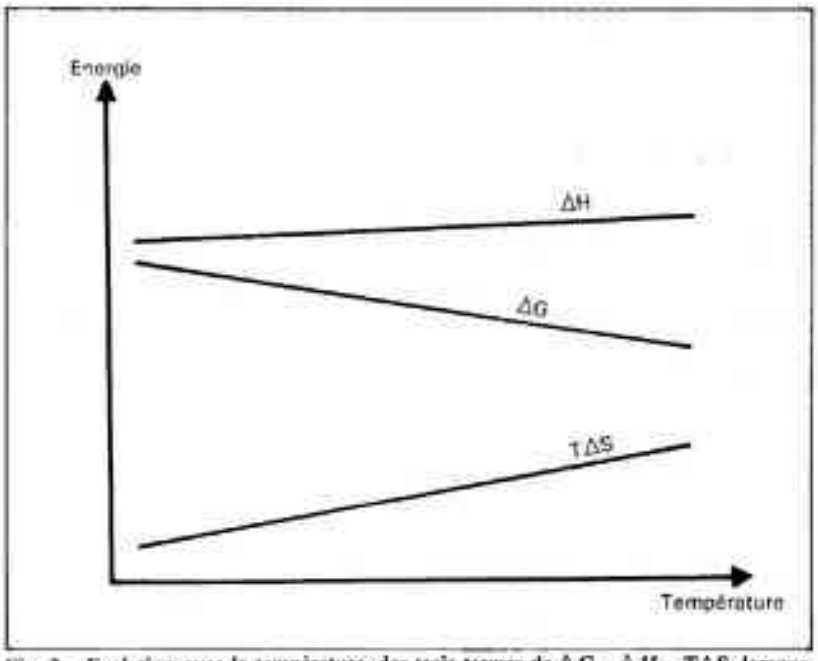


Fig. 2 – Evolution avec la température, des trois termes de $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, lorsque, comme dans H_2O liquide = H_2 gaz + 1/2 O_2 gaz, ΔS est positif. (ΔG, ΔH, ΔS : variations de l'enthalpie libre, de l'enthalpie, de l'entropie du système).

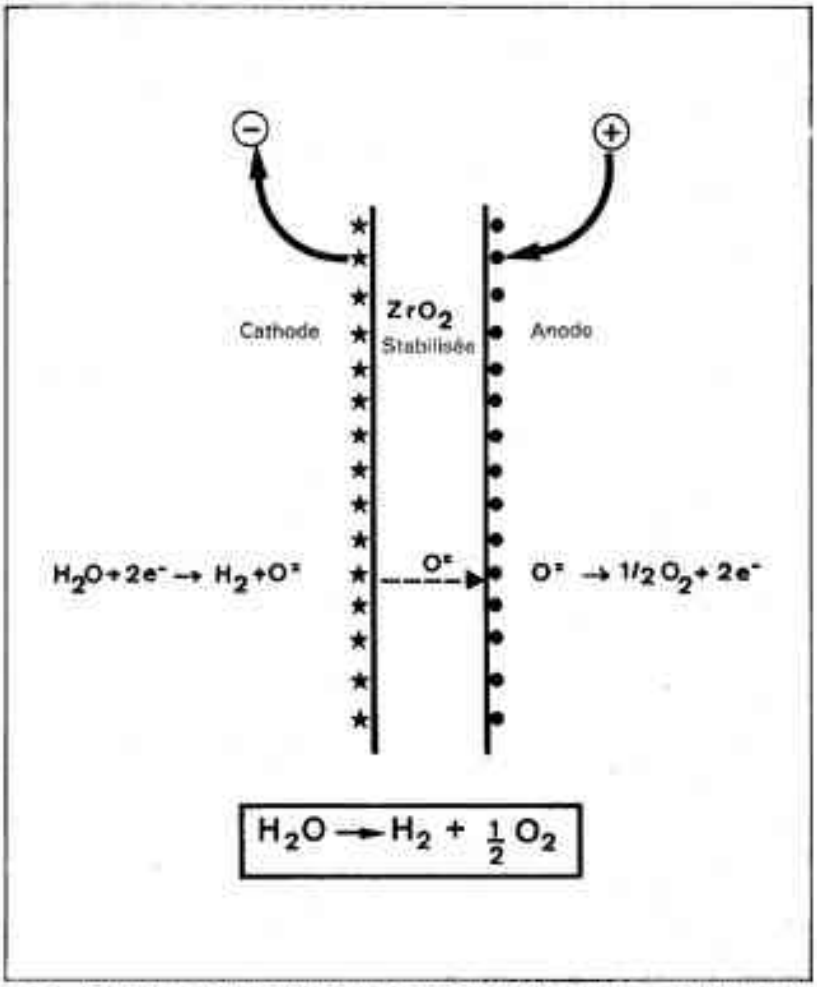


Fig. 3 – Electrolyse de la vapeur d'eau : la paroi étanche de zircone, conductrice par les ions O^{2-}, est recouverte de deux conducteurs électroniques jouant le rôle d'électrodes ; sous l'influence de la tension appliquée, les molécules d'eau sont dissociées à la cathode en ions O^{2-} et en hydrogène.

loppement y contribueront de plus en plus), l'échauffement moyen sera de 3°C ± 1,5°C entre 2040 et 2060, conduisant à une montée du niveau de la mer et à une sécheresse par 40-50° de latitude Nord (1). L'hydrogène devra donc pouvoir prendre le relais (et être produit à partir d'énergie solaire ou nucléaire).

En quoi l'hydrogène peut-il, à moyen terme, permettre une utilisation plus rationnelle de l'énergie ? On sait qu'il est très coûteux d'assurer en permanence l'adéquation entre demande et offre d'énergie, car cela se traduit par des investissements mal rentabilisés, et ce problème s'aggravera avec l'énergie solaire, intermittente par nature. On a donc besoin d'un vecteur d'énergie qui soit facile à préparer, à stocker et distribuer. L'hydrogène convient bien (mieux que la chaleur ou l'électricité) car il peut brûler ou redonner de l'électricité par une pile à combustible. La figure 1 donne une vue d'ensemble de la « filière d'hydrogène » que nous allons détailler.

La production d'hydrogène

De nombreuses méthodes sont possibles, mais seule l'électrolyse sera prochainement capable d'une production industrielle (plus de 100 tonnes/jour)

Les progrès de l'électrolyse de l'eau. La figure 2 rappelle que l'élévation de température diminue l'enthalpie (a) libre de la réaction de dissociation de l'eau liquide en ses constituants gazeux. Comme $\Delta G = nEF$ (n : nombre d'électrons mis en jeu, F : Faraday), la tension appliquée, qui est de 1,48 V à 25°C, et l'énergie à fournir, diminuent à chaud. Simultanément, le chauffage diminue les surtensions et amène à produire les gaz sous une pression de toute façon nécessaire à leur transport.

Les électrolyseurs récents se subdivisent en deux catégories selon la température : 80-120°C, où des catalyseurs actifs sont nécessaires – par exemple $Ni_{1-x}O$ à l'anode, et $NiMoO_4$ à la cathode, fonctionnant avec E=1,58 V et I=10kA/m² (électrolyte KOH 5N) à 120°C – et 140-200°C sans catalyseur (ou avec catalyseur moins actif) – par exemple avec E=1,45 V et I=10kA/m² (KOH 6N) à 200°C (2) –. Les problèmes annexes qui se posent concernent le diaphragme et le comportement des bulles de gaz (5). En 1980, EDF et GDF ont lancé un programme de réalisation de deux électrolyseurs de 2MW, l'un confié à Creusot-Loire, l'autre à ACB, fonctionnant à

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

plus de 160°C et à 120°C respectivement, et visant une efficacité de 4,5kWH par m^3 H_2 ; avec des ateliers de 300 MWe, le prix de revient de l'hydrogène serait de 0,85 F/m^3 si le kWH coûte 0,17 F (sur 8000 H/an) et beaucoup moins avec un tarif « heures creuses » (7)

Des perspectives plus prometteuses reposent sur l'utilisation d'électrolyte polymère solide, étudié au CEA (3), l'induction directe du courant dans l'électrolyseur (8), l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (voir figure 3). Par exemple le Centre d'études nucléaires de Grenoble a construit un électrolyseur de ce type fonctionnant à 850°C (6).

Les méthodes du futur.

Les cycles thermochimiques, où l'eau participe à une série de réactions où elle se trouve finalement dissociée, ont l'avantage d'utiliser la chaleur et non l'électricité pénalisée par le rendement de Carnot ; cependant pour des raisons de simplicité, on s'oriente vers des cycles où une étape est électrolytique. D'autre part, la source de chaleur des réacteurs nucléaires « haute température » est loin d'être disponible et il faudra se contenter d'une source à T≤ 600°C. La thermolyse de l'eau doit faire appel au rayonnement solaire concentré car la dissociation de l'eau n'est que de 0,7% à 2000K (et il faut éviter la recombinaison au refroidissement). Des expériences de laboratoire ont cependant produit 1 litre/H d'hydrogène avec un rendement énergétique de 0,5% ; elles sont largement perfectibles (4). La photolyse est également très étudiée. De nouvelles méthodes de purification sont en cours (10).

Stockage, distribution, securité

L'hydrogène peut être stocké gazeux (sous pression), liquide (à T 20K) ou sous forme d'hydrure (b). Pour le gaz c'est le stockage souterrain qui est le moins cher ; des essais ont montré que les réservoirs pour gaz naturel conviennent, bien que l'hydrogène diffuse facilement. La forme liquide sera réservée au transport (voiture, avion) car sa compacité coûte 4 kWH/kgH_2 pour la liquéfaction.

Un problème important est celui de la fragilisation des matériaux par l'hydrogène, notamment les aciers pour gazoducs et compresseurs ; elle dépend de la nuance d'acier, de ses traitements thermiques, de la qualité de la surface, de la pureté de l'hydrogène ... Ce problème est particulièrement étudié en France où l'on a mis au point des tests simples grâce à une étude en profondeur des mécanismes de fragilisation. Gaz de France estime que, si l'hydrogène n'est pas trop pur, les canalisations de gaz naturel conviennent pour PH_2<70 bars. On est loin cependant d'avoir élucidé l'interaction hydrogène-matériaux, comme en témoigne la grande activité internationale sur ce sujet.

On touche ici aux problèmes de sécurité, car, très fluide, l'hydrogène fuit plus facilement que d'autres gaz ; mais, du fait de sa légèreté, il s'élimine rapidement en milieu non confiné : on n'a pas réussi à faire exploser des fuites volontaires de quelques m^3 en présence d'étincelles. Il suffit d'ailleurs de rappeler que le « gaz de ville » contenait environ 50% d'hydrogène.

Utilisations

On s'en tiendra ici aux utilisations nouvelles, en notant que, compte-tenu de la demande croissante en hydrocarbures légers, les raffineries de pétrole passent progressivement de productrices à consommatrices d'hydrogène.

Les transports.

L'automobile, comme tout moteur à combustion interne, peut fort bien fonctionner avec de l'hydrogène comme carburant, avec même un certain nombre d'avantages :

– le mélange H_2/air s'enflamme très facilement ; la combustion étant plus sûre, le moteur est moins capricieux, plus facile à régler ;

– la vitesse de propagation de la flamme est très grande avec l'hydrogène, ce qui permet de diminuer la taille des chambres de combustion,

– même mal réglé, un moteur à hydrogène est beaucoup moins polluant (pas de CO ou d'hydrocarbures, très peu de NO ou NO_2).

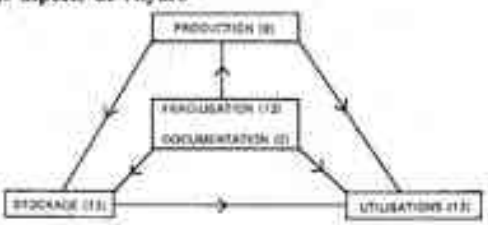
Le problème qui reste à régler est celui du stockage de l'hydrogène ; deux solutions sont possibles :

• L'hydrogène liquide, déjà utilisé dans les fusées Saturne ou Ariane par exemple, nécessite, de par sa faible densité et sa température de 20 K, un réservoir plus grand (donc plus lourd) que pour l'essence et très bien isolé thermiquement. Ce problème n'est pas trop contraignant si l'on en juge par le fait que six voitures différentes, dont une petite Diesel japonaise, étaient exposées en 1982 à la 4ème Conférence internationale sur l'hydrogène.

• Les hydrures solides : le plus léger, celui qui dérive du magnésium, ayant

LA RECHERCHE COOPERATIVE SUR PROGRAMME VECTEUR HYDROGENE

Cette RCP, créée en 1980 par le CNRS, comprend une cinquantaine d'équipes appartenant au CNRS, à l'Université, à d'autres organismes publics (CEA) ou à l'industrie, et s'intéresse aux différents aspects de l'hydrogène en tant que futur vecteur d'énergie : production et purification, distribution et stockage, fragilisation des matériaux, grandes utilisations industrielles prospectives, banque de données.



Articulation des thèmes (les nombres entre parenthèses indiquent les nombres d'équipes concernées).

HYDROGEN DATA

Une base de données produit la revue « Hydrogene Information » qui traite toutes les publications relatives à l'hydrogène, et présente les références bibliographiques obtenues aux sources primaires ou par l'intermédiaire des systèmes automatisés. Ces références sont classées par sujet permettant une sélection rapide.

L'utilisation « on line » permet un accès aux champs : auteurs, années de publication ou laboratoire et de façon générale une recherche de chaine de caractères.

Responsable : S. Talbot - Besnard, Ecole Centrale - 92290 Chatenay - Malabry

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

une pression de dissociation trop faible, doit être préchauffé par les gaz d'échappement ; pour le démarrage, il faut donc utiliser un autre hydrure, celui de fer-titane (fig. 3). La faible autonomie, de l'ordre de 300 km, est palliée par le rechargement nocturne si l'hydrogène est distribué à domicile (ou fabriqué par électrolyse), notamment pour le chauffage (fig. 4). C'est ainsi que dix taxis doivent prochainement circuler à Berlin avec des réservoirs d'hydrures rechargeables en dix minutes.

