

Le courrier du CNRS Soleil

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

52 Fichier(s)

Les mots clés

[CDSHS](#), [Centre de documentation sciences humaines](#), [Desroches-noblecourt](#)
[Christiane](#), [Durand Henry](#), [groupe optique de Meudon](#), [Kandel Robert](#), [Mounier](#)
[Monique](#), [Petit Michel](#), [PIRDES](#)

Les relations du document

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

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS Soleil

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

Consulté le 11/01/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/264>

Présentation

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

Personnes citéesPetit, Michel, 1935-

Notice créée par [Richard Walter](#) Notice créée le 20/10/2024 Dernière modification le 24/12/2024

LE COURRIER DU CNRS

Spécial soleil/Juin 1979/10F



de la Direction des Relations Extérieures
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette

Editions du CNRS et publications de la direction des relations extérieures et de l'information

*Les ouvrages des Editions du CNRS sont disponibles soit en librairie
soit aux Editions du CNRS - 15, quai Anatole France, 75700 Paris.
Les brochures et les documents scripto-visuels sont disponibles à la Direction
des relations extérieures et de l'information - 15, quai Anatole France, 75700 Paris*

Editions du CNRS

ouvrages édités dans le domaine de l'énergie

Energie solaire - Perspectives économiques (Percebois). Format 21 x 29,7 - 216 pages/broché (1975) - 40 F.

Prix et coûts de l'énergie (Bourgeois). Format 21 x 29,7 - 200 pages/broché (1976) - 38 F.

Un modèle énergétique pour la France (Finon). Format 21 x 29,7 - 232 pages/broché (1976) - 42 F.

La rente pétrolière (J.P. Angelier). Format 21 x 29,7 - 168 pages/broché (1976) - 35 F.

L'énergie solaire, applications thermiques dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Format 16 x 24 - 744 pages/relié (1976) - 150 F.

La demande d'énergie (Girod). Format 21 x 29,7 - 192 pages/broché (1977) - 39 F.

Le véhicule électrique (Nicolon). Format 21 x 29,7 - 128 pages/broché (1977) - 28 F.

Réflexions critiques sur le bilan énergétique (P. Raman). Format 21 x 29,7 - 176 pages/broché (1977) - 57 F.

Energie - l'offre et la demande (F. Blamoutier). Format 21 x 29,7 - 216 pages/broché (1977) - 55 F.

Prévision à long terme de la demande d'énergie (B. Chateau et B. Lapillonerie). Format 21 x 29,7 - 240 pages/broché (1977) - 57 F.

Energie solaire, conversions et applications (Solar energy conversion and applications). Format 21 x 29,7 - 848 pages/broché (1978) - 210 F.

Economie de l'énergie dans la communauté européenne (K. Zijlstra). Format 21 x 29,7 - 220 pages/broché (1979) - 55 F.

Analyse statistique des processus météorologiques appliquée à l'énergie solaire. Format 21 x 29,7 - 404 pages/broché (1979) - 90 F.

Le choix solaire - une énergie qui entre dans la vie quotidienne (Christian Vauge). Format 16 x 24 - 256 pages/broché (1979) - 54 F. (co-édition CNRS - Tehou)

Publications de la direction des relations extérieures et de l'information

brochures

Le Courrier du CNRS : Spécial énergie (1975). Format 21 x 29,7 - 48 pages - 10 F.

Le four solaire d'Odeillo (1976). Format 21 x 29,7 - 12 pages - 10 F.

* L'électricité solaire * (1977). Article (10 pages) publié dans le n° 23 du Courrier du CNRS. Format 21 x 29,7 - 90 pages - 10 F.

Le CNRS et l'énergie (1977). Format 21 x 29,7 - 55 pages - 10 F.

Rapport d'activité PIRDES (77-78).

Programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire (1978). Format 21 x 29,7 - 12 pages - 5 F.

La centrale solaire expérimentale Thémis (1978). Format 21 x 29,7 - 16 pages - 10 F.

Recherches sur l'habitat solaire : la contribution du CNRS (1978). Format 21 x 29,7 - 12 pages - 5 F.

La Centrale PERICLES (1978). Format 21 x 29,7 - 4 pages - 1 F.

Le CNRS et l'énergie solaire (1979). Format 13 x 21 - dépliant 8 pages - 1 F.

documents scripto-visuels

Collection « Images de la recherche » - Energie solaire - Réalisée par le CNRS et l'AUDECAM :

- « Le four solaire d'Odeillo »
- « Les centrales solaires à concentration »
- « La photosynthèse »
- « L'habitat solaire »
- « Les photopiles et leurs applications »

Ces pochettes sont disponibles à la documentation française - 29-31, quai Voltaire, 75340 Paris Cedex 07 - tél. : 261.50.10, au prix de 28 F. la pochette de dix diapositives.

Film

* Le four solaire d'Odeillo * (1978). 13' - 16 mm couleur - son optique, location (par projection) : 120 F.

Le courrier du CNRS

Spécial soleil

Centre national de
la recherche scientifique
15, quai Anatole France
75700 Paris Tél. : 555.92.25

Directeur de la publication
Pierre Creyssel (par intérim)

Secrétaire de rédaction
Martine Chabrier - Elkik

La vie des laboratoires
Véronique Brossollet

Comité de rédaction
Serge Caudron
Pierre Chaunu
Jean-Didier Dardel

Georges Duby
Francis Garnier
Daniel Gautier
Alain Giraud

Lucien Hartmann
James Hiéblot

Robert Klapisch
Jacqueline Mirabel

Geneviève Niéva
Henri Peronnin

Pierre Potier
Jean-Claude Ribes
Jean Rouch

Entretiens

Monique Mounier

Abonnements et ventes
au numéro

Le numéro 10 F

Abonnement annuel : 34 F

Editions du CNRS :
15, quai Anatole France
75700 Paris
C.C.P. Paris 9131-53

Tout changement
d'adresse doit être signalé
au secrétariat de rédaction.
Nous remercions
les auteurs et les organismes
qui ont participé à la
rédaction de ce bulletin.
Les intertitres ont été
rédigés par le comité de
rédaction. Les textes
et illustrations peuvent être
reproduits sous réserve
de l'autorisation du
directeur de la publication.

C.P.A.D. 303
Réalisation ALLPRINT
8, rue Antoine Chantin
75014 Paris

ISBN 2-222-02-551-6

© Centre national de la
recherche scientifique

Photo 1 de couverture :
Représentation du soleil
(peinture d'Iria Bernardini)

Photo 4 de couverture :
Le phénix, oiseau solaire,
renaisant de ses cendres et
réapparaissant régulièrement
sur l'arbre sacré d'Héliopolis.
Tombe ramesside de
Deir el-Medineh,
Haute-Egypte.

Le Courrier du CNRS propose à ses lecteurs un numéro « Spécial Soleil », réalisé à l'occasion de la journée du Soleil qui sera célébrée dans toute la France le 23 juin 1979. Chacun connaît les efforts déployés par le CNRS depuis 1974, pour mettre en place un programme spécial sur l'énergie solaire. Dans ce numéro, Henry Durand, commissaire à l'énergie solaire, dans l'entretien qu'il a bien voulu accorder au CNRS, retrace les grandes lignes de la politique menée par la France dans ce domaine. Michel Rodot et toute l'équipe du PIRDES nous exposent d'autre part, de manière précise, les perspectives les plus récentes de la recherche, qu'il s'agisse de la réhabilitation et du perfectionnement des énergies anciennes ou du pari raisonnable que constitue l'avènement de l'héliostat et du silicium. Mais le Soleil au CNRS, ce n'est pas seulement l'énergie solaire. Christiane Desroches-Noblecourt nous rappelle que, dans l'Egypte ancienne, le Soleil, magnifié par les hymnes à Aton, omniprésent, jouait un rôle central dans toute la théologie et les systèmes d'interprétation du monde. Le groupe optique de Meudon décrit la vie magnétique du Soleil et s'interroge en particulier sur la signification de ce minimum prolongé de l'activité solaire, que les astronomes avaient mis en lumière, dès la fin du XIX^e siècle et qui a peut-être influencé les conditions climatiques terrestres. C'est aux relations entre le Soleil et les climats que Robert Kandel consacre son article en montrant que si le Soleil a une influence déterminante sur les systèmes climatiques, nos connaissances en ce domaine demeurent encore incomplètes. Michel Petit, dans un court article, complète les données ainsi rassemblées en exposant les projets de la mission internationale solaire polaire menée conjointement par le CNRS et l'agence spatiale européenne, dont l'objet sera l'observation du Soleil à toutes les latitudes. Mais il faut revenir sur Terre, c'est le rôle des économistes de rappeler qu'une extraordinaire source d'énergie comme le Soleil ne peut trouver d'application qu'en tenant compte d'un certain nombre de contraintes. Patrick Criqui évalue les conditions nécessaires pour qu'une politique rationnelle de l'habitat solaire soit mise en œuvre, compte tenu des stratégies qui peuvent être envisagées dans ce domaine. Ainsi, d'un bout à l'autre de la chaîne, des physiciens aux économistes, des égyptologues aux astronomes et géophysiciens, le CNRS s'efforce de rappeler que la science est une, que ses progrès dépendent avant tout de la multiplicité et de la complémentarité des voies d'approche et dans ce domaine, comme dans les autres, la recherche n'est jamais achevée :

« Combien multiples sont tes œuvres
Bien qu'il (en) demeure de cachées ! »

Entretien avec Henry Durand : l'énergie solaire à l'horizon 2000

4

Le soleil sous les pharaons

Christiane Desroches-Noblecourt

CNRS

Délégation du Siège

Service Logistique

Dépôt des archives - Bâtiment 19

1, avenue de la Terrasse

91190 Gif-sur-Yvette

Tél : 01 69 82 39 17

9

La vie magnétique du soleil

Groupe optique de Meudon

18

Le soleil et les climats

Robert Kandel

26

L'énergie solaire : une recherche active, un pari raisonnable

Equipe de direction du PIRDES

32

L'habitat solaire en France : une analyse socio-économique

Patrick Criqui

44

Une autre vue du soleil : la mission solaire polaire

Michel Petit

49

Où trouver des informations sur le soleil :

- les centres de documentation sciences humaines - sciences exactes
- les Editions du CNRS et les publications de la direction des relations
extérieures et de l'information

50

3

Entretien avec Henry Durand : l'énergie solaire à l'horizon 2000

Président du COMES depuis sa création en mars 1978, Henry Durand, physicien est par sa formation initiale et par sa carrière un homme proche des réalités industrielles et qui connaît bien l'activité scientifique internationale. Il nous donne ici l'essentiel de ses idées sur la politique de l'énergie solaire de la France et ses perspectives à court et long terme.

Il est d'usage de demander quelle sera la contribution du « solaire » en l'an 2000. Nul n'est devin... On sait qu'elle sera encore très faible en 1980. En 1985-1990, devant une crise énergétique menaçant d'être très grave, Monsieur le Président, qu'apportera l'énergie solaire ?

Le « moyen terme », 1985-1990, sera ce que nous préparons aujourd'hui. Il est difficile, au plan de la multiplication des démonstrations, de faire autre chose que d'encadrer le développement du marché.

Prenez le cas de l'habitat. La part du marché des chauffe-eau solaires en 1979 sera peut-être de 1 % de celui des constructions neuves. Celui du chauffage solaire très inférieur au millième (un petit nombre de centaines sans doute, contre 450 000 logements construits). En supposant même, ce qui est une prophétie tellement optimiste que je ne la cite qu'à titre d'hypothèse d'école, que nous solarisions en 1985 la moitié des chauffe-eau et le dixième des logements neufs, cela ferait un parc solaire installé à cette époque d'un million de chauffe-eau et de 200 000 logements, soit environ 300 000 tonnes d'équivalent-pétrole économisées cette année-là : un peu plus de un pour mille de la consommation totale d'énergie.

□ Ancien élève de l'Ecole normale supérieure, docteur ès-sciences et ingénieur civil des Mines, Henry Durand est également master of science, ayant partagé ses études et ses débuts dans la recherche scientifique entre Paris, Pittsburgh et Oxford. Il a été depuis 1973, directeur général des laboratoires d'électronique et de physique appliquée (LEP) de la société Philips.



On ne peut pas aller plus vite que cela, sauf à réaménager les logements existants.

En 1985, les premières centrales thermodynamiques seront en fin de période d'essai et d'expérimentation. N'y comptons pas trop pour faire beaucoup d'électricité.

Le seul domaine qui peut sûrement aller très vite, car le « gisement » existe, est celui de l'exploitation énergétique de la biomasse. Sans imaginer pour 1985 des solutions très futuristes, nous pouvons, au prix d'un gros effort, mieux utiliser notre potentiel végétal, forestier ou agricole, et passer d'une contribution d'environ 1 % aujourd'hui (on consomme en effet en France environ 1,8 MTep principalement sous forme de feu de bois et de déchets de l'industrie du bois), au double. Ce qui est loin d'être négligeable, et représenterait un milliard de francs 1979 d'économie de devises.

Quelle est la place de la France dans « la course au soleil » ? Quel est le bud-

get affecté au solaire par tête d'habitant aux États-Unis, en Allemagne fédérale, au Japon et en France ?

La France tient la seconde place dans votre classement, talonnée depuis 1978 d'assez près par l'Allemagne. En gros, le budget fédéral américain est douze fois plus élevé que le nôtre (neuf fois plus si nous excluons les énergies éolienne et thermique des mers, pour lesquelles nous n'avons pas de programme prioritaire). C'est donc dire que, par habitant, les États-Unis dépensent le double. Pour les Allemands, compte tenu de leur nombre plus important, ils sont quelque peu en-dessous des français. Le Japon, malgré l'ampleur du projet Sunshine (mais qui couvre toutes les recherches énergétiques non nucléaires), dépense peu pour le soleil : le quart de la France, et donc le huitième ramené à la tête d'habitant.

Il est vrai que dans ces trois pays (États-Unis, Allemagne et Japon), les dépenses propres de l'industrie privée sont sans doute plus importantes que chez nous. Mais la hiérarchie et les ordres de grandeur ne sont pas fondamentalement modifiés.

Comment expliquez-vous que le budget solaire de l'Allemagne fédérale soit plus élevé que le nôtre, avec aussi peu de soleil ?

Le budget allemand n'est sans doute pas plus élevé que le nôtre. Il devrait s'en rapprocher, mais en fait personne ne connaît bien le budget fédéral, car il devrait comporter une fraction de la subvention de 25 % allouée aux dispo-

sitifs économiseurs d'énergie, depuis le milieu de l'année dernière : une provision d'un milliard de deutschmarks par an a été réservée pour ce chapitre. Mais on ne connaît pas encore la fraction qui est allée ou ira au soleil. Pour le reste, les dépenses de recherche sont plus faibles qu'en France, mais le soutien industriel plus élevé, ainsi que les dons de matériel aux pays en voie de développement. C'est ainsi qu'un programme de sept ans s'élevant à cent soixante millions de DM (trois cent soixante dix millions de francs) va à l'industrie photovoltaïque.

Officiellement, le budget solaire allemand *stricto sensu* (Ministère fédéral de la recherche et de la technologie, BMFT) s'élève pour 1979 à soixante dix millions de DM sans les subventions mentionnées plus haut. Pour compliquer encore les choses, il faut se souvenir que les universités reçoivent des financements des Länder.

Il est vrai que l'Allemagne a moins de soleil que nous. Son effort n'en est que plus remarquable. Cela explique aussi les antennes que ce pays lance à l'étranger (création d'un laboratoire mixte germano-espagnol, en Espagne, par exemple).

Pouvez-vous décrire l'orientation du COMES en matière de « politique solaire » en France ?

Le conseil des ministres du 14 février a entériné une sorte de « charte de l'énergie solaire » que lui avait présentée le COMES.

Comme je le rappelais plus haut, la biomasse et l'habitat sont les deux secteurs privilégiés, ceux qui peuvent compter de manière significative (nous visons une quinzaine de MTop pour l'an 2000). Mais celui de l'électricité solaire, s'il intéresse moins le territoire national, du moins dans le cadre de cette échéance, reçoit toute notre attention : à dire vrai, les domaines de l'électricité solaire, tant thermodynamique que photovoltaïque, consomment une part très majoritaire du budget solaire global de la nation : respectivement 31 % et 29 %, contre 24 % seulement pour l'habitat, en 1979.

Le souci correspond au deuxième objectif assigné au COMES par le gouvernement : créer une industrie d'exportation. C'est déjà le cas de la conversion photovoltaïque, où la France est le premier exportateur mondial.

En dehors de ces priorités sectorielles, le COMES doit également avoir une politique régionale et une politique

internationale. Au plan régional des contrats de programme seront signés avec des collectivités locales (régions, départements ou municipalités) en vue de renforcer l'impact géographique des programmes de démonstration. L'action internationale du COMES couvre des accords bi ou multilatéraux, des programmes ambitieux d'expérimentation dans les pays en voie de développement, comme ceux de la zone du Sahel, et surtout une coopération de plus en plus intense dans les échanges de scientifiques, les missions d'experts, l'établissement de programmes solaires à l'étranger, etc.

L'action du CNRS a-t-elle été un atout dans l'essor du programme solaire français ? Pouvez-vous dresser un bilan ?

Le CNRS a été le pionnier en énergie solaire depuis une vingtaine d'années, bien avant que la notion de rareté de l'énergie s'impose à nous : la thermique a vu son couronnement dans le four d'Odeillo, et le « mur Trombe » est presque devenu un nom commun tant sa popularité est grande. Ces problèmes de thermique se poursuivent aujourd'hui avec les programmes Périclès, et surtout THEK qui me paraît avoir un bel avenir comme capteur à moyenne température.

Ce dernier domaine, qui ouvre grand le champ de la chaleur solaire à usage industriel, doit être vigoureusement poursuivi : il convient de faire porter maintenant l'effort sur un développement industriel de série, seul capable de convaincre les utilisateurs grâce à une baisse de prix.

A la date du 1er juin, en ce qui concerne THEMIS, la plus grande incertitude règne. Il y a eu manifestement une erreur dans l'appréciation des coûts. A dire vrai, est-ce totalement une erreur d'appréciation ? ou bien un lent processus de « perfectionnisme » qui a entraîné les cahiers de charges hors de l'épure initiale ?

Dans le domaine des photopiles, le CNRS a aussi été un pionnier, mais il a partagé cette gloire avec l'industrie qui, déjà depuis une dizaine d'années, a pris la tête de ce domaine, à l'exclusion bien sûr de la recherche la plus fondamentale.

En revanche, le CNRS depuis trois ans est le champion incontesté des systèmes photovoltaïques à concentration, avec le programme Sophocle. Curieuse destinée que celle de Sophocle... Il est

irritant de penser que son succès économique, qui est possible, se ferait au détriment de la filière des panneaux plans, celle qui est aujourd'hui l'enfant chéri de tous les programmes nationaux. De plus, un développement industriel complet des systèmes à concentration consommerait des crédits fort importants, réclamés également par les tenants des panneaux plans. Les experts sont partagés, et si certains d'entre eux repoussent Sophocle, d'autres font valoir qu'il n'est jamais trop tôt pour étudier un programme de remplacement au cas où la filière principale ne répondrait pas à ses espoirs. Cela dit, il entre tout à fait dans la mission d'un établissement de recherche comme l'est le CNRS, d'examiner des solutions alternatives, même si elles sont un peu plus risquées : il n'y aurait pas de recherche sans cela.

Pour l'habitat, « les maisons solaires », sont maintenant bien connues. Mais des « solutions solaires » pour l'habitat ancien existent également. Que peut faire l'industrie dans ce domaine ? Et d'abord s'y intéresse-t-elle ?

C'est un peu vite dit que d'affirmer que tout est connu dans l'habitat solaire. La modélisation, et surtout l'expérimentation d'une architecture bioclimatique scientifiquement étudiée en sont à leurs débuts. Et c'est sans doute là le meilleur placement en termes d'apports « gratuits » du soleil.

Il est cependant vrai que l'habitat ancien est délaissé. En matière de chauffage solaire, cela me paraît normal : il faut que l'habitat réponde d'abord aux normes les plus strictes d'isolation pour que la contribution solaire soit significative : ce qui exclut en général l'habitat ancien, et même assez récent.

Il n'y a en revanche pas d'impossibilité technique à l'équipement du parc de logements anciens en eau chaude sanitaire. Le coût en est nettement plus élevé certes, non seulement à cause du surcoût de l'installation de capteurs non prévus à l'origine, mais encore par les modifications substantielles de plomberie requise : recevoir son eau chaude depuis la cave ou du toit n'est pas la même chose.

Nous allons cependant examiner avec l'Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat comment des incitations pourraient être imaginées pour les logements déjà construits. Le problème n'est pas simple, en termes économiques.

Quelles sont aujourd'hui les perspectives en matière de recherches, en particulier celles du PIRDES, qui se renforce en se dotant d'un conseil scientifique, assurant une liaison structurelle avec le comité national ?

On dit souvent qu'il n'y a pas de recherche scientifique digne de ce nom qui sous-tende les disciplines solaires, et qu'il s'agit surtout de technologie, assortie d'un peu d'analyse de systèmes. Cela n'est pas exact, ou tout au moins ne représente qu'une vérité très partielle.

Certes, le contenu scientifique des problèmes liés à l'habitat est faible on quitte même le domaine des sciences de l'ingénieur pour entrer dans celui de l'ingénierie (et de l'architecture). Cela sera sans doute vrai très bientôt pour les systèmes à concentration.

Mais à côté de cela, il y a deux domaines au moins où la recherche scientifique de très haut niveau est loin d'avoir dit son dernier mot, et qui nécessiteront encore des années ou des dizaines d'années d'efforts imaginatifs et d'expériences de laboratoire.

La conversion photovoltaïque, même si elle est déjà industrielle, est encore mal comprise. Malgré près de vingt années d'effort, les mécanismes intimes de l'hétérojonction CdS/Cu₂S échappent à l'analyse des scientifiques. Le silicium amorphe pose de redoutables problèmes aux théoriciens. Et sans doute d'autres corps, plus mystérieux encore, sont à découvrir.

Le CNRS, par ses actions thématiques programmées, complète en amont très efficacement l'action du COMES, et on doit se féliciter de l'excellent couplage que le directeur du PIRDES, par ailleurs président du comité « conversion photovoltaïque » du COMES, assure entre ces deux types de programmes complémentaires.

La biomasse ouvre un champ encore plus vaste aux investigations des fondamentalistes. Si l'on commence à percevoir le processus de la fabrication de la chlorophylle, on entrevoit d'immenses possibilités à la photosynthèse : faire créer de nouveaux corps par la nature, et même influencer sur les processus naturels pour leur faire fabriquer des produits sur commande, l'objectif ultime, en termes énergétiques, étant la photodissociation de l'eau, aujourd'hui à peine esquissée par certaines algues, et qui pourrait être (pourquoi ne pas rêver...) une des solutions à la faim d'énergie qui nous dévore. Dans un domaine tout aussi essentiel, quoique plus orienté, nous attendons de la génétique végétale qu'elle nous « invente » des

plantes à meilleur rendement que celles que nous connaissons aujourd'hui. Nous attendons de la microbiologie qu'elle nous donne une meilleure fermentation de la biomasse en gaz. La liste de nos espoirs est sans fin...

Dans tout cela, le rôle du CNRS est primordial. Le conseil scientifique du PIRDES devrait jouer à l'échelon national le rôle d'une caisse de résonance de ce bouillonnement d'idées, et celui d'un coordonnateur de la recherche fondamentale en France. L'assurance que les finalités de ces recherches s'intégreront dans l'ensemble du programme solaire français mené par le COMES, est garantie par la nomination du directeur du PIRDES en tant que président du comité scientifique du COMES.

« L'énergie solaire, un pari raisonnable », tel était le titre de la conférence de Monsieur Michel Rodot à l'exposition du CNRS à Bordeaux. Image de la recherche. Que pensez-vous de cette formule ?

Je ne peux qu'y souscrire. Mon seul regret, dans ce pari, est qu'il sera surtout gagné par le renchérissement du coût de l'énergie « classique », et donc au détriment de l'économie nationale. Mais les choses étant ce qu'elles sont, il serait *a contrario* « déraisonnable » de ne pas miser sur cette diversification des sources d'énergie qui s'offre à nous.

Quelle est l'action de nos partenaires, en particulier, dans la communauté européenne ?

J'ai personnellement suivi de près, depuis la création du programme solaire européen en 1976, les relations entre les actions nationales et européennes. Mr. Robert Chabbal, président du comité consultatif sur la recherche solaire auprès de la commission des communautés, y veille aussi. On peut faire à ce sujet deux constatactions, toutes deux positives :

- la première est que la délégation française, travaillant à l'époque autour des trois pôles majeurs constitués par le CNRS, la DGRST et la Délégation aux énergies nouvelles, a veillé à ce qu'il y ait une bonne complémentarité, qualitative et financière, entre les actions nationales et européennes ;

- par voie de conséquence, les sommes non négligeables dépensées par les communautés (six millions d'unités de compte sur chacune des trois années

1976-1979, soit trente cinq millions de francs) sont venues renforcer nos équipes et nos programmes. Il faut voir dans cette « synergie » une des raisons du succès de la France dans le programme communautaire, puisque nos propositions ont toujours eu un taux d'acceptation supérieur à la moyenne.

La commission vient de lancer un autre type d'actions, visant cette fois à financer partiellement des démonstrations « rentables », et non des actions de recherche et de développement. Bien que la France ait là aussi fait un très beau « score », je n'en suis pas très satisfait. La notion de « démonstration » en énergie solaire est difficile à distinguer de celle de « projets expérimentaux », car il n'y a pas, au stade du pari dont parle Mr. Rodot, beaucoup de démonstrations rentables. De plus, ce programme a été mené très hâtivement (avec cependant la part de compliment que comporte cet adjectif au sens de la rapidité avec lequel l'affaire a été engagée), et sans trop de concertation avec les responsables nationaux. Mais enfin, cela va quand même dans le bon sens, celui de la promotion de l'énergie solaire.

On peut imaginer que des choix seront nécessaires : on ne sera pas le meilleur en tout. Pouvez-vous indiquer quels sont actuellement les projets communs entre partenaires européens ?

La commission des communautés européennes mène son programme sur un vaste front : elle trouve en effet des résonances dans tel ou tel pays et peut par conséquent trouver de l'intérêt (et des financements nationaux partiels) sur l'ensemble du domaine. Elle espère voir au moins doubler les sommes qui seront mises à sa disposition (elle avait demandé le triple). Certains lui font reproche de ce manque de sélectivité. Pas moi. D'abord, parce que le programme français est lui-même assez étendu ; et ensuite parce que je connais bien le contexte solaire, souvent étroit, des autres pays européens, et que j'ai pu constater qu'en donnant ses chances à des équipes qui paraissaient marginales à l'origine, l'action communautaire a permis de cristalliser des programmes nationaux embryonnaires et de les faire se développer dans un contexte d'amicale compétitivité intellectuelle très favorable à leur épanouissement.

Cela dit, il n'existe qu'un seul programme européen véritablement intégré : c'est la construction d'une centrale solaire à tour, un petit Themis, en

Sicile, au niveau de 1 MW-crête. Les trois gouvernements français, allemand et italien sont associés à son financement, et un consortium industrie tri-national en assure la construction, sans aucun retard jusqu'ici (quoique avec quelque dépassement financier).

En revanche, il y a de nombreuses actions concertées ou... concurrentielles ! L'ensemble du programme de photosynthèse n'est qu'une vaste entreprise de regroupement des vingt meilleures équipes européennes de recherche fondamentale en un « club de cerveaux » particulièrement impressionnant. Mais inversement, la Communauté n'hésite pas à financer en parallèle cinq opérations de construction de générateurs photovoltaïques dans la gamme 1-5 KW : c'est la libre concurrence des conceptions, et des réalisations.

Il faut savoir gré à la commission d'avoir su s'adapter au « tissu solaire » européen, sans imposer comme elle le fait parfois dans d'autres domaines la condition « poly-nationale » comme préalable à tout financement. Ces mariages forcés auraient éliminé une bonne partie des contractants industriels, qui constituent la véritable force du programme communautaire.

Quels sont les clients potentiels, notamment dans les pays en voie de développement, de la « technologie solaire » française... Il y a les pays qui ont du soleil et du pétrole, et les pays qui ont seulement du soleil ?