D'autre part, un bien meilleur rendement sera obtenu à partir de piles à combustibles hydrogène-air. Le type basique (KOH) convient bien à la traction automobile (et à l'hydrogène, qui ne produit pas de CO_2), cependant que le type acide (H_3PO_4) est monté sur quelques centrales de 4-5 MW. En trafic urbain, l'économie d'énergie est de 30% et la densité de puissance de 190 WH/kg (contre 24 pour la batterie au plomb). En Belgique un bus a été ainsi équipé, son fonctionnement est naturellement silencieux et non polluant. Il reste cependant à obtenir une meilleure fiabilité et un moindre coût.

L'avion supersonique à hydrogène liquide, projeté par Lockheed, pèse, à pleine charge, deux fois moins que son homologue au kérosène. Il est tenu pour moins cher à fabriquer, plus économique en service, plus sûr et, naturellement, non polluant.

L'hydroliquéfaction du charbon est un procédé consistant 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 (c).

La métallurgie est un débouché noble pour l'hydrogène qui sert ici de réducteur. Une installation industrielle fonctionne au Vénézuela avec du minerai de fer en lit fluidisé, produisant du fer non carburé qu'il suffit de fondre au four électrique. Mais on peut aussi injecter l'hydrogène dans le haut-fourneau, économisant du coke (cher et de fabrication polluante). La sidérurgie pourrait être une bonne industrie d'accueil pour le trio: H_2, O_2, électricité, disponible sur le site d'une centrale équipée d'électrolyseurs.

(c) En thermodynamique, fonction définie par la somme de l'énergie interne (U) d'un système et du produit de sa pression P par son volume V (U + PV).
(b) Ce point a été développé par A. Percheron-Guegan dans Images de la Chimie 1982.
(c) Ce sujet a été traité par Henri Charcosset - Le Courrier du CNRS n° 45 - mai 1982.

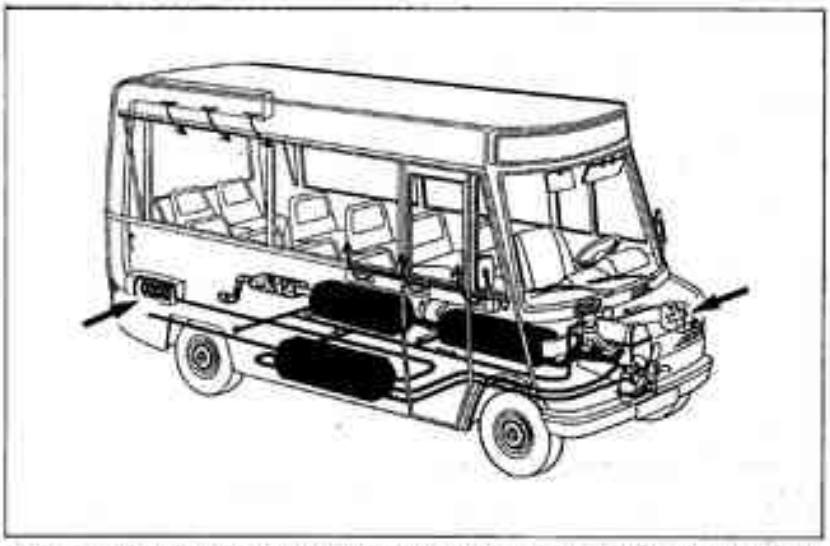


Fig. 4 – Minibus Daimler-Benz alimenté en hydrogène. Le réservoir situé juste derrière le moteur contient l'hydrure de magnésium, il est ainsi chauffé par les gaz d'échappement qui vont ensuite vers les réservoirs situés en aval et contenant de l'hydrure de fer-titane ; le troisième réservoir (fer-titane) sert à la climatisation.

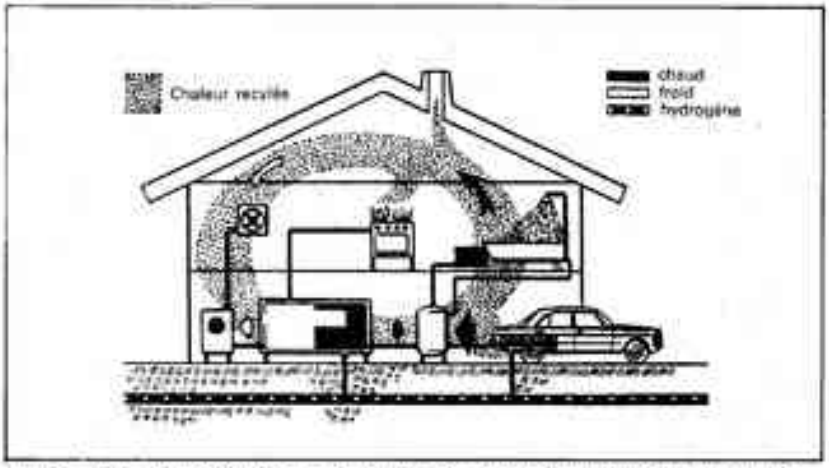


Fig. 5 – Utilisation de l'hydrogène pour la maison et la traction automobile : une canalisation amène l'hydrogène qui est stocké sur hydrure dans un réservoir d'où il peut être pompé pour recharger une voiture ou chauffer la maison ; les calories (synthèse de l'hydrure) et frigories (dissociation) servent au chauffage ou à la climatisation. D'après Buchner.

En dix ans, depuis le premier choc pétrolier, des progrès substantiels ont été réalisés de la production d'hydrogène à de nouvelles utilisations potentielles. Ce vecteur d'énergie, qui est en même temps un produit de base de la chimie, et dont l'avenir à long terme semble assuré, connaît pour le moment bien sûr ses promoteurs et ses détracteurs. Son supporter le plus optimiste est sans doute C. Mc Auliffe qui, parlant de l'incendie du Zeppelin Hindenburg en 1938, fait remarquer qu'on ne devait pas dire : « Il y a eu 36 morts », mais plutôt : « Sur les 102 passagers et membres d'équipage, 68 ont survécu ».

Car il est vrai qu'avec tout autre gaz combustible il n'y aurait eu sans doute aucun survivant.

BIBLIOGRAPHIE

(1) **Reveille R.** – *Scientific American 247* (1982) 33.
Gaudry A. communication personnelle.
(2) **Marinio G.** – *Int. Hydrogen Energy* 6 (1982) 167.
(3) **Masson J.P.** – Ibid 7 (1982) 167.
(4) **Ledé J. et al.** – ibid. p. 929.
(5) **Clavilier J. et al.** – *J. Electroanal. Chem.* 127 (1981) 281.
(6) **Schouler E. et al.** – *Rev. Gené. Elec.* 3 (1982) 193.
(7) **Aurelle R. et Pottier J.** – Proc. 4 th World Hydrogen Energy Conf., Pasade'a June 1982 ß *Publ. Pergamon 1982*, p. 1563.
(8) **Bockris J. O'M.** – ibid. p. 1475.
(9) **Buchner H.** – ibid. p. 3.
(10) **Mounier G.** – Communication personnelle.

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose à titre expérimental de fournir aux lecteurs intéressés des articles très généraux, prospectifs ou de synthèse sur ce sujet. La bibliographie comportera environ 80 références de 1977 à 1983 et est disponible au CDST au prix de 130 F H.T. (154,18 F TTC) voir coupon réponse p. 30.
La stratégie de recherche est : HYDROGENE et VECTEUR ENERGIE.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Réflexion sur

Les échecs scolaires, marginalisation et identifications culturelles chez les migrants de la seconde génération

L'émergence d'une nouvelle génération d'adolescents et de jeunes issus de l'immigration mais nés en France, pose aujourd'hui un problème culturel spécifique et sans doute, exige une redéfinition des stratégies didactiques en vigueur.

Georges VIGNAUX

Ces dernières décennies, l'Europe a connu d'importantes vagues migratoires. Leur ampleur, par rapport au passé, a été exceptionnelle. Ceci a notamment permis l'essor industriel des principaux pays de la Communauté. Aujourd'hui, cet essor rencontre les difficultés que l'on sait. Mais, avec l'effondrement des industries grandes consommatrices de main d'œuvre, le chomage atteint plus que d'autres, les travailleurs immigrés. Ceci contribue à les faire considérer fréquemment comme « gênants ». Des attitudes xénophobes ressurgissent ainsi. Cependant, les incitations « au retour », les expulsions dans certains cas, n'ont eu que des effets mineurs. Et pour cause : avec le temps, l'immigration a pris, un peu partout, un caractère « familial ». Les immigrés sont en majorité sédentarisés et ont fondé foyer ou été rejoints par leurs familles. Leurs enfants sont dès lors, largement présents dans les différents systèmes scolaires des pays d'accueil. Cette présence engendre un peu partout, de nombreuses difficultés. Un des effets, et non des moindres, de la crise et de ses menaces sur l'emploi, est de faire ressurgir les attitudes de repli sur soi. D'où l'émergence d'affirmations culturelles, reprenant même à l'occasion, la forme archaïque du « régionalisme ». L'existence de nos sociétés emprunte ainsi, de plus en plus, des voies multiculturelles. Ceci, dès lors, entre en conflit avec la conception même de nos systèmes éducatifs, encore fondés sur l'intégration dans un moule culturel unique. D'où encore, les difficultés nombreuses éprouvées par ces enfants de migrants dès leur entrée à l'école, difficultés qui conduisent nombre d'entre eux à l'échec total et, par voie de conséquence, à des situations de marginalisation ou de révolte sociale. Situations d'autant aggravées que la présence de ces enfants de migrants dans certains établissements scolaires, peut s'avérer majoritaire.

□ Georges Vignaux, chargé de recherche au laboratoire de recherche en sciences sociales. Ecole normale supérieure – 2, avenue du Palais, 92210 Saint-Cloud.

Une forte croissance Une situation complexe

Si l'on prend ainsi, tout d'abord, l'exemple de la France et le cas de la présence portugaise dans notre pays, les chiffres du tableau 1 témoignent de l'accroissement considérable de cette communauté.

Il est important de souligner surtout que très rapidement, cette immigration portugaise, de type essentiellement masculin au début, a atteint sa configuration actuelle présentant une structure interne proche des modèles d'immigration familiale. Ceci est d'ailleurs le cas de la plupart des autres communautés établies en territoire français (tableau 2).

. La situation est d'ailleurs comparable dans la plupart des autres pays européens concernés. Elle est cependant encore plus complexe en Grande-Bretagne. L'immigration au Royaume-

1

ACCROISSEMENT DE LA COMMUNAUTE PORTUGAISE

	1975	1979
Ensemble de la population	52 599 430	
Etrangers :	3 442 415	4 124 317
Portugais :	756 935	866 610
Algériens :	710 690	782 111

2

TABLEAU COMPARATIF DES REPARTITIONS D'ENFANTS SCOLARISES PAR NATIONALITE D'ORIGINE

Nationalité	Enseignement public		Enseignement privé		Total
	Nombre	%	Nombre	%	
Maghrébins	398 453	45,65	15 253	30,54	414 706
Algériens	267 063	30,54	10 773	21,57	277 836
Marocains	93 721	10,71	2 108	6,22	96 829
Tunisiens	38 669	4,42	1 372	2,75	40 041
Portugais	227 549	26,0	12 632	25,29	240 181
Espagnols	71 955	8,22	4 905	9,82	76 860
Italiens	56 570	6,46	3 537	7,08	60 107
Africains	21 326	2,44	3 745	7,50	25 071
Yougoslaves	14 270	1,63	490	0,98	14 166
Autres pays	83 905	9,59	9 386	18,79	93 291
TOTAL	875 034	100 %	49 948	100 %	924 982

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Uni s'est surtout effectuée entre les années 1950 et 1970. Durant ces années plus d'un million de personnes sont entrées en Grande-Bretagne et la minorité de couleur était estimée en 1977 à près de 1,85 million d'individus, soit quelques 3,4 % de la population totale. Au moment de ce recensement, 40 % du total de cette population étaient déjà nés au Royaume-Uni. A l'intérieur de cette importante minorité, les groupes les plus nombreux proviennent essentiellement des Caraïbes, du Pakistan et d'Afrique orientale. Il ne s'agit donc pas d'une communauté homogène. Ce que ces populations ont cependant en commun, en regard de la population britannique indigène, c'est un taux d'accroissement considérable qui fait qu'en 1971, par exemple, 41 % des membres composant la population noire étaient d'âge inférieur à 15 ans et que 49 % étaient d'âges compris entre 15 et 44 ans. A titre comparatif, pour l'ensemble de la population britannique, ces proportions tombent à 24 % et 29 %. Enfin, en Grande-Bretagne comme ailleurs, ces populations sont le plus souvent concentrées dans certaines zones, géographiquement bien délimitées : banlieues des grandes agglomérations, bas quartiers, régions historiquement industrialisées. Elles sont dès lors, les premières les plus durement touchées par la crise et ses retombées : chomage, expulsions, prises en charge sociales, séquelles médico-psychologiques.

Ainsi, dans toutes ces communautés étrangères, la plupart anciennement établies dans les divers pays de la Communauté européenne, différents facteurs concourent actuellement pour composer un tableau de difficultés variables selon les cas : facteurs d'ordre socio-économique, facteurs linguistiques – une étude menée en 1981 par l'ILEA (Inner London Education Authority) recensait près de 131 différents langages pratiqués dans une population de 44 925 écoliers –, facteurs enfin proprement psychologiques, issus de taux d'échecs généralement élevés. Ce dernier facteur est bien sûr la résultante des précédents.

L'échec scolaire chez les enfants de migrants

Il est extrêmement difficile de donner une définition précise et suffisamment univoque de ce que signifie l'échec scolaire. Au moins, semble-t-il se mesurer et dans tous les cas, se concrétiser par l'éviction hors du système scolaire, éviction généralement précédée par des redoublements, des orientations dévalorisantes, des abandons des enfants. Disons qu'on ne peut parler d'échec qu'en regard de ce que l'école attend des performances des enfants et des normes qu'elle impose à ces performances. C'est dire que cet échec paradoxalement, est aussi et toujours, une mise en cause implicite du fonctionnement de l'institution scolaire. La concrétisation familière de cet échec est en effet, l'abandon sur place de l'enfant conduit, d'une orientation à l'autre, à se retrouver dans un cul-de-sac pédagogique. Bien sûr – et la plupart des auteurs insistent là-dessus –, cet échec scolaire massif des enfants de migrants semble largement imputable à des conditions familiales défavorables. Mais s'en tenir à cette seule explication est, à l'occasion, un moyen commode d'absoudre les effets mêmes de la machinerie scolaire.

Certes, il y a toujours corrélation entre échec à l'école et type de situation familiale, mais il convient de s'interroger sur les circonstances et les modalités selon lesquelles l'école est susceptible d'aggraver un handicap social. Bien des enseignants, sensibilisés à des études maladroitement menées, n'ont que trop tendance à trancher exclusivement entre les responsabilités de la société ou celles de l'école. La situation est en fait, toujours plus complexe, d'autant qu'effectivement, une dimension sociale essentielle du système scolaire est très tôt, d'assurer ce tri des enfants qui consiste à les « orienter ». Les facteurs sociaux antérieurs à l'école jouent alors un rôle considérable tout au long de la carrière scolaire de l'enfant et il est manifeste que les différentes orientations qu'il subira lors de cette carrière peuvent autant le favoriser qu'à coup sûr l'éliminer. Les enfants de migrants sont particulièrement visés dans ce dernier cas.

C'est qu'en effet, cette nécessité d'orientation, conçue comme impérative par l'enseignant, le conduit généralement à traiter à part ces enfants. Cette « sollicitude », dans bien des cas, loin d'atténuer les effets du handicap social, va au contraire les aggraver. Un certain nombre d'enquêtes et de recherches à l'instigation de la Direction des écoles du ministère de l'Education Nationale, sont éclairantes sur ce point. Dans toutes ces études, les facteurs suivants apparaissent déterminants dans la genèse de difficultés scolaires : santé, milieu géographique, niveau d'étude des parents, formes de scolarisation, contacts famille-école, suivi des enfants dans la famille.

Tous ces facteurs peuvent être plus ou moins reliés aux échecs constatés, sans pour autant être considérés comme causes univoques. Avant de les examiner en détail, précisons encore qu'il importe de ne pas définir l'échec scolaire à partir de l'enfant lui-même, mais en termes de performances attendues par le système scolaire. Cette notion d'échec se concrétisera donc d'un côté, par des lacunes plus ou moins grandes de savoir, des « déficits intellectuels », et de l'autre, par des comportements non conformes aux attentes du système scolaire. A l'examen donc des facteurs déterminants de ces situations d'échec, effectivement, ceux qui s'avèrent les plus prégnants sont d'abord d'ordre social (tableau 3).

3

TAUX DE RETARD SCOLAIRE ET CATEGORIE SOCIO-PROFESSIONNELLE DES PARENTS SUR UNE POPULATION DE PRES DE TRENTE MILLE ELEVES DANS LA REGION DE VALENCIENNES (NORD)

Catégorie socio-professionnelle CSP	Répartition des élèves dans chaque CSP : %		Enfants en retard : %	Effectifs
Agriculteurs	1,5		11,4	428
Cadres supérieurs	4,7	14,7	4,7	1 400
Cadres moyens	10		8,8	3 006
Commerçants, Artisans	4,4		16,8	1 306
Employés	6,7	14,4	16,3	2 001
Personnel de service	3,3		18,1	991
Ouvriers qualifiés, maîtrise	31,3		24,4	9 319
Manoeuvres	25,2		36,8	7 563
Mineurs	9,4	69,4	42,2	2 821
Retraités	3,4		42,0	1 021
Décédés	0,1		53,5	43
TOTAL		100		29 975

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

D'emblée, il apparaît que les pourcentages de retards scolaires sont particulièrement élevés chez les enfants issus de parents employés, commerçants ou personnel de service et ces pourcentages le sont davantage pour la catégorie des ouvriers, manœuvres ou retraités.

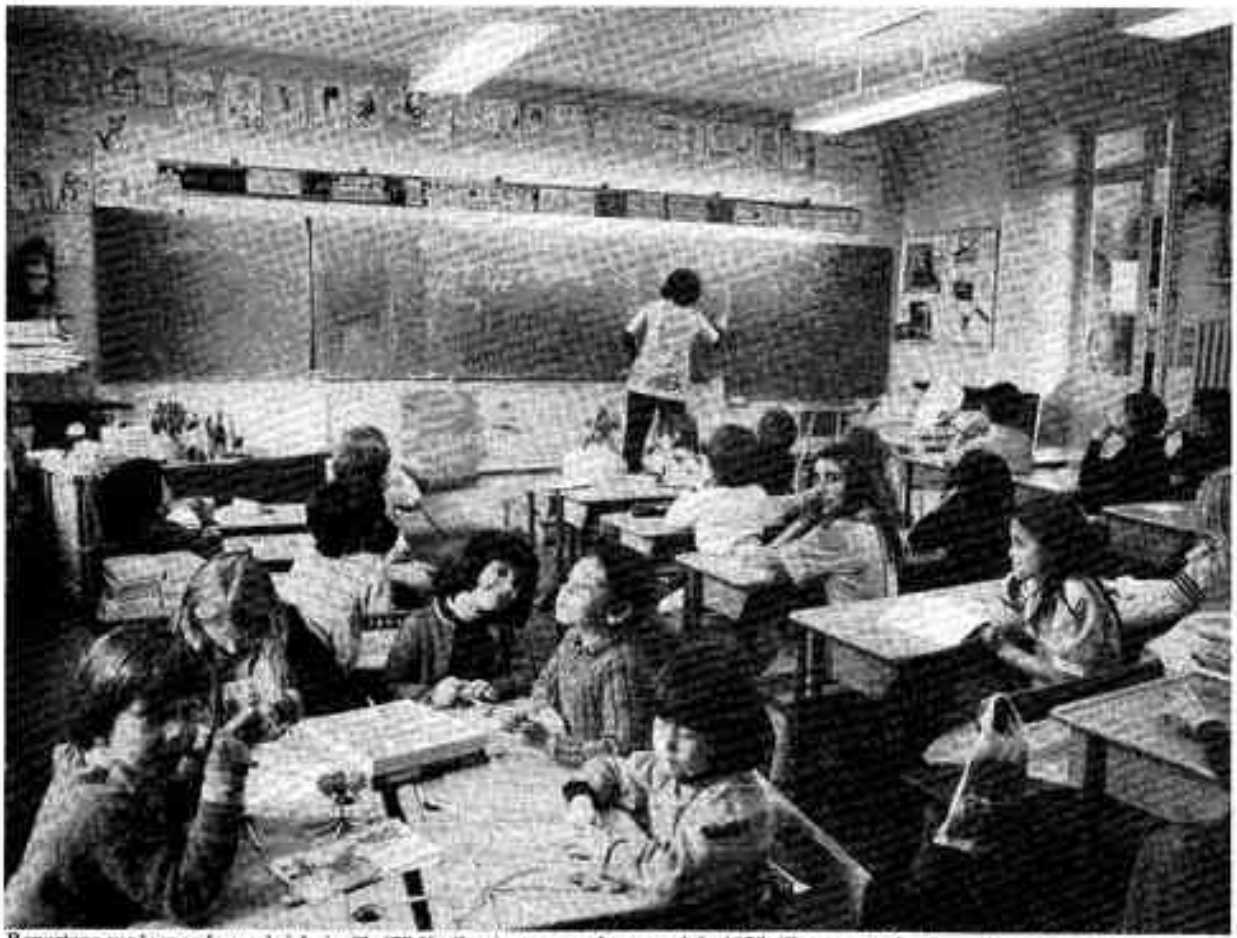
Ce type d'études manifeste donc une forte « dépression » des élèves issus de milieux économiques défavorisés. En revanche, dans les notations élevées, on trouve régulièrement les enfants dont les parents sont cadres supérieurs ou moyens. Sans doute, y a-t-il renforcement du travail scolaire sous la pression familiale. Sans doute, existe-t-il encore un effet « Pygmalion » dans la perception que se font les enseignants de l'aptitude des enfants, compte tenu de ce qu'ils savent ou se représentent des milieux d'origine. Mais toutes ces études et d'autres, en particulier portant sur les corrélations avec la nationalité d'origine, la taille de la famille et le suivi du travail scolaire, suggèrent quelques remarques supplémentaires.

En premier lieu, l'activité professionnelle de la mère se révèle être un facteur négatif dans les catégories socio-professionnelles inférieures ou moyennes mais elle devient un facteur positif dans les catégories plus élevées. De même, nationalité et culture d'origine n'ont pas un grand pouvoir explicatif des difficultés scolaires. Par contre, les mêmes études font ressortir l'importance du rôle joué par la distance culturelle, en particulier en ce qui concerne les enfants d'origine maghrébine. Le handicap essentiel des enfants de migrants s'exprime ainsi davantage en termes socio-culturels qu'en termes économiques. C'est de tout un rapport à une culture qu'il s'agit. Autant l'école, selon la tradition française, s'affirme comme lieu de nivellement des inégalités économiques ; autant, expression d'une culture dominante et voulue uniforme, ravive-t-elle les inégalités culturelles.

Les trois quarts des enfants étrangers ont ainsi, dès l'entrée dans le second cycle, au moins un an de retard. Ceci va entraîner pour ces enfants, des conséquences immédiates et drastiques au plan des orientations qu'ils subiront dans le maquis des filières scolaires (tableau 4).

ANNEES SCOLAIRES 1975/1976 ET 1977/1978 — 4

Ensemble du second cycle		Second cycle %		
		long général	long technique	court
Population scolaire totale	= (100%)	39,35	17,52	43,13
Elèves français	= (100%)	40,40	17,82	41,78
Elèves étrangers	= (100%)	19,85	11,67	68,48
Orientation après 3e		Secondes A-AB-C	Secondes T et B	Second cycle court
Ensemble des élèves	= (100%)	56,81	14,83	29,36
Enfants d'ouvriers qualifiés	= (100%)	42,36	16,06	40,80
Enfants de manœuvres	= (100%)	33,28	14,32	52,40



Reportage sur le monde rural, à Lainville (78 Yvelines), et ses environs, en juin 1978. (Documentation française, Ministère de l'agriculture – Photo : J.P. Verney).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Il est à noter ainsi le nombre considérable d'enfants étrangers orientés vers le second cycle court. La plupart des enfants de migrants ont, semble-t-il, un destin scolaire « tout tracé » : filières spécifiques, études écourtées. Et, ces études, non moins spécifiquement, sont en général de type technique. Ces orientations, imposées par le système éducatif, sont autant des révélations que des sanctions : sanctions vis-à-vis d'une non-conformité à la norme culturelle scolaire ; révélations d'une machinerie institutionnelle où la différence conduit souvent à la mise à l'écart. Il n'est guère surprenant alors, qu'en réaction, nombre d'enfants ou d'adolescents de cette seconde génération de l'immigration fassent retour à ce qu'ils jugent être leur culture d'origine.

Le problème de « l'identité culturelle » est ainsi sous-jacent à bien des analyses consacrées aux difficultés scolaires des enfants de migrants. Ce problème, éprouvé avec des pondérations plus ou moins fortes selon les cas et les situations, est en définitive commun à tous ces enfants de migrants dès leur entrée dans le système scolaire qui, pour eux, sera ressenti comme lieu de socialisation et d'inculcation culturelle étrangères. L'école, lieu de promotion sociale, symbole d'intégration et donc de réussite, peut s'avérer dès les premières difficultés, prétexte d'un rejet global de toute intégration et source donc de marginalisations futures. Ce phénomène est souvent évoqué dans les études consacrées à ce qu'on nomme le « problème de la seconde génération ».

Le maintien des liens avec les cultures d'origine

Une question essentielle se pose aujourd'hui en effet : celle du maintien ou non des liens des migrants avec la culture du pays d'origine et la nécessité d'analyser sous quelles formes ceci doit être opéré et organisé en fonction des effets attendus : enrichissement culturel, stabilisation socio-psychologique, préparation à un retour éventuel au pays d'origine.

Ainsi, en France, ont été mis en place depuis bientôt dix ans, des cours de langue et culture d'origine à l'intention des enfants de migrants maghrébins et portugais, dès l'école élémentaire. En ce qui concerne les enfants portugais, cette possibilité existe pour eux depuis 1973, réalisée sous forme de cours intégrés à l'horaire scolaire ou parallèles à celui-ci. On estime au moins à cinquante mille le nombre d'enfants bénéficiant de ces cours. Mais se pose encore la question de l'intégration de ces cours aux horaires normaux (formule préférentielle), celle de leur intégration pédagogique, éducative véritable, et donc l'intégration de cultures « autres » dans notre système scolaire.

Progressivement ainsi, s'impose une conception nouvelle, celle d'éducation « interculturelle », dont les acceptions demeurent cependant encore matière à développement.

Il s'agit en effet de repenser complètement les contextes culturels de nos différents systèmes éducatifs, compte tenu de cette présence de fortes communautés étrangères dont les cultures étaient jusque-là quelque peu ignorées par ces même systèmes. Il s'agit plus concrètement, d'assurer de façon optionnelle et généralisée, des « plages » temporelles permettant aux enfants de migrants de redécouvrir les cultures d'origine et aux enfants français de comprendre ces mêmes cultures. Ceci implique un certain nombre de remises en cause didactiques.

La première de ces remises en cause nécessaires est celle de l'ethnocentrisme jusqu'ici dominant dans nos contextes scolaires, en particulier au niveau de la rédaction des manuels et des formations continues d'enseignants. La seconde remise en cause indispensable est celle d'une révision de nos didactiques des langues. Il importe en effet, d'analyser conjointement les modalités d'enseignements de la langue du pays d'accueil – le français en l'occurence –, et celles de la langue d'origine. Ceci impose d'élaborer des outils spécifiques. La troisième remise en cause enfin souhaitable revient à l'établissement d'une harmonisation entre les différentes stratégies pédagogiques existant dans notre système, et en direction, cette fois, de processus véritablement centrés sur l'apprenant.

BIBLIOGRAPHIE

Boulot S., Fradet D., Scolarisation des enfants étrangers. Statistiques 1979-1980. *CREDIF-ENS* Saint-Cloud. 1980.

Munos M.C., La scolarisation des enfants de travailleurs migrants en France. *CIEMM*. 1978.