Cette question mériterait à elle toute seule une interview séparée. En bref, les pays qui ont du pétrole et du soleil – et ils sont nombreux – ne négligent pas le soleil. Voyez les Etats-Unis ! La première conférence sur l'énergie des pays arabes tenue voici deux mois à Abu Dhabi, et où j'ai été invité, donnait une place surprenante au soleil. Quant à ceux qui ont seulement du soleil, – et je me limite bien sûr aux pays en voie de développement –, ils sont en général pauvres, par une relation de cause à effet presque évidente.

Pour l'essentiel, le solaire, qui est non plus ici leur « pari », mais souvent leur seule « chance », est encore trop cher pour eux qui sont dépourvus de capital : on en arriverait à ce paradoxe où, par absence de formation de capital fixe, ces pays seraient condamnés à vivre d'énergie fossile achetée à mesure des besoins, plutôt que de bénéficier de leur richesse solaire. Pour sortir de ce cercle vicieux, l'aide internationale est

indispensable. La France, surtout sur son plan « Sahel – énergies nouvelles », financé par le ministère de la coopération (ainsi que par le COMES, qui en prendra la gestion), mais aussi par d'autres actions bilatérales ou multilatérales en Amérique Latine ou en Asie, a pour le moment une position en tête dans ce domaine : grâce à ces programmes, la technologie française se répand dans le monde entier. Nous sommes les premiers, – presque les seuls –, exportateurs de machines solaires thermodynamiques et de pompes photovoltaïques.

Et la concurrence, comment se présente-t-elle ?

La question est bonne, car précisément nous risquons de ne pas rester indéfiniment les premiers, et nous ne sommes plus les seuls... Déjà la concurrence allemande s'exerce fortement ; celle des Etats-Unis, un peu trop absorbés aujourd'hui par leur marché intérieur, va devenir très dure. On peut aussi parler du Japon, bien qu'on ne le voit guère aujourd'hui.

Cette concurrence dépendra des produits :

- pour la production de puissance électro-mécanique, elle sera fonction des attitudes des programmes d'assistance des gouvernements des pays industrialisés aux pays en voie de développement, mais aussi du support que peut constituer le marché intérieur : les Etats-Unis sont à ce titre fort bien placés ;

- pour les matériels touchant au chauffage, je ne crois pas qu'il puisse y avoir de marchés importants dans les pays en voie de développement : ce sera une lutte entre pays industrialisés. En revanche, la climatisation solaire est un article d'exportation de premier plan, qui sera l'objet d'une forte concurrence ; le dessalement de l'eau aussi.

Au-delà de la concurrence des produits, il faut rester vigilants sur les transferts de technologie : mis à part quelques processus complexes (comme ceux mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques), ou les très gros systèmes (telles les centrales à tour), les disciplines solaires ne sont pas très « sophistiquées ». Les pays industrialisés qui réussiront rapidement des transferts seront privilégiés. Quoiqu'il en soit, au-delà des échanges habituels et souhaitables entre scientifiques, il nous faut veiller à cet aspect concurrentiel. Les relations internationales que le COMES entretient sont de plus en plus empreintes d'un caractère commercial,

et nous nous organisons en conséquence. Au niveau d'un organisme aussi engagé que le CNRS dans l'aventure solaire, dont le poids en recherche et développement pèse autant que tout le reste de la communauté solaire, il faut veiller à limiter les « fuites » qui iraient alimenter la concurrence étrangère. Cela est certes difficile, allant à l'encontre de la libre circulation des idées traditionnelles dans cet établissement. Je m'adresse donc à ses chercheurs pour leur rappeler qu'en solaire encore plus qu'ailleurs, tout le monde copie son voisin ; et ceci d'autant plus que les techniques sont simples et faciles à piller.

Quelle sera la place du programme solaire français dans le 8^e plan ?

En l'absence de toute recommandation officielle, je ne puis qu'émettre une hypothèse. La tendance des groupes de réflexion qui préparent le 8^e plan favorise nettement le solaire : la commission de l'énergie du plan vient de mettre à jour son scénario énergétique, et y fait grand cas de l'énergie solaire. Le comité consultatif pour la recherche et le développement en énergie remettra bientôt ses conclusions au gouvernement, mais il est prématuré d'en divulguer la teneur. Je compte aussi sur les récents événements qui ont marqué le secteur énergétique et l'opinion publique pour accompagner une tendance à poursuivre la courbe de croissance de nos investissements solaires publics, qui, au cours du 7^e plan, a connu un accroissement annuel compris entre 20 et 30 %. Je dois aussi émettre le vœu que ce 8^e plan voit un véritable marché se créer, notamment pour les chauffe-eau solaires et la biomasse, de manière à faire supporter aux investissements industriels une part plus importante de l'effort solaire national.

Monsieur le président, le 23 juin 1979, on célébrera en France « la journée du soleil ». Quel effet devrait avoir, selon vous, une telle action d'information sur l'ensemble de la population ?

Je viens de parler de l'opinion publique. Dans un domaine où chacun de nos concitoyens se sent concerné, quoique mal informé, une telle action apportera une mobilisation, une sensibilisation du public que nous encourageons tous. Une dizaine de colloques, congrès, expositions de caractère national ou international, seront soutenus

par des dizaines, voire de centaines de manifestations locales. Une telle concentration d'entreprises individuelles ou collectives doit avoir un impact considérable, et le COMES, dans la mesure de ses moyens, encore faibles sur le plan humain, aide à faire de cette journée, ou plutôt de cette semaine, une réussite.

Sans doute y aura-t-il ici et là quelques bavures, où l'on verra des « pro-solaires » très enthousiastes devenir des « anti-quelque-chose ». Cela ne tirera sans doute pas à conséquence. La difficulté la plus grande sera ensuite de maintenir un effort suffisant d'éducation du public pour que le message se perpétue.

Ne risque-t-on pas de donner de faux espoirs aux français, qui comptent sur les énergies douces, et sur l'énergie solaire en particulier, dans le contexte actuel de la crise pétrolière ?

Vous avez raison d'émettre cette crainte. Comment faire pour que ce message soit « raisonnablement » perçu ? Dans un monde qui est toujours sinon manichéen, tout au moins binaire, il est fort difficile d'expliquer que le solaire n'est qu'un des atouts de la stratégie énergétique : il y a parfois un charisme quasiment impliqué qui empêche les fanatiques du solaire d'apprécier les jugements nuancés. A titre d'anecdote, un de ceux-là, qui venait de dépenser plus de 100 000 F dans un chauffage solaire qui lui permettait d'économiser la moitié de sa note de combustible, s'étonnait en termes véhéments que le gouvernement ne lui finance pas ce surcoût et encore plus qu'il n'oblige pas tous les français à le suivre. Pour ces messieurs « il n'y a qu'à », une addition de deux Térafrancs (l'immensité des sommes mises en jeu m'oblige à utiliser cette unité, qui vaut mille milliards de francs) ne représentait évidemment rien. Je me suis fait traiter de défaitiste, et je sais fort bien que, chaque fois que je prêche une certaine modération aux enthousiastes du « tout solaire », je recueille des commentaires du genre : « Le président du commissariat à l'énergie solaire n'y croit pas... ! ».

Comment faire comprendre au grand public que le temps nécessaire au mûrissement des recherches est forcément long ?

La réponse à votre question est d'autant plus difficile qu'il y a, pour le soleil, une attitude psychologique qui n'existe nulle part ailleurs, sauf pour l'air que nous respirons : chacun se sent un droit de propriété sur cette énergie si uniformément répandue. De là à croire qu'elle est gratuite, il y a un pas allègrement franchi : il est si facile de confondre l'existence d'une source d'énergie et sa disponibilité, lorsque son existence fait partie du vécu. Les analogies avec le charbon qui n'a pas de prix (au sens le plus strict du terme) tant qu'il dort dans le sous-sol, et qui n'acquiert une valeur marchande que par sa disponibilité, n'intéressent personne. Puisque le soleil est à portée de la main..., me rétorque-t-on.

Ces arguments de nature économique se retrouvent dans la mauvaise appréciation des délais de mise en œuvre de l'énergie solaire, tant au plan de la recherche, qu'au niveau de la courbe d'apprentissage du développement industriel. Les mirages les plus insolites courent de bouche à oreille, notamment sur les photopiles dont les trompettes de la renommée sont fréquemment embouchées pour annoncer triomphalement que la dernière découverte permettra de baisser les prix par 10, par 100 ou plus... On oublie de dire que ces mêmes photopiles ont coûté cinq années d'efforts ou plus à d'authentiques savants, qu'elles ont coûté des millions, et qu'au demeurant on en a fait une seule qui mesure un millimètre carré ! Dans bien des cas, la crédulité de l'opinion publique est amplifiée par une mauvaise information de la presse, qui, le plus souvent en toute bonne foi, croira de son devoir de répandre sans nuances les opinions les plus sensationnelles.

Le domaine de l'énergie est un domaine sérieux. Celui de l'énergie solaire aussi. Les amateurs n'y ont point leur place, et je le regrette pour eux, car les énergies douces ont un attrait exceptionnel. Il faut qu'ils se forcent à faire confiance aux spécialistes, qu'ils les encouragent, qu'ils contribuent à leur faire donner les moyens pour aller vite. La communauté solaire compte sur eux, et doit de son côté fournir à un public des informations objectives, et ne pas leur cacher la lenteur des processus d'innovation.

Quelles sont vos priorités ?

Continuant sur cette lancée, je dirais que le commissariat à l'énergie solaire, prenant un train déjà bien lancé sur ses

rails, a d'abord dû s'organiser pour piloter le programme national et mettre en place les structures pour effectuer au mieux les arbitrages entre les moyens disponibles et les objectifs fixés. Cette structure, encore fragile, existe maintenant. La priorité que je me fixe est maintenant de m'extraire et d'apaiser la soif d'information de nos concitoyens. C'est donc précisément à cette tâche de formation et de relations publiques que je vais m'atteler dans les prochains mois.

Et vos recommandations ?

En créant le commissariat à l'énergie solaire, le Président de la République a doté la France d'un outil. Mes recommandations doivent maintenant aller dans le sens d'un bon usage de cet instrument : il nous faut maintenant créer un marché, des industries, tout en maintenant la pression sur l'innovation, les inventions, la recherche. Dans ces derniers domaines, le CNRS reste un support tout à fait exceptionnel, tant par la quantité que par la qualité de ses équipes.

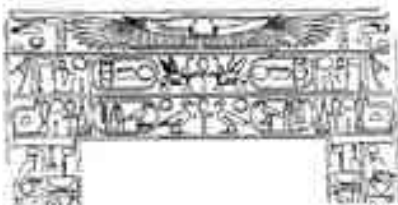
S'il fallait lui faire une recommandation plus particulière, ce serait pour lui demander, maintenant que les technologies solaires se répandent plus largement, de faire un bilan de l'énorme travail effectué, et de préparer un retour aux sources. Il est normal que, au cours des dernières années où le CNRS était véritablement un pionnier du solaire, un glissement se soit opéré, à mesure des progrès effectués, de la recherche vers l'application, puis de l'application vers la réalisation, voire à la commercialisation de certains concepts. Or, la tâche de la recherche scientifique reste grande, tandis que se multiplient ingénieurs et industriels prêts à réaliser, fabriquer, vendre. Il est donc du devoir de notre plus prestigieux établissement de recherche d'apporter ses immenses connaissances au soutien de cet ensemble que j'ai la charge d'animer. Tout pari repose sur des espérances. Je compte beaucoup sur le CNRS pour prendre en main ces espoirs : je vous rappelle que je connais bien votre maison par l'intérieur, puisque je suis membre de votre direction et de votre conseil d'administration. Je sais dès lors que le pari sera « raisonnable », et qu'il aura toutes ses chances pour être gagné.

Entretien réalisé par Monique Mounier.

Le soleil sous les pharaons

*Magnifique est ton apparition à l'horizon du ciel, ô Disque vivant qui vécus le premier !
Une fois levé à l'horizon du ciel, tu remplis toutes les terres de ta beauté.
Tu es beau, tu es grand, tu étincelles, et tu domines toutes les contrées.
Tes rayons embrassent les pays, tous, autant que tu en as créés.*

Christiane DESROCHES-NOBLECOURT



Evocation classique et permanente du dieu solaire en Egypte : le disque ailé. Temple d'Amada, Nubie, XVIII^e dynastie.

La géographie

Les deux grands axes du monde

Dans le pays des pharaons, où la vie n'était possible que par l'action du soleil sur l'humus véhiculé puis déposé à l'est et à l'ouest du thalweg par le Nil venant du cœur de l'Afrique, tout, en effet, paraissait dépendre de ces deux entités essentielles : l'astre et le fleuve, lesquels semblaient se mouvoir suivant un rythme certes bien différent, mais se répétant sans cesse. C'étaient, pour les Egyptiens, les deux grands axes du monde, figurant les bras d'une immense croix. Du sud au nord, le flot pénètre en Egypte sans affluent et n'y reçoit aucune pluie, avant de se perdre dans la Méditerranée. Du levant au couchant, l'astre irradiant dans sa course apparente éclaire et actionne la vie, puis s'apaise et semble s'assoupir à sa disparition nocturne.

Les nuits et les jours, se succédant en deux phases que les nilotiques divi-

□ Christiane Desroches-Noblecourt est conservateur en chef du département des antiquités égyptiennes au Musée du Louvre ; elle dirige depuis 1973 une équipe de recherches sur les temples du culte royal, les tombes des pharaons et le mobilier antique et civil en Nubie et à Thèbes de l'Antienne Egypte (ERA 439).

sèrent chacune en douze parties égales, formaient ainsi un petit univers restreint de vingt-quatre instants solaires inscrits entre deux nouvelles apparitions, entre la vie et la mort présumées d'une force, qui, perpétuellement, se renouvelait en passant de la chaîne arabe à la chaîne libyque.

Une gigantesque horloge à saisons

Il en était tout autrement du majestueux fleuve africain. Brusquement gonflé de pluies équatoriales qui alimentaient ses deux grandes racines, il déversait son inondation sur les rives d'Egypte, après avoir creusé son lit pendant des millions d'années. Puis, continuant à couler jusqu'à la mer, cette « gigantesque horloge à saisons » s'épuisait lentement au cours d'un peu plus de douze lunaisons. Et lorsque son niveau était à l'étiage et que tout être humain, tout animal, toute végétation paraissaient ne plus pouvoir supporter davantage la sécheresse accablante des quatre mois d'été qui suivaient les quatre mois de printemps après les quatre

mois d'hiver, alors revenait un déluge inespéré et bienfaisant qui ramenait avec lui l'espoir et le recommencement. Le retour, que bien vite les hommes observèrent comme régulier, se déroulait toujours aux moments les plus cruciaux pour les deux axes régnant sur le monde (c'est-à-dire celui habité par les nilotiques) : lorsque le soleil est le plus intolérable, dangereux par son ardeur intense qui brûle tout, et lorsque le fleuve, près de s'épuiser, en arrive à ne plus véhiculer qu'un bras d'eau insuffisant. Alors, après soixante-dix jours d'absence, réapparaissait à l'horizon oriental du ciel Sothis, la plus brillante étoile de la constellation du chien, (la *Sepdet* des Anciens, la *Sirius* des Grecs), le « Héraut du soleil », très près de l'endroit même où, quelques instants après, l'astre surgissait. C'est à Thèbes, le jour qui correspond au 19 juillet julien, pendant la chaleur caniculaire, lorsque le soleil passe dans le signe du Lion.

Etablissement de l'année solaire

Ce phénomène subi, constaté, puis espéré pendant des centaines de siècles, incita les Egyptiens du début du III^e millénaire (ou même, si l'on suit certains égyptologues, dès 4241 avant J.-C., - la plus ancienne date fixe de l'histoire) à établir une mesure de temps fondée sur l'intervalle régulier qui s'inscrivait entre deux retours de l'inondation, annoncés par la réapparition de Sothis au ciel, ramenant un nouveau soleil. Les douze périodes lunaires furent remplacées par douze périodes de trente jours (trois semaines de dix jours) auxquelles on ajouta cinq jours supplémentaires (appelés par les



Le scarabée du soleil naissant, Khepri. Autel solaire d'Abou Simbel, Musée du Caire, XIX^e dynastie.

Grecs les épagomènes), ce qui donna les 365 jours de l'année solaire.

Restait un quart de jour perdu à chaque révolution de l'an, que les Égyptiens avaient fort bien perçu et dont ils tenaient compte naturellement pour la vie agricole et certainement celle des temples. Mais le calendrier civil le négligeait régulièrement, ce qui décalait les dates d'un jour tous les quatre ans : il fallait donc quatre fois 365 années, soit 1460 ans (une période « sothiaque ») pour que les calendriers coïncidassent à nouveau.

C'était, de toute façon, pour emprunter les termes du mathématicien Neugebauer, « le seul calendrier intelligent qui ait jamais existé dans l'histoire humaine ». Ce calendrier solaire, muni toutefois de son année bissextile, fut recommandé par l'astronome alexandrin Sosigène à Jules César, lequel remplaça ainsi, en l'an 45 avant J.-C., le vieux calendrier lunaire romain. Ce calendrier égyptien, légèrement rectifié quelques années après par Auguste, fut utilisé par toute la Chrétienté jusqu'à l'époque du Pape Grégoire, date à laquelle on l'aménagea à nouveau sous la forme que nous lui connaissons de nos jours. En l'an 238 avant J.-C., Ptolémée III avait tenté, en vain, d'ajouter un sixième jour épagomène tous les quatre ans : d'impérieuses raisons religieuses avaient dû contrer encore tout essai de réforme, peut-être même présentée dès Aménophis IV.

Ainsi, dans les deux axes du monde, le soleil devenait-il prépondérant et omnipotent.

La théologie

Au moment où l'humain s'efforçait de trouver une explication aux grandes forces cosmiques qui l'entouraient, les esprits les plus évolués s'appuyèrent certainement sur quelques



Ramsès II apparaissant tel le dieu-soleil Horus sous l'aspect d'un homme à tête de faucon. Grand temple d'Abou Simbel, Nubie, XIX^e dynastie.



Le disque à l'entrée de la tombe de Ramsès X, montrant l'âme solaire du roi mort sous forme d'un génie à tête de bélier et celle du roi renaissant tel le scarabée du soleil. Vallée des Rois, XX^e dynastie.

lois fondamentales, dont ils se servirent comme d'un levier pour rassurer et conduire ceux qu'ils appellèrent vite « le troupeau de Dieu » ou « les ouailles du Soleil ». On reconnaît parmi les multiples témoignages plastiques, graphiques et inscrits, trois versions principales qui interprètent la création du monde suivant des systèmes différents, mais qui s'interpénètrent et parfois même se complètent.

Héliopolis ou l'énigme d'Édipe

Le système prôné dans le cercle des prêtres d'Héliopolis (ainsi appelée par les Grecs en raison du culte typiquement solaire qui était pratiqué depuis le début des temps dans les sanctuaires de cette ville) mettait l'accent sur les divers aspects du soleil. À l'état de démiurge, existant dans l'inconscient du monde, il était Atoum, et créa par la masturbation tout un collège de dieux (l'Ennéade), qui ne sont, en fait, que le commentaire des multiples formes de sa puissance. Ce furent d'abord Shou et Tefnet, l'atmosphère et l'humidité, puis Geb et Nout, la terre et le ciel, enfin les acteurs de la légende osirienne, Osiris et Seth, le bienfaisant et le perturbateur, et leurs deux sœurs Isis et Nephthys, la maternité et l'assistance. De sa léthargie apparente, dans la nuit de son inaction, il se révèle sous la forme de Khepri, le soleil qui pointe à l'horizon à l'aube du monde sans cesse renouvelé. Si l'iconographie religieuse évoque parfois Atoum comme un noble vieillard marchant appuyé sur une canne, qui a porté en lui l'espoir des générations futures, l'aspect qu'elle donne au soleil levant est parfois celui d'un scarabée poussant sa boule solaire, qui, en fait, contient ses œufs mêlés aux substances dans lesquelles ils vont bientôt éclore. Puis le soleil monte à son zénith ; il est alors figuré tel un athlète vigoureux dont le masque de faucon était illuminé des yeux di-

vins : c'est Rê dans toute sa splendeur. On ne peut s'empêcher, à la contemplation de tels symboles, de se remémorer l'énigme posée par le Sphinx et résolue par Édipe : les trois aspects du soleil, selon qu'il ressort des abîmes, qu'il pointe à l'horizon ou qu'il fait vivre le monde, rappellent en somme – sur le plan de la créature – les trois âges de l'homme (l'animal à quatre pattes, à deux pattes et à trois pattes).



Partie inférieure du corps de la déesse Nout, représentée deux fois sur un sarcophage de Mendès, correspondant à la naissance du soleil sous l'aspect d'un enfant et d'un scarabée, aidée par les génies primordiaux d'Héliopolis. Musée du Caire, Basse Époque.

Memphis et le mécanisme de la pensée

La théologie établie par les prêtres de Memphis est fondée sur l'œuvre de Ptah qui transforme la matière, soulève la croûte terrestre, force tellurique pour que tout élément, tout être, réapparaisse au jour, pour que tout ce que l'oreille entend et ce que l'œil voit, arrive au siège de la pensée (situé dans le cœur ?) et qu'ensuite le raisonnement analyse et décide. Matériel et intellectuel, le démiurge, vu sous cet angle, pourrait se rapprocher de l'élément terre (de même que celui d'Héliopolis évoque la lumière et le

feu). Son image anthropomorphisée est celle d'un corps dans un linceul, mais dont la tête et les mains sont dégagées.

La naissance du soleil à Hermopolis

Tout autre est le concept d'Hermopolis : les Grecs reconnaissent Hermès dans la personne de Thot, encore vénéré de leur temps en ce site, patron de la connaissance et du savoir, de la mesure et du temps, image de l'exactitude et de la rigueur scientifique. Mais, à l'origine, c'était avant tout le lieu où était né le soleil, issu de huit ancêtres, ceux des premiers temps « antérieurs ». Ils étaient un et huit à la fois, esquissant ce qui pouvait préexister avant même la création du soleil. Le chiffre de huit qui formait l'Ogdoade représentait le dédoublement de quatre pré-entités primordiales (les *Hehou*). Il y avait le couple *Noun* et *Naounet* qui correspondait à l'eau initiale ; puis *Heh* et *Hehet* l'infini spatiale ; *Kek* et *Ke-ke*, les ténèbres et enfin, *Amon* et *Amounet*, ce qui est caché, l'inconnu, plus tardivement remplacés par *Niaou* et *Niaout*, le vide (le cinquième sens des Bouddhistes). Parfois, on retenait ensemble ces dix entités regroupées au lieu de huit, et, dans ce cas, agissant en véritables prégnostiques, certains considéraient *Amon* et *Amounet* « comme un hypostase synthétique des huit, faisant la somme des huit esquisses antérieures ». Les huit couples créateurs de la lumière, intervenant en protodémurge dans le *Noun* primordial, – nous retrouvons ici le troisième élément liquide –, travaillèrent à la mise en place de l'Univers, parfois étrangement représentés avec des corps d'hommes et de femmes munis respectivement de têtes de grenouilles ou de serpents. On les reconnaît dans le bassin marécageux rempli des eaux du *Noun* et situé au cœur d'un tertre émergé du Néant et appelé « île de l'embrasement ». Sur ce grand étang était apparu un lotus mystérieux. Les principes mâles laissèrent alors couler leurs semences dans la fleur qui, fécondée, s'entrouvrit pour laisser apparaître « un bel enfant radieux qui répandit sa lumière sur le monde et créa le cosmos et les êtres ». Les grands ancêtres travaillèrent donc à la mise en place de l'univers actuel, « le droit fut créé en leur temps, et l'ordre cosmique (*Maât*) vint du ciel à leur époque. La lumière fut faite grâce au travail de leurs mains ».

Une autre version dans les mêmes lieux faisait apparaître la lumière au moyen du Verbe créateur qu'avait proféré le « Grand Jargonneur » caquetant



Le soleil vivant sortant de l'horizon, au-dessus de l'image d'Osiris-soleil mort. Sarcophage de Khonsou, Musée du Caire, XIX^e dynastie.

l'humanité. On faisait aussi allusion à un œuf pondu sur le tertre par un oiseau mystérieux : des deux moitiés de la coquille avait surgi le soleil.

Le lotus, expression du renouveau solaire

Mais, de toutes ces images, il est bien évident que le lotus demeure, en Égypte comme dans le monde asiatique, la plus répandue et la plus diversifiée : culte rendu par le prêtre qui présente au divin, chaque matin, l'image d'un lotus (souvent une fleur d'orfèvrerie articulée) pour affirmer ainsi la renaissance quotidienne du soleil. Fleurs de lotus tenues par les défunts dans le décor des chapelles funéraires, afin qu'ils connaissent, grâce à elles, un renouveau solaire perpétuel ; coupe à vin en forme de lotus pour la libation, dont devait résulter la renaissance et qui évoque d'une façon saisissante le profil du calice recevant le corps circulaire de l'hostie. Fleurs de lotus peintes ou ciselées au fond des vases à lustration, à l'endroit de la matrice de petites figurines féminines rituelles, décor au lotus sur des bijoux funéraires, etc., partout le lotus est là pour évoquer l'apparition du soleil et le rajeunissement du monde, ce qui, au IV^e siècle de notre ère, influença les

théories symbolistes échevelées de Jamblique, concernant « la quintessence spirituellement ignée des nénuphars et leur structure circulaire comme le mouvement de l'âme » !

Amon, « le Caché »

A partir de ces trois systèmes essentiels d'interprétation théologique différents en apparence, mais qui, en fait, servirent de commentaires aux uns et aux autres, on peut dire que les grands centres religieux de l'Égypte organisèrent leur enseignement cosmogonique. Au moment du plus grand rayonnement de la civilisation pharaonique, le dogme officiel de la Couronne devint celui du clergé d'Amon à Thèbes ; Amon, le Caché, aérien peut-être aussi, dont l'essence apparaît déjà dans la théologie hermapolitaine, finit par incorporer tous les principes fondamentaux. On le retrouve dans le grand Nil véhiculant le principe de toute vie ; il est dans l'air et dans le souffle. Ce Caché, de la théologie hermapolitaine, se reconnaît dans une des formes d'Osiris de l'Ennéade héliopolitaine, puis accouple son identité avec Ré lui-même, démiurge de la ville du soleil : il est alors désormais connu sous le nom d'Amon-Ré, l'Eternel.

On peut ainsi affirmer que tout aspect du divin régnant sur les quatre éléments se « solarise » et que l'image de l'astre, de sa puissance et de son action, habite la pensée religieuse égyptienne. Partout, on retrouve le soleil, soit sous l'aspect de ses trois « âges » héliopolitains, soit figuré par un petit enfant nu et accroupi, le doigt à la bouche, comme on le montre, sortant du lotus, à Hermopolis, ou encore la tête seule émergeant de la fleur, forme présente dans la tombe de Toutankhamon.

Avatars et périples du soleil

Cela sera aussi parfois l'enfant nu, tout noir parce qu'il est encore dans l'abîme primordial, parmi les



Les deux barques du Jour et de la Nuit dont les déesses se transmettent le disque solaire. Sarcophage de Tabo, Musée du Louvre, Basse Époque.