Pichoro R., Aspects socio-économiques et socio-culturels de l'échec scolaire. *Revue d'hygiène et de médecine scolaires*. 1980, XXXIII, 77-93.

Bulletin officiel du ministère de l'éducation nationale, 21.1.82.

Centre international de l'Enfance. *Les enfants de travailleurs migrants en Europe*. ESF. 1974.

Porcher L., La scolarisation des enfants étrangers en France. *Didier*. 1978.

Adolescents immigrés. Migrants Formation. 1978, n° 29-30. Jaroudi Adil. La nouvelle génération de l'immigration maghrébine. CIEM. 1982.

Mallet R., Les enfants de travailleurs migrants et l'enseignement secondaire. *L'orientation scolaire et professionnelle*. 1980, 9, n° 3.

Zirotti J.P., La scolarisation des enfants de travailleurs immigrés. Université de Nice. *Institut d'études et de recherches interethniques et interculturelles*. 1979.

Francequin Cellais G., Mazalejjat M.F., On n'a pas tous de la dire. Adolescence au CET. Maspero, 1979.

Malewska Peyre H., Zaroska M., Problèmes d'identité, conflits de valeur et déviance chez les enfants de travailleurs immigrés. *Service social dans le monde*, 1980, n° 1.

Malewska Peyre H., L'expérience du racisme et de la xénophobie chez les jeunes immigrés. *Annales de Vaucresson*. 1980, n° 17.

Scolarisation en maternelle et scolarité primaire. Le cas de l'arrondissement de Valenciennes. *Beture*, 1976.

Analyse de la division fonctionnelle d'un espace géographique. Etude des interactions société-famille-école. *Fotinos G.*, 1976.

Enquête sur le déroulement de la scolarité primaire dans le département de l'Aube. *Beture*, 1976.

La scolarisation des enfants de travailleurs migrants. Evaluation, sélection et orientation scolaire. *Idevir*, 1979.

Heurt M., Localisation des enfants de migrants dans le système scolaire. *Direction des écoles*, 1979.

Les jeunes immigrés. *CFRES*. Vaucresson, 1981.

Les jeunes immigrés : eux et nous. *CFRES*, Vaucresson.

Analyse bibliographique des travaux portant sur les jeunes immigrés de la deuxième génération. Situation en France - Retour au pays d'origine. *Société d'études pour le développement économique et social*. Paris, 1979.

Porcher L., L'éducation des enfants de travailleurs migrants en Europe : l'interculturalisme et la formation des enseignants, Strasbourg. *Conseil de la coopération culturelle*, 1981.

Vigneux G., L'éducation des enfants de migrants : problèmes et perspectives. *Conseil de l'Europe*, Strasbourg. 1983.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Le service national des champs intenses, Hochfeld-Magnetlabor de Grenoble

Dans cette course vers des champs magnétiques plus intenses, l'auteur nous explique pourquoi et comment le CNRS et la MPG ont unis leurs efforts au SNCI – HML pour parvenir au plus haut niveau de la compétition internationale.

Guy AUBERT

Créé en 1971 le Service national des champs intenses a pour mission essentielle de permettre la réalisation d'expériences sur la matière placée dans des conditions extrêmes de champ magnétique principalement, mais aussi de basse température et de haute pression.

En 1972, le CNRS et la Max Planck Gesellschaft (MPG) signèrent un contrat de dix ans pour le développement et l'exploitation en commun des installations. Cette collaboration franco-allemande permit d'équiper le laboratoire d'alimentations de 10 MW, le rendant ainsi compétitif avec le Francis Bitter national magnet laboratory (Etats-Unis) qui est le seul autre laboratoire de champs intenses dans le monde disposant d'une telle puissance installée. Le partenaire allemand du SNCI à Grenoble est le Hochfeld-Magnetlabor, rattaché au Max Planck Institut für Festkörperforschung de Stuttgart.

Le bilan des dix premières années de travail en commun s'est avéré particulièrement positif et le contrat entre le CNRS et la MPG a été prolongé pour dix nouvelles années jusqu'en 1992.

Actuellement quelque soixante chercheurs, ingénieurs et techniciens français et allemands travaillent de façon permanente et en étroite coopération dans le laboratoire. Ils y accueillent un grand nombre de scientifiques venus de France et de République fédérale allemande principalement mais aussi d'autres pays, et les assistent dans la réalisation de leurs expériences. De dix à vingt visiteurs sont ainsi présents en moyenne au SNCI-HML pour des séjours de durée très variable, entre quelques heures et plusieurs mois !

Un gros effort a été réalisé au cours des dernières années pour mettre à la disposition des visiteurs, outre les aimants, des équipements scientifiques annexes importants : lasers de l'infrarouge à l'ultra-violet, monochromateurs, cryostats, réfrigérateurs à dilution (réalisés grâce à la collaboration du Centre de recherche sur les très basses températures), équipements de spectroscopie Mössbauer, Raman, appareillages de mesures magnétiques sous diverses conditions de température et de pression, équipements de tests de matériaux supraconducteurs, ...

D'autres laboratoires en France et dans le monde ont mis au point et développent des dispositifs de production de champs magnétiques intenses transitoires de plus ou moins courte durée (de quelques μ s à quelques ms). Ces champs pulsés présentent un intérêt certain dans la mesure où l'on peut ainsi atteindre des niveaux de champ actuellement inaccessibles en continu. Cependant leur utilisation est réservée à certains types d'expériences compatibles avec le caractère transitoire du champ et qui fournissent des informations, certes précieuses, mais d'une précision très limitée.

Les champs magnétiques intenses jouent un rôle fondamental en recherche et en technologie L'énumération des domaines de recherche impliquant l'utilisation de champs magnétiques serait fort longue et fastidieuse et l'on se contentera de remarquer que la quasi totalité des disciplines, de la physique des particules à la biologie, y est représentée. Du point de vue de la technologie et des applications pratiques on trouve également un nombre considérable d'utilisations des champs magnétiques, et de nouvelles applications, souvent d'une grande importance pour le progrès de l'humanité, ne cessent d'apparaître.

□ Guy Aubert, professeur à l'Université de Grenoble, dirige le Service national des champs intenses de Grenoble.

La plupart des résultats, tant en recherche qu'en technologie, ont été obtenus au moyen de champs modestes, de l'ordre du tesla ou inférieurs (1T = 10.000 gauss ; le champ magnétique terrestre est de l'ordre de quelques dixièmes de gauss). Aussi, sans toutefois prétendre rivaliser avec les étoiles où peuvent régner des champs magnétiques de cent ou mille teslas, peut-on cependant se poser la question de l'intérêt des champs magnétiques intenses, c'est-à-dire dix teslas ou plus.

Le premier élément de réponse réside dans l'examen de quelques ordres de grandeur afin de bien mesurer la faiblesse des interactions magnétiques, faiblesse qui attestera de l'intérêt qu'il y a de disposer de champs magnétiques toujours plus intenses si l'on ne veut pas que ces interactions ne soient que de simples perturbations. L'énergie d'interaction d'un moment magnétique $\vec{\mu}$ avec un champ magnétique $\vec{B}$ est $-\vec{\mu} \cdot \vec{B}$. L'ordre de grandeur des moments magnétiques à l'échelle atomique est de magnéton de Bohr, $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0{,}9274.10^{-23}$ J/T ; les moments magnétique nucléaires sont quelque mille fois plus faibles car, dans l'expression du magnéton nucléaire qui fixe leur ordre de grandeur, la masse m_e de l'électron est remplacée par celle du proton $m_p \simeq 1836\ m_e$. Ainsi un moment de $1\mu_B$ placé dans un champ magnétique de 1T conduit à une énergie d'interaction de l'ordre de 10^{-23} J, c'est-à-dire de l'ordre du dix millième d'eV. Cette énergie est donc très faible par rapport aux énergies habituellement mises en jeu dans les atomes et les molécules pour lesquels l'électron volt est un bon ordre de grandeur. Dans les systèmes à très grand nombre de particules, en particulier la

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

matière condensée, l'un des paramètres importants est la température : le comportement de ces systèmes analysé dans le cadre de la thermodynamique statistique est gouverné par le rapport entre les énergies des interactions mises en jeu et kT (où T est la température thermodynamique et k la constante de Boltzmann, k = 1,3806.10^{-23} J/K). Ainsi à la température ambiante (environ 300 kelvins), kT est-il de l'ordre de 0,025 eV. Si, comme il est d'usage dans ce domaine, on utilise le kelvin comme « unité d'énergie » (en fait k × 1K), on voit que $1_{\mu B}$ dans 1T conduit à une énergie d'environ 1K, ce qui encore une fois démontre la faiblesse des interactions magnétiques et en même temps l'intérêt qu'il y aura de disposer simultanément de champs magnétiques intenses et de très basses températures.

Mais ne pourrait-on pas obtenir les mêmes résultats en utilisant des interactions autres que magnétiques, puisque celles-ci sont si faibles ? Sans vouloir entrer dans les détails, il suffit de rappeler que la symétrie des interactions magnétiques leur est particulière et qu'elles seules permettent d'accéder à certaines informations ou de produire certains effets.

Cette rapide discussion n'est certes pas une justification suffisante pour entreprendre une course difficile (et onéreuse) vers des champs magnétiques plus intenses. On trouvera en encadré quelques exemples précis de recherches pour lesquelles les champs magnétiques éventuellement associés aux très basses températures jouent un rôle déterminant. Pour plus d'information, on pourra consulter le très important rapport d'analyse et de prospective* intitulé « high magnetic field research and facilities » établi en 1979 à la demande du National research council des États-Unis par un groupe d'experts après une large consultation internationale.

Après le « pourquoi », voyons maintenant le « comment »

La solution la plus économique pour produire un champ magnétique de l'ordre du tesla dans un volume de quelques cm^3 est de construire un électroaimant mais, au-delà de 2 à 3 T, les matériaux ferromagnétiques constituant le circuit magnétique sont saturés, leur contribution au champ magnétique produit reste stationnaire et seule celle des courants parcourant les bobinages inducteurs peut continuer à augmenter. La quantité d'énergie dissipée par effet Joule devient alors très rapidement prohibitive car si la disposition de ces bobinages est très efficace pour aimanter le circuit magnétique, elle l'est beaucoup moins pour participer au champ dans le volume expérimental, contrairement aux systèmes ne comportant pas de matériaux magnétiques et dont les distributions de courant sont généralement étudiées pour une efficacité maximum. Le célèbre « grand électroaimant de Bellevue » (masse = 100 tonnes, puissance = 100 kW, environ 5T dans un entrefer de 10 mm) est un exemple de la technique des électroaimants dans une de ses réalisations les plus importantes et témoigne de l'intérêt soutenu de la recherche française pour les champs magnétiques intenses.

Si depuis quelques années des aimants supraconducteurs produisant une dizaine de teslas sont devenus des équipements quasi standard de laboratoire, atteindre et dépasser la zone des 15T nécessite, quelle que soit la technique utilisée, des investissements technologiques et financiers tels que tous les pays engagés dans ces développements (États-Unis, Union Soviétique, Angleterre, République fédérale allemande, Hollande, Japon, Pologne pour l'ensemble des pays de l'Est, France) ont concentré leurs efforts dans un petit nombre de laboratoires. Ces laboratoires sont chargés des études et de la réalisation des aimants et sont ouverts aux scientifiques visiteurs dont les propositions d'expériences utilisant ces aimants ont été acceptées. Les États-Unis ont été les pionniers dans ce domaine en fondant il y a cinquante ans au Massachusetts Institute of Technology, le Francis Bitter national magnet laboratory. Ce laboratoire est toujours resté le leader mondial et sa suprématie n'est actuellement contestée que par le Service national des champs intenses, Hochfeld magnetlabor de Grenoble.

les aimants résistifs

Les champs magnétiques intenses sont produits au moyen de solénoïdes sans fer parcourus par des courants électriques très importants. Bien qu'il ne soit pas question ici de faire une revue détaillée des diverses technologies qui ont été envisagées ou mises en œuvre, on ne peut manquer de remarquer que les premières tentatives en ce domaine furent françaises. Elles commencèrent par les travaux de C. Fabry qui publia en 1898 un article « Sur le champ magnétique au centre d'une bobine cylindrique et la construction des bobines de galvano-

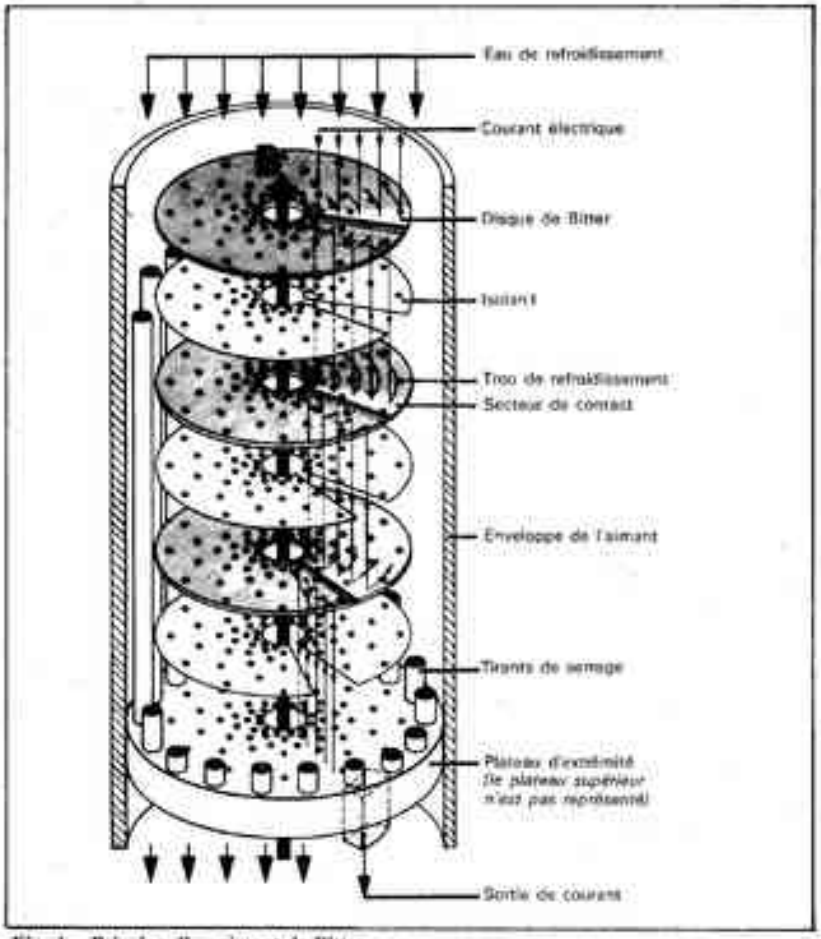


Fig. 1 – Principe d'un aimant de Bitter.