Le soleil renaissant diurne et le soleil-Osiris rechargeant son énergie dans le monde nocturne. Vignette d'un papyrus mythologique, Metropolitan Museum of New York.

papyrus, après avoir disparu à l'horizon occidental, dans la célèbre montagne de *manou*. Il relèvera alors la tête dans la montagne de *bakou*, pour illuminer la terre et faire vivre tous ceux qui le voient. On le retrouve aussi tel un faucon, ou encore un homme à tête de rapace, et périodiquement sous la forme du Phénix (le *benou* des textes). Pour se déplacer dans le ciel immense, on lui prête la forme d'un disque, — et parfois d'un globe —, muni des grandes ailes de l'oiseau divin. Ou bien encore, on le place sur une barque qui circule sans timonier ni rameur, mais escortée d'une théorie d'images divines appartenant à la famille hiéropolitaine, et de certains concepts divinisés, aussi bien entre *bakou* et *manou* qu'à l'inverse. Lorsqu'il est le soleil diurne, on lui restitue l'aspect arrondi sous lequel il apparaît aux hommes, ainsi entre deux monticules, ou deux lions symbolisant le passage, ou également Shou et Tefnet. Quand on veut l'évoquer ayant, dans sa course, passé à travers la fente de la montagne de *manou*, à l'occident du ciel, il peut prendre la silhouette d'un homme, protégé par les replis du serpent *mehen* qui lui sert de chapelle, homme muni d'une tête de bélier peinte en vert : c'est la « chair du dieu » qui passe dans les douze heures de la nuit pour « recharger sa force », comme le dira plus tard Héraclite d'Ephèse. Au plafond des profondes syringes du Nouvel Empire, dans la Vallée des Rois, ou même sur ceux des temples ptolémaïques, sur les flancs des grandes cuves funéraires en pierre, mais avant tout couvrant les murs des hypogées des pharaons, puis ornant les papyrus mythologiques, et se déroulant en des épisodes presque dantesques, ce long voyage nocturne du soleil est évoqué. L'astre connaît les épreuves des douze grandes sections de la nuit, avant de renaître à l'horizon d'un nou-

veau matin. Il doit d'abord parcourir ce long boyau comparé au corps du serpent *mehen* ; ou bien être aussi l'immense image étirée de la déesse du ciel, Nout, servant de cadre au firmament : les pieds et les mains touchant le sol, le corps exhaussé horizontalement et sa longue chevelure traînant à terre. La déesse nue avale la boule du soleil mourant à l'occident, qui traversera tout son organisme pour atteindre la fente orientale lui permettant de jaillir, renouvelé, entre ses cuisses sous l'image d'un scarabée ailé. Ailleurs, la barque du jour et la barque de la nuit se rencontrent pour le passage du soleil d'un monde dans l'autre : celui de la clarté qui permet de faire vivre les hommes, celui des ténèbres où se prépare son renouveau. Alors les deux nacelles se rejoignent, et l'astre, saisi par la déesse qui veille sur la barque de la nuit, est délicatement remis dans les mains de celle qui le reçoit pour le placer dans la barque du jour.

Tête de bélier aux chairs vertes, évoquant le soleil en train de se reconstituer, ou jeune scarabée, symbole du soleil levant, ces deux éléments du bestiaire égyptien représentent à eux deux l'éternité souhaitée par le défunt pharaon désireux participer à la force solaire qu'il doit rejoindre ultérieurement, ou à laquelle il doit être assimilé par le jugement suivant son trépas. On ne peut oublier le passage célèbre du conte de Sinouhé, remontant au Moyen Empire, lorsqu'il décrit la mort d'Aménemhat 1er : « il fut enlevé au ciel et ainsi se trouva uni avec le disque solaire, et le corps du dieu s'absorba en celui qui l'avait créé ». Ainsi donc, Pharaon confirme le caractère solaire indéniable qui lui avait déjà été reconnu depuis l'Ancien Empire.

Le caractère solaire de la royauté

En effet, la IV^e dynastie, introduisant dans le protocole royal le titre de « Fils du Soleil » (*sa Rê*),



La déesse du ciel, Nout, avalant le soleil de la 12^e heure du jour et mettant au monde le soleil revigoré. Temple de Dandara, plafond de la chapelle du Nouvel An, époque ptolémaïque.

affirme qu'à la haute époque, le plus illustre des hommes, touché de l'aile du divin, est bien l'héritier incarné de la force la plus puissante au monde. On connaît la statue célèbre de Khéphren, conservée au Musée du Caire : l'arrière de sa coiffure est protégé par les ailes enveloppantes du faucon Horus, dont la tête, aux yeux perçants, domine celle du pharaon, comme le ciel surplombe la terre entière.

Sur le flanc droit de la rampe montante qui mène à la pyramide du même souverain, le grand sphinx de Guizeh, *Hor-em-akhet* (« Horus-dans-l'Horizon ») — dont les Grecs firent Harmachis — évoque, très probablement, l'espoir en la renaissance du roi à l'orient du ciel, lorsqu'il sortira du passage (corps du lion). Dans cette aire prestigieuse, les trois grandes pyramides de Guizeh affirment encore le caractère hiéropolitain et solaire des souverains de l'Ancien Empire. La gigantesque chape de pierre, dont le profil rappelle un rayon solaire s'écrasant au sol, aux pentes si harmonieusement calculées, est un véritable moyen d'ascension céleste. Mais on ne doit pas oublier que le choix des quatre côtés n'est pas fortuit et, se référant au chiffre sacré de la ville de Rê, il matérialise les quatre parties du monde, les quatre points cardinaux et, très vraisemblablement aussi, les quatre éléments.

L'obélisque ou l'action solaire matérialisée

À la dynastie suivante, les temples funéraires de la rive gauche de Memphis possèdent, dans leurs sanctuaires à ciel ouvert, l'image du grand *benben* (de la racine *ben*, jaillir ?) ou premier et massif obélisque. On discute encore sur les détails de sa symbolique, mais il faut certainement y reconnaître une allusion à l'action solaire : jaillissement de la lumière créée hors des eaux, ou jaillissement du membre solaire créateur, qui se réfère évidemment à la fécondation universelle. C'est l'éternelle pierre levée, dont la forme a été sublimement harmonisée. En fait, les rites sont nombreux qui se rapportent aux obélisques, tôt érigés par paires devant les pylônes des temples ; ils possèdent même leur clergé. Parfois intermédiaire entre la force solaire qu'il capte et qu'il transmet à l'image divine au fond du sanctuaire, ou encore beau symbole de « celui qui est venu à l'existence de lui-même » (*kheper-djer-ef* : le démiurge solaire) ce gigantesque bétyle peut, dans les textes, être appelé « la montagne d'or qui illumine le Double Pays ». L'or, reflétant

l'irradiation du créateur, compose la chair des dieux. Aussi, le pyramidion qui termine l'obélisque, est-il plaqué d'or et il arriva parfois, au Nouvel Empire, à la XVIII^e dynastie, que les souverains tentèrent de plaquer entièrement du précieux métal les flancs de la pierre levée, avant d'en ériger même en or massif.

L'approche scientifique

Mythes et vérité scientifique

L'aspect particulièrement original et fondamentalement protoscientifique, en ses grandes lignes, de la théologie physique hermopolitaine, réside dans le fait que cette dernière sous-tend la notion de l'existence, avant la création du soleil, d'éléments indéterminés. Les Egyptiens les désignaient sous l'appellation de *paoutyou*, c'est-à-dire « ceux des temps révolus », « les Grands Ancêtres de l'Univers ». Leur rôle de proto-démiurges accompli, ils s'étaient retirés. Ainsi, ceux qui « existaient avant le commencement des temps » avaient même, dans l'histoire de ces temps, été enterrés dans « la butte primitive » à Djeme (Medinet Hahou).

Si l'on voulait, non pas établir un parallèle, — ce qui serait aussi imprudent qu'inexact —, mais simplement esquisser un rapprochement en tenant compte de la transposition par le mythe, on pourrait reconnaître en ces « Grands Ancêtres », tous ces gaz et poussières cosmiques qui constituaient le nuage initial au moment de la formation des galaxies et d'où proviennent notre soleil émis dans l'espace « par le jeu des réactions thermonucléaires, des radiations chargées d'énergie... » et notre planète « masse obscure et dense de poussières rocheuses » (Joël de Rosnay).

Nous n'ignorons pas que derrière ces images, ces symboles, les savants de l'Égypte ancienne cachaient des vérités profondes, des observations pertinentes, des enseignements qu'il ne fallait pas encore révéler. Que le soleil soit figuré tel un scarabée, un nouveau-né le doigt dans la bouche, ou un vieillard s'appuyant sur une canne, ou encore par une silhouette humaine à tête de bélier, le clerc voulait, par ces représentations, évoquer la chaleur, la lumière, l'action croissante ou décroissante de l'astre, nul ne s'y trompait. Mais quelles lois empiriques du Cosmos les physiciens des pharaons avaient-ils alors pu découvrir pour les révéler par leurs gigantesques fresques



Amenhotep IV et Nefertiti au balcon de leur palais thébain. Tombe de Ramosé à Gournah, XVIII^e dynastie.

mythologiques ? Aux scientifiques d'aujourd'hui de répondre. A leur intention, signalons que l'enseignement hermopolitain constitue sans doute l'approche la plus élaborée d'une analyse de certains phénomènes relatifs aux origines de l'Univers et à l'apparition du soleil.

Amenhotep IV et le globe solaire Aton

Au dernier quart de la XVIII^e dynastie (vers 1375 avant notre ère) Amenhotep IV tenta de clarifier le dogme en le rendant plus accessible à l'entendement de son époque. Très fidèle à l'enseignement des prêtres d'Hermopolis, — l'antique ville des Huit : *Khemenu* —, en face de laquelle, au reste, il fonda sa nouvelle capitale (l'actuelle Amarna), il ne voulut pas remonter aux mythes de la formation de l'univers. En revanche et délibérément, il s'attacha au commentaire de l'action du soleil, au fonctionnement de la vie elle-même, du « moulin de la vie » au sens actuel du cycle de Krebs. Aussi mit-il l'accent sur le rôle de Shou issu du soleil et auquel la légende héliopolitaine assigne la tâche de séparer le ciel de la terre. On ne peut, alors, s'empêcher de penser à la constitution de notre système solaire et, plus précisément, sans doute, à la formation autour de la terre de la couche protectrice d'ozone indispensable à la vie.

Il faut donc réellement attendre les règnes d'Amenhotep III et d'Akhenaton son fils, pour rencontrer l'image la plus réaliste du soleil. Se reportant aux manuscrits les plus vénérables des premiers temps, conservés dans cette région de Moyenne Égypte, le quatrième Amenhotep s'ingénia à clarifier le dogme et à se servir des représentations les plus accessibles et naturalistes pour commenter les grandes lois physiques

de la nature qui, pour lui, étaient l'expression-même du divin. C'est ainsi que les figurations divines anthropomorphes disparurent, et qu'à la place d'un factice panthéon incarné, on ne vit plus, dans le décor religieux, que le disque, et parfois le globe (de l'œil ?) solaire, dominant l'action du couple royal (parfois même dans un embrassement rituel) le temple ou le palais vers lesquels il dardait ses rayons. Voici donc l'apparition des rayons, non pas comme les Grecs et enfin plus tard, les Européens les distribuèrent tout autour de la masse solaire, mais laissant seulement passer la lumière et la force dans la direction de celui qu'ils veulent pénétrer. Cette image, avec quelques variantes, sera reprise dans certains papyrus mythologiques, puis sur des stèles de la Basse Époque, et enfin dans certains temples, comme celui de Dendara, mais les rayons seront alors faits d'une infinité de petites pyramides imbriquées s'épanouissant sur un sujet ou le sol, vers lesquels ils sont dirigés. Le soleil d'Amenhotep IV-Akhenaton est tout autre et ses rayons sont terminés par de petites mains. Plus encore, sur tous les reliefs de son époque, les mains touchent les corps royaux, s'approchent d'un geste protecteur des couronnes et présentent aux narines du roi et de la reine le signe de vie (dans la tombe de Parennefer, une des mains tient une *uraeus*).

Le rôle de *ankh* et de *was*

Si l'on se reporte aux premières représentations de la réforme religieuse, laquelle naquit, — on le sait —, à Thèbes au temps de la corégence d'Amenhotep III et d'Amenhotep IV, on peut contempler dans la tombe du vizir Ramose une des premières scènes de distribution de récompenses par Amenhotep IV et Nefertiti au balcon de leur palais. Le signe de vie (*ankh*) touchant aux narines des souverains, voisine avec le signe *was*, dirigé vers le sol, tenu par d'autres mains solaires. Au début de la réforme religieuse, les indications fournies par l'iconographie étaient un peu plus explicites : le roi voulait montrer que la force d'Aton (disque ou globe solaire) était traduite, commentée et véhiculée au moyen d'intermédiaires figurés par les signes *ankh* et *was*. L'un est le symbole de la vie, ou du moins ce que nous appelons la vie, mais en tout cas une vie qui dépasse l'humain, car le signe est tenu dans la main des images divines qui s'en servaient, à toutes les époques, pour insuffler le *pneuma* aux narines de

Pharaon. Quant au signe *ouas*, il est, dans les formules lapidaires, un complètement régulier du signe de vie. Souvent dans la main des dieux, telle une canne, il encadre, comme deux piliers, l'image du monde entre la terre et le ciel. Ces deux hiéroglyphes, en somme, servent de sigle à de nombreuses scènes religieuses, et figurent, alternés, dans les frises de temples, jusqu'à l'époque ptolémaïque. A leur propos, Erich Winter a récemment démontré qu'il fallait voir dans le signe *ankh* le symbole du dieu Shou, et dans le signe *ouas* celui de Tefnet, tous deux retrouvés dans l'Ennéade héliopolitaine. L'entité Shou, — une des seules qui avaient été conservées par Aménophis IV — fut introduite par le roi dans le protocole de son image solaire, Aton, le Père. En effet, la première version des épithètes d'Aton est la suivante : « Horus horizonnier se manifestant en joie dans l'horizon en son nom de Shou qui est (dans) Aton ».

L'hymne au créateur

Ainsi donc, nous touchons au vif de la réforme qui est si bien commentée dans les hymnes à Aton, si originaux et empreints d'un universalisme qui dépeint clairement la hauteur de vue de leur rédacteur, Akhenaton lui-même. Dans ces textes, le dieu est présenté comme l'unique créateur de tous les hommes, universellement adoré. On y célèbre sa grandeur, mais sans aucune allusion, cette fois, à ces faits mythologiques dont sont remplis la plupart des autres hymnes. On n'y trouve ni détail superflu, ni répétition fastidieuse et lourde, et il s'en dégage une profonde humanité. On peut y relever également, ainsi que l'a noté Fechtmeier, la preuve qu'un lien de continuité, plus étroit qu'on ne le suppose, nous unit à l'Égypte. Il est incontestable, par exemple, que cet Hymne à Aton offre, dans les idées comme dans les images, d'étroites analogies avec les œuvres des mystiques du Moyen Âge, notamment avec cet admirable chant de Saint François d'Assise :

*« Sois loué, ô Seigneur, avec toutes tes créatures,
Surtout avec Monsieur mon Frère, le Soleil,
Qui produit le jour, et nous éclaire de sa lumière ;
Il est beau, il rayonne d'éclat ;
De toi, ô Seigneur, il porte l'emblème !*

Ainsi toute vie émane du soleil et est transmise à l'humanité par l'intermédiaire et sous la garantie organisée de Pharaon qui forme, avec

*Magnifique est ton apparition à l'horizon du ciel, ô Disque vivant
qui vécut le premier !
Une fois levé à l'horizon du ciel, tu remplis toutes les terres de ta beauté.
Tu es beau, tu es grand, tu étincelles, et tu domines toutes les contrées.
Tes rayons embrassent les pays, tous, autant que tu en as créés.
Tu es Rê et tu pénètres jusqu'à leur extrémité.
Tu les enchaînes pour ton fils chéri (le pharaon).
Bien que tu sois éloigné, tes rayons sont sur terre.
On te voit, et (pourtant) on ne connaît pas ta marche.*

*Lorsque tu te reposes dans l'horizon occidental du ciel
Comme si elle était morte, la terre est dans l'obscurité.
On dort dans les chambres, la tête enveloppée,
Si bien qu'un homme ne peut pas voir son compagnon.
Si tous les biens que l'on a sous la tête étaient dérobés,
On ne le remarquerait même pas.
Tout lion sort de sa tanière,
Tous les serpents mordent,
Les ténèbres recouvrant tout !
Le monde est dans le silence,
Car celui qui l'a créé repose dans son horizon.*

*Lorsque tu te lèves à l'horizon, la terre s'illumine
En tant que Disque tu luis, durant le jour,
Et tu chasses les ténèbres. Lorsque tu fais don de tes rayons,
Le double Pays (les habitants de l'Égypte), est en fête
Les hommes s'éveillent et se dressent sur leurs pieds
Car tu les as fait lever ;
Ils lavent leurs membres, et prennent leurs vêtements,
Leurs bras se lèvent en adoration lorsque tu apparais
Et puis le pays tout entier se livre à son travail.*

*Tous les troupeaux sont satisfaits de leurs herbages,
Les arbres et les plantes verdissent
Les oiseaux délaissent leurs nids
Et leurs ailes adorent ton Ka
Sur ses pieds bondit tout le petit bétail,
Tout ce qui vole et bat des ailes vit
Lorsque pour eux tu t'es levé.
Les barques remontent et descendent le fleuve, pareillement,
Chaque route est ouverte puisque tu te lèves.
Les poissons dans le fleuve sautent à ta face
Et tes rayons traversent la profondeur de la mer.*

*Tu fais se produire le germe dans les femmes,
Tu as créé la semence dans les hommes,
Tu fais vivre le fils dans le ventre de sa mère
Tu l'apaises afin qu'il ne pleure pas,
O Nourrice dans le sein maternel.
Dispensateur de souffles, qui vivifies tous ceux qu'il a créés,
Lorsque (l'enfant) sort du sein maternel, au jour de sa naissance,
Tu ouvres sa bouche complètement,
Et à ses besoins tu pourvois.
Si l'oisillon à naître pèple déjà dans la coquille de l'œuf
C'est que déjà tu lui as donné le souffle pour le faire venir,
Et puis pour qu'il la brise (la coquille), tu as marqué son terme.
Il sort de l'œuf et bruyamment se fait entendre.
Dès qu'il vient d'éclore, sur ses pattes il court.*

Combien multiples sont tes œuvres
 Bien qu'il (en) demeure de cachées !
 O toi, dieu unique, à côté de qui n'en existe point d'autres
 Tu as créé la terre selon ton désir,
 Toi seul, avec les hommes, et les bestiaux,
 Tous les animaux (du désert)
 Tous ce qui vit sur le sol et marche sur ses pattes,
 Tous ce qui plane en l'air et vole avec ses ailes.
 Qu'il s'agisse des pays étrangers, de la Syrie, de la Nubie
 Ou de la terre d'Égypte,
 Tu mets chacun à sa place, et tu pourvois à leurs besoins
 Tous ont leur nourriture,
 Et leur temps de vie est compté.
 Leurs langues s'expriment en paroles différentes
 Divers aussi est leur aspect (celui des hommes).
 Leur peau n'est pas semblable.
 Car, tu as su faire la distinction des peuples.
 Dans le monde inférieur, tu créas le Nil,
 Et tu le mènes comme tu l'entends pour nourrir les gens d'Égypte.
 Puisque tu les créas pour toi,
 Tu es leur Maître à tous, qui peines pour eux,
 Le Maître de tous les pays, qui te lèves pour eux,
 Le Disque du jour, à l'aspect majestueux.
 Tous les pays éloignés, tu les fais vivre (aussi).
 Ainsi as-tu placé un autre Nil dans le Ciel, afin qu'il tombe pour eux.
 Et roule ses flots sur les montagnes
 Comme la Très Verte (la mer), pour irriguer leurs champs dans leurs
 bourgades.

Combien excellentes sont tes pensées,
 O Seigneur de l'Éternité.
 Le Nil au ciel, tu le donnes aux peuples étrangers,
 Et, dans chaque désert, au bétail qui va sur ses pattes,
 Mais, pour la terre aimée, (l'Égypte), c'est du monde inférieur que
 vient le Nil !

Tes rayons nourrissent tous les champs ;
 Lorsque tu luis, ils vivent et croissent pour toi.
 Tu fais les saisons pour que poussent toutes tes créatures !
 L'hiver, pour les rafraîchir,
 Et, pour qu'elles te goûtent, la chaleur.
 Tu as fait le ciel éloigné pour qu'en y montant
 Il te soit possible de contempler tout ce que tu as créé.
 Tu es unique, et tu te lèves sous ton aspect de disque vivant.
 Lorsque tu te lèves et que tu luis, lorsque tu t'éloignes et que tu
 reviens,

Tu crées des millions d'êtres de toi, qui est Un.
 Villes et bourgades, champs, chemins et fleuve,
 Chaque œil te voit en face de lui,
 Lorsque tu es le Disque du jour au-dessus de la terre.

.....
 Tu es dans mon cœur, et nul ne te connaît
 Si ce n'est ton fils, le roi Akhénoten.
 Tu lui fis comprendre ta nature et ta force.
 (Les habitants) du monde, sont dans tes mains, puisque tu les as créés.
 Si tu te lèves, ils vivent ; te couches-tu, ils sont morts.
 C'est bien toi-même, la durée de la vie,
 Et l'on vit de toi.
 Les yeux contemplent ta beauté, jusqu'à ce que tu te couches.
 Et le travail cesse, lorsque tu te couches à droite. (II).

.....
 Principaux passages du plus important des deux hymnes à Aton, dont le texte a été re-
 trouvé sur les parois de la tombe du grand Majordome Aï, dans la nécropole d'El-
 Amarna.

Néfertiti, ce couple terrestre des sexes
 différenciés, réplique tangible de Shou
 et Tefnet, contenus en substance dans
 la chaleur initiale, - ces jumeaux sans
 lesquels le demiurge ne peut vivre -, et
 commentaire vivant du créateur.

La démythification d'Osiris et la religion des souffles

Avec la reconnaissance de l'omni-
 potence du soleil et des forces
 qui l'habitent, il n'y a plus de concept
 réel de la mort, il n'y a plus de dieu
 Osiris chthonien et, partant, il n'y a
 plus de mystère. Le nouveau prophète
 s'efforce d'expliquer, de commenter, les
 grandes lois de la nature, et c'est évi-
 demment par l'image, - et même son
 propre corps matérialisant la création
 du dieu -, qu'il va s'exprimer. Qu'est-
 ce que la vie ? - c'est le mouvement,
 les artères qui battent, les organes qui
 fonctionnent, les plantes et les animaux
 qui croissent, le mouvement universel.
 Elle peut s'assoupir, mais non pas dis-
 paraître. Un repos cosmique, oui, une
 transformation, peut-être, une muta-
 tion, - mais non un anéantissement !
 Osiris n'est pas un dieu distinct de Rê,
 le soleil : il est partie intégrante du so-
 leil, c'est la force qui se recharge.
 Akhenaton désire alors démythifier la
 légende d'Osiris, mort parce qu'il ne
 peut plus procréer. La blessure stérili-
 sante qui lui avait été infligée n'est
 qu'un instant de répit avant son réveil
 prochain. Son corps meurtri, enfermé
 dans un sarcophage, est immergé dans
 le fleuve souterrain comme un élément
 radio-actif dans son château de plomb.
 Mais, au moment où il sera libéré, il
 jaillira tel une force fulgurante. D'Osiris
 assoupi, il redeviendra Rê irradiant.
 Alors le roi, dans son nouveau temple
 à l'Est de Karnak, fit sculpter certaines
 de ses statues en homme nu, immobile
 et privé de son sexe : voici donc Osiris,
 le soleil endormi, incapable de procréer
 avant d'avoir récupéré l'ardeur génési-
 que. Le roi a dévoilé le mystère jalou-
 sement caché par les prêtres, ce qui ne
 lui sera jamais pardonné. Puis, à côté,
 une autre image du roi, en support vi-
 vant de l'astre, vêtu du pagne pharaoni-
 que, les plumes du dieu Shou sur la
 tête. Le cycle éternel est rétabli : tout
 est avatar du soleil : il dispense, au
 moyen de ses jumeaux, Shou et Tefnet
 (atmosphère, souffle et humidité), les
 possibilités d'existence, qu'il préempte
 à son tour par l'oblation de tout ce que
 produit la terre. (Ainsi, pour faire appel
 à une comparaison audacieuse, la pho-
 tosynthèse rejette de l'oxygène dans
 l'atmosphère). Maintenant sera-t-il

sans doute possible à celui qui n'est pas égyptologue de comprendre un des plus suggestifs tableaux de l'époque du roi réformateur, conservé dans une tombe de Tell el-Amarna, celle de Apy, où le couple royal, escorté des trois premières princesses, fait offrande à l'astre rayonnant. Les petites mains solaires sont prêtes à saisir les produits qui leur sont offerts, et le signe *ankh* est présenté aux narines du souverain. Comme à l'accoutumée, les rayons irradiant surtout les deux personnages royaux, et s'ils ne touchent pas les princesses (produit du couple royal, substitut terrestre du soleil) ils se dirigent bien vers les offrandes, cependant que le roi et la reine élèvent vers l'astre rayonnant leur offrande suprême qui est faite d'une sorte de pyxide en forme de double cartouche marquée des noms du dieu. L'objet tenu en mains par le roi porte les inscriptions dans la direction du roi-même, ce qui signifie que la personne royale est confondue avec le dieu, ou est son émanation. De chaque côté du nom divin, deux petites images du dieu Shou confirment cette hypothèse. Quant à la reine, exhaussant également une pyxide analogue, mais plus petite, flanquée d'un côté par l'image de la souveraine accroupie en orante, nous la voyons en vis-à-vis des inscriptions du double cartouche : elle fait donc remonter à la face du créateur un élément qu'il avait dirigé vers elle (l'humidité ?). Il fallait de surcroît que l'auteur de la composition puisse exprimer, non seulement par l'image des rayons, la présence solaire, mais encore par un moyen approprié l'effet qu'ils produisaient : ce souffle de vie qui ne pouvait exister sans le soleil. Aussi, pour le montrer agissant, l'artiste a fait flotter derrière la nuque des souverains les longs et élégants rubans de leurs coiffures : l'invisible par le visible – il fallait y penser !



L'offrande au globe d'Aton, grand dispensateur du souffle de vie. Tombe de Apy, Tell el-Amarna, XVIII^e dynastie.



Le couple royal défilant sur le char solaire rutilant d'or. Tombe d'Achmen à Tell el-Amarna, XVIII^e dynastie.

Pharaon sur son char, préfiguration d'Apollon

Durant cette période de grand commentaire physico-religieux de la machine cosmique, Pharaon devait briller comme cette lumière qui est dans le soleil. Dans la ville qu'il avait fondée, Akhet-Aton – le Tell el-Amarna actuel –, il apparaissait tel l'astre fabuleux sur son char plaqué d'or, avec son élément complémentaire Néfertiti, tiré par des coursiers empanachés. Voici que survient, du même coup, la préfiguration du roi soleil et celle du char d'Apollon.

Une gémale synthèse

À la lecture de cet exposé dont je mesure la complexité, il faut se rappeler que l'expression de tout le dogme religieux des Égyptiens, aux époques précédentes, était certainement encore plus diffuse et accessible aux seuls initiés. Akhenaton avait sans doute tenté de fournir, à l'entendement, des approches parfaitement scientifiques qui s'opposaient aux gloses et aux légendes mythologiques de plus en plus incompréhensibles. En dépit des réactions provoquées par cette « réforme solaire » et malgré le retour apparent aux enseignements traditionnels, les audaces qu'il avait risquées, – et que risquera encore il y a si peu de temps, *mutatis mutandis*, un Teilhard de Chardin –, n'étaient pas restées sans lendemain : le grand Ramsès les reprit en s'efforçant de les exprimer avec sans doute plus d'habile diplomatie, et à l'aide de symboles complémentaires. Mais le fond demeurait le même. Il sut, plus que d'autres peut-être, se montrer comme l'évocation du soleil incarné. Moins d'explications protoscientifiques, moins de commentaires sur l'action cosmique, mais tout reporté sur son image à lui-même, en qui était rassemblée l'immense puissance solaire. Il était Rê, ainsi qu'il est sculpté au-dessus de la porte de son grand spéos

d'Abou Simbel, tel un homme gigantesque à tête de faucon, recevant même un culte rendu par sa propre personne. Il essaie néanmoins d'exprimer l'incommensurable du divin, toujours à l'aide d'éléments solaires, en confondant volontairement les figures divines étrangères avec celles de la théologie héliopolitaine. Il s'efforce de réunir en une seule personne les entités qui, – apparemment formées de démiurges différents : Rê, Amon, Ptah –, ne sont en réalité que les éléments d'un seul et unique corps. Et lorsque, dans le fond de son grand temple d'Abou Simbel, par exemple, il se fait représenter parmi les

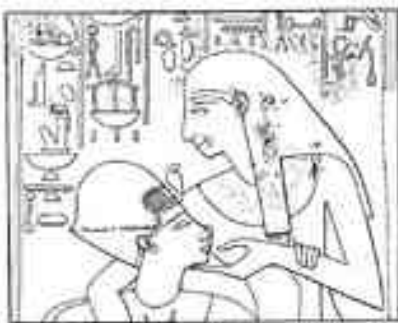


La momie de Nofretary symbolisant en une seule image le soleil mort et le soleil renaissant, se transformant sous la protection d'Isis et de Nephthys. Tombe de Nofretary dans la Vallée des Reines, XIX^e dynastie.

images divines, son mobile est avant tout de montrer qu'elles ne font qu'un avec lui, le soleil renaissant. L'autel solaire érigé devant ce même temple, et sur lequel veillent les cynocéphales « assistants » de l'astre, marque encore ce souci d'utiliser les symboles de l'action diurne et de l'action nocturne du démiurge pour exprimer l'éternité du mouvement cosmique auquel il veut être associé pour toujours. Cette même éternité, faite d'hier et de demain, c'est-à-dire des deux aspects du soleil, mort et vivant, d'Osiris et de Rê, dont il reprend le commentaire à son compte, il la fait figurer dans le tombeau de sa reine préférée, Nofretari, sous l'image de la momie de la reine à tête de bélier (la chair du dieu qui va renaître). L'inscription qui l'accompagne en donne une très claire explication : « C'est Rê qui se repose en tant qu'Osiris, – Osiris se repose ainsi dans le soleil ». Pour souligner encore son attachement à toute la symbolique solaire, il reprend à son compte l'obélisque unique que les Thoutmosides avaient érigé à l'est de

leur sanctuaire de Karnak. Il y adosse sa statue majestueuse et monumentale qui devient l'objet de la vénération, confondu avec le soleil et avec Amon, c'est-à-dire avec Amon-Rê, voici Pharaon, tourné vers une ouverture en direction de l'extérieur, grâce à quoi les humbles peuvent enfin avoir accès au temple et implorer le miséricordieux : « l'Amon qui écoute les suppliques ».