* disponible sur demande au SNCI.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

mètres ». Ses résultats concernant la conception de bobines de galvanomètres où la puissance dissipée peut être aussi faible que le picowatt furent utilisés plus tard pour l'étude de solénoïdes dissipant des mégawatts ! La première construction d'un solénoïde de grande puissance (20 mm de diamètre utile, 5 teslas, 340 kW) fut achevée en 1914 par Deslandres et Perot qui utilisaient la génératrice de courant du magasin « Au Bon Marché » à Paris. La guerre laissa malheureusement cette œuvre de pionniers sans lendemain.

Le premier problème que l'on rencontre dans la conception d'un aimant résistif est celui de l'évacuation de la chaleur produite par effet Joule dans le bobinage. Parmi les diverses solutions de compromis utilisables pour réaliser le plus grand champ possible dans un volume et avec une puissance donnés et qui prennent en compte les difficultés de construction et la durée de vie du système, celle proposée par F. Bitter en 1936 s'est très largement imposée. Le principe d'un aimant ou bobine de Bitter est présenté schématiquement sur la figure 1 : un grand nombre de disques de cuivre (quelques centaines, épaisseur de l'ordre du mm) et d'isolant (par exemple du kapton, épaisseur environ 100 µm) sont empilés de telle façon que le contact électrique entre deux disques de cuivre successifs soit assuré sur un secteur angulaire de recouvrement. Les lignes de courant sont ainsi approximativement hélicoïdales et génèrent un champ magnétique axial dans le volume cylindrique central. La puissance dissipée est extraite par de l'eau qui traverse l'empilement à grande vitesse (> 10m/s) par un grand nombre de petits trous (typiquement 1.000, diamètre de 1 à 2 mm). A cause de la très grande densité d'énergie à extraire, l'eau doit être en contact direct avec le conducteur. On utilise donc de l'eau désionisée dont la résistivité est en permanence contrôlée et maintenue à environ 5 MΩ.cm et qui circule en circuit fermé. La chaleur évacuée est transférée au moyen d'un échangeur à un circuit ouvert alimenté par l'eau de la rivière voisine. Les aimants de 10 MW sont en fait constitués de deux empilements concentriques dissipant 5 MW chacun. La photo 1 montre l'empilement interne d'un aimant de 10 MW produisant au total 20T dans un diamètre utile de 50 mm.

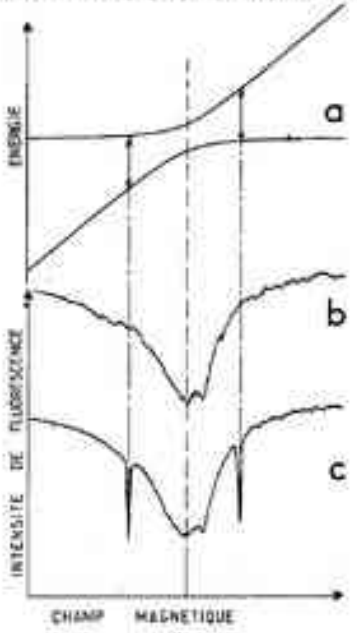
La puissance de 10 MW disponible au Francis Bitter NML aux Etats-Unis et au SNCI-HML de Grenoble a permis de pousser cette technologie jusqu'à sa limite ultime : le champ maximum réalisable dans un cylindre de quelques cm de diamètre (~ 50 mm) n'est plus en effet limité par la puissance mais par les contraintes imposées au bobinage par le champ magnétique lui-même (force de Laplace). Cette limite se situe aux environs de 20-30T. Plusieurs aimants de ce type ont été construits et peuvent être mis à la disposition des expérimentateurs sur huit sites différents. Avec moins de 5 MW on peut obtenir 15 T dans un diamètre utile de 50 mm, aussi pour les expériences ne nécessitant pas de champ plus élevé, deux aimants peuvent fonctionner simultanément en utilisant chacun deux alimentations de 2,5 MW en parallèle et deux pompes de circulation d'eau (chaque pompe du circuit d'eau désionisée a un débit de 100 m³/h sous 27 bars). Sans entrer dans les détails techniques il est important de mentionner quelques caractéris-

PHYSIQUE ATOMIQUE ET MOLECULAIRE : SPECTROSCOPIE PAR ANTICROISEMENTS DE NIVEAUX SINGULETS ET TRIPLETS

Les niveaux d'énergie des molécules stables dont tous les électrons sont appariés, se divisent essentiellement en deux catégories : les niveaux singulets, dont le spin électronique total est nul et qui sont amagnétiques (en première approximation car il existe des magnétismes orbitaux ou nucléaires plus faibles), et les niveaux triplets, de spin électronique total unité. Lorsque l'on applique un champ magnétique, seuls les nombreux triplets sont déplacés et l'on peut ainsi amener en coïncidence un niveau singulet et un niveau triplet. Si ces deux niveaux sont couplés, par l'interaction spin-orbite des électrons ou une interaction nucléaire habituellement plus faible, ils se repoussent, on dit qu'ils s'anticroisent, et se mélangent : les niveaux courbés au voisinage de l'anticroisement sont en partie singulet et en partie triplet (fig. a). On excite le niveau singulet, ou la partie singulet des niveaux mixtes à l'aide d'un laser (une décharge dans les premières expériences). Si la séparation des deux niveaux qui s'anticroisent est grande devant leur largeur, due essentiellement à l'effet Doppler dans les gaz, on peut voir directement la position de ces niveaux. Mais on s'est intéressé surtout au cas, très fréquent, où cette méthode directe est impossible. Le laser excite alors simultanément les deux niveaux et on se contente d'observer comment varie l'intensité totale de la fluorescence lorsque l'on balaye le champ au voisinage de l'anticroisement. Du fait que les niveaux sont mixtes, une partie de l'excitation apportée par le laser part par des voies de désexcitation triplet, non radiative ou radiative (phosphorescence) ce qui se traduit par une diminution de la fluorescence (fig. b).

On obtient des résultats beaucoup plus précis en induisant une transition radiofréquence entre les deux niveaux mixtes (il serait impossible de le faire entre un niveau singulet pur et un niveau triplet pur, c'est-à-dire en l'absence d'anticroisement) (fig. c).

La première application de ces techniques au SNCI a permis de déterminer pour la première fois de façon précise la position relative des niveaux singulets et triplets de la plus simple des molécules : H_2. Elles permettent maintenant d'étudier dans des molécules organiques intermédiaires (5 à 10 atomes) la structure des nombreux niveaux triplets qui se trouvent au voisinage du premier niveau singulet électroniquement excité : le passage entre ces niveaux singulets et triplets est responsable du phénomène de phosphorescence. Laboratoire de spectrométrie physique (LA 8) – SNCI.



a) Deux niveaux d'énergie (singulet et triplet dans le cas de la figure) se repoussent : on parle de « croisement évité » ou d'anticroisement. b) L'intensité de fluorescence passe par un minimum pour la valeur du champ magnétique qui correspond au centre de l'anticroisement (signal observé sur un niveau de rotation-vibration singulet de la molécule de glyoxal CHO-CHO excité par laser). c) Un champ de radiofréquence égalise les populations des deux niveaux qui s'anticroisent lorsque sa fréquence est égale à leur différence d'énergie. On observe alors deux minima étroits du signal de fluorescence.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

tiques des alimentations stabilisées à thyristors et transistors du SNCI-HML qui les rendent bien supérieures aux machines tournantes plus anciennes installées au Francis Bitter NML. Chaque alimentation (2,5 MW, 335 V, 7.500 A) a une stabilité à long terme (une journée) de $\pm 5.10^{-6}$ et peut être commandée ou modulée par une source de tension extérieure comme une alimentation standard de laboratoire (temps de montée de zéro au maximum : environ une minute). Pour certaines expériences, une régulation du champ, par un dispositif d'asservissement comportant une sonde RMN, permet d'obtenir une stabilité à long terme du champ de quelques 10^{-8}.

L'ensemble du système est contrôlé par un ordinateur qui reçoit trois fois par seconde des mesures de la tension, du courant, des températures d'entrée et de sortie d'eau dans chaque bobinage de l'aimant et qui décide des dispositions à prendre en cas d'anomalie. Cette surveillance permet de prolonger considérablement la durée de vie des aimants et le plus souvent de les démonter pour réparation avant qu'ils ne soient définitivement endommagés.

Revenons maintenant à la construction des aimants résistifs. Les aimants de Bitter dépassant difficilement 20T, une nouvelle technologie dite des aimants polyhélices a été développée au SNCI-HML. Cette technologie reprend une idée déjà ancienne mais qui n'avait jamais été complétement exploitée et n'avait pas donné lieu à des réalisations véritablement concluantes. Elle consiste à réaliser la partie interne de l'aimant qui est soumise aux contraintes les plus fortes, au moyen d'un ensemble d'hélices concentriques dont les dimensions sont calculées de façon à obtenir le champ maximum pour un niveau de contrainte identique dans chaque hélice. L'espace annulaire entre les hélices est utilisé pour la circulation de l'eau de refroidissement (figure 2, photo 2). L'optimisation des distributions de courant dans les hélices et dans la bobine de Bitter externe constitue, si l'on tient compte du niveau de contrainte imposé dans les hélices, un problème complexe dont la solution est maintenant bien maîtrisée. Le prix à payer pour obtenir plus de champ réside essentiellement dans une plus grande complexité de la construction qui a nécessité la mise au point de techniques variées et la solution du problème particulièrement délicat des amenées de courant dans les hélices.

Cet effort a abouti à la réalisation d'un aimant produisant 25T dans un diamètre utile de 50 mm qui détient pour l'instant le record mondial de champ des aimants résistifs. Dans la partie centrale de l'aimant, la densité de puissance dissipée est considérable (2 MW par litre) : elle est évacuée par une circulation d'eau à 20 m/s. La photo 3 démontre de façon éloquente les possibilités de cette nouvelle technologie : on y voit un aimant polyhélice et un aimant de Bitter qui produisent le même champ (15T) dans le même volume utile (diamètre 50 mm) en dissipant la même puissance (5 MW).

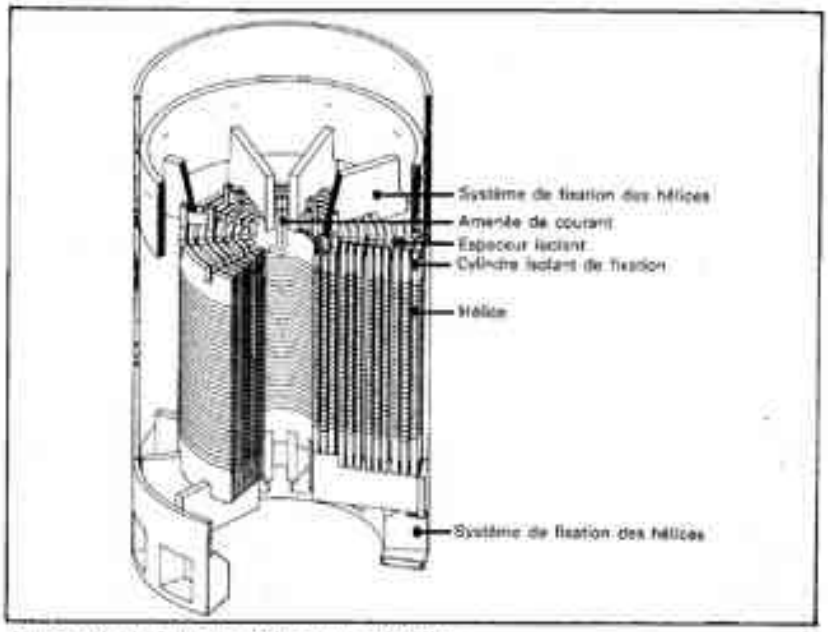


Fig. 2 – Vue schématique d'un aimant polyhélices.

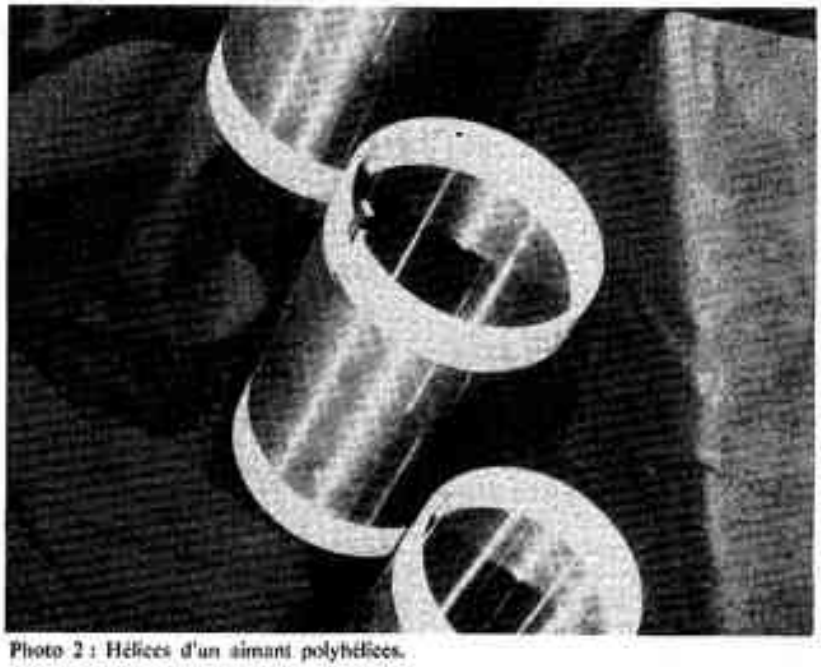


Photo 2 : Hélices d'un aimant polyhélices.