En Nubie, Ramsès, soleil et projection du soleil sur terre, avait fondé de nombreux sanctuaires, dont les deux plus célèbres maintenant, ceux d'Abou Simbel, reçoivent son image de divinité éclatante dans le spéos* du sud, alors que dans le spéos du nord, la reine, telle l'étoile Sothis, permet, au début de chaque année, l'apparition royale à l'horizon comme astre renouvelé. Et pour puiser encore davantage aux sources les plus anciennes de la religion qui avait inspiré Aménophis IV-Akhenaton, il se penche sur le message du temps des Pyramides. Il constate que, dès la V^e dynastie, le roi Sahourê avait fait figurer dans son cartouche le soleil sous la forme d'un sein gonflé, au mamelon protubérant. Ce même sein solaire retrouvé sur les obélisques de la reine Hatchepsout et de Thoutmosis III, réapparaît sur le corps quasiment hermaphrodite d'Aménophis IV ; Ramsès en reprend le symbole et dans de



Allaitement de Ramsès II par Isis qui lui transmet le lait ankh-ouas.

nombreux cartouches, à Louxor aussi bien qu'au Ramesseum, son temple de « millions d'années » : le soleil, qui est un des composants de son nom et qui se retrouve aussi dans son prénom, est souvent représenté sous l'aspect de cette mamelle. C'est, pour lui, une façon de traduire les actions primordiales du soleil, distribuant le *ankh* et le *ouas*, c'est-à-dire Shou et Tefnet, car le lait est appelé justement *ankh-ouas* dans les textes religieux. Reprenant donc une très vieille image, Ramsès suggère encore le soleil comme nourricier par excellence, évoqué du temps d'Aménophis IV sous la forme de l'astre dirigeant vers la narine des souverains les signes *ankh* et *ouas* tenus par les petites mains solaires. L'antique et vénérable symbole nous permet de mieux comprendre les scènes où Pharaon est allaité par une déesse : il reçoit, pour son renouvellement solaire, le *ankh-ouas*, élément essentiel dispensé par la divinité à son fils, le pharaon.

Le message égyptien

Durant cette longue quête à travers plus de trois mille ans d'histoire, on retrouve donc cette reconnaissance de la gigantesque machine solaire qui fonctionne pour la terre. Il ne pouvait en être autrement, dans un pays où les contrastes si violents entre le désert stérile et la fertilité verdoyante étaient à ce point juxtaposés. Tous semblaient dépendre – et en réalité dépendaient –, plus qu'ailleurs, de l'astre aussi omniprésent. Peu de nuées, de rares éclipses qui provoquaient de réelles angoisses, la vie était suspendue à l'achèvement de la nuit et au retour du jour ; et après la joyeuse période des récoltes, on connaissait l'appréhension d'une éprouvante sécheresse, avant que ne revienne l'inondation salvatrice. Il fallait avant tout que demain revienne, que le Jour de l'An se produise, pour que l'équilibre du monde ne soit pas ébranlé. Il fallait donc que réapparaisse en un rythme

éternel et régulier l'irradiante machine.

Aussi ne soyons pas étonnés qu'après les Grecs, les Romains eux-mêmes aient été frappés par les conceptions des anciens Egyptiens. L'empereur Hadrien – on le sait – avait été conquis par les approches égyptiennes du grand mystère cosmique. Sur les ruines de la célèbre porte qu'il consacra dans le *temenos** d'Isis à Philae, on retrouve encore le reflet des enseignements qu'il avait fait siens dans un tableau sculpté au-dessus d'un passage percé dans le mur Sud. En bas de la scène, un crocodile ramène, du fond de l'onde, Osiris momifié qui va sortir de son immersion. Les plantes qui encadrent la composition évoquent naturellement le milieu aquatique. Au sommet, l'immensité du ciel nocturne est marquée par une ligne d'étoiles limitée à chacune des extrémités par l'image de la lune et du soleil. Enfin, le centre de la scène où va se jouer le grand drame de la renaissance du monde, est marqué par un gigantesque globe flanqué de deux montagnes. Et au cœur même de la machine qui dispense toute force, les deux symboles propres à faire comprendre les deux aspects essentiels de l'énergie : l'image d'Osiris, le dieu en léthargie (autre version de la momie à tête de bélier) et celle de l'enfant accroupi, le jeune Horus, le doigt dans la bouche, (traduite ailleurs par la forme du scarabée), le soleil levant. C'est une image du monde, telle que les Egyptiens la rendaient avec leurs hiéroglyphes monumentaux, à la fin d'une civilisation où l'homme se rapprochait des mystères qu'il allait s'efforcer d'expliquer avec son humble langage scientifique.

- * *Temenos* enclos sacré.
- * *Speos* caverne aménagée.



Le sein solaire figuré dans le cartouche de Sahourê. Musée de Berlin, V^e dynastie. Obélisque de Thoutmosis I^{er} où l'on retrouve le sein solaire dans nom du roi et du dieu. Karnak, XVIII^e dynastie. Le sein solaire figuré sur les inscriptions de la base d'une statue de Ramsès II à Louxor, XIX^e dynastie.



Les éléments du monde dominés par les aspects diurnes et nocturnes du soleil. Porte d'Hadrien à Philae, 2^e siècle après J.-C.

La vie magnétique du soleil

Le soleil, comme toute étoile, vit. Il « consomme » son hydrogène et nous irradie de ses rayonnements ; mais entre le processus élémentaire de fusion nucléaire, qui a lieu dans le noyau du soleil et la diversité des phénomènes macroscopiques, il y a toute une cascade de processus physiques. Ici sont présentés ceux liés aux champs magnétiques du soleil.

Groupe optique de Meudon

Dès le IV^e siècle avant J.C., on avait remarqué à l'œil nu, la présence sur le disque solaire de taches sombres, mais ce n'est qu'avec l'invention de la lunette en 1610 que ces taches furent associées au soleil lui-même.

Des taches sombres sur le soleil

Deux siècles encore passèrent avant qu'un astronome amateur, Heinrich Schwabe, ne trouvât une période de dix ans entre deux maximums consécutifs du nombre de tache. Quelques années plus tard, Rudolf Wolf, directeur de l'Observatoire de Berne, remarqua le travail de cet amateur et organisa une recherche systématique des taches solaires au niveau européen. Ce fut le départ de collaborations qui s'étendent maintenant aux pays du monde entier et auxquelles la France prend une part importante.

Wolf entreprit une recherche historique de toutes les données d'observation de la surface solaire rassemblées dans les archives et les analysa avec soin. Il reconfirma le comportement cyclique des taches (fig. 1) depuis 1610 et en précisa la période (onze ans). Il ne remarqua pas que le nombre de taches fut très réduit pendant la seconde moitié du XVII^e siècle, ou plutôt l'attribua-t-il à la pauvreté des données d'observations. Pourtant, la décroissance du nombre de taches observées entre 1645 et 1715 avait été remarquée pour la première fois par Lalande dès 1792, mais ce ne fut qu'à la fin du XIX^e siècle que les astronomes, en particulier l'astronome anglais Maunder, s'inter-

rogèrent sur la signification de ce minimum prolongé de l'activité solaire. Celui-ci a peut-être sur les conditions climatiques terrestres des implications plus importantes que la modulation à court terme de onze ans (voir article de R. Kandell).

On sait maintenant que les taches sont le siège de champ magnétique intense (2 000 à 4 000 gauss).

Un grand nombre d'autres structures ont été découvertes avec les télescopes modernes : facules brillantes, protubérances, trous coronaux..., toutes étant associées à des champs magnétiques et à des mouvements de matière.

Le soleil : une dynamo ?

Les questions qui se posent évidemment dès que l'on aborde le problème des champs magnétiques sont les suivantes : comment le champ magnétique est-il engendré et comment a-t-il persisté depuis des temps géologiques ?

Le soleil ne tourne pas comme un corps solide, la vitesse angulaire à l'équateur étant environ 50 % plus grande qu'aux pôles. D'autre part, à la température élevée du gaz solaire, la matière est en partie ionisée, donc conductrice, et interagit très fortement avec le champ magnétique. Supposons qu'il existe un champ originel poloidal (c'est-à-dire dirigé selon l'axe magnétique de l'étoile), la rotation différentielle (accélération équatoriale) va déformer les lignes de force et donner naissance à des composantes toroïdales (c'est-à-dire dans le plan de l'équateur) de sens opposé dans chaque hémisphère (fig. 2). Pour régénérer le champ poloidal à partir du champ toroïdal, un mécanisme supplémentaire est nécessaire.

On a pu montrer que des mouvements convectifs non axisymétriques transforment ce champ toroïdal en un nouveau champ poloidal de sens opposé au précédent. On explique ainsi qualitativement le renversement périodique de la polarité du champ magnétique qui caractérise le cycle solaire.

Quelle est l'origine de ces mouvements convectifs ?

La zone située juste en-dessous de la surface visible du soleil est un gigantesque moteur thermique qui convertit une petite fraction du flux de chaleur lui parvenant du centre du soleil en mouvements convectifs. Différentes cellules convectives ont été observées : la granulation dont les dimensions horizontales sont de l'ordre de 1 500 km (fig. 3), et la supergranulation de plus grandes dimensions ($\approx 30\,000$ km). On suspecte maintenant l'existence de cellules convectives à beaucoup plus grande échelle spatiale et temporelle et qui pourraient, par conséquent, subir davantage les effets de la rotation. Cette convection globale se révèle ainsi un candidat de premier choix pour la régénération du champ.

Le minimum de Maunder est-il fortuit ou non ?

Deux ingrédients semblent donc nécessaires pour la bonne marche de la dynamo solaire : la rotation différentielle d'une part, et l'existence de mouvements convectifs organisés d'autre part. Si l'un de ces facteurs est modifié, le cycle solaire normal est altéré au point de devenir inobservable. Il semble d'ailleurs qu'il y ait des indications selon lesquelles la rotation aurait changé de façon significative pendant

le minimum de Maunder (entre 0 et $\pm 20^\circ$ de latitude, elle se serait accrue par un facteur 3 !). En outre, dans des simulations numériques, on a bloqué la convection et il apparaît alors un cycle solaire affaibli comparable à celui de Maunder. Bien qu'on ignore actuellement ce qui pourrait modifier les champs de vitesse convectifs, la cause, si elle existe, a probablement son origine dans l'intérieur du soleil. Quel que soit l'effet considéré, on peut imaginer que le cycle solaire bascule entre deux modes, le mode normal et le mode de Maunder, avec une périodicité qui n'est pas connue mais dont l'ordre de grandeur pourrait être de quelques centaines d'années.

Le transport du champ magnétique à la surface du soleil : poussée d'Archimède magnétique ?

Le champ engendré dans les couches profondes de la zone convective doit être transporté à la surface visible du soleil (photosphère). Un mécanisme possible est la poussée d'Archimède magnétique. La pression gazeuse de la matière à l'intérieur d'un tube de force est inférieure à la pression gazeuse du milieu non magnétique environnant car elle doit satisfaire à l'équilibre de pression :

$$(P_{\text{gaz}} + P_{\text{magn}})_{\text{tube}} = (P_{\text{gaz}})_{\text{extérieur}}$$

La densité dans le tube y est moindre qu'à l'extérieur, par conséquent la force de gravité qui s'exercera sur le tube sera plus faible que celle s'exerçant dans le milieu environnant. Le tube magnétique s'élèvera et ce, d'autant plus rapidement que le champ magnétique sera plus intense. Là encore, bien des problèmes restent à résoudre : quelle est l'intensité du champ magnétique dans la zone convective ? Y séjourne-t-il assez longtemps pour être régénéré de façon à expliquer le cycle de onze ans ? On n'a pas encore de réponse directe au premier problème puisque la zone convective reste inaccessible à l'observation. Des considérations théoriques avaient montré que si le champ magnétique dépassait cent gauss là où il est engendré, c'est-à-dire dans les couches profondes de la zone convective, il serait dissipé en moins de deux ans. Ce court délai ne laisserait pas le temps à la dynamo solaire de jouer son rôle. Bien des phénomènes interviennent sur la vitesse d'ascension des tubes de flux, notamment la nature visqueuse du milieu convectif et l'on doit considérer avec prudence ces prédictions alarmantes.

Une conséquence directe de l'émer-

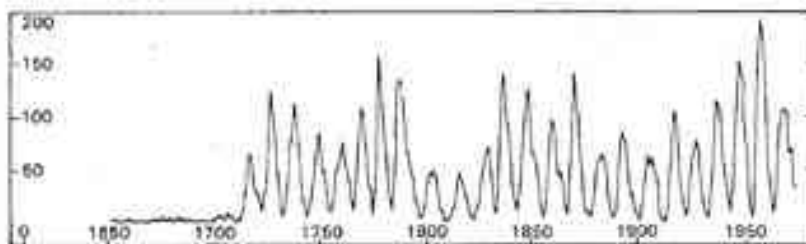


Fig. 1 - Nombre de taches observées de 1610, date de l'invention de la lunette, à nos jours (d'après Waldmeier et Eddy). On retrouve la récurrence de 22 ans du cycle solaire et son affaiblissement au milieu du XVII^e siècle.

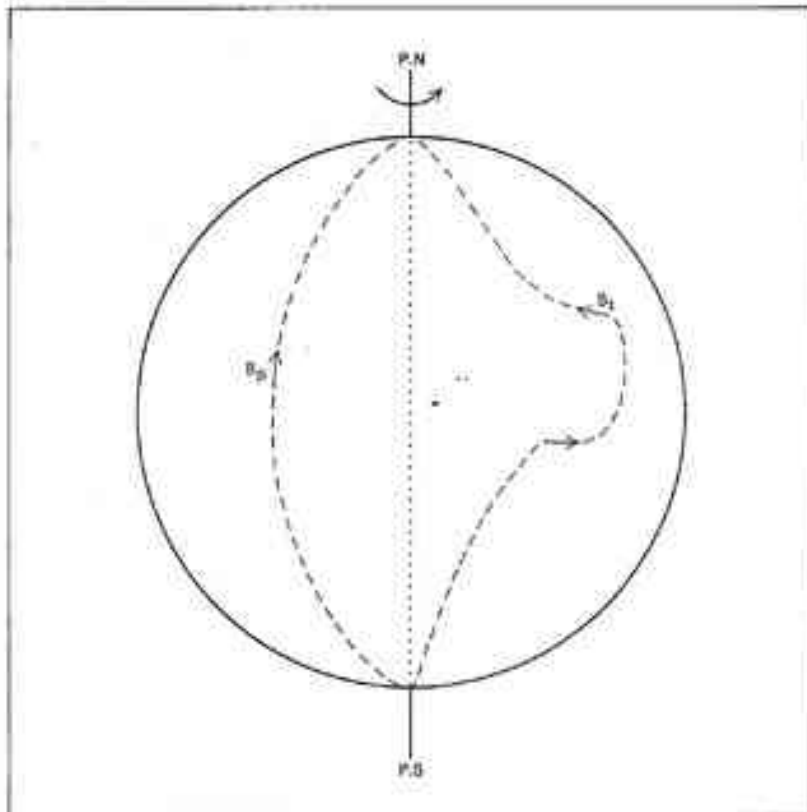


Fig. 2 - Génération du champ toroidal B_T à partir d'un champ poloidal B_P , sous l'effet de la rotation différentielle. L'axe de rotation et l'axe magnétique solaire sont pratiquement confondus.

Le groupe optique du département d'astronomie solaire et planétaire (DASOP) de l'observatoire de Meudon se compose de seize chercheurs, douze techniciens, et bénéficie des moyens généraux du département. L'activité de ce groupe est principalement orientée vers les domaines suivants :

- acquisition quotidienne d'observations de l'activité solaire ;
- spectroscopie moléculaire dans les taches solaires ;
- étude des champs magnétiques et de vitesse dans les régions actives ;
- conditions physiques dans les tubes magnétiques et leur modélisation ;
- propagation des ondes dans l'atmosphère et flux d'énergie mécanique ;
- étude du déclenchement des éruptions et des émissions énergétiques associées.

Ce groupe collabore activement avec les autres groupes solaires français, notamment :

- le centre de prévisions des éruptions solaires (Meudon) ;
- le groupe de radioastronomie métrique de Nançay-Meudon ;
- l'observatoire du Pic du Midi et de Toulouse ;
- le groupe radiomillimétrique de l'observatoire de Bordeaux ;
- le groupe « hydrodynamique » de l'observatoire de Nice.

Avec ses moyens au sol et le satellite américain SMM (Solar Maximum Mission), il participe aux campagnes internationales liées au prochain maximum d'activité solaire : Flare build-up study (FBS) et Solar energy release in flares (SERF).

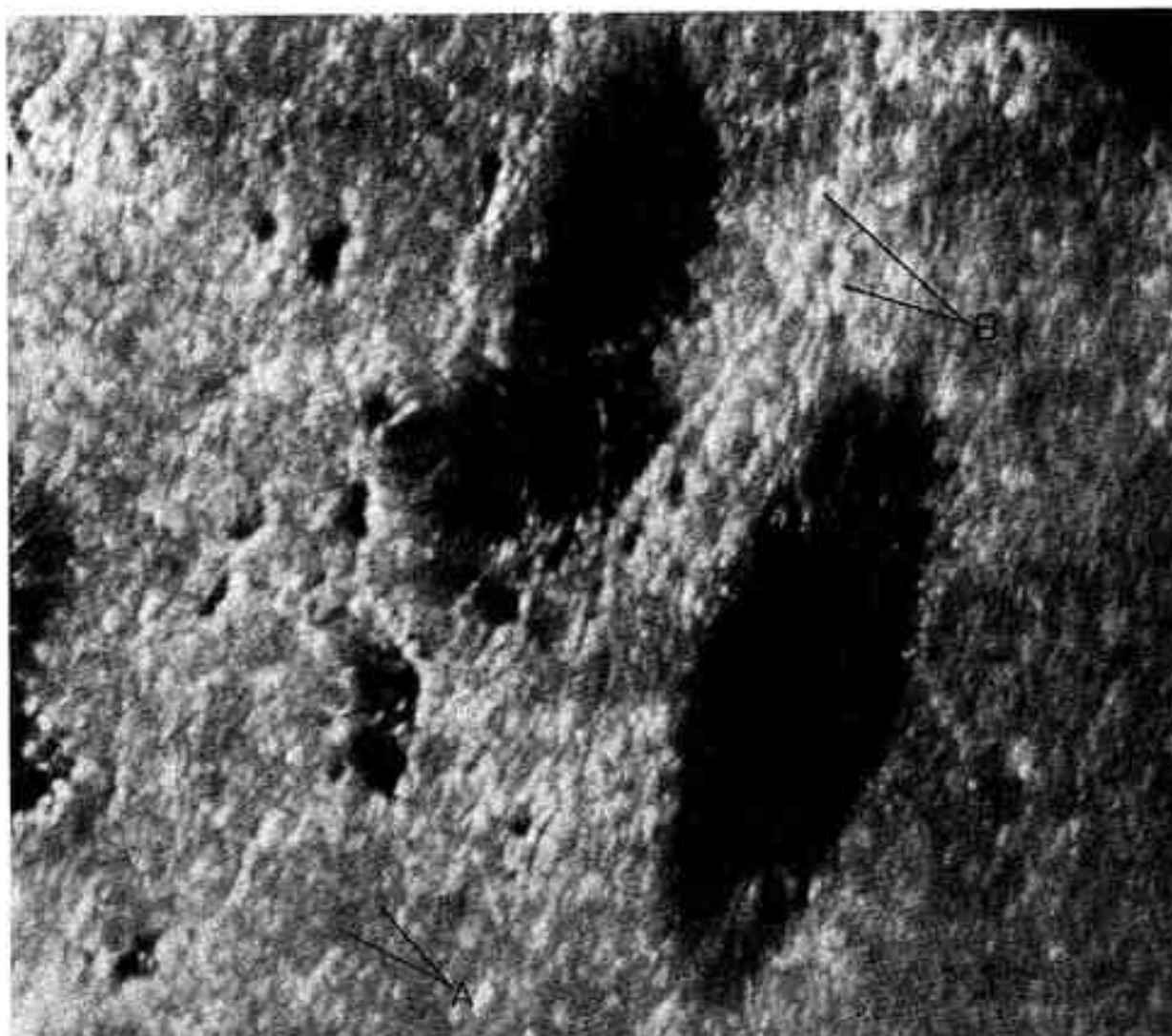


Fig. 3 - Les structures de la photosphère : A) les cellules convectives à petite échelle (granulation) ; B) les facules et les taches. (Cliché R. Müller, Observatoire du Pic du Midi et de Toulouse)

gence des tubes de flux dans la photosphère, c'est un écoulement de matière observé dans les pieds du tube, à la manière d'un tuyau rempli d'eau qui se viderait lorsqu'on le soulève.

Magnétisme et dynamique sont étroitement liés. La zone convective qui gouverne les mécanismes d'activité solaire est très mal connue. Ce n'est que par une approche indirecte (grâce aux observations des champs magnétiques et des champs de vitesse dans les couches visibles) qu'on peut espérer retracer l'état magnéto-hydrodynamique interne et remonter aux mécanismes de base de génération, transport et évolution. Pour avoir des mesures à haute résolution, des instruments nouveaux sont nécessaires. Les astronomes solaires français ont présenté un tel projet : Thémis (téléscope héliographique pour l'étude du magnétisme et des instabilités solaires). C'est un télescope sous

vide, sans polarisation instrumentale, qui serait installé à l'observatoire européen des Canaries.

Pourquoi les taches sont-elles sombres et les facules brillantes ?

En regardant une image de la photosphère (fig. 3), on constate qu'à l'exclusion des taches, la plupart du flux magnétique apparaît concentré dans des régions brillantes de très petites dimensions. On ne peut manquer de noter le contraste entre les taches (plus froides) et les plages faculaires (plus chaudes) de l'ensemble de la photosphère. Or ces structures sont toutes le siège de champs magnétiques intenses (de quelques centaines de gauss ou plus, dans les facules, à deux ou trois kilogauss dans les taches).

Pourquoi un même phénomène produit-il des effets opposés ? Dès 1941, Bierman a suggéré que le trans-

port de chaleur par convection était bloqué par la présence de forts champs magnétiques, ceux-ci étant en quelque sorte des isolateurs thermiques. Le refroidissement des taches (3 900°K au lieu de 5 000°K dans le milieu non magnétique) peut être aussi expliqué par la transformation du flux d'énergie en ondes magnétiques qui se déplaceraient le long des lignes de force.

Que se passe-t-il alors dans les tubes magnétiques brillants répartis à la frontière des supergranules ou groupés en plages autour d'une tache ? On sait que ces structures ont des dimensions spatiales inférieures à la résolution des télescopes actuels, aussi leurs conditions sont-elles mal connues, les valeurs mesurées n'étant que des moyennes non représentatives. On observe pourtant dans ces tubes minces des mouvements de matière persistants alors que dans la partie sombre des ta-

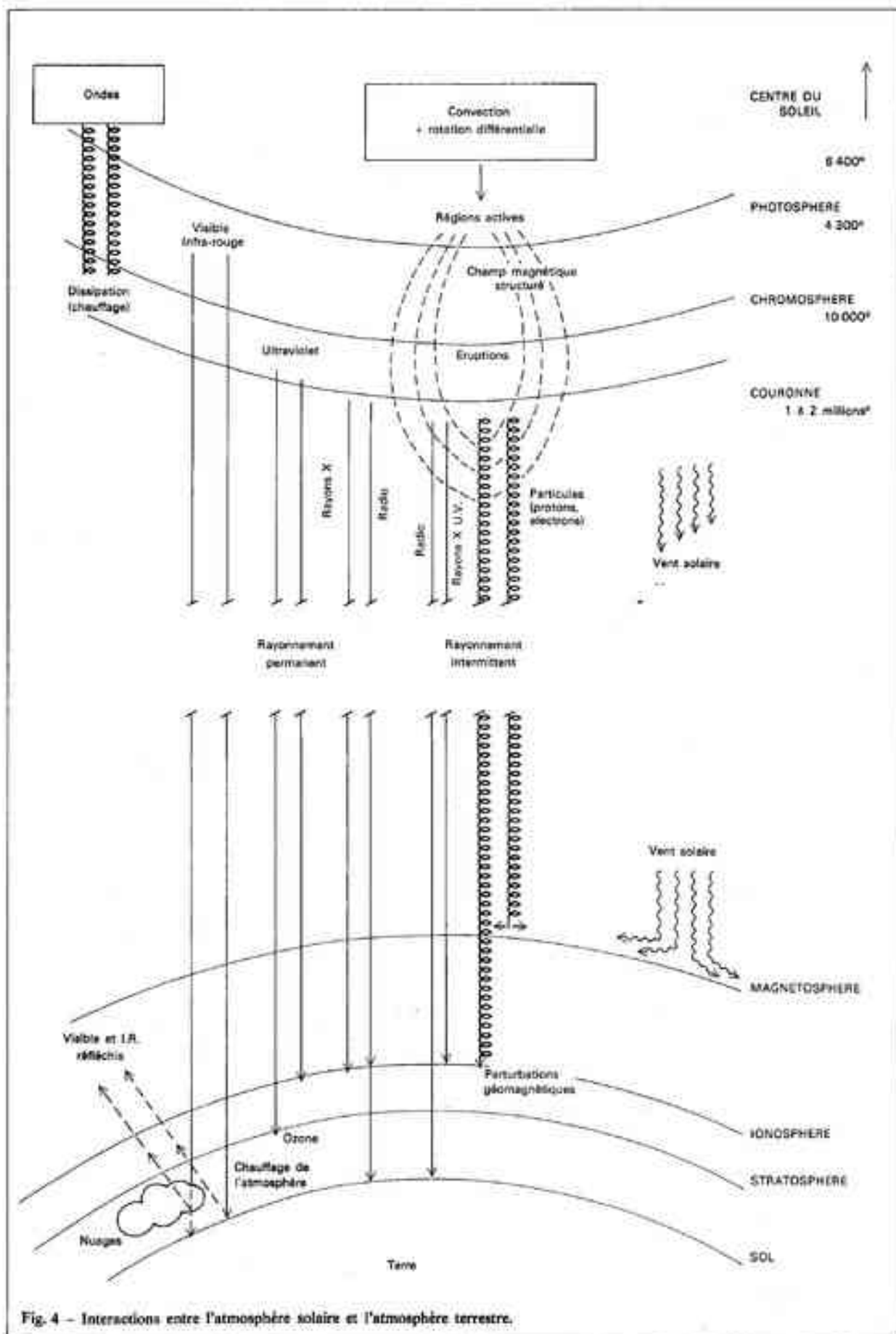


Fig. 4 - Interactions entre l'atmosphère solaire et l'atmosphère terrestre.

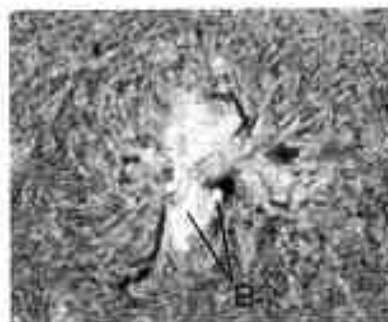
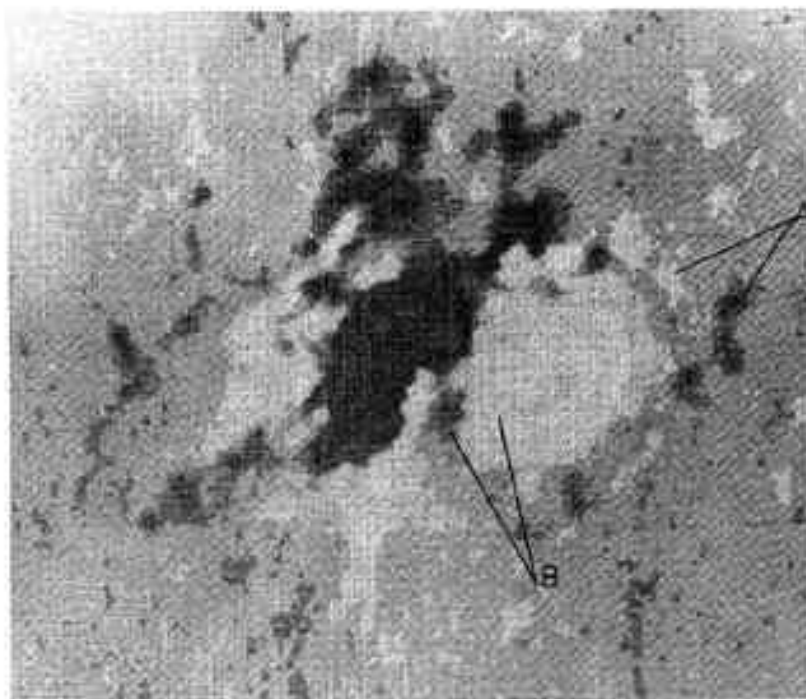


Fig. 5 - Carte photosphérique du champ magnétique dans une région active observée à Meudon. Les polarités opposées apparaissent en rouge (polarité nord) et bleu (polarité sud). Deux points de mesure sont distants, sur le soleil, de 700 km. La carte est accompagnée de deux images chromosphériques (raie $H\alpha$) de la même région active. Des éruptions y sont visibles dans les régions marquées A et B. Chaque éruption fait intervenir des structures magnétiques de polarité opposée.



Fig. 6 - Éruptions chromosphériques importantes observées dans la raie $H\alpha$ (6 563 Å), sur le disque et au bord (Observatoire de Meudon).

ches, la dynamique est quasi absente. L'écoulement observé est certainement à l'origine du chauffage des tubes car il peut transporter de l'énergie des couches supérieures plus chaudes (la température de la couronne atteint un million de degrés alors que celle de la photosphère est inférieure à 6 000 degrés).

On peut interpréter qualitativement les différences thermodynamiques des diverses structures magnétiques. Reste à comprendre comment la matière et le champ s'assemblent pour former des configurations stables.

Les ondes, véhicule de l'énergie dans l'atmosphère solaire

Le transport de l'énergie à travers les couches successives de l'atmosphère solaire prend toute son importance quand on constate que la température de la couronne atteint un à deux millions de degrés alors que la température de surface (photosphère) ne dépasse pas 6 000°K (fig. 5). Quelle en est la cause ? Dans les régions centrales du soleil, les fortes pressions qui résultent du jeu des forces gravitationnelles s'accompagnent de hautes températures (quinze millions de degrés) déclenchant des réactions nucléaires, sources de grandes quantités d'énergie. Divers processus se partagent le transport de cette énergie vers l'extérieur : rayonnement de photons, particules accélérées, mouvements convectifs, ondes acoustiques et ondes magnétiques. Jusqu'à présent, seules les ondes acoustiques avaient été invoquées pour expliquer la remontée de température observée dans les couches extérieures. Ces ondes, engendrées dans la zone convective, se propagent dans la photosphère et la chromosphère en traversant des régions de moins en moins denses et avec une amplitude de plus en plus grande. Elles se transforment en ondes de choc et par dissipation chauffent le milieu environnant.

De récentes observations semblent infirmer cette théorie : les ondes subissent des réflexions au niveau chromosphérique rendant impossible le chauffage de la couronne. On est donc amené à tenir compte du rôle du champ magnétique. Responsable des hétérogénéités observées dans la chromosphère, le champ magnétique stocke l'énergie, canalise la matière, intensifie la génération des ondes et leur permet de se propager à des altitudes plus élevées que dans les régions non magnétiques.

Le problème de chauffage de la couronne reste encore très controversé. Toutefois, la concentration du champ magnétique en structures de très petites

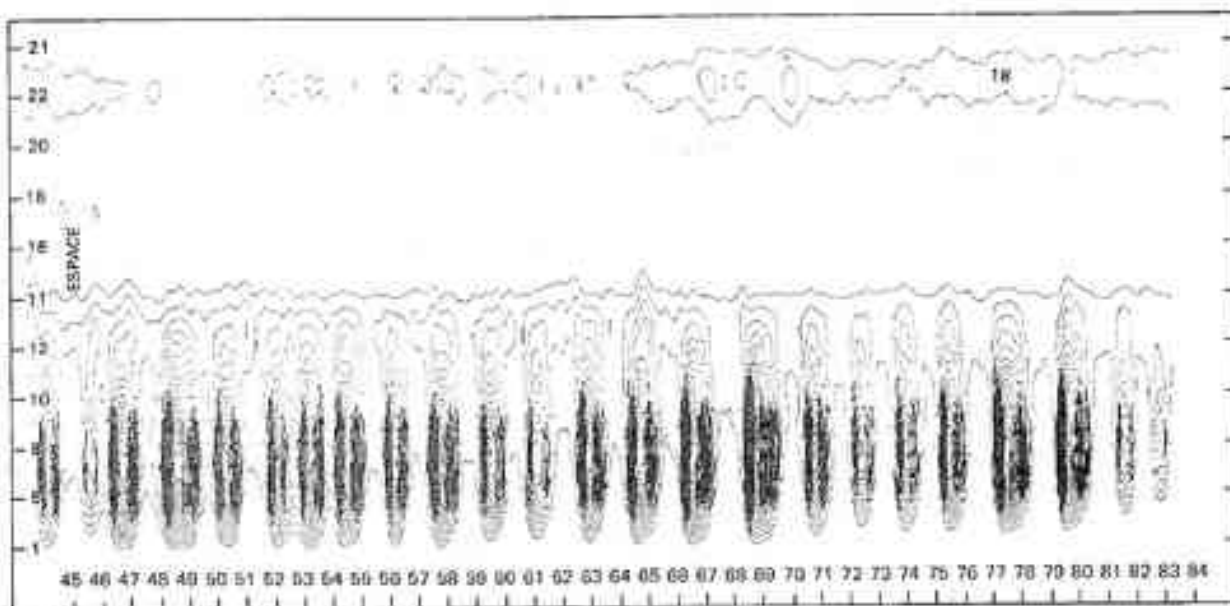


Fig. 7 - Emission radio pulsante due à des électrons accélérés dans le site éruptif. L'enregistrement a été obtenu par le radio-héliographe métrique de Nançay, en abscisse, la position EW sur le soleil en minutes d'arc, en ordonnée, le temps en secondes.

dimensions remet en cause les études homogènes faites à ce jour.

Les éruptions : libération brutale d'énergie

Les éruptions sont des instabilités qui perturbent toutes les couches de l'atmosphère solaire, depuis la photosphère jusqu'à la couronne et le milieu interplanétaire. Elles apparaissent essentiellement entre deux taches ou deux structures magnétiques de polarité opposée, et plus particulièrement dans les groupes qui montrent une structure magnétique complexe et une évolution rapide (fig. 5). La phase pré-éruptive (quelques heures) est caractérisée par l'émergence de nouveaux tubes de flux associés à des mouvements photosphériques tourbillonnaires qui vrillent les lignes de force des tubes magnétiques. Lorsque le point de rupture est atteint, c'est le déclenchement proprement dit qui se traduit par une libération brutale d'énergie magnétique et une reconnexion des lignes de force. Il est clair que les éruptions ont des aspects infiniment variés : échelles spatiales et temporelles, émissions dans le domaine visible (fig. 6), l'ultraviolet, la radio (fig. 7), les rayons X, émissions corpusculaires (électrons et protons) et ondes de choc interplanétaires. La moitié au moins de cette énorme quantité d'énergie est libérée sous la forme d'éjections de particules rapides et pourtant aucune théorie ne fournit actuellement une explication satisfaisante

de cette conversion d'énergie magnétique en particules accélérées.

La signature solaire dans l'espace interplanétaire

Le soleil n'est heureusement pas un trou noir. Il s'en échappe un flux permanent de rayonnement et de corpuscules dans lequel baigne notre système planétaire. Le rayonnement, depuis les rayons X jusqu'aux ondes radioélectriques, dépose son énergie au voisinage de la terre. Presque tout est absorbé dans la haute atmosphère (ionosphère). Seuls les rayonnements infrarouge et visible ont une interaction significative avec la basse atmosphère et le sol, participant à la définition des climats et à l'équilibre de la biosphère.

Toutefois, l'équilibre de la magnétosphère et de l'ionosphère est perturbé

par les événements catastrophiques liés aux éruptions solaires. Cela se manifeste par des orages géomagnétiques, des changements dans les conditions de réflexion des ondes radioélectriques courtes sur l'ionosphère, l'apparition d'aurores polaires...

Les mesures effectuées dans l'espace interplanétaire par les satellites artificiels ont montré l'existence d'un flux de particules s'échappant en permanence de l'héliosphère (« le vent solaire »). C'est lui qui « souffle » les queues de plasma des comètes. La masse ainsi perdue par le soleil est relativement faible. Des observations récentes semblent montrer qu'elle s'échappe principalement des « trous coronaux », régions où les lignes du champ magnétique se referment très loin de la surface solaire, par opposition aux régions actives où les arches magnétiques s'élè-

Le soleil est constitué essentiellement d'hydrogène et d'hélium. Dans la phase actuelle de son évolution, trois réactions nucléaires transforment par fusion de l'hydrogène en hélium et fournissent l'essentiel de la production d'énergie dans le soleil.

Pourtant une seule de ces réactions (appelée « PROTON-PROTON III ») est capable de produire des neutrinos de grande énergie et c'est leur détection que Davis a tentée aux Etats-Unis. Le flux de neutrinos observé est trois à quatre fois inférieur au flux théorique calculé d'après un modèle solaire classique. Pour tenter de résoudre cette difficulté, on peut observer que la réaction « PROTON-PROTON » est très sensible à la température : une petite diminution de température suffit à réduire le flux de neutrinos. Or une composition du noyau plus riche en hydrogène abaisserait cette température. Comment imaginer une modification de la composition chimique du noyau ? Plusieurs suggestions ont été faites. Retenons seulement le rôle du champ magnétique.

Il est admis que les champs magnétiques présents lors de la formation du soleil peuvent être amplifiés par la rotation différentielle (le centre tourne plus rapidement que la partie externe) et rester prisonniers du noyau. En conséquence, la structure interne et la dynamique du fluide seront modifiées, favorisant ainsi le mélange des éléments. Ce sont donc, sans doute, de faibles instabilités magnétiques qui peuvent résoudre l'énigme des neutrinos solaires.

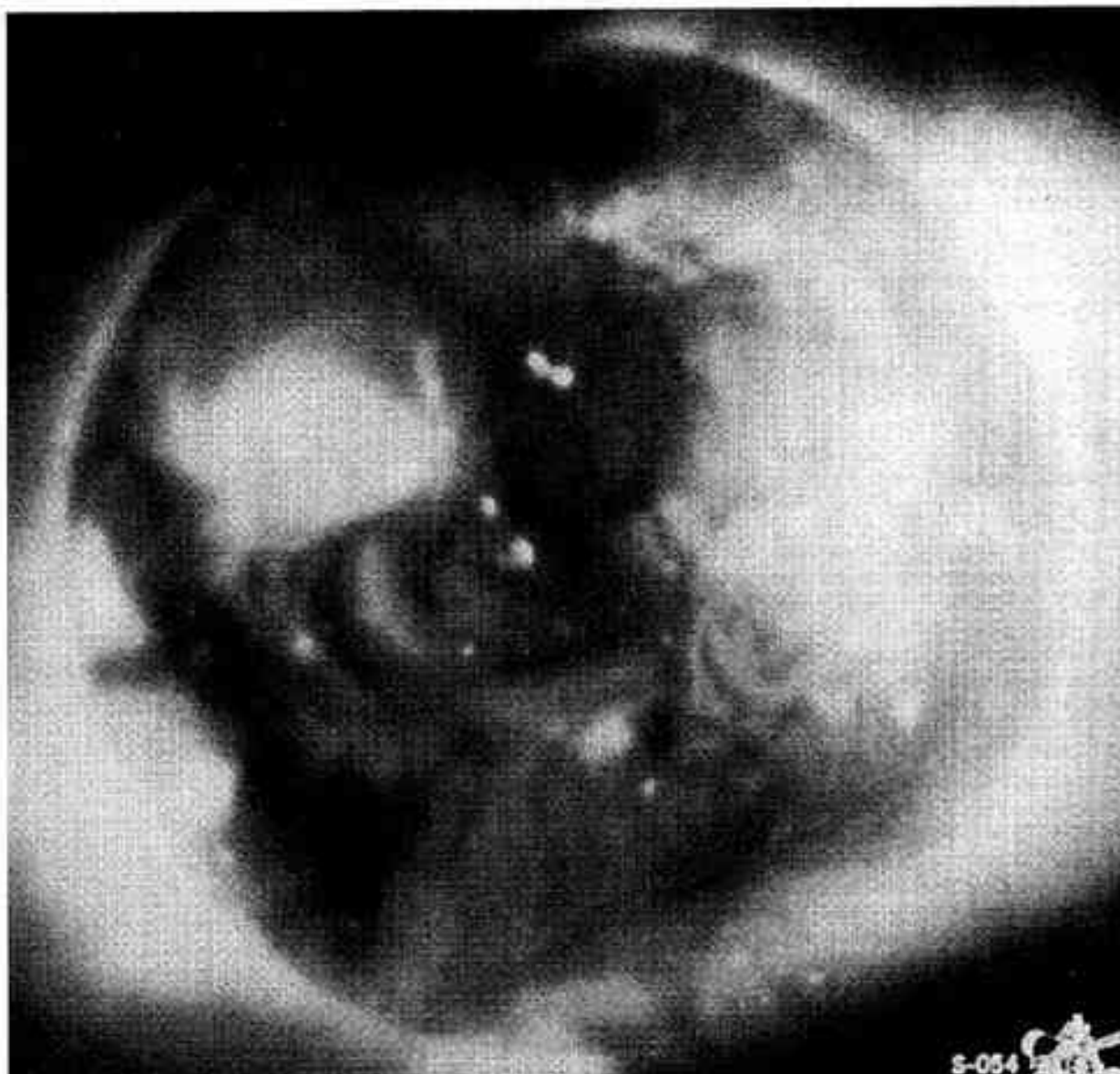


Fig. 9 - Aspect de la couronne observée dans le domaine des rayons X par la mission Skylab. C'est dans les zones sombres appelées « trous coronaux » que le vent solaire prend naissance. Les points brillants sont associés à l'existence des régions actives.

Fig. 10 - Cliché d'une protubérance solaire vue en H α , obtenue par B. Lyot, inventeur du coronographe et du filtre monochromatique.

vent seulement à quelques rayons solaires.

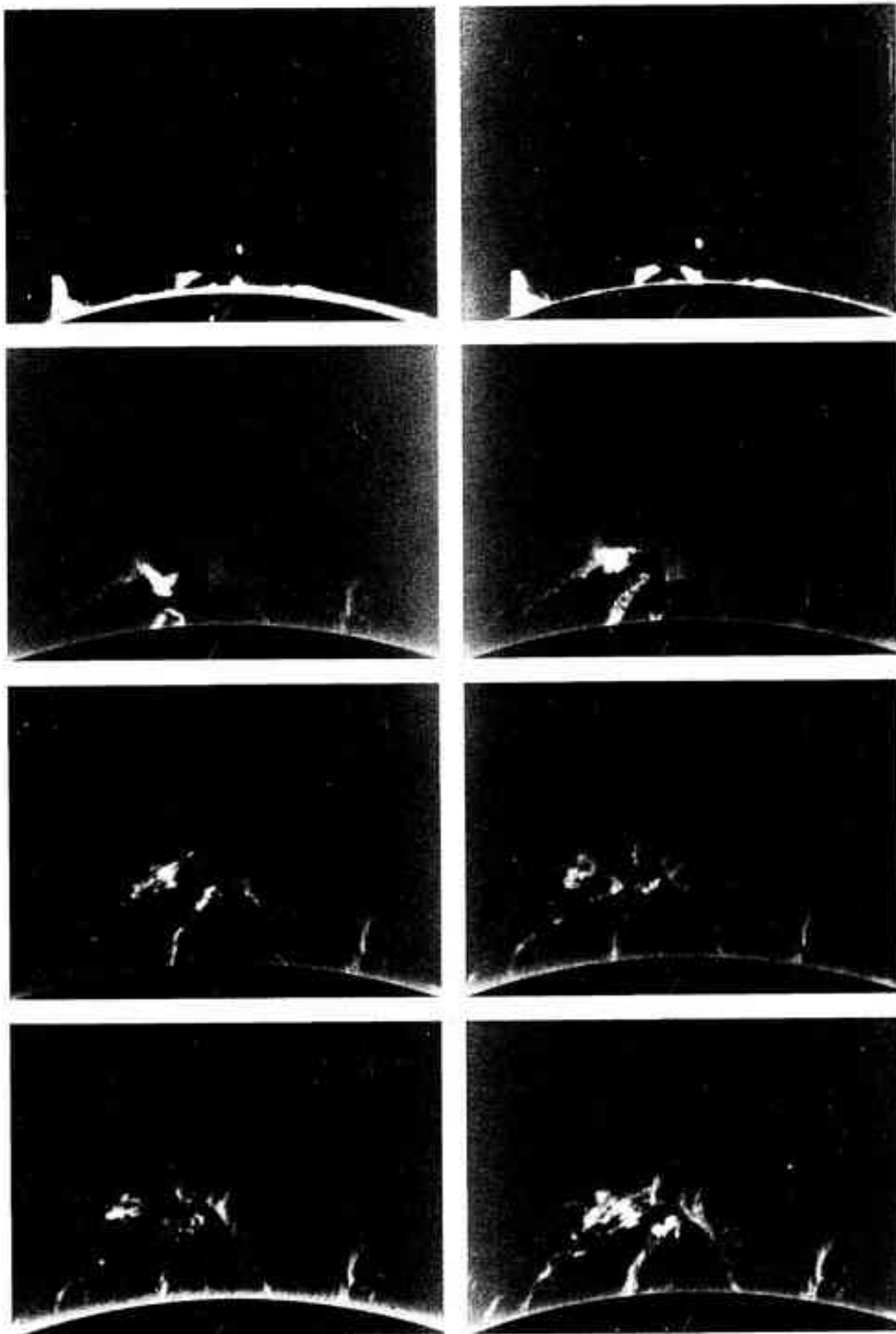
Certains physiciens pensent qu'à l'époque du minimum de Maunder la couronne devait présenter les caractéristiques d'un immense trou coronal et que le flux du vent solaire était beaucoup plus important qu'en période d'activité « normale ». Cette hypothèse sera difficile à mettre en évidence car la surface terrestre est (heureusement !) protégée du vent solaire par le champ géomagnétique. L'existence du vent solaire, et, plus généralement des vents stellaires, est importante en tant que processus pour alimenter l'espace interstellaire en matière (avec les explosions d'étoiles). C'est à partir de cette matière que de nouvelles étoiles nai-

tront assurant ainsi la permanence de l'univers.

Nombre de problèmes liés à l'activité solaire restent à résoudre : l'interaction entre la convection et la circulation dans les couches internes, l'émergence des champs magnétiques et leur organisation en régions actives, les éruptions, les hautes températures de la couronne, l'évolution des trous coronaux et du vent solaire ainsi que les relations complexes avec la géosphère (climatologie).

Contrairement à d'autres domaines de l'astrophysique où les données ne permettent qu'une interprétation quali-

tative, les informations détaillées obtenues sur le soleil imposent une physique beaucoup plus rigoureuse. Les problèmes sont difficiles, certes, mais une fois résolus, les acquisitions théoriques qui en résulteront pourront être appliquées à d'autres champs de l'astrophysique. En particulier, si des mouvements de matière sont présents dans des objets en rotation rapide, des oscillations magnétiques peuvent être engendrées et constituer un candidat possible du mécanisme responsable de la pulsation régulière observée dans les pulsars, les naines blanches et les sources de rayons X. Notre connaissance actuelle de l'univers qui doit beaucoup à la physique solaire bénéficiera largement de ces futurs développements.



Le soleil et les climats

Si le Soleil chauffe la Terre, son influence est modulée par un grand nombre de phénomènes de nature très diverse et le système climatique est extraordinairement complexe. La corrélation entre les variations climatiques et les cycles d'activité solaire est-elle réelle ou imaginaire ? Robert Kandel fait le point.

Robert KANDEL

La prédominance du soleil sur les conditions climatiques de la terre a été reconnue depuis la plus haute antiquité. Le mot climat même fait référence à l'inclinaison des rayons solaires, cette inclinaison qui varie selon les saisons et les latitudes. Cette variation saisonnière n'est pas d'ailleurs solaire en soi, et ceci doit nous rappeler que si c'est bien le soleil qui chauffe la terre, son influence est modulée par un grand nombre de phénomènes de nature très diverse, et que ce que l'on peut appeler le système climatique est extraordinairement complexe (figure 1). De par le monde (en France : au laboratoire de météorologie dynamique du CNRS, et à l'établissement d'études et recherches météorologiques de la météorologie nationale), de nombreuses équipes cherchent à comprendre le fonctionnement de ce système par la modélisation numérique. Le facteur solaire n'en est qu'un parmi plusieurs (par exemple : aérosols, CO_2 , ...) dont l'influence est à étudier.

Un système complexe mais stable

Comment fonctionne ce système à l'égard du rayonnement solaire ? D'abord, sa réponse au « signal » solaire n'est pas simple. Au début de janvier, alors que la terre passe le plus près du soleil et intercepte un flux solaire plus grand de 7 % qu'en juillet, la température moyenne globale de sa

surface est plus faible de 2° centigrade. Ceci n'est pas compréhensible si l'on raisonne uniquement en termes de moyenne globale (figure 2), mais la contemplation de la réalité terrestre (figure 3) ou simplement l'examen d'une mappemonde, nous rappelle que ni les continents, ni les océans, ni les nuages, ni l'ensoleillement, ne sont répartis de façon uniforme sur notre globe terrestre. En vérité, un climat purement solaire (c'est-à-dire déterminé entièrement par le flux du rayonnement solaire sur un plan horizontal au sommet de l'atmosphère) serait invivable, car là où les étés ne seraient pas trop chauds, les hivers seraient trop froids. Si les hommes ont pu s'établir de l'équateur à 80° de latitude (avec une station scientifique au pôle sud), c'est parce que l'atmosphère et les océans transportent de la chaleur des régions tropicales où le gros du flux solaire est absorbé, vers les pôles, notamment du côté où l'hiver sévit (figure 4).

Quelle est la stabilité du fonctionnement de ce système à l'égard d'éventuelles variations du soleil ? Des modèles simples du système climatique (comme ceux construits par le climatologue soviétique Budyko, et l'américain Sellers, qui tiennent compte du facteur latitude et de la rétroaction température-glace-albédo-température) conduisent à la conclusion que la situation actuelle est plutôt instable : avec une légère augmentation de la « constante » solaire qui mesure le flux émis par le soleil, toutes les calottes glaciaires sur la terre devraient disparaître (sauf en altitude) ; avec une baisse, c'est au contraire toute la terre qui devrait se retrouver couverte de glace !

En outre, d'après ces modèles, ces deux situations, plus stables, seraient tout à fait compatibles avec la valeur actuelle de la constante solaire, et au fond seraient plus probables que le climat que nous connaissons à présent.

Que disent les faits ? La paléoclimatologie (à laquelle travaillent plusieurs équipes en France, notamment au centre des faibles radioactivité de Gif-sur-Yvette (laboratoire mixte CEA-CNRS), et au laboratoire de glaciologie du CNRS à Grenoble) nous renseigne sur les millénaires et même quelques dizaines de millions d'années du passé. Depuis plus de deux millions d'années, le climat oscille entre stadés glaciaires et interglaciaires, et le dernier maximum des glaces ne date que de 18 000 ans. Cependant, ces glaces étaient encore loin de couvrir toute la terre. Si l'on regarde les derniers six cents millions d'années, ces épisodes de glaciation paraissent au contraire plutôt rares, et la plupart du temps (90 % ?) il semble que la terre ait bien connu un climat sans glace. Finalement, la vie existe sur terre depuis au moins trois milliards d'années, et ceci semble exiger l'existence d'eau liquide, à une température ne dépassant jamais 42° C, pendant toute cette période.

Rien ne permet de dire que les périodes glaciaires sont nécessairement liées à des variations solaires, quoique cette hypothèse ait été émise plusieurs fois : les mesures de la « constante » solaire ne vont pas plus loin qu'un siècle dans le passé, et les mesures précises hors atmosphère n'ont commencé que depuis quelques années. Toutefois, à l'échelle de trois milliards d'années, la stabilité du climat terrestre a quelque

□ Robert Kandel, service d'aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson.

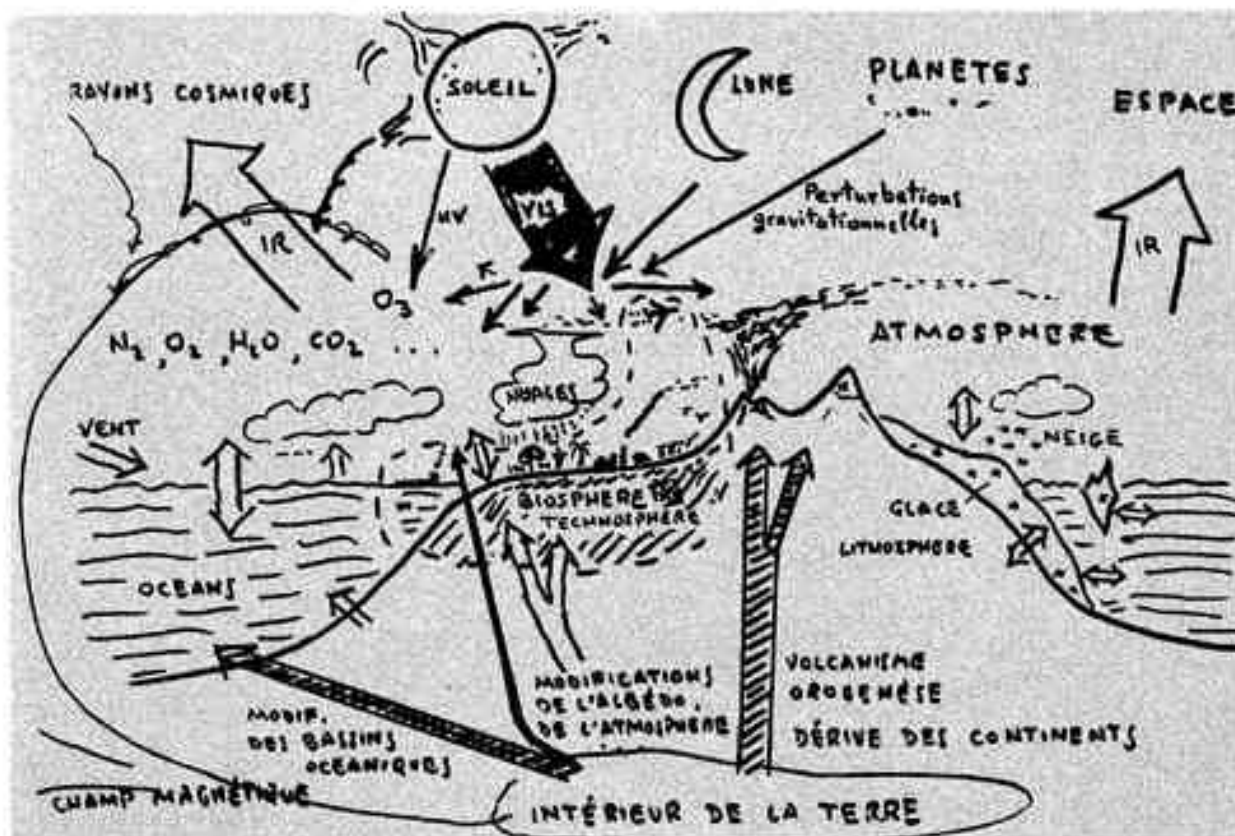


Fig. 1 - Représentation schématique du système climatique et de son environnement. Les flèches pleines \rightarrow représentent des processus externes au système, c'est-à-dire ne dépendant pas de celui-ci. Les flèches ouvertes \Rightarrow représentent des processus internes, qui sont affectés par le climat et qui l'influencent à leur tour.