Pour conclure cette brève présentation des aimants résistifs du SNCI-HML, signalons que le temps d'expérience annuel se situe aux environs de 4.000 heures soit, en tenant compte des arrêts techniques, un taux d'utilisation d'environ 70 % ou 17 heures par jour en moyenne. L'énergie totale consommée par an approche 6 GWh et le coût électrique moyen d'une heure d'aimant résistif est d'environ 800 F.

Les aimants supraconducteurs

Les quelques considérations économiques précédentes amènent évidemment à rechercher une autre autre solution que l'utilisation des aimants résistifs pour la production de champs magnétiques intenses. Un programme important d'étude et de

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

construction d'aimants supraconducteurs a donc été mis en œuvre.

Rappelons brièvement que les matériaux supraconducteurs ont une résistivité nulle au-dessous d'une certaine température critique et peuvent transporter des courants électriques importants sans dissipation appréciable d'énergie. Ils constitueraient donc une solution idéale pour la réalisation de solénoïdes produisant des champs magnétiques intenses si la nature elle-même n'imposait pas d'autres limitations. En effet le matériau supraconducteur constituant l'aimant se trouve soumis au champ magnétique produit par celui-ci et au-delà d'un certain champ magnétique critique le matériau cesse d'être supraconducteur. Ajoutons à celà qu'il existe aussi une densité de courant critique que l'on ne peut dépasser sous peine également de voir cesser la supraconductivité du matériau. Champ critique et courant critique sont d'autant plus grands que la température est plus basse.

La technologie des aimants supraconducteurs est donc tributaire de la mise au point de matériaux à champ et courant critique élevés à la température du seul fluide cryogénique pratiquement utilisable, l'hélium 4 liquide dont la température d'ébullition est 4,2 K sous la pression normale. Les matériaux actuellement disponibles sur le marché sont essentiellement le NbTi et le Nb_3Sn.

Les progrès récents les plus importants portent sur le fonctionnement des aimants supraconducteurs dans un bain d'hélium liquide superfluide à 1,8 K sous pression ambiante, suivant une technique imaginée par des ingénieurs du Commissariat à l'énergie atomique et développée depuis par le SNCI-HML en collaboration avec le laboratoire de cryotechnologie du Centre d'études nucléaires de Grenoble. Pour tirer le maximum de profit de cette technique, les bobinages supraconducteurs doivent être conçus de telle façon que l'hélium superfluide puisse être en contact avec le conducteur sur une surface maximum. Très schématiquement, l'hélium superfluide peut alors évacuer très rapidement la chaleur dissipée localement en des points du matériau proches de la transition entre les états normal et supraconducteur, ce qui évite la propagation de cette transition à l'ensemble du bobinage.

Le plus gros aimant supraconducteur actuellement installé au SNCI-HML produit un champ de 10T dans un diamètre utile de 325 mm dans le bain d'hélium superfluide. Dans ce

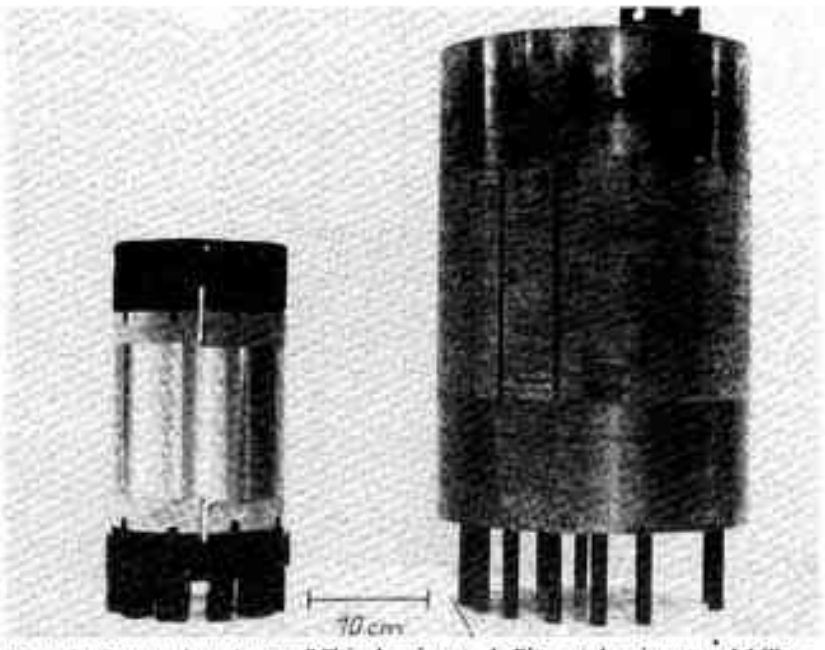
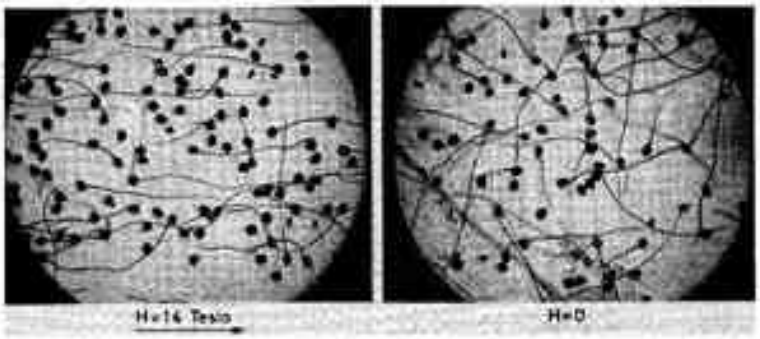


Photo 3 : Comparaison des possibilités des aimants de Bitter et des aimants polyhélices.

LES CHAMPS MAGNETIQUES INTENSES EN BIOPHYSIQUE

Les champs magnétiques intenses sont également devenus un outil d'étude en biophysique et en physique des macromolécules. Ceci est essentiellement dû au fait que des grandes structures organisées et anisotropes peuvent être alignées sous champ, phénomène déjà connu dans les cristaux liquides. La figure montre que la croissance cellulaire peut être orientée par un champ magnétique : la partie droite est une photo au microscope de grain de pollen de fleur de lys (*Lilium longiflorum*) avec leurs tubes monocellulaires qui ont poussé pendant quelques heures en milieu isotope : à gauche la même expérience faite dans un champ magnétique de 14 T met en évidence la croissance orientée.

Les processus microscopiques responsables de ce « magnétotropisme » ne sont pas encore élucidés. C'est l'une des raisons pour lesquelles on étudie les anisotropies diamagnétiques d'un grand nombre de macromolécules biologiques telles que des acides nucléiques, des polypeptides et des polysaccharides mais aussi de virus, de membranes, de micelles et de microémulsions. Tant que ces objets sont en suspension diluée dans une solution, donc sans interactions mutuelles appréciables, l'orientation reste faible même en champ intense. Celle-ci peut néanmoins être détectée par des méthodes optiques de biréfringence. Elle fournit des informations sur la flexibilité, la forme de la structure interne de ces molécules dans leur milieu « naturel ». Par ailleurs l'orientation magnétique peut devenir très efficace à haute concentration, les grosses molécules allongées ont en effet tendance à s'aligner mutuellement. On peut ainsi produire des phases condensées avec un très haut degré d'ordre orientationnel notamment des gels de fibrine, des fibres cristallines de virus ou encore des fibres amorphes de certains polyesters. De tels échantillons sont parfois très précieux pour les études de structures par des méthodes de diffraction. HML – MPL



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

volume disponible, deux autres aimants, l'un en NbTi, l'autre en Nb_3Sn peuvent être insérés pour produire soit 11T dans un diamètre de 254 mm soit 14T dans un diamètre de 120 mm respectivement. Un bobinage intermédiaire en Nb_3Sn est actuellement programmé qui, utilisé conjointement avec les deux précédents dans l'aimant principal, devrait conduire au total à 16,5T dans le diamètre de 120 mm, mettant l'ensemble au niveau du record mondial actuellement détenu par le Japon. Par ailleurs un petit aimant en V_3Ga a été réalisé et a produit 3,5T supplémentaires dans le champ de 13T d'un aimant de Bitter. Les propriétés du V_3Ga permettent d'estimer qu'il pourra maintenir ce niveau de performance dans le champ de 16,5T précédent et sans doute d'atteindre pour la première fois au monde 20T dans 20 mm de diamètre utile au moyen d'un aimant supraconducteur.

L'aimant hybride

La recherche de champs magnétiques continus de plus en plus élevés conduit tout naturellement à l'utilisation conjointe des deux technologies. En effet, dépasser 25T avec un aimant résistif conduirait à des puissances prohibitives si l'on veut conserver un diamètre utile suffisant pour y réaliser des expériences. Par exemple un champ de 30T nécessiterait pour un aimant polyhélices optimal une puissance de 20 MW et il faudrait doubler cette puissance ainsi que les installations hydrauliques correspondantes pour gagner encore 5T. On arrive donc au concept d'un aimant hybride dans lequel l'aimant résistif est entouré d'un aimant supraconducteur qui se trouve ainsi placé dans une zone de champ suffisamment faible pour permettre son fonctionnement. Cette idée fut proposée pour la première fois en 1966 et a été mise en œuvre dans plusieurs laboratoires de champs intenses, en particulier par ceux qui ne disposaient pas d'une puissance installée très importante. Par exemple, le laboratoire de Nimègue (puissance installée 6 MW) possède un aimant hybride, construit par le Francis Bitter NML, qui produit 25,5T dans un diamètre utile de 32 mm, la contribution de l'aimant supraconducteur étant de 8,5T.

Le record mondial de champ est actuellement détenu par l'aimant hybride du Francis Bitter NML avec 29T dans un diamètre utile de 33 mm, l'aimant supraconducteur fournissant pour sa part 7,9T.

Le CNRS et la MPG ont décidé récemment la construction d'un aimant hybride au SNCI-HML de Grenoble.

L'HYDROGENE ATOMIQUE POLARISE

Les systèmes physiques élémentaires tels que noyaux, atomes et molécules peuvent être classés, suivant la valeur de leur nombre de spin total I en bosons (I entier) et fermions (I demi-entier). Ces deux types de systèmes obéissent à des statistiques quantiques distinctes, d'où des propriétés physiques différentes, en particulier à basse température. Ainsi les bosons commencent à une température T_c pour une densité n donnée, à se rassembler dans un même état quantique, devant conférer à ce condensat des propriétés très particulières dans le comportement collectif de ses constituants. Bien que prévue de longue date, cette condensation de Bose-Einstein n'a été observée que sur un système condensé (^{4}He), jamais sur un système gazeux. La condensation de Bose-Einstein en phase gazeuse reste donc comme un défit expérimental de grand intérêt théorique.

L'hydrogène atomique, composé de deux particules de spin 1/2 (noyau et électron) représente le boson le plus simple que l'on puisse étudier à basse température et en phase gazeuse, donc dans un état de faible interaction entre particules. L'hydrogène atomique est cependant un système particulièrement instable, qui tend à former des molécules d'hydrogène suivant une réaction très énergétique : $H + H \rightarrow H_2 + 4,5$ eV (~ 54000 K). Cette difficulté peut être partiellement surmontée en considérant l'hydrogène atomique polarisé sous champ magnétique intense. Le comportement à basse température de l'hydrogène atomique polarisé et l'accès à sa condensation, initiée par un groupe de chercheurs à Amsterdam est actuellement étudié par plusieurs groupes (Amsterdam, Cornell, UBC Vancouver) et dans un projet commun CRTBT-SNCI à Grenoble. Cette étude nécessite la mise en œuvre de techniques de pointe dans le domaine des très hauts champs magnétiques disponibles dans un grand volume et des très basses températures. Le principe expérimental est brièvement développé ci-dessous.

L'hydrogène atomique, produit par décharge microonde à température ordinaire est polarisé ($H\downarrow$) par un champ magnétique $\vec{B}$. L'hydrogène existe alors sous quatre états hyperfins /a>, /b>, /c> et /d>. Les états /c> et /d> qui sont repoussés par les champs magnétiques élevés permettent l'isolement des états /a> et /b>.

L'état /a> qui, en raison du couplage hyperfin électron-noyau possède une composante de spin électronique antiparallèle à celle de /b> peut donner lieu à une réaction de recombinaison /a>, /a> ou /a>, /b>. Cette recombinaison sera d'autant moins importante que est plus faible ($\epsilon \propto B^{-1}$), d'où l'intérêt de travailler à champ magnétique aussi élevé que possible.

L'hydrogène atomique polarisé, qui s'enrichit en état /b> sous l'effet de la relaxation nucléaire /b>→/a> et de la réaction de recombinaison qui détruit les atomes /a> doit être refroidi et acheminé vers une cellule située au point de champ magnétique le plus élevé (B~ 15,T). A ce niveau l'hydrogène peut être étudié du point de vue thermodynamique et magnétique. Avec une puissance de réfrigération suffisante pour évacuer la chaleur de recombinaison et en procédant à une compression mécanique ou magnétique, on peut espérer amener l'hydrogène atomique polarisé à une densité de 10^{19} cm^{-3} à T = 80 mK et observer les effets de la condensation.

Cette étude dont la condensation de Bose-Einstein peut être définie comme l'un des objectifs ultimes conduit à aborder un grand nombre de phénomènes annexes qui concernent la relaxation nucléaire de l'hydrogène à basse température, la cinétique de recombinaison de l'hydrogène polarisé, la thermodynamique d'absorption de l'hydrogène atomique sur ^{3}He et ^{4}He, l'analyse du couplage hyperfin électron noyau dans l'hydrogène atomique. CRTBT - SNCI.