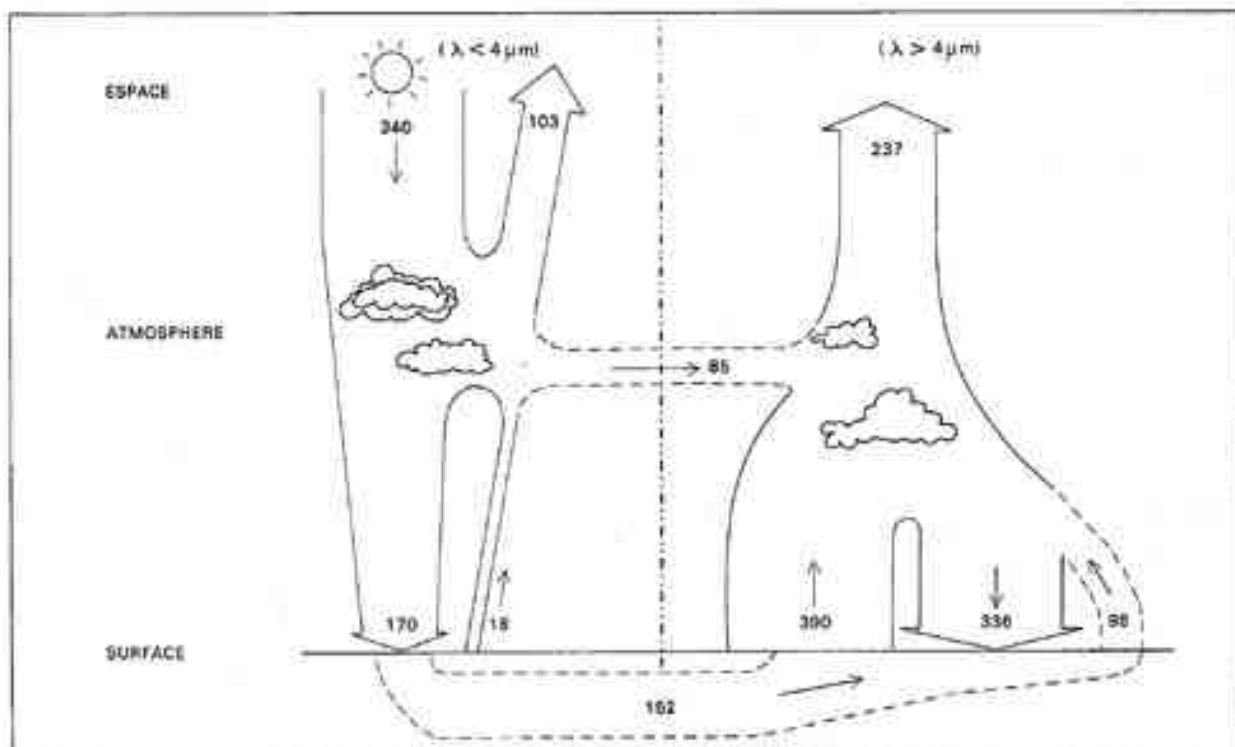


Fig. 2 - Description unidimensionnelle (moyenne globale annuelle) de l'atmosphère terrestre. Les flux d'énergie sont donnés en watts par mètre carré. A gauche, les flux de rayonnement solaire « ondes courtes ». A droite, le domaine « ondes longues » du rayonnement thermique terrestre : les flux ascendants et descendants sont presque égaux à la surface, par suite de l'effet de serre atmosphérique, dû surtout à la vapeur d'eau, au gaz carbonique, et aux nuages. Notez que sans les transports non radiatifs ($98 W m^{-2}$) de chaleur latente et de chaleur sensible, de la surface vers l'atmosphère, la température moyenne de la surface serait près de $60^{\circ}C$.

chose de paradoxal, car (malgré les difficultés soulevées par la non observation de neutrinos solaires) la théorie de l'évolution du soleil exige que celui-ci ait augmenté très nettement de brillance (10 à 60 %, selon les auteurs) pendant ce temps. L'atmosphère (et la biosphère) de la terre ont aussi évolué, apparemment de façon à maintenir l'état climatique entre des limites relativement étroites, malgré cette évolution solaire. Cela ne semble avoir été le cas ni sur Mars ni sur Vénus. Evidemment, pour que nous soyons ici, il faut que cela ait été le cas sur la terre ! Fallait-il aussi que notre environnement oscillât de manière si dramatique depuis deux millions d'années, pour que nous humains fussions devenus des êtres se posant ces questions ? Certains le pensent...

Le carbone 14 et l'activité solaire

Nous avons évoqué des échelles de temps allant de quelque 10^3 à quelques 10^9 ans. Alors que la paléoclimatologie existe et nous renseigne sur ces périodes, l'astronomie solaire même théorique ignore toutes les échelles temporelles entre 10^3 et 10^9 ans ; il y a là du terrain à défricher ! Pour $t < 10^3$ ans, que pouvons-nous dire ? Au Colorado, Jack Eddy a donné de bons arguments pour la réalité du « minimum de Maunder » de l'activité solaire, entre 1645 et 1715. Galilée aurait eu de la chance d'avoir tourné sa lunette sur le soleil avant la disparition des taches ! Cette période se distingue également par un excès d'abondance de l'isotope carbone-14 dans du bois que l'on peut dater de façon précise comme étant de cette époque. Or, les deux phénomènes peuvent être liés par un mécanisme physique assez bien compris : à une activité faible correspond un vent solaire faible, ce qui baisse la « barrière » aux rayons cosmiques « mous » ; ce sont ces particules qui produisent du C^{14} excédentaire dans la haute atmosphère, et à la suite d'échanges avec la biosphère il se retrouve dans la matière organique produite par la photosynthèse. Est-il alors raisonnable de penser que les autres périodes d'anomalies en C^{14} correspondent également à des minima prolongés d'activité solaire ? Peut-être, si l'enchaînement activité - vent solaire - rayons cosmiques - production de C^{14} est le seul qui permet d'expliquer les anomalies C^{14} ...

Quel rapport y a-t-il avec le climat ? A chacune de ces périodes de C^{14} en excès correspond une période froide (la

plus récente étant le « petit âge glaciaire » que Le Roy Ladurie a si bien décrit dans son *Histoire du climat depuis l'an mil*), alors qu'aux anomalies de C^{14} en défaut correspondent des périodes plus chaudes (comme le « petit optimum » du VIII^e au XII^e siècle, quand ont fleuri les colonies vikings au Groënland). Pour Eddy et pour d'autres partisans du déterminisme solaire des climats, c'est la « constante » solaire qui varie, peut-être de un ou deux pour cent ; l'activité solaire (ou plutôt l'enveloppe des maxima d'activité) serait un témoin très sensible des variations de cette luminosité, et le C^{14} terrestre aurait enregistré pour nous les variations des derniers millénaires. Dans cet ordre d'idées, le réchauffement observé entre 1880 et 1940 semble bien coïncider avec un accroissement des maxima d'activité solaire, et quelques chercheurs ont prétendu avoir trouvé des évidences d'une augmentation de la constante solaire de l'ordre de 0,3 % pendant cette même période. Toutefois ces évidences sont plus que contestables, car elles dépendent de mesures au sol, en des lieux variés, avec des instruments et des observateurs différents d'une année à l'autre. En vérité on ne pourra rien dire avant plusieurs décennies de fonctionnement d'un système de satellites de surveillance de la constante solaire : raison de plus pour se mettre tout de suite à la tâche...

Cette image du déterminisme solaire des climats a le mérite de la simplicité. Mais le climat n'est pas une affaire simple, et cette image pourrait bien être erronée. Ce sont peut-être les variations climatiques elles-mêmes qui, en modifiant les échanges de carbone entre air, mer et biosphère, sont les causes des anomalies C^{14} , bien plus que les variations d'activité solaire. Rappelons que la corrélation entre un minimum prolongé d'activité solaire et l'anomalie C^{14} d'une part, comme celle avec une période froide d'autre part, n'est établie que pour un seul cas, celui du minimum de Maunder et du « petit âge glaciaire ».

Des mécanismes de couplage

Cependant, l'influence solaire sur la terre n'est pas seulement l'affaire des quelques 1 360 watts par mètre carré que nous interceptons. Dans les domaines énergétiques de son spectre (X, UV), dans le domaine radio, dans ses émissions corpusculaires, et dans les aspects magnétiques et morphologiques de sa haute atmosphère, la couronne, le soleil est une étoile

éminemment variable, sur des échelles de temps allant de la minute au siècle. Des réponses terrestres à cette activité solaire sont manifestes dans la magnétosphère, l'ionosphère, et toute la haute et moyenne atmosphère de la terre, selon la pénétration de ces particules et photons énergétiques. Même la couche d'ozone stratosphérique - à seulement quinze kilomètres d'altitude - peut en être affectée. Dans la thermosphère, au-dessus de cent kilomètres, la température, la densité, et l'étendue même de l'atmosphère varient entre jour et nuit, et entre minimum et maximum d'activité du soleil. Mais il reste très difficile de voir comment ces phénomènes dont le théâtre est la haute atmosphère, peuvent influencer sur le climat ou le temps météorologique qui se déroulent essentiellement à la surface ou dans les premiers dix kilomètres de l'atmosphère, où les densités d'énergie sont plus fortes de plusieurs ordres de grandeur. Certes, de nombreux mécanismes physiques pour de telles influences ont été suggérés - de façon qualitative. Il y a l'opacité visible et infrarouge de l'ozone, dont l'abondance est sensible (mais peu...) à l'activité solaire ; excitation d'ondes planétaires par des précipitations de particules, ou par le rythme de la rotation solaire ; modification des noyaux de condensation et donc de la nébulosité, par particules ionisées ; modification du circuit électrique de l'atmosphère, avec des incidences sur la précipitation... Mais sauf peut-être pour les effets radiatifs de l'ozone, aucun modèle détaillé ayant un pouvoir de prédiction n'a été élaboré pour ces mécanismes ; et pour l'ozone, l'effet paraît minime.

Des corrélations réelles ou imaginaires ?

Du côté des observations, il existe dans la littérature scientifique une pléthore de corrélations entre des variations climato-météorologiques et les cycles d'activité solaire de onze et de vingt-deux ans. Mais ces corrélations, dont certaines sont contradictoires, sont-elles réelles ou imaginaires ? Le débat entre croyants et sceptiques est parfois très vif, notamment en Union Soviétique. Dans une revue récente, l'australien Pittock conclut que « malgré une littérature massive sur le sujet, il n'existe pas à présent d'évidences convaincantes de corrélations statistiquement significatives ou ayant une utilité pratique, entre les cycles de taches solaires, et la météorologie ou le climat. » Les seules exceptions possibles ? D'une

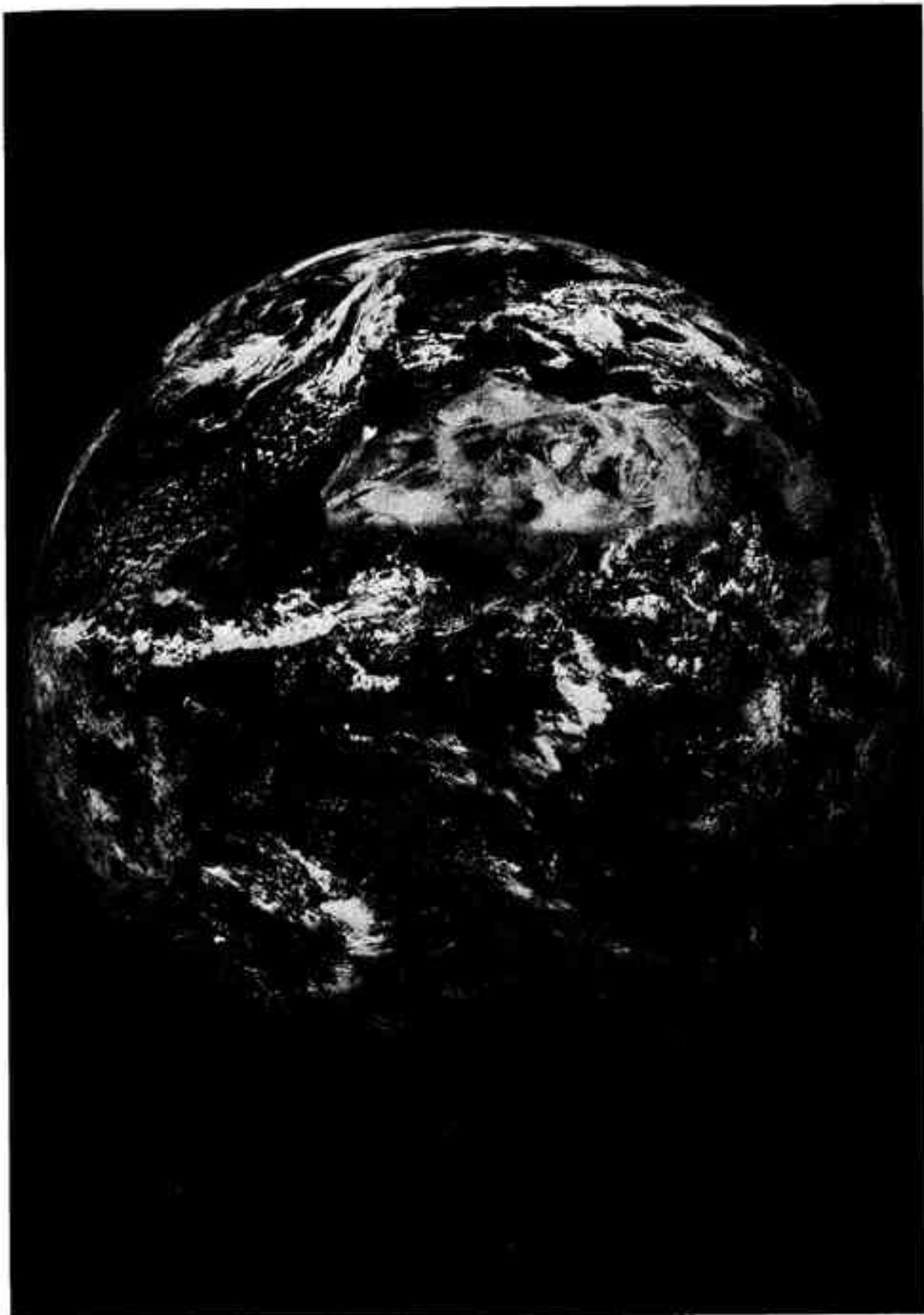


Fig. 3 – Image en lumière visible d'une partie de la terre, éclairée par le soleil. Il est clair que la représentation de cette image (plus le reste, non éclairé, de la terre) par la seule flèche montante à gauche de la figure 2, est une simplification grossière. Cliché METEOSAT fourni par l'agence spatiale européenne.

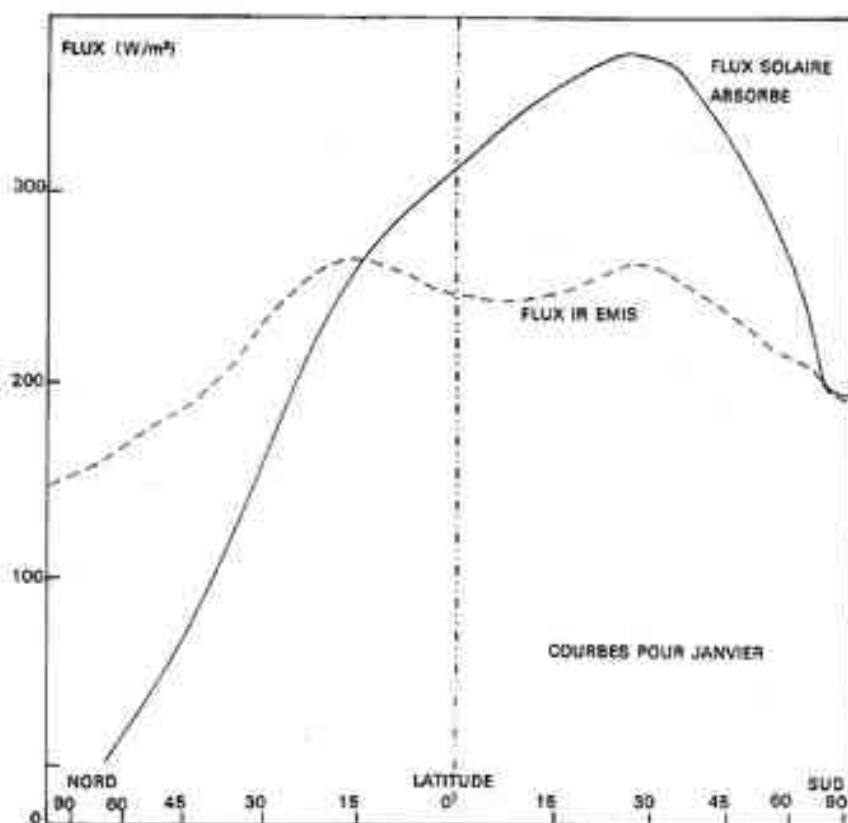


Fig. 4 - Absorption et émission de rayonnement par le système terre + atmosphère, en fonction de la latitude, en janvier. (D'après Ellis et Vonder Haar)

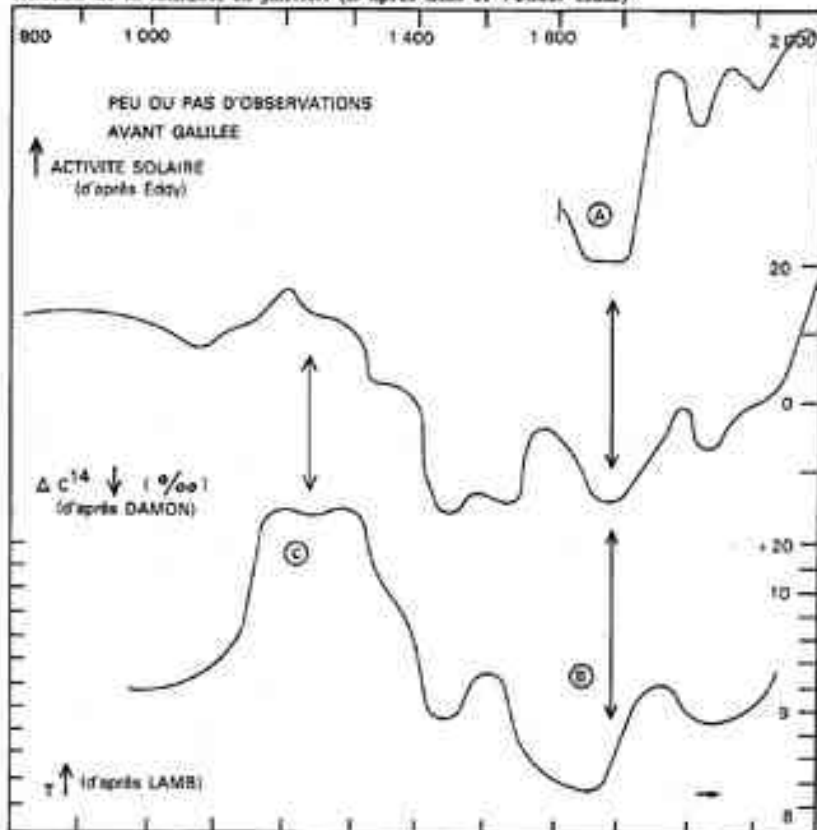


Fig. 6 - Activité solaire, C14, et climat depuis un millénaire. Notez le « minimum de Maunder » (A) et le petit âge glaciaire (B) ainsi que le petit optimum climatique (C). L'anomalie ΔC^{14} est l'écart à une courbe qui tient compte de la variation du champ magnétique terrestre ; sa variation récente est affectée par la combustion de carburants fossiles et par les expériences nucléaires des années 50 et 60.

part, le travail des américains Mitchell et Stockton sur une corrélation entre les périodes de sécheresse dans l'ouest des Etats-Unis, et le cycle de vingt-deux ans du magnétisme solaire. D'autre part, les corrélations héliométéorologiques mises en évidence par Roberts et Olson au Colorado, et par Wilcox et ses collaborateurs à Stanford : chaque fois que change le sens du champ magnétique interplanétaire (lié au soleil par le vent solaire), au voisinage de la terre, la genèse et le développement des dépressions cycloniques aux latitudes moyennes sont renforcés. Il reste à comprendre quel mécanisme physique pourrait être derrière cette corrélation. Il reste aussi à voir si une telle corrélation a une importance quelconque pour le climat ; ce n'est pas évident, car ici l'échelle de temps est de quelques jours, voire de vingt-sept (période de la rotation solaire), alors que l'on ne peut guère parler de climat sur moins d'une décennie, voire de plusieurs.

Comment conclure ? Malgré les variations parfois dramatiques du temps d'une année à l'autre, malgré les souvenirs d'enfance, le climat ne change que bien peu de mémoire d'homme. Les variations importantes et intéressantes ont été trouvées dans l'histoire écrite ou fossile. Le soleil reste un facteur externe prédominant pour le système climatique, mais comment pouvons-nous écrire son histoire ? Y a-t-il des évidences fossiles qui attendent un œil sachant les reconnaître ? Pourquoi nos théoriciens ne se pencheraient-ils pas sur les échelles de temps entre 22 et 10^8 ans ?

BIBLIOGRAPHIE

Variations du climat au cours du Pléistocène, J. Labeyrie (éd.), colloque international du CNRS, Paris, 1974.

The solar output and its variation, O.R. White (éd.), Colorado associated university press, Boulder, 1977.

Climatic change, J. Gribbin (éd.), Cambridge university press, Cambridge, 1978.

« A critical look at long-term sun-weather relationships », A.B. Pittock, in *Rev. Geophys. Space phys.* 16, 400-420, 1978.

Evolution des atmosphères planétaires et climatologie de la terre, colloque international du CNRS, 1978.

Earth and cosmos, R.S. Kandel, Pergamon Press, Oxford, in press, 1979.

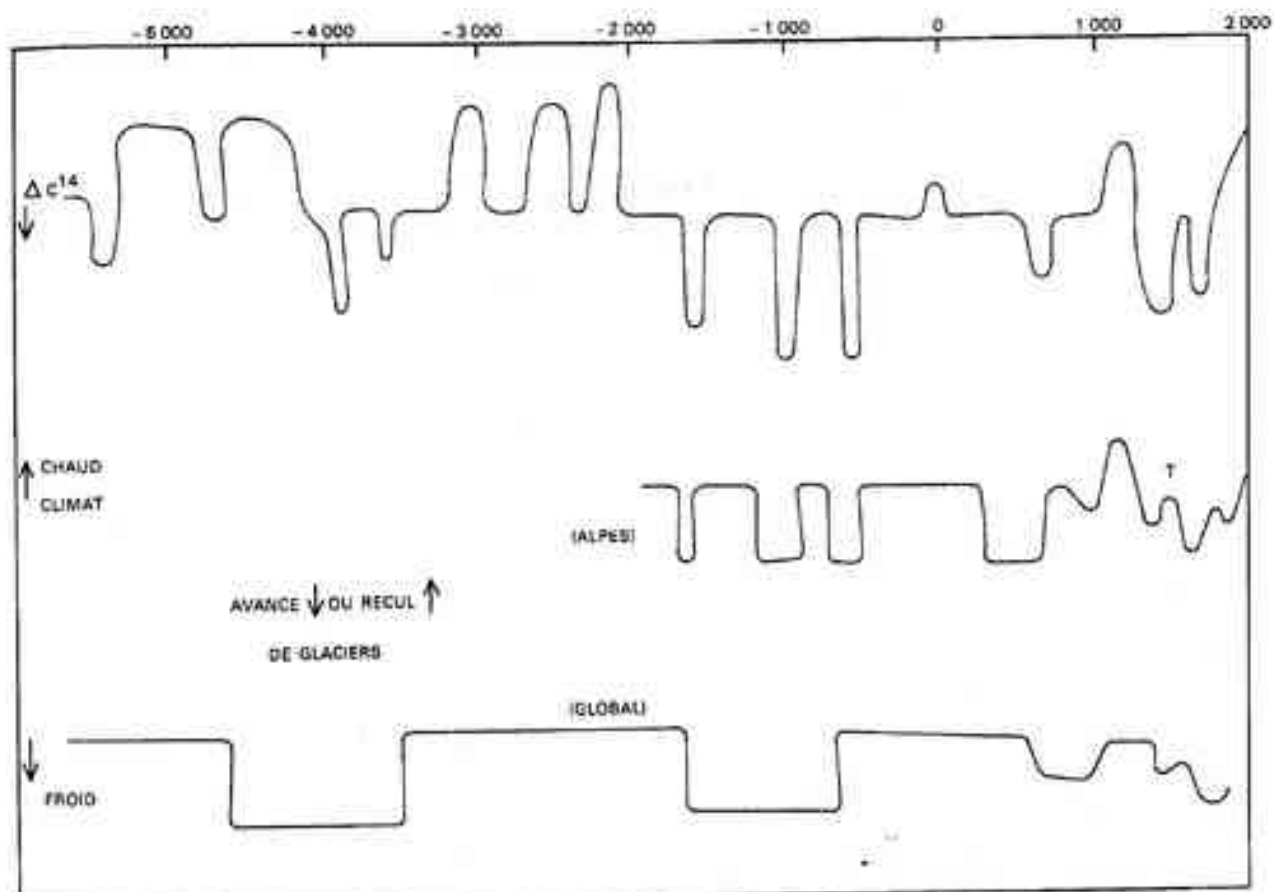


Fig. 5 - Echelles temporelles du climat. Phénomènes cosmiques et terrestres.

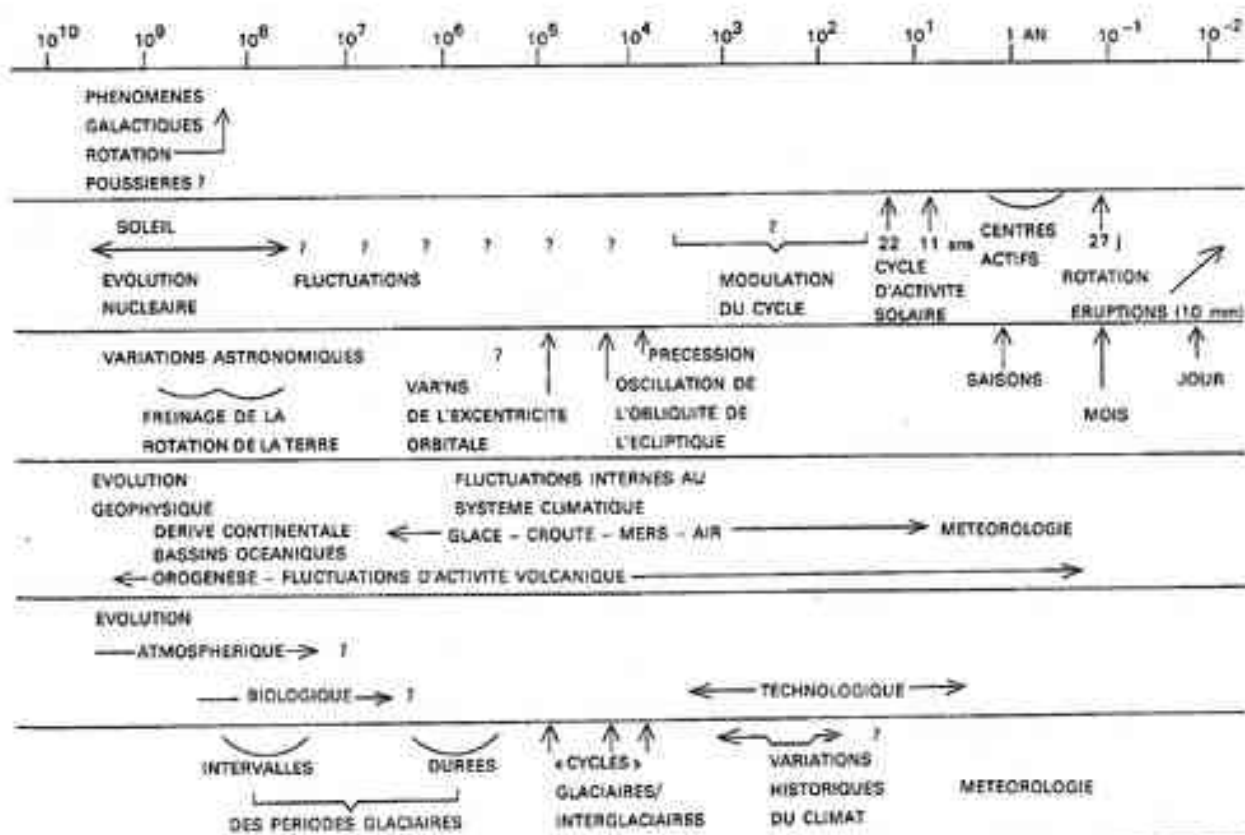


Fig. 7 - Climat et C 14 depuis huit mille ans (Schéma d'après Eddy)

L'énergie solaire : une recherche active, un pari raisonnable

Dès 1975, sous l'impulsion de Robert Chabbal, le CNRS a lancé un programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire. Qu'en est-il de cette énergie nouvelle qui est aussi une énergie ancienne ? L'équipe du PIRDES nous donne ici l'état de ses travaux.

Equipe de direction du PIRDES*

L'objectif « Développement des applications de l'énergie solaire » justifie depuis 1975 un programme spécial du CNRS, le programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire (PIRDES).

Après quatre ans, quelles équipes a-t-il pu mobiliser ? Quels résultats a-t-il obtenus ? Quelle part prend-il au programme national ? Quelles recherches fondamentales, quelles réalisations originales sont nécessaires à ce programme ? Quelles contributions au bilan énergétique national peut-on légitimement attendre de l'énergie solaire à long terme ?

Orientation des recherches

C'est à partir de l'état d'avancement des techniques de conversion de l'énergie solaire qu'il convient, dans notre secteur, de discuter l'orientation des recherches. Le tableau 4 montre les quatre phases de développement.

La phase d'analyse-système est du ressort du CNRS, mais aussi de l'industrie. Toutes les dimensions, y compris économiques, d'une technique doivent être prises en compte. Peuvent être pris en exemple le travail du groupe projet CNRS-EDF sur les centrales à tour, celui du LAAS (Toulouse) sur les héliostats et les champs d'héliostats, celui de l'IEJE (Grenoble) sur les facteurs régionaux de l'extension de l'habitat solaire.

La phase de recherche fondamentale est d'intérêt central pour le PIRDES. Il

s'agit d'abord d'ouvrir de nouvelles voies (ex : production photochimique d'hydrogène, étude du silicium amorphe pour photopiles, réfrigération solaire par adsorption solide-gaz, piles électrochimiques thermo-régénérables), mais aussi d'approfondir la compréhension des phénomènes de base. Citons à cet égard, entre autres :

- les travaux d'interprétation statistique des données météorologiques (1) ;
- l'analyse des propriétés optiques des solides simples ou diphasés en fonction de la température, comme moyen visant à maîtriser les récepteurs de rayonnement à sélectivité spectrale ;
- l'étude des régimes de convection dans des échangeurs thermiques tels que capteurs plans ou chaudières recevant le rayonnement solaire concentré ;
- l'analyse des microségrégations et des propriétés électroniques du silicium polycristallin, en vue des photopiles des années 80 ;
- l'analyse des mécanismes des fermentations anaérobies (sélection des souches microbiennes, enzymologie, bactéries sulfato-réductrices, bactéries photosynthétiques, etc...)

L'optimisation technologique est naturellement entreprise par l'industrie lorsqu'existe un débouché à court terme : c'est le cas des photopiles au silicium, ou celui des maisons solaires. Le CNRS peut alors contribuer aux progrès de ces techniques en apportant des idées neuves, par exemple procédés de fabrication de jonctions p-n, ou systèmes de stockage à chaleur latente. Il intervient aussi en expérimentant (2) des systèmes avec toute la rigueur scientifique désirable : par exemple sur les maisons solaires expérimentales de Bourgoin-Jallieu, St Chéron, Argenteuil, Grimaud, Odeillo.

Il est enfin naturel qu'il se charge de la construction de premiers prototypes illustrant des techniques qui ne seront rentables qu'à moyen ou à long terme : c'est tout le sens des études de centrales à tour (programme THEM), de centrales à collecteurs distribués (THEK, PERICLES), de générateurs photovoltaïques sous concentration (SOPHOCLE).

L'industrialisation et la diffusion des technologies sont par contre dans tous les cas, du ressort des entreprises industrielles.

Nous ne chercherons à aller plus loin sur les recherches en cours que dans quelques directions parmi les plus importantes.

Réhabilitation et perfectionnement des « énergies anciennes »

Qualifier d'« énergies nouvelles » le chauffage solaire des maisons et l'emploi du bois comme combustible serait évidemment abusif.

Le problème qui se pose à propos de ces « énergies anciennes » est de stopper leur déclin. Dans les 50 dernières années, la consommation française de bois a diminué de 50 % alors que la surface de forêts augmentait de 30 %. L'architecture s'est de plus en plus éloignée de systèmes thermiquement raisonnables pour privilégier les matériaux modernes (verre, aluminium, béton) employés de façon thermiquement coûteuse.

Développer l'usage comme combustible du bois, des déchets végétaux, voire de cultures spéciales dites « cultu-

* □ MM. Rodot, directeur ; Clavier, directeur-adjoint ; Deflandre, Peube, Vinaron, conseillers scientifiques ; Dupas et Lestienne, chargés de mission.

(1) Publication parue en mai 1979 aux Éditions du CNRS.

(2) L'expérimentation s'oppose ici à la démonstration : elle inclut des mesures physiques précises et leur comparaison avec des modèles théoriques.

LES MOYENS DU PIRDES

En 1979, participent au PIRDES 116 chercheurs et 137 ITA (sans compter la contribution des services centraux) du CNRS. La répartition de ces chercheurs par direction scientifique est donnée par le

tableau 1. Le nombre total de chercheurs-équivalent-temps plein est de 266.

Les affichages de postes de chercheurs qui figurent sur le tableau 1 sont un des moyens d'action du PIRDES, conduisant à un dialogue avec le Comité national du CNRS à propos de la politique d'embauche.

Un autre moyen est constitué par le budget propre du PIRDES, qu'il dépense pour 80 % dans les unités de recherche du CNRS ou associées au CNRS, et pour 20 % en sous-traitance extérieure. Le montant de ce budget et sa décomposition thématique sont illustrés par le tableau 2.

	STOCK 1979	EMBAUCHES 1978	AFFICHAGES 1979
PHYSIQUE NUCLEAIRE	8	1*	2*
MATHEMATIQUES, PHYSIQUE DE BASE	29	3*	2*
SCIENCES PHYSIQUES POUR L'INGENIEUR	29	6	4
CHIMIE	17	1	2
TERRE, OCEAN, ATMOSPHERE, ESPACE	11	-	-
SCIENCES DE LA VIE	20	1	1
SCIENCES DE L'HOMME	1	1	-
FIG (FONCTION D'INTERET GENERAL)	1	-	-
	116	13	11

* Compensation de redéploiements avec changement d'activité.

Tableau 1 - Effectifs « Chercheurs CNRS » par direction scientifique

		1977		1978		1979	
		CNRS	RESSOURCES EXTERIEURES	CNRS	RESSOURCES EXTERIEURES	CNRS	RESSOURCES EXTERIEURES
CONVERSION THERMIQUE ET THERMODYNAMIQUE	HABITAT/ CHALEUR SOLAIRE	1 400	-	1 800	300	3 500	800 ?
	CONCENTRATION	4 700	3 800	4 800	500	4 500	800 ?
	REALISATION DE LA CENTRALE THEMIS	-	-	-	(20 000)	-	(20 000)
	THERMOCHEMIE	450	-	1 000	200	900	-
CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE		1 500	1 450	2 700	1 800	3 700	1 800 ?
PHOTOCHEMIE ET BIOCONVERSION		1 030	-	800	300	1 200	400 ?
ACTIONS D'ACCOMPAGNEMENT	METEOROLOGIE	730	-	800	-	300	-
	ECONOMIE	300	-	800	-	700	-
	CONSTRUCTIONS	3 030	-	-	5 000	1 200	-
	DIVERS (GESTION)	610	-	500	-	800	-
		13 750	5 250	13 000	8 100	18 800	3 400 ?
		19 000 KF		21 100 KF		20 000 KF	

Tableau 2 - Les moyens du PIRDES
LOCALISATION DES RECHERCHES

L'organisation même des recherches sur l'énergie solaire au CNRS s'est appuyée sur deux principes.

Le premier principe consiste à utiliser les chercheurs là où ils se trouvent et à construire avec eux des « laboratoires sans murs » pour traiter chaque sous-programme (chaque « filière »). Ceci évite de subir les longs délais nécessaires par des réorganisations et permet de maintenir chaque chercheur dans l'ambiance la plus féconde pour le traitement de son problème, c'est-à-dire dans son laboratoire où il peut se nourrir des progrès de sa discipline. Il existe ainsi des groupements informels d'équipes sur les récepteurs de rayonnement solaire (propriétés photothermiques des matériaux), sur les biocombustibles solaires, sur l'exploitation des données météo-

rologiques et sur quatre filières différentes de photopiles.

Le second principe veut que les recherches d'intérêt central pour le PIRDES s'appuient sur un petit nombre de pôles bien localisés qui sont développés en priorité. Dans les cas où s'affirme la nécessité d'une permanence de recherches sur une longue période et de l'attribution de moyens lourds, ce principe est indispensable pour éviter la dispersion et l'inefficacité. C'est ainsi que le laboratoire d'énergie solaire de Poitiers-Odeillo et le LAAS de Toulouse ont servi de support dès 1975 aux travaux sur la conversion thermodynamique, qu'un laboratoire nouveau, construit en 1980 à Vuilhonn, traite des photopiles à haut rendement et de l'habitat solaire, et que des orientations particulières ont été affichées pour les principaux centres des régions mé-

diterranéennes, amorçant ainsi de nouvelles restructurations.

C'est bien entendu avec les chercheurs eux-mêmes, et souvent à leur initiative, que se structurent les équipes de recherches travaillant au programme PIRDES, avec l'accord des directions scientifiques concernées. Les jumelages d'équipes comme celui entre Poitiers et Odeillo qui a donné naissance au laboratoire d'énergie solaire actuel, l'accentuation de la vocation « solaire » de quelques laboratoires propres, les regroupements d'équipes dispersées qui peuvent prendre la forme officielle de GRECOS (soumis alors à l'examen du Comité national) sont des formes d'action fréquentes et efficaces. Des regroupements thématiques locaux, à l'échelle universitaire ou interuniversitaire, seraient également recommandables (Orsay, Marseille, Montpellier, etc...)

L'INSERTION NATIONALE DU PIRDES

La mise en place du Commissariat à l'énergie solaire (COMES) en 1978 conduit à situer aujourd'hui le PIRDES dans l'organigramme national représenté par le tableau 3. Le PIRDES reçoit du COMES, par une convention, les 3/4 de ses crédits. Il coopère avec plusieurs organismes publics :

- EDF, sur les centrales à tour ;
- le CEA, sur la conversion thermodynamique à haute température, sur la climatisation par adsorption et sur l'exploitation des données météorologiques ;
- le CNES, sur les photopiles ;
- le plan-construction et le centre scientifique et technique du bâtiment, sur le pro-

gramme d'habitat solaire ;

- l'INRA, sur la bioconversion.

Le PIRDES a également établi des relations avec l'industrie, qui prennent la forme, soit de marchés d'études et de réalisation de prototypes imaginés au CNRS, soit d'accords de cession de brevets ou de savoir-faire via l'ANYAR, soit de recherches coordonnées entre laboratoires du CNRS et de l'industrie sur des sujets d'intérêt commun. Voici quelques-unes des actions les plus récentes :

- conclusion d'un accord tripartite entre CNRS, EDF et CETHEL pour la création d'un groupe d'ingénierie et de commercialisation des centrales à tour ;
- passation de plusieurs marchés d'études à la Société Bertin pour études de compo-

sants et sous-systèmes de centrales solaires à collecteurs distribués ;

- accord CNRS - St Gobain - Université de Montpellier pour recherches en commun sur les photopiles au Cds ;

- deux développements industriels confiés à la SOTEREM et à la SNIAS, sur un héliostat inventé au CNRS et sur le générateur photovoltaïque sous concentration « Sophocle » ;

- développement en commun avec BSN de miroirs sphériques collés sur béton destinés au système Périéles ;

- recherches en commun CNRS - LEP sur la production de jonctions p-n de silicium incrustation et recuit laser.

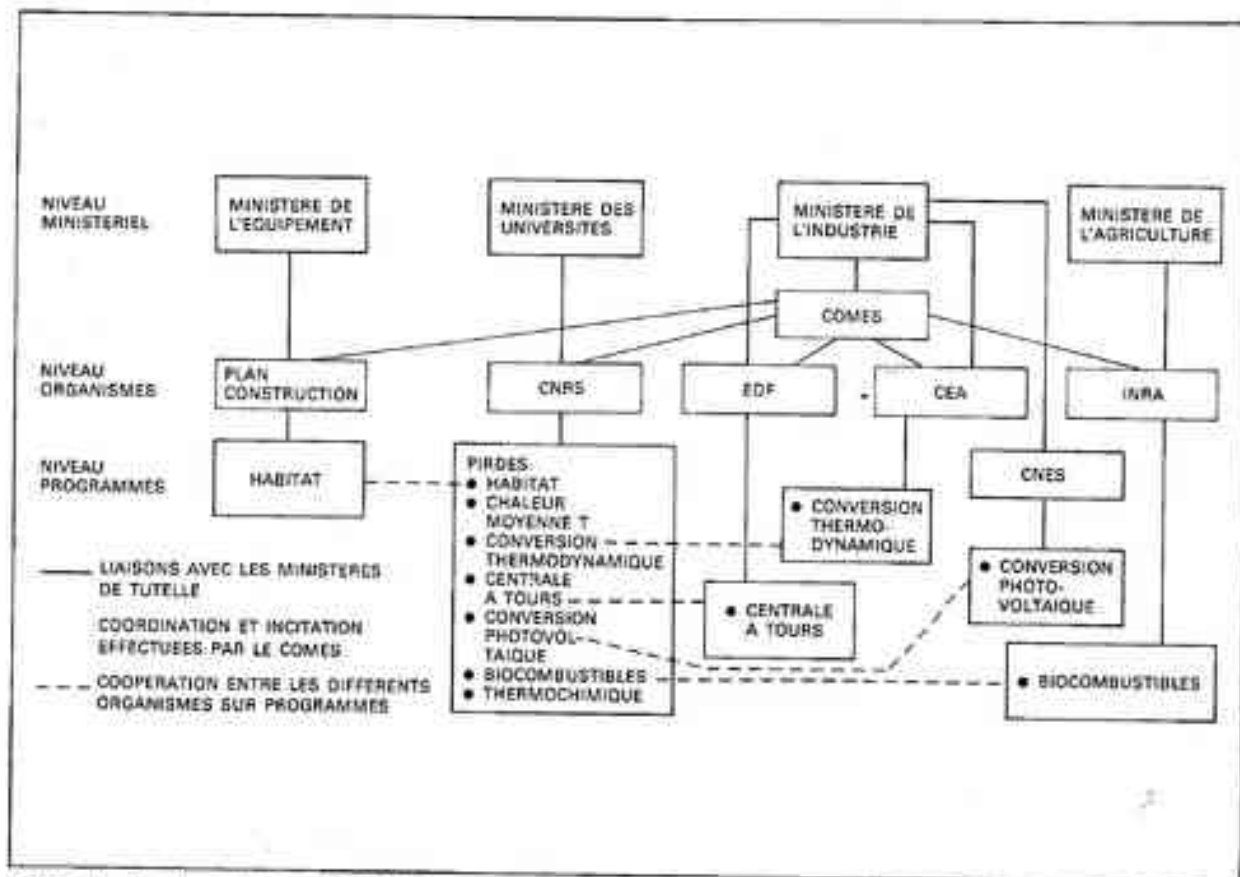


Tableau 3 - Insertion nationale du PIRDES

MODES D'ACTION DU PIRDES

La première phase, celle de l'évaluation des domaines d'intérêt, est insuffisamment traitée en France. Le PIRDES n'échappe pas à cette règle. Certes la conjoncture est analysée par la direction du PIRDES, puis par les comités d'ATP, discutée parfois par le Comité national ; certes dans certains secteurs particuliers (réfrigération, chaleur industrielle, filières de photopiles) les problèmes ont été posés de façon assez complète. Mais cette activité peut être améliorée. Pourraient y contribuer les deux mesures suivantes :

- détachement de jeunes chercheurs après leur thèse, pendant six mois ou un an, au PIRDES pour participer à cette tâche d'évaluation et de prospective.
- discussion de rapports d'évaluation et de prospective par les sections concernées du

Comité national, au cours de leur session d'automne.

La deuxième phase est celle du financement. Deux méthodes sont utilisées, suivant que sont lancées ou non des appels d'offres. Les ATP du PIRDES sont très analogues aux autres ATP : elles ouvrent un concours d'idées pendant deux ou trois ans sur un thème donné. Les quatre actions lancées en 1976 sont venues à leur terme. En 1979, les ATP du PIRDES sont les suivantes :

- thermochimie solaire (créée en 1978) ;
- applications de la chaleur solaire à l'agriculture et à l'industrie ;
- mécanismes photoélectriques fondamentaux ;
- matériaux et mécanismes de la conversion photochimique de l'énergie solaire.

Quant aux actions sans appel d'offres, ce

sont soit des constructions de prototypes entreprises dès 1975 dans le domaine de la conversion thermodynamique, soit des continuations d'actions lancées par ATP ; dans ce cas l'ATP a servi à sélectionner les sujets et les équipes concernées.

Le PIRDES intervient aussi à propos des appels d'offres du COMES ou des communautés européennes, en aidant les équipes CNRS à sélectionner les thèmes qu'elles soumettent.

Rappelons que l'équivalent américain du PIRDES, le solar energy research institute (SERI), né en 1977, distribue son budget propre de la façon suivante entre ses différentes activités : recherche 40 %, évaluation de la recherche 20 %, valorisation-industrialisation 15 %, diffusion-formation-information 15 %, relations internationales 10 %. Ce qui montre que l'administration de la recherche n'a pas fini d'évoluer...

res énergétiques » est un des premiers devoirs du programme solaire national. L'inventaire des ressources, réalisé par l'INRA, fait état de cinq millions de tonnes-équivalent-pétrole (5 M. Tep) mobilisables très rapidement. Un des problèmes difficiles est la collecte de la biomasse (qui coûte au moins 500 F/Tep économisée). Il existe des brevets ANVAR pour compacter les déchets en granulats calibrés. Plusieurs entreprises vendent et exportent des gazogènes. Développer cette source d'énergie commence par l'affirmation d'une volonté soutenue par des moyens appropriés (incitation des producteurs et des consommateurs). L'agriculture américaine, qui entre pour 4 % dans la consommation énergétique nationale, s'est donnée pour objectif d'être énergétiquement excédentaire en 1990. Des recherches fondamentales sont nécessaires pour parvenir à la fixation de l'azote atmosphérique par les graminées, qui diminuerait fortement la consommation d'engrais. Plus modestement le PIRDES examine la possibilité d'associer aux gazogènes un chauffage solaire (3) : dans les gazogènes actuels 30 % de l'énergie de la biomasse est utilisée à produire la chaleur nécessaire pour atteindre la température de gazéification.

Même problème, transposé, dans les pays en voie de développement (PVD). Du Sénégal au Soudan, les pays du Sahel manquent dramatiquement de bois

alors que leur cuisine quotidienne est faite par des feux de bois de rendement thermique inférieur à 5 %. Qui inventera le poêle convenable ? L'élevage intensif permet de collecter des déchets animaux qui peuvent subir une fermentation méthanique : cette technique semble convenir très bien à la Chine, et peut-être à l'Inde. Les pays équatoriaux se voient ouvrir de multiples possibilités : gazéification du bois (4), culture de canne à sucre qu'on peut faire fermenter en éthanol (5), culture d'algues. La valorisation chimique de la biomasse se combine ici avec sa valorisation énergétique. Des recherches fondamentales sont-elles nécessaires aussi dans ce domaine ? oui certes. Parmi les plus importantes mentionnons celles d'ordre socio-économique qu'ont été lancées par l'ATP « Socio-économie de l'énergie » du secteur sciences de l'homme. Des exploitations agricoles d'un type nouveau sont en train de naître. Economistes et sociologues pourraient contribuer davantage au PIRDES : cette appréciation vaut pour tous les paragraphes qui suivent. Autres problèmes : la production directe d'hydrocarbures légers par les algues (6), la recherche d'équilibres écologiques nouveaux, l'étude des modes de destruction de la cellulose, l'étude des fermentations.

Passons au chauffage solaire des bâtiments. Les collecteurs muraux en façade sud du type Trombe ont marqué

le départ des méthodes « passives » ou « bioclimatiques » de chauffage solaire, non seulement en France, mais aux Etats-Unis où elles ont pris une grande extension. Cette contribution importante du CNRS (antérieure au PIRDES !) en appelle d'autres, car il ne s'agit pas seulement de problèmes d'architectes et de bureaux d'études thermiques. Les équipes du CNRS sont engagées dans des travaux de modélisation thermique des bâtiments (7) d'analyse-système et d'expérimentation sur des serres (8), (9), ou sur des associations Trombe-capteurs à air : - stockage par cailloux (7, 8), de recherche sur des composants nouveaux comme les parois à stockage par sels hydratés (9) ou par paraffine (10).

Transposons à nouveau aux PVD : il s'y pose le problème des matériaux de construction et celui de la climatisa-

(3) Laboratoire des sciences du génie chimique et équipe « réactions radicalaires et photochimie » (ERA 136), Nancy.

(4) Alors que le charbon de bois continue à décliner en Guadeloupe et Martinique au profit du butane, la Guyane et notamment sa mangrove offre un terrain d'expérience intéressant.

(5) Le Brétil a inauguré largement cette technologie. La canne à sucre est une des rares espèces qui possède à la fois un gain énergétique et un taux de croissance élevés.

(6) Laboratoire de chimie organique physique, ENSCP, Paris.

(7) Equipe RAMSES, laboratoire de l'accélérateur linéaire, IN2P3 Orsay.

(8) Laboratoire d'énergie solaire, Poitiers-Orléans.

(9) Laboratoire d'énergie solaire, Valbonne.

(10) Laboratoire des signaux et systèmes, Orsay, et laboratoire de thermodynamique, Châtenay-Malabry.

Technique	Analyse-système	Recherche fondamentale	Optimisation technologique	Industrialisation diffusion
Chauffe-eau solaire	Achievée	Achievée	Très avancée	En cours
Chauffage solaire (méthodes passives)	Embryonnaire	Nécessaire sur quelques points comme : - stockage therm. - capteurs hautes températures	Stade des démonstrations	A faire
Application des capteurs solaires au chauffage basse et moyenne température	Assez avancée		Avancée pour les maisons ; à faire pour applications agric. et indus.	Abordée seulement pour maisons solaires
Centrales thermo-hélio-électriques à collecteur central	Achievée dans cas standard. Nombreuses variantes nécessaires	A faire sur : - matériaux - récepteurs - régulation...	Abordée seulement dans cas standard (THEMIS)	A faire
Photopies de première génération	Achievée	Nécessaire sur : - matériau Si - technologies de préparation	En cours d'évolution rapide	En cours
Photopies de deuxième génération	Assez avancée	Nécessaire (nombreuses filiales)	En cours sur quelques filiales	A faire
Photochimie et photobioclimie solaires	A faire	Nécessaire (nombreuses filiales)	Pas mûre	Pas mûre
Thermochimie solaire	Abordée, à poursuivre	Nécessaire (nombreuses filiales)	A faire	Pas mûre
Bioconversion (de la biomasse en combustible)	Assez avancée	Nécessaire sur fermentation, éco-systèmes, génétique	Stade des démonstrations	A faire

Tableau 4 - Etat d'avancement des techniques de conversion d'énergie solaire

tion. La mise au point de matériaux locaux pouvant être cuits par des fours solaires simplifiés (plâtre, briques, silico-calcaires, ciments pouzzolaniques) est un des objectifs du programme « Thermochimie » du PIRDES. Plusieurs équipes du CNRS étudient les méthodes « passives » de réfrigération (par évaporation, par rayonnement) qui sont effectivement en usage depuis des siècles.

C'est seulement quand on a exploité à fond les méthodes passives de chauffage et de climatisation que s'impose le recours aux méthodes « actives » mais là encore le soleil peut apporter des économies d'énergie appréciables. Les chauffe-eau solaires, s'ils sont rentables pour l'eau chaude domestique ne le sont pas encore pour le chauffage central. Pour progresser, il faudrait mieux stocker la chaleur et ainsi pouvoir diminuer la capacité du chauffage d'appoint. C'est pourquoi le PIRDES, comme d'ailleurs d'autres organismes, s'est orienté vers l'étude du stockage saisonnier, utilisant la capacité calorifique du sol (11) ou des nappes aquifères (12). Comme le système de réfrigération solaire actif, il étudie les systèmes à adsorption (13).

De façon générale, le chauffage solaire devrait pouvoir contribuer au bilan national pour plus de 5 MTep en 2000, d'après une estimation du Ministère de l'Industrie.

Avec peut-être 8 MTep pour la biomasse, on arrive aisément ainsi à faire couvrir par l'énergie solaire plus de 5 % de nos besoins. Aisément, du moins, en parole. Dans la réalité, ce sera plus difficile : compteront surtout la volonté politique et les moyens financiers mis au service de l'industrialisation des procédés et de l'incitation des consommateurs.

Vers une civilisation de l'héliostat ?

Les capteurs-concentrateurs sont intéressants dès qu'on veut : soit élever la température d'une cible, soit produire un effet de centralisation énergétique.

Envisageons d'abord l'aspect purement thermique. 15 % de l'énergie consommée par l'industrie l'est sous la forme de chaleur entre 100 et 300° C (soit 9 MTep). Ce chiffre s'élève à 19 % dans le textile (0,6 MTep), à 28 % dans l'agro-alimentaire (1,3 MTep), à 56 % dans le papier (1,6 MTep). Le soleil peut encore ici



Fig. 1 - L'immeuble solaire de Bourgoin-Jallieu, construit par l'union des HLM, instrumenté par le plan-construction modélisé et expérimenté par une équipe du centre de recherches à très basses températures du CNRS, Grenoble.

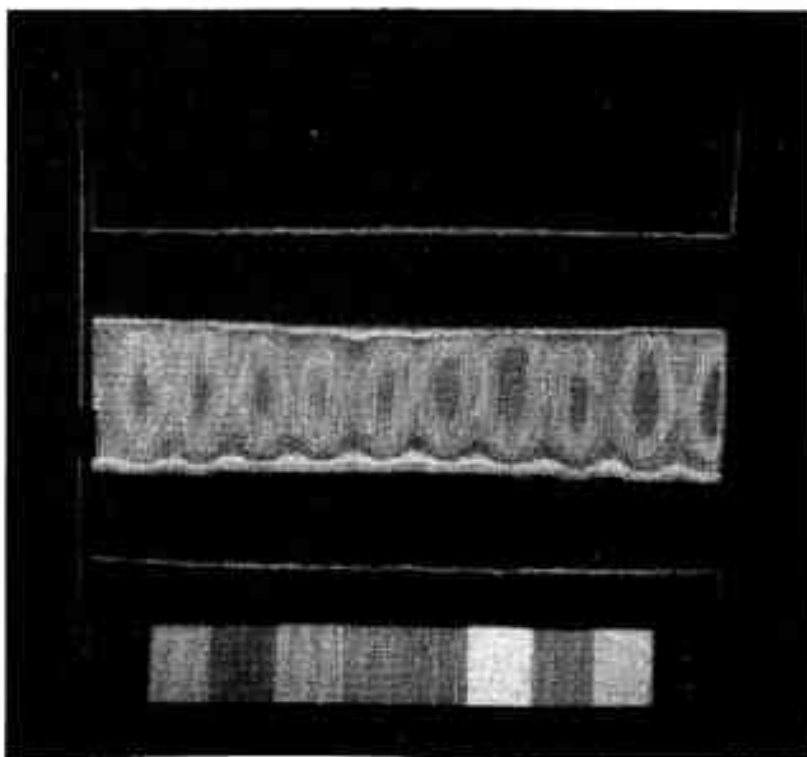
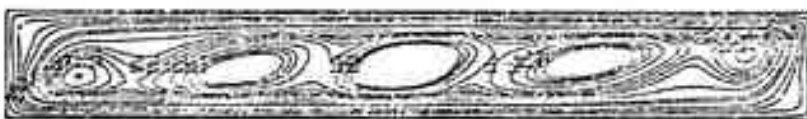


Fig. 2 - Rouleaux de convection dans un capteur plan : modélisation théorique (Institut de mécanique des fluides, Marseille) et observation par caméra infra-rouge (Laboratoire d'héliophysique, Marseille).