$|a\rangle = |\downarrow\uparrow\rangle - \varepsilon|\uparrow\uparrow\rangle$

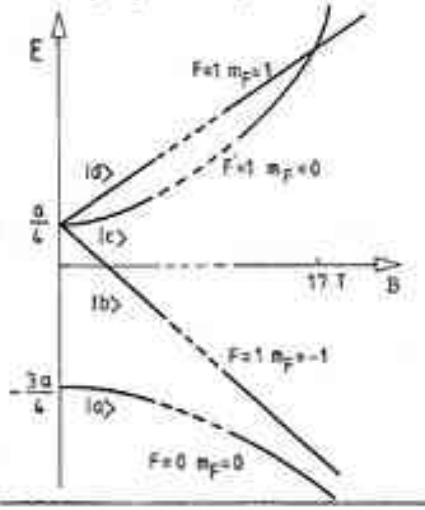
$|b\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle$

$|c\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle + \varepsilon|\downarrow\uparrow\rangle$

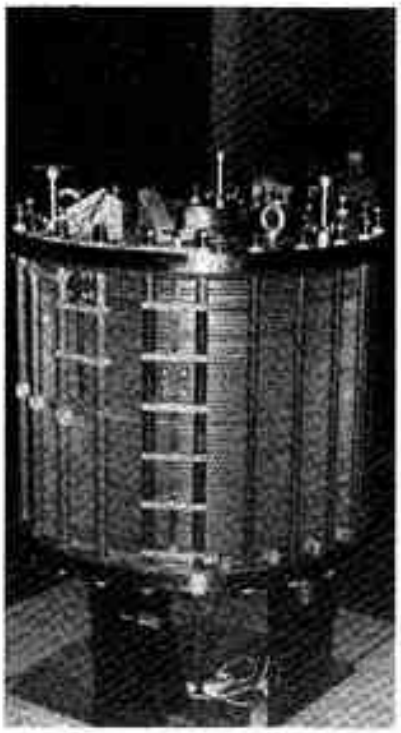
$|d\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle$

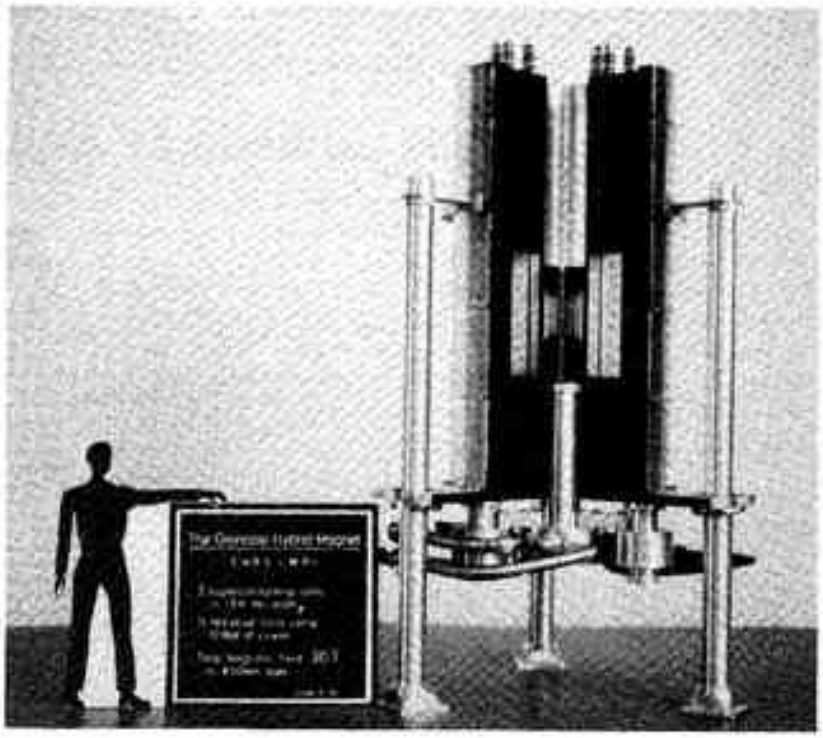
$\varepsilon \approx \frac{2,5\ 10^{-2}}{B}$

$a = 1,420$ GHz



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf





L'objectif final est 30T dans un diamètre utile de 50 mm et sa réalisation mettra à la disposition des expérimentateurs le plus grand champ magnétique continu dans le plus grand diamètre utile. Pour atteindre cet objectif les deux nouvelles technologies évoquées précédemment devront être mises en œuvre simultanément : la technologie polyhélices pour l'aimant résistif et le fonctionnement à 1,8 K dans l'hélium superfluide à la pression atmosphérique de l'aimant supraconducteur. Ce dernier produira 11T dans un diamètre a la température ambiante de 420 mm alors que l'aimant résistif composé de douze hélices et deux bobines de Bitter produira 19T avec une puissance de 10 MW environ. La photo 4 montre une vue de la maquette de l'aimant qui pèsera au total douze tonnes.

L'aimant supraconducteur est constitué de deux bobinages concentriques en NbTi. La photo 5 montre l'aimant extérieur, déjà construit, constitué d'un assemblage de galettes doubles. La masse totale du matériau supraconducteur utilisé est supérieure à trois tonnes. L'énergie stockée dans l'aimant supraconducteur sera de 22 MJ. Aussi des dispositifs ont-ils été mis au point pour extraire la plus grande partie de cette énergie en cas de transition provoquée, par exemple, par un incident sur l'aimant résistif ce qui évitera la vaporisation explosive d'une énorme quantité d'hélium. Une destruction partielle de l'aimant résistif aurait également pour conséquence de générer des forces considérables entre les deux aimants. La prise en compte de ces efforts a conduit à une conception particulièrement délicate du cryostat contenant l'aimant supraconducteur et des supports de celui-ci. Un système de contrôle relativement sophistiqué du fonctionnement de l'ensemble est en cours de mise au point. Piloté par un ordinateur, il sera chargé d'éviter toute fausse manœuvre (l'aimant hybride du Francis Bitter NML vient précisément d'être gravement endommagé à la suite d'une banale erreur de branchement) et de prendre très rapidement les dispositions susceptibles d'éviter un incident majeur.

La construction de l'aimant hybride devrait s'achever vers la fin de 1983.

Il est bien sûr tentant de spéculer sur la possibilité de produire des champs magnétiques continus encore plus élevés. Avec une puissance disponible de 10 MW, la technologie polyhélices et un aimant supraconducteur en Nb_3Sn produisant 13T dans un diamètre utile de 500 mm, il est certainement possible d'obtenir 35T dans un diamètre utile de 50 mm. En réduisant ce diamètre à 25 mm, on peut envisager les 40T et peut-être davantage encore en admettant un fonctionnement limité à de courtes durées qui seraient toutefois bien plus importantes (quelques secondes ou minutes) que celles des champs pulsés usuels.

Pourquoi une telle course ?

Il ne s'agit évidemment pas de battre des records simplement pour la gloire. L'expérience montre que tout progrès technologique contribue à l'avancement de la science. Les projets d'expériences dans des champs de plus en plus intenses ne manquent pas et ce sont les chercheurs qui bénéficient les premiers de possibilités technologiques nouvelles qui récoltent la plus belle moisson de résultats.

Contrairement à ce qu'a pu dire le baron Pierre de Coubertin à propos des compétitions olympiques, dans le domaine de la recherche et de la technologie, participer ne constitue pas l'essentiel : il faut avant tout s'efforcer d'être le premier.

Photo 4 : Maquette de l'aimant hybride (hauteur totale 4 m, masse 12 tonnes).

Photo 5 : Bobinage supraconducteur externe de l'aimant hybride.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Les Éditions du CNRS

Ces ouvrages sont disponibles chez votre libraire habituel ou à la librairie du CNRS, 295, rue Saint Jacques – 75005 Paris – Tél. : 326.56.11.
Ils peuvent être consultés tous les jours, sauf samedis et dimanches, de 9 h à 12 h et de 13 h 30 à 17 h 30.

Mathématiques – Physique de base

Cours de l'école de microscopie électronique en science des matériaux. Bombannes 1981, édité par : Bernard Jouffrey, Alain Bourret, Christian Colliex – Principes de base, place importante donnée à la microscopie quantitative, application dans différents domaines (minéralogie, semiconducteurs,...), utilisation de l'information dans le traitement du signal et des images (optique de Fourier). – 16 × 24 / 636 p. / relié / 187 fig. / 11 tabl. / 58 pl. fig. et phot. – Prix : 150 F.

Mechanical behavior of anisotropic solids. Comportement mécanique des solides anisotropes, Colloque international du CNRS – n° 295 – Villars-de-Lans, 19-22 juin 1979, dir. : J.P. Boehler. Etude de l'anisotropie mécanique des solides : variation des propriétés mécanique (déformabilité, résistance,...) suivant l'orientation des sollicitations externes, aspects non-linéaires et inélastiques, état d'avancement des connaissances, échange interdisciplinaire entre théoriciens, expérimentateurs et ingénieurs. (49 communications dont 36 en anglais, résumés français-anglais), co-édition : Editions du CNRS – Martinus Nijhoff Publishers. – 16 × 24 / 960 p. / relié 372 fig. / 31 tabl. / 21 phot. – Prix : 550 F.

Modélisation mathématique et simulation des systèmes de l'environnement, dominante : eau et végétation (1er séminaire) – coordonnateur : J. Aguilar-Martin. Utilisation du traitement de l'information pour l'étude et la pratique de la modélisation et la simulation opérationnelle d'un système complet, rôle du modèle, de la connaissance de phénomènes fondamentaux à la simulation. – 16 × 24 / 216 p. / broché 51 fig. / 8 tabl. / 1 phot. / 2 cart. – Prix : 68 F.

La théorie de l'itération et ses applications. Colloque international du CNRS n° 332 – Toulouse, mai 1982. Discipline en plein essor réunissant le concours de plusieurs spécialités, base mathématique portant sur les différents aspects de la théorie de l'itération, processus chaotiques dans les systèmes non linéaires, attracteurs étranges, application en mécanique, biologie, médecine... (34 communications dont 15 en anglais). – 16 × 24 / 284 p. / dos collé 49 fig. / 1 tabl. – Prix : 95 F.

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

Phénomènes karstiques III – mémoires et documents de géographie – dir. : Jean Nicod. Exemples choisis de karsts méditerranéens et tropicaux permettant de dégager quelques problèmes d'évolution : karst et volcanisme, néotectonique, processus morphoclimatiques dans les karsts tropicaux, rôle de la corrosion sous couverture pédologique ou détritique, problèmes des tufs et travertins. – 21 × 27 / 204 p. / dos collé 84 fig. / 5 tabl. / 4 phot. / 4 Cart / 13 pl. phot. / 3 cart. encart. – Prix : 180 F.

Cahiers de micropaléontologie/3ème partie, 1/1982. – 8ème colloque africain de micropaléontologie/3ème partie, Paris, 18-19 juillet 1980. Travaux effectués en Egypte, un nouveau genre d'ostracode du Maestrichtien, ostracodes du tertiaire inférieur, étude des nannofossiles calcaires et des foraminifères planctoniques du paléocène et de l'éocène inférieur de la coupe de Taramsa, ouest de Quena, vallée du Nil, biostratigraphie d'une série Eocène dans un sondage de la région de Chebin el-kom, delta du Nil, etc... (9 communications dont 1 en anglais, résulés français-anglais). – 21 × 27 / 140 p. / dos collé 22 fig. / 12 tabl. / 10 cart. 15 pl. phot. – Prix : 100 F.

Chimie

Corrosion et protection des métaux – Gérard Béranger, Francis Dabosi. Processus de corrosion et mécanismes de protection dans les milieux aqueux, méthodes de caractérisation et d'estimation des cinétiques de dégradation, appréciation objective des solutions envisageables, qu'est-ce que la corrosion ? Structure des métaux et alliages, diagrammes d'équilibres et de phases, principales transformations. – 16 × 24 / 396 p. / broché 190 fig. / 18 tabl. / 4 pl. phot. – Prix : 150 F.

Sciences de l'homme et de la société

Atlas historique des villes de France sous la direction de Ch. Higounet, J.B. Marquette et Ph. Wolff. Etudes graphiques en huit couleurs de cartographie historique, présentation de types de villes, développement topographique avant l'ère industrielle, plan, structure parcellaire, chronologie monumentale sur fond cadastral ancien au 1/2500e, notice. – 32 × 42 / notices, cartes, légendes sous dossier. Foix (Ariège) : naissance de la ville au XIIème siècle – Prix : 48 F. Pau (Pyrénées atlantiques) : dernière des capitales du Béarn, développement tardif – Prix : 48 F. Tarbes (Hautes Pyrénées) : plus agrégat de villes que ville unique à l'époque médiévale – Prix : 48 F. Auch (Gers) : existant avant la conquête romaine, expansion urbaine dès la fin du XIème siècle – Prix : 48 F. Bayonne (Pyrénées atlantiques) : site occupé dès l'époque préhistorique, castrum à l'époque romaine, renaissance urbaine aux XIème et XIIème siècles – Prix : 48 F.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Table trentennale des publications de la société de l'histoire de Paris et de l'Ile-de-France – Cinquième série (1934-1978). Mise à jour de la table des études en histoire parisienne (archéologie, topographie, histoire de l'art, politique, économie, religieuse, sociale), présentation par ordre alphabétique des titres d'articles, accompagnés d'un résumé succint, références données : tome, année, page. – 16 × 24 / 40 p. / broché. – Prix : 25 F.

Paroisses et communes de France – Dictionnaire d'histoire administrative et démographique, Lozère, René-Jean Bernard – dir. : Jean-Pierre Bardet. – Evolution des communes de l'ancien régime à nos jours (politique, juridique, ecclésiastique, administrative, démographique, introduction : histoire, archives, sources diverses, cartes historiques, statistiques, démographiques (présentation de chaque commune par un tableau). – 16 × 24 / 316 p. / relié / Tabl. / cart. – Prix : 110 F.

Familles patriciennes de Périgueux à la fin du Moyen Age. Arlette Higounet-Nadal. – Quatre modèles de familles bourgeoises de cette ville, alors à la frontière des dominations française et anglaise ; leur reconstitution à l'aide des documents de la pratique et municipaux : diversité des origines et des mutations sociales ; un exemple dans l'histoire des sociétés urbaines de la France médiévale. Les ségui, clercs et marchands, les Chaumont, marchands et terriens, les La Roche, chevaliers et bourgeois, les Bernabé, une ascension sociale. – 17 × 26 / 152 p. / broché / 28 fig. / 1 tabl. – Prix : 95 F.

Les villes dans le monde ibérique. Actes du colloque de Talence/nov. 1980. – Recherches pluridisciplinaires sur un thème commun. Fonctions administratives, politiques, économiques et sociales des villes ibériques. Représentations littéraires et imaginaires de la ville. Evolution récente de quelques grands noyaux urbains. Evolution historique : Antiquité, Moyen-Age. Littérature et imaginaire de la ville. La ville et le corps social : administration, comportement électoral, criminalité. – 21 × 29,7 / 236 p. / broché / 11 fig. / 12 tabl. / 1 cart. dépl. / 14 phot. – Prix : 150 F.