(11) Institut de mécanique des fluides, Grenoble.
(12) Institut de mécanique des fluides, Toulouse.
(13) Laboratoire de physique des solides, Orsay.

servir à économiser des énergies nobles (fuel, électricité) : une batterie d'héliostats, chacun muni de sa chaudière, et un réseau de thermostuide passant par ces chaudières peut y pourvoir. A quel prix ? aujourd'hui 30 000 F/Tep économisée annuellement, 10 000 à moyen terme (soit moins cher que les chauffe-eau d'aujourd'hui). Faire progresser une telle solution suppose d'abord que l'on dispose d'un capteur adéquat. Pour la partie inférieure de l'intervalle 100 – 300° C, celui-ci peut être un capteur plan sous vide, tel que l'étudie la thomson-CSF ou un capteur à focalisation linéaire sur lequel travaillent le CNEEMA (14), la société Bertin et le CEA. Le CNRS a préféré s'orienter vers les capteurs paraboliques à focalisation ponctuelle et munis de deux mouvements leur permettant de suivre le soleil en azimut et en site. Notre raisonnement se schématise ainsi : leur rendement de collecte de l'énergie est nettement supérieur à celui des cylindro-paraboliques (50 % en moyenne sur l'année au lieu de 25 %, par exemple) et leur prix ne devrait pas être beaucoup plus élevé, car une approximation grossière du paraboloïde suffit pour la surface réfléchissante et, d'autre part, le double mouvement n'est pas un élément coûteux de l'ensemble. Deux modèles ont été construits (figure 3) et actuellement la Société Bertin procède, sous marché du CNRS, à l'étude de l'industrialisation d'un tel appareil.

Par ailleurs, le PIRDES a programmé l'étude de systèmes de chauffage solaire pour l'industrie, en trois étapes : étude théorique des réseaux de fluides (15), construction d'un modèle probatoire dit THEK 2, constitué par une dizaine d'héliostats et un réseau de fluide, puis enfin couplage avec l'industrie pour réaliser une installation en vraie grandeur dans le secteur agro-alimentaire (16).

Mais la concentration de l'énergie solaire permet aussi de produire de l'électricité, par différentes techniques. Comparons ces techniques sous l'angle de leur capteur, de leur système de collecte de l'énergie, de leur système de production de l'électricité (tableau 5) : nous avons également inséré dans le tableau, à titre de comparaison, des systèmes sans concentration.

Le premier mérite de l'héliostat est

(14) Centre national d'études et d'expérimentation de la machine agricole.

(15) En cours du laboratoire d'héliophysique, Marseille : Ecole des mines et société Bertin (marchés CNRS).

(16) Cette réalisation, baptisée THEK 2, a reçu un avis favorable du groupe d'experts de la communauté économique européenne (CEE).

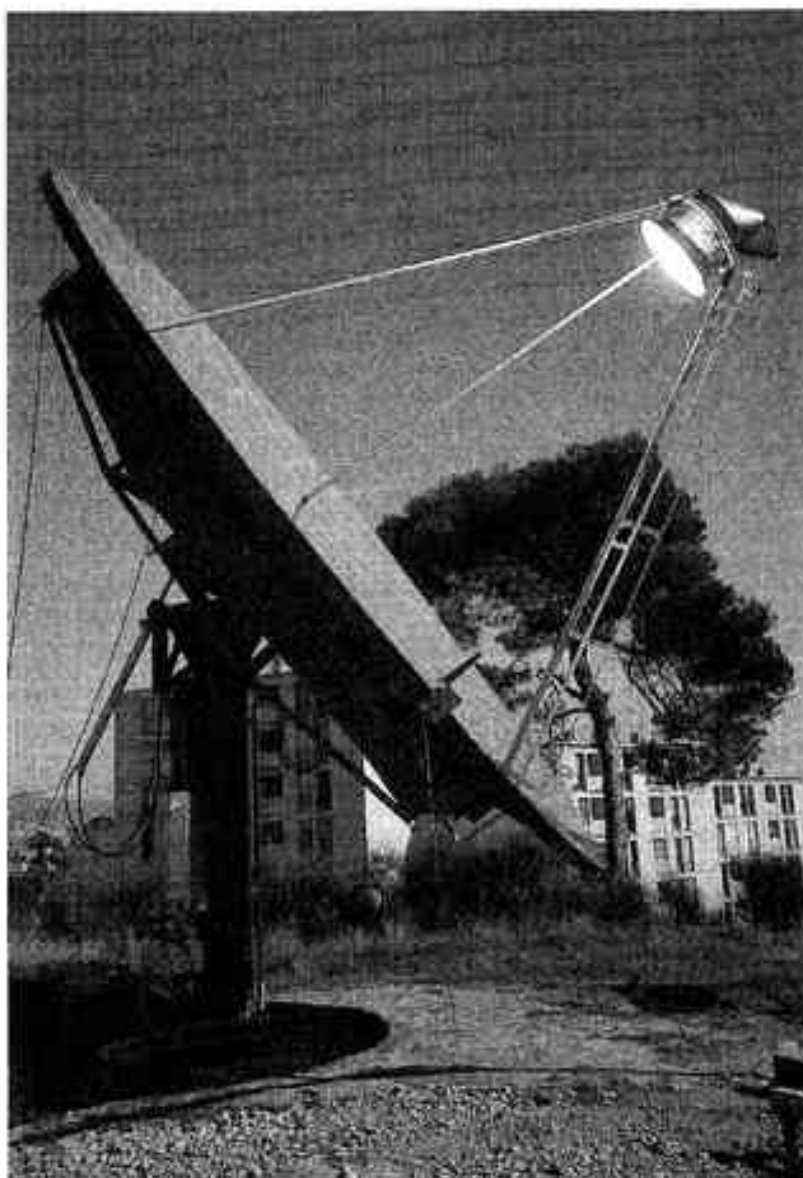
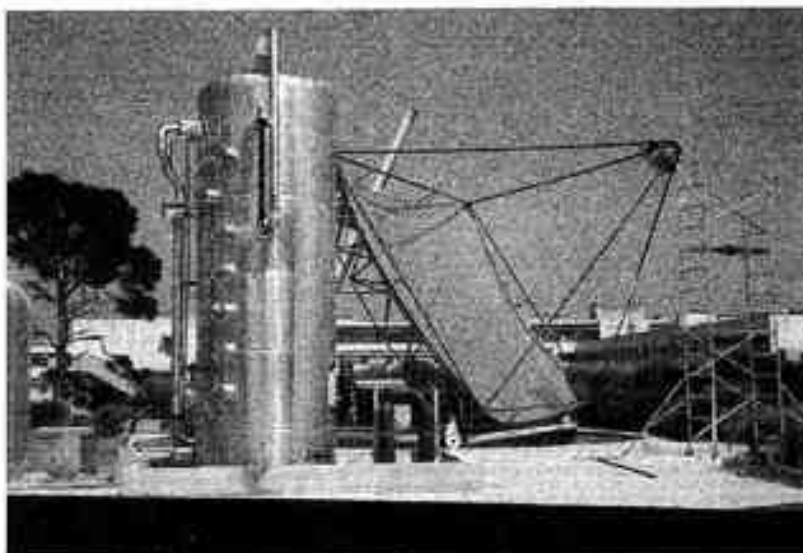


Fig. 3 – Deux capteurs paraboliques construits par le laboratoire d'héliophysique (Marseille) et l'équipe technique de base du PIRDES, M. Molan (CNRS-PIRDES)

	CAPTEUR	COLLECTE	MACHINE
CENTRALE A TOUR	HELIOSTAT (PRECIS)	OPTIQUE (SUPPORT IMMATERIEL)	TURBINE
CENTRALE A COLLECTEURS DISTRIBUES	HELIOSTAT (GROSSIER)	THERMIQUE (RESEAU DE FLUIDES)	TURBINE
	CAPTEUR	MACHINE	COLLECTE
PHOTOVOLTAIQUE AVEC CONCENTRATION	HELIOSTAT + LENTILLE	PHOTOPILE SILICIUM SOPHISTIQUEE	ELECTRIQUE (CUIVRE)
PHOTOVOLTAIQUE (Panneaux plans)		PHOTOPILE AU SILICIUM (ORDINAIRE)	ELECTRIQUE (CUIVRE)
	CAPTEUR	COLLECTE	MACHINE
BIDMASSE	VEGETATION	RAMASSAGE	GAZOGENE

Tableau 5 - Systèmes de production d'électricité solaire

d'intervenir dans trois des systèmes possibles - les trois premiers - sous des formes pas très différentes. Son deuxième mérite est, dans la perspective de la conversion thermodynamique, d'autoriser la centralisation économique de l'énergie (support optique gratuit pour la collecte, effet de taille avantageux pour la turbine).

Son troisième mérite est, dans la perspective de la conversion photovoltaïque, de dissocier le capteur et la machine et de réduire dans de larges proportions la surface (chère) de photopile.

Ajoutons que le degré optimal de centralisation peut être très variable, et n'est en aucun cas très élevé. Les plus grandes centrales à tours auxquelles on rêve pour l'an 2000 ne dépassent pas 1/10 de tranche nucléaire, les plus petites se situent vers 1/1 000. Parce qu'elles sont modulaires, les centrales à collecteurs distribués ou à photopiles peuvent être relativement dispersées. La centrale peut se réduire à compter un héliostat unique : en particulier un paraboloïde au foyer duquel on place un moteur Stirling, ou une turbine à gaz, ou un système thermoélectrique, pourrait être un système de grand intérêt.

On constate ainsi une convergence d'intérêts pour ce composant polyvalent : l'héliostat. On constate aussi que, étant donnée sa complexité très modérée, un coût limite de l'ordre de celui de la machine agricole (20 F/kg) devrait être accessible, et que ce coût rendrait rentables les centrales à tour. Ceci indique non seulement qu'on peut se proposer l'héliostat comme objet d'étude légitime, mais qu'on doit le

faire : car cette technologie ne progressera pas par des études « papier », mais par des inventions successives portant sur les procédés de production, sur les structures (mécanique, commandes) et sur les matériaux (verre, métaux polis, ciments, plastiques).

L'industrie est peu intéressée aujourd'hui à financer ces travaux car il s'agit de recherches à long terme. Une stratégie de développement normal de ce secteur doit se fonder sur des crédits d'état, et tenir compte de ce que :

- des prototypes de centrales, de taille appropriée, sont un des bons moyens de programmer des séries convenables d'héliostats ;
- l'aide d'un marché réaliste doit être trouvée dès que possible, et ceci semble possible à travers les applications thermiques industrielles citées au début de ce chapitre, et peut-être à partir d'équipements dans les pays tropicaux.

Le CNRS, pour sa part, a entrepris avec EDF le programme THEM. Deux types d'héliostats (fig. 4) ont été développés : l'un à partir des travaux du LAAS (y compris une étude très détaillée des systèmes de commande) et de plusieurs industriels associés ; l'autre par le groupement industriel CETHEL, sur crédits DGRST et CNRS. De plus le modèle de l'équipe technique de base du PIRDES est à l'étude, sous les deux formes THEK et THEM.

Ce programme vise, en première étape, une centrale à tour dite THEMIS dont la taille a été révisée, en baisse, par suite des prix trop élevés proposés par l'industrie pour la fabrication des héliostats (et aussi de la chaudière).

Construire une telle centrale, en effet, permet à la fois de lancer l'industrie des héliostats et d'étudier expérimentalement son mode de gestion, qui n'est pas simple. En outre le CNRS et EDF, avec le CEA, préparent « sur le papier » des systèmes plus évolués de centrale à tour. L'une de ces voies, celle des cycles à gaz, est explorée de façon plus précise car la chaudière à gaz est, non seulement, un composant critique de cette filière, mais aussi un bel objet d'études fondamentales sur les échanges thermiques à haute température sous rayonnement (17).

Une première retombée des études d'héliostats, en dehors du champ de centrales à tour, est constituée par la réalisation du prototype de générateur photovoltaïque sous concentration SOPHOCLE 1 000 (18) (fig. 6). Le CNRS essaiera en 1979-80 de petits prototypes de ce genre dans divers climats, par collaboration bilatérale avec des laboratoires d'Inde, Brésil, Sénégal, Algérie et Mexique : on saura ainsi si la productivité et la fiabilité de ces systèmes permettent d'envisager à court terme cette forme particulière de « civilisation de l'héliostat ». Il semble donc que cette filière a certaines chances de déboucher.

Vers une civilisation du silicium ?

Nous avons abordé par un biais le domaine des photopiles : traitons-le dans toute son étendue, qui est, elle aussi, l'objet de contestations.

Certains y voient le pain blanc du siècle prochain - ce sont souvent les détracteurs de la conversion thermody-

namique -. D'autres refusent d'y voir de l'énergétique : la production française annuelle n'est-elle pas l'équivalent énergétique d'un moteur de camion tournant toute l'année ?

L'industrie française, c'est un fait, s'y précipite : quatre producteurs de piles solaires en 1980 contre un seul en 1978. La production double chaque année. Un marché existe : faible en France même (quelques relais de communications, la détection des incendies de forêt, les clôtures électriques, la recharge des batteries de voiliers), ample dans les pays tropicaux (alimentation de téléviseurs, pompes solaires, miniréfrigérateurs, éclairage, et bientôt générateurs électriques pour villages isolés).

Bon contexte pour la recherche. Et celle-ci est effectivement très active : plus de trente équipes CNRS sont concernées. L'évolution technique des photopiles est en effet très rapide, et loin d'être terminée. Elle est dominée par deux questions principales : le perfectionnement des photopiles au silicium, l'avènement possible d'autres types de photopiles.

Les baisses de coût espérées pour les photopiles au silicium résultent d'abord d'études de matériaux. Le matériau actuel est produit par la réduction de la silice, chloruration, distillation puis réduction des chlorures, fusion du silicium pur, tirage d'un lingot monocristallin de diamètre 75 à 100 mm, sciage du lingot. Les variantes suivantes sont étudiées : lingots de plus gros diamètre, découpés par scies multiples très fines (gain de coût d'un facteur 3 ou 4), tirage direct de rubans de silicium (différentes méthodes ont conduit à de bons rendements et laissent espérer un coût divisé par 10), emploi de silicium purifié plus simplement, car les teneurs tolérables d'impuretés sont mal connues (19), et enfin emploi de silicium polycristallin obtenu par différentes techniques (20). La mise en œuvre de ces moyens devrait assurer une baisse de coût supérieure à 10 pour le matériau, qui entre pour 40 % dans le coût des photopiles.

Une deuxième voie de progrès concerne la technologie des photopiles : remplacement des contacts évaporés par des contacts sérigraphiés et formation des jonctions p-n par des méthodes

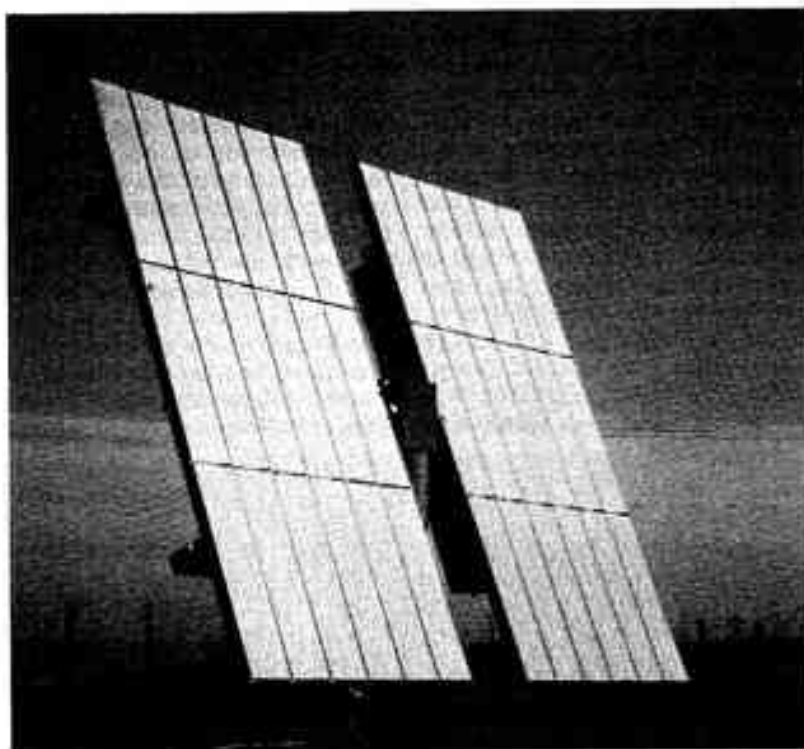


Fig. 4 - Deux héliostats focalisants construits par le LAA5 (CNRS) et les sociétés SNIAS-ARBEL-SOTEREM d'une part, par le groupement industriel CETHEL de l'autre.

(17) Laboratoire d'énergétique solaire, Poitiers-Odeillo.

(18) Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes, (L.A.A.S.), Toulouse.

(19) Sur ce thème travaillent le laboratoire d'énergétique électrochimique de Grenoble et le centre d'études de chimie métallurgique de Vitry.

(20) La caractérisation d'un tel matériau et l'étude fondamentale des joints de grain dans le Si font l'objet d'une action concertée de 9 équipes du CNRS.

nouvelles. Sur ce dernier thème travaille notamment le centre de recherches nucléaires du CNRS à Strasbourg (groupe PHASE). Cette équipe étudie la recristallisation superficielle du Si soumis à l'éclair d'un laser, après qu'une impureté dopante ait été apportée soit par évaporation d'une couche métallique, soit par incrustation d'ions provenant d'un plasma ou d'un jet de petites particules (agrégats). Dans cette technique on prend son parti de la nécessité d'opérations sous vide, mais on vise à réaliser toute la technologie par une chaîne continue, en profitant de ce que la formation d'une jonction ne de-

mande que dix secondes, au lieu de plusieurs heures par diffusion. On peut présumer une baisse de coût d'un facteur 5 à 10 sur ce poste, qui entre pour 30 % dans le coût total de la photopile.

Les 30 % restants sont le coût de l'encapsulation des cellules en panneaux rigides et étanches, qui risque fort d'être le « point dur » de la progression de cette technique (une baisse de coût d'un facteur 2 semble seule possible).

Il résulte de cette analyse que vers 1985 les photopiles au silicium devraient valoir entre 5 et 15 F/W crête (contre 90 F aujourd'hui). L'objectif

fixé aux USA par la loi Mc. Cormack est de 5 F/W pour le générateur photovoltaïque complet en 1988. On peut également prévoir une élévation des rendements de conversion moyen de 12 à 15 %. Dans ces conditions le coût des générateurs plans à photopiles silicium passerait, de 300 000 F/KW nominal aujourd'hui, à 25 000-35 000 F en 1986... et peut être 8 000 à 15 000 F vers 1990-1995...

Pourra-t-on faire mieux par d'autres techniques ?

Une première voie est celle de la concentration, déjà citée, et avec elle, l'emploi de photopiles sophistiquées à

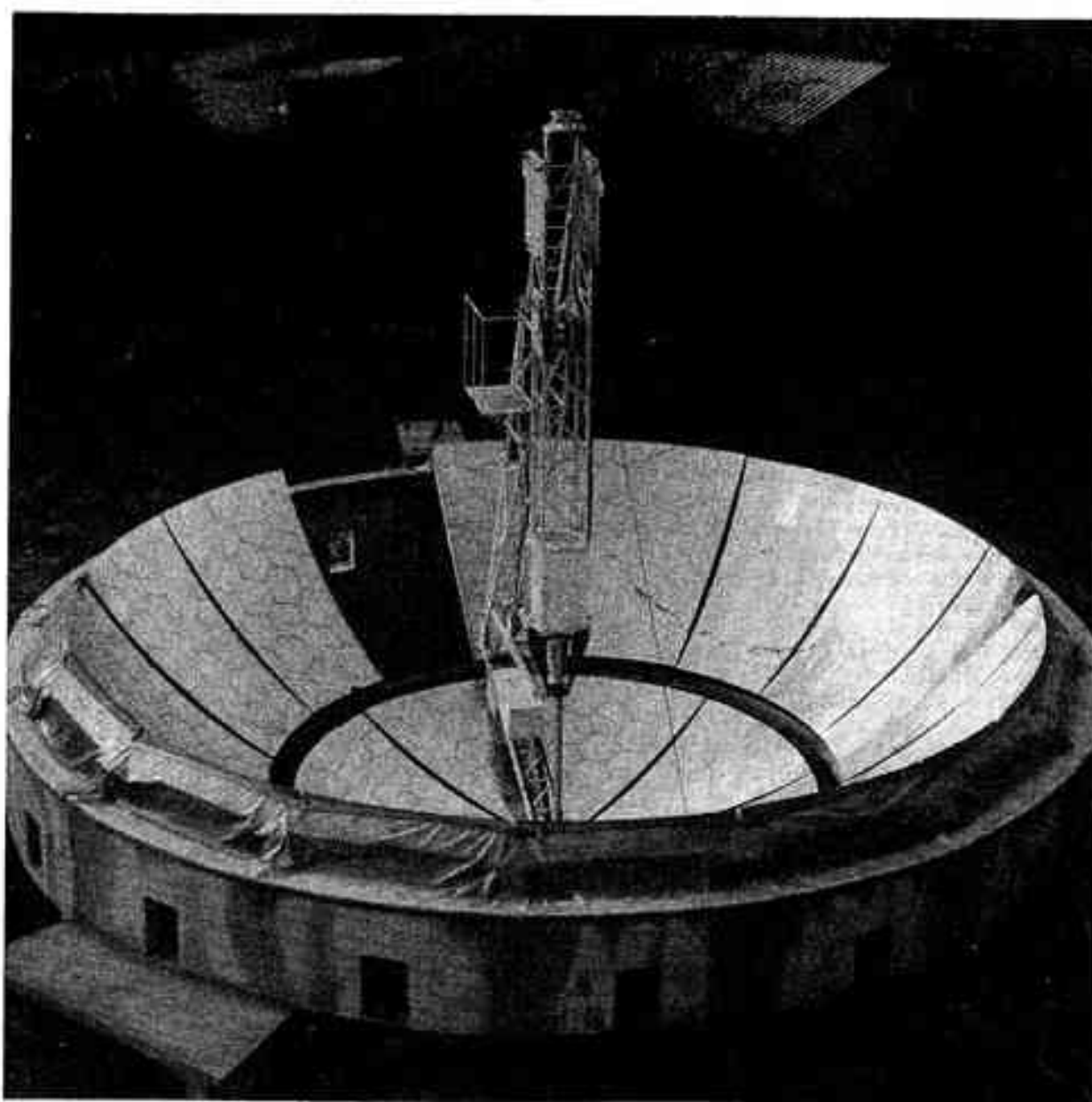


Fig. 5 - Le collecteur sphérique fixe muni d'une chaudière mobile PERICLES (Production d'énergie en région isolée par concentration limitée d'énergie solaire) a été conçu par le laboratoire d'astronomie spatiale de Marseille. Au prototype de 10 m de diamètre actuellement construit succèdera peut-être un modèle de 30 m bien adapté à la fourniture de chaleur et d'électricité aux villages indiens.

très haut rendement. Cette filière implique non seulement le silicium, mais aussi l'arséniure de gallium et d'autres composés III-V (21). Des cellules de rendement 22 % ont été obtenues tant aux USA qu'en Italie. Mais on peut également recourir à des systèmes à conversion de fréquence : cellule revêtue d'un matériau photoluminescent (22) ou encore cellule recevant le rayonnement d'un corps noir chauffé par le rayonnement solaire (23). On peut enfin penser à des systèmes « multicolores » constitués soit de plusieurs cellules recevant en parallèle différentes bandes spectrales du rayonnement

solaire soit d'une seule photopile composée de plusieurs cellules recevant en série le rayonnement solaire et constituées de matériaux spectralement adaptés. Une première réalisation américaine a conduit à un rendement de 30 % et on peut viser jusqu'à 50 %. Plusieurs équipes CNRS se groupent sur ce thème.

Cette filière est intéressante mais son avenir est probablement limité à long terme. Il semble que les générateurs à concentration utilisant des cellules au Si puissent concurrencer des générateurs à panneaux plans tant que les cellules ordinaires au silicium dépassent

10-15 F/W crête, et que ceux utilisant des cellules « multicolores » puissent s'imposer (quand ils seront au point !) tant que les cellules ordinaires dépasseront 3 à 5 F/W crête. D'une certaine manière, on peut dire que le développement de cette filière est une assurance contre un échec éventuel de l'abaissement radical des coûts des photopiles au silicium.

(21) Sur ce sujet travaillent l'INSA de Lyon, les laboratoires de physique des solides et de magnétisme de Bellevue, le centre d'études d'électronique des solides, Montpellier et l'école nationale de chimie de Toulouse.

(22) Laboratoire de spectroscopie et d'optique du corps solide, Strasbourg.

(23) Groupe de physique des solides de l'ENS, Paris.

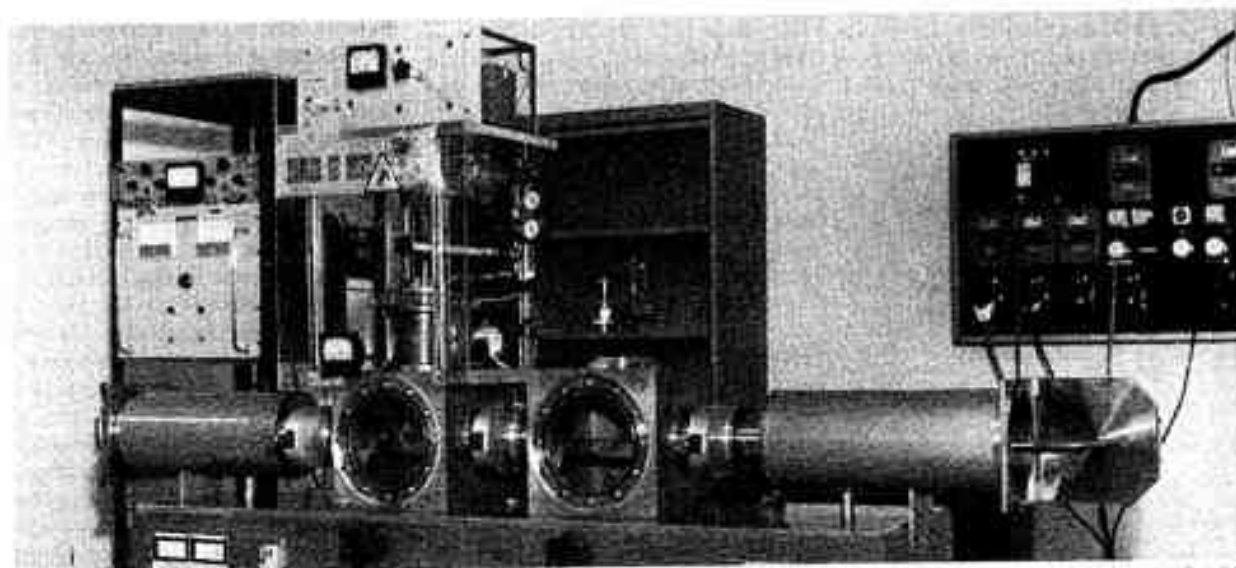