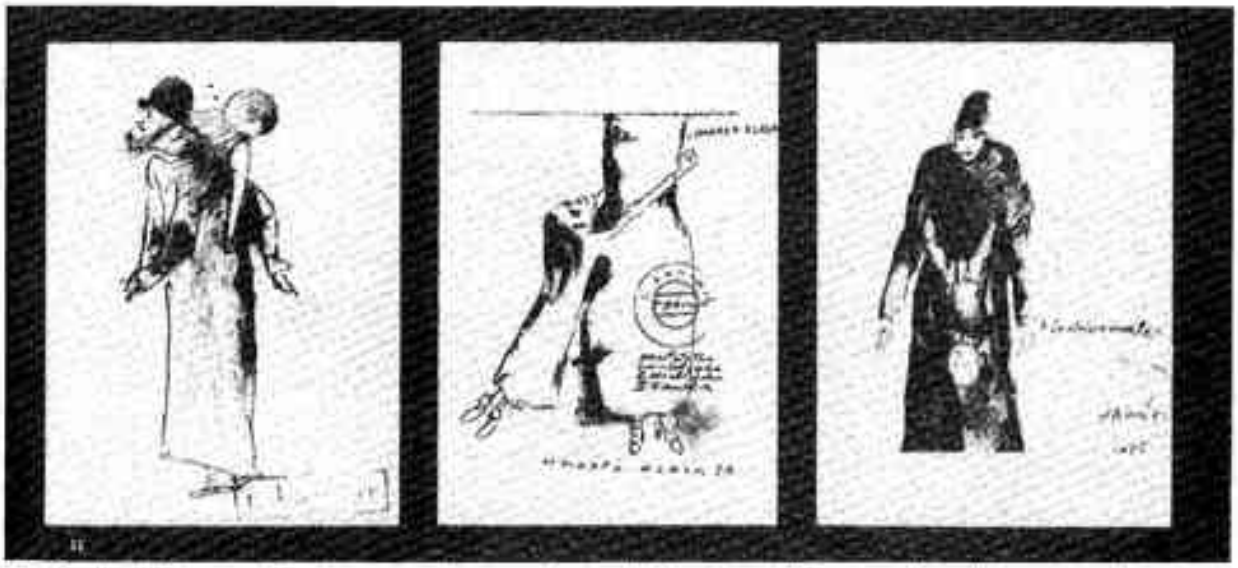
Recueil des instructions données aux ambassadeurs et ministres de France. Des traités de Westpalie jusqu'à la Révolution française – XXX : suisse – tome 1 : les XIII cantons. Georges Livet. Rôle joué dans l'Europe moderne par la confédération (stipulation du traité de paix perpétuel (1516), alliances renouvelées avec les rois de France). Evolution des relations, continuité du dessein, discontinuité des motivations. – 16 × 25 / 622 p. / relié / 1 cart. – Prix : 320 F.

Les voies de la création théâtrale/XI T. Kantor. Resp. : Denis Bablet. Tadeusz Kantor : un des hommes de théâtre les plus importants de notre temps, peintre, metteur en scène, scénographe, créateur au sens complet et animateur du théâtre Cricot 2 ; ensemble de textes centrés sur sa démarche radicale et l'histoire de son théâtre, sur deux spectacles : la classe morte, Wielopole-Wielopole. – 21 × 27 / 288 p. / relié / 14 fig. / 105 phot. / 26 pl. phot. et fig. – Prix : 140 F.

Le développement des sciences sociales en France. Au tournant des années soixante, table ronde janvier 1981 – dir. : Alain Drouard. Liens complexes entre la demande sociale et l'essor des sciences sociales en France au tournant des années soixante ; mise en perspective historique du développement institutionnel et scientifique des disciplines suivantes : économie, sociologie, psychologie sociale. – 16 × 24 / 192 p. / broché. – Prix : 80 F.

Droit international privé. Travaux du comité français de droit international privé années 1980-1981. Ouvrage collectif. Réflexions sur l'espace juridique européen en matière civile et commerciale ; rétrospective du droit belge ; interrogations sur le conflit des lois, le mariage polygamique ; évolution du droit de la vente internationale. 150 ans de droit international privé belge, la règle de conflit est-elle une règle neutre ? aspects récents du droit de la vente commerciale internationale, le mariage polygamique en droit international privé. – 16 × 24 / 120 p. / broché. : Prix 55 F.

L'obligation alimentaire. Etude de droit interne comparé, vol. 1 : Canada, Etats-Unis, Royaume-Unis de Grande-Bretagne. Ouvrage collectif. Trois pays de Common Law (Canada, Etats-Unis, Royaume-Unis de Grande Bretagne) pour le premier ouvrage de cette série ; recherche comparative des droits interne ; ambiguïté de l'obligation alimentaire ; entre les droits privé et public ; d'un système à l'autre, évolution : remplacement de la solidarité privée par les autorités étatiques. – 16 × 24 / 564 p. / broché. – Prix : 150 F.



Esquisses de T. Kantor pour les personnages et les mannequins en cire des enfants qu'ils furent : « ... les enfants morts pendent, s'accrochent à bout de force, on en traîne d'autres comme un fardeau, comme la mauvaise consciences, comme un « boulet au pieds (...) ».

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Protection magique contre les épidémies (Masumi yûranki, NB).

Accumulation et répartition des patrimoines. Colloque international du CNRS n° 581 – juillet 1978. D. Kessler, A. Masson, D. Strauss-Kahn, préface : A. Babeau. Définitions et mesures ; comparaisons internationales ; facteurs d'épargne et d'accumulation ; facteurs et évolution des inégalités ; rôle de l'imposition et des transferts sociaux ; méthodes d'estimation de l'épargne et des patrimoines ; prévoyance collective et imposition des patrimoines ; modèles d'accumulation, répartition et inégalité des patrimoines. (21 communications dont 12 en anglais, résumés français-anglais). – 16 × 24 / 610 p. / broché / 25 fig. / 119 Tabl. – Prix : 98 F.

Archives parlementaires de 1787 à 1860. Recueil complet des débats législatifs et politiques des chambres françaises – 1ère série (1787 à 1799)/ tome XCIII du 21 messidor au 12 thermidor an II (9 juillet au 30 juillet 1794). Ouvrage collectif. Analyse des séances, procès-verbaux des délibérations, dans l'ordre chronologique, apport à l'histoire politique, militaire, religieuse, sociale et économique (chute de Robespierre). – 19 × 28 / 776 p. / broché. – Prix : 380 F.

Frontières du conte. Ouvrage collectif. Essais sur un genre protéiforme : existe-t-il un dénominateur commun du lai de Guingamor au Petit Chaperon rouge, des nouvelles de Bonaventure des Périers aux trois contes de Flaubert ? Rapports avec le merveilleux, le fantastique et le réalisme, l'histoire ou la fiction. – 17 × 25 / 184 p. / dos collé. – Prix : 60 F.

Admonester – du pouvoir discrétionnaire des organes de police. Henri Souchon. Etude comparative des modalités pratiques de l'admonestation (1979-1981), France, Royaume-Unis, Canada) ; qui pratique l'admonestation, étendue, limites du pouvoir d'initiative policier ? qui admoneste-t-on, pour quels motifs ? techniques mises en œuvre, moyens, attitudes ?. – 17 × 25 / 208 p. / dos collé / 3 fig. / 41 tabl. – Prix : 60 F.

Tables du journal le Temps, vol. X (1898-1900), introduction : Pierre Albert. Fidélité à la politique gouvernementale : condamnation des révolutionnaires socialistes et des agitateurs nationalistes ; pourtant, dès juin 1899, soutien du cabinet Waldeck-Rousseau ; défense de l'expansion coloniale, fidélité à l'alliance russe, inquiétude devant l'impérialisme britannique ; dès 1900 : place prépondérante donnée à l'exposition universelle. – 16 × 25 / 1298 p. / relié. – Prix : 650 F.

Neopolis. Les laboratoires de recherche fondamentale : de l'atelier à l'usine. G. Lemaine, Gérard Darmon, Saba El Nemer. Organisation du travail dans les laboratoires de recherche fondamentale ; étude comparative du fonctionnement de laboratoires de tailles différentes ; rapport entre chercheurs et techniciens dans le travail ; effets des facteurs organisationnels et institutionnels dans les stratégies des chercheurs. – 16 24 / 216 p. / broché / 17 fig. / 5 tabl. – Prix : 88 F.

Pèlerinage aux neuf sommets. Carnet de route d'un religieux itinérant dans le japon du XIXéme siècle. Hartmut O. Rotermund. Mise en valeur d'un document unique parmi les matériaux ayant trait aux religieux japonais dits Yamabushi ; analyse du carnet de route d'un de ces Yamabushi du début du 19éme siècle ; meilleure connaissance de la vie quotidienne d'un pèlerin ; à travers rapports entre moine itinérant et population, tableau de la société rurale à la fin de l'époque féodale. – 16 × 24/ 484 p. / broché / 6 cart. / 85 pl. phot. – Prix : 186 F.

Gallia préhistoire. Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine, tome 25 – fascicule 2/1982.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

Informations archéologiques pour les circonscriptions des antiquités préhistoriques (des origines à la fin de l'age du bronze) ; inventaire et étude des vestiges. – 22 × 27,5 / 316 p. / broché / 109 fig. / 3 tabl. / 2 cart. / 113 phot. / 59 pl. phot. fig. – Prix : 320 F.

Gallia. Tome 40, fasc. 2/1982. Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine de l'antiquité classique au 8ème siècle après J.C. Jean-Bernard Devages (1938-1981) ; tissu découvert dans les fouilles du port antique de Marseille, sarcophage en plomb ouvragé découvert à Cenon (Gironde) ; petit masque en tôle de bronze découvert à Genainville (Val d'oise) ; informations archéologiques (par circonscriptions). – 22 × 28 / 212 p. / broché / 78 fig. / 1 tabl. / 1 cart. / 92 phot. / 9 pl. phot. / 1 fig. dépl. ht. – Prix : 210 F.

Antiquités africaines Tome 18/1982. Recherches historiques et archéologiques sur l'Afrique du nord de la protohistoire jusqu'à la conquête arabe. In memoriam Yvonne Allais (1891-1981) ; observation sur les causes de la guerre de Tacfarinas ; la voie romaine de piedmont Sufetula-Masclianae (Djebel Mrhila, Tunisie centrale) ; franchissement des chotts du sud tunisien dans l'antiquité ; Lamasba : an ancien irrigation community ; etc... (9 articles dont 1 en anglais). – 22 × 28 / 184 p. / broché / 37 fig. / 19 tabl. / 33 phot. / 3 cart. / 8 pl. / 1 cart. dépl. ht. – Prix : 185 F.

Documentation de la Bible/2. Concordance de la cantilation des premiers prophètes Josué, Juges, Samuel et Rois. G.E. Weil, P. Riviere, M. Serfaty. Lecture liturgique publique faite sur un mode récitatif ; 2ème ouvrage d'une série destinée à publier les résultats des analyses automatiques portant sur le système des signes, élaborés par les scribes-massorètes de Tibériade, propres aux textes en prose de la Bible hébraïque. – 21 × 29,7 / 350 p. / dos collé. – Prix : 190 F.

Inventaire des mégalithes de la France. 7 – Aveyron. (I. L'ouest aveyronnais : Causses de Limoge et de Villeneuve) Jean Clottes et Claude Maurand. 92 dolmens et 2 menhirs recensés sur la bordure occidentale de l'Aveyron : nombreux monuments inédits ; leur situation dans le contexte du groupe mégalithique du Quercy par l'étude des architectures, des implantations, et des vestiges sépulcraux. (résumés français, anglais, allemand). – 22 × 28 / 136 p. / broché / 11 fig. / 1 tabl. / 2 cart. / 46 pl. fig. / 10 pl. phot. ht. – Prix : 115 F.

Mines et fonderies antiques de la Gaule. Table ronde Université de Toulouse-Le Mirail, novembre 1981 – resp. : Cl. Domergne. Conjonction des sciences et des techniques pour l'histoire et l'archéologie minières ; historique (1789-1960) : intérêt pour les travaux miniers antiques ; inventaires locaux (Bretagne, Limousin...), techniques (et leur évolution) ; ferriers (ancienne cité des leuques, Minot, Montagne noire) ; apports des méthodes physico-chimiques. (18 communications dont 1 en anglais). – 21 × 29,7 / 336 p. / broché / 38 fig. / 25 tabl. / 22 phot. / 16 cart. / 33 pl. fig. et phot. – Prix : 195 F.

Paléorient. Volume 8/1 – 1982. Approche pluridisciplinaire à l'archéologie de l'Asie du sud-ouest (vie et conditions de vie des populations) ; analogies, anomalies and research strategy ; l'Acheléen moyen de Joubb Jannine (Liban) ; the fauna from Shanidar cave ; lapis lazuli and the great Khorasan road ; the garden of the lord : a plausible reconstruction of natural resources of southern Jordan in early bronze age, etc... (11 articles et notes dont 5 en anglais, résumés français-anglais). – 21 × 29,7 / 116 p. / broché / 26 fig. / 15 tabl. / 1 phot. / 7 cart. / 10 pl. fig. / 3 pl. phot. – Prix : 135 F.

Corpus des inscriptions de la France médiévale. Ariège, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées, Tarn-et-Garonne. Robert Favreau, Jean Michaud, Bernadette Leplant. Recensement de 133 textes épigraphiques (milieu 8ème siècle-fin 13ème siècle) à l'exclusion des chrismes pyrénéens ; très large place réservée à l'abbaye de Moissac ; index général permettant des regroupements. – 21 × 29,7 / 334 p. / broché / 4 fig. / 4 cart. / 105 pl. phot. – Prix : 120 F.

Saint-Plancard, chapelle Saint-Jean-des-Vignes, décollation de Jean Baptiste.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf

LE COURRIER DU
CNRS

Formes primitives de la vie sur la Terre
âge : 800 millions d'années environ.
(voir descriptif ci-contre p. 16)

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/146?context=pdf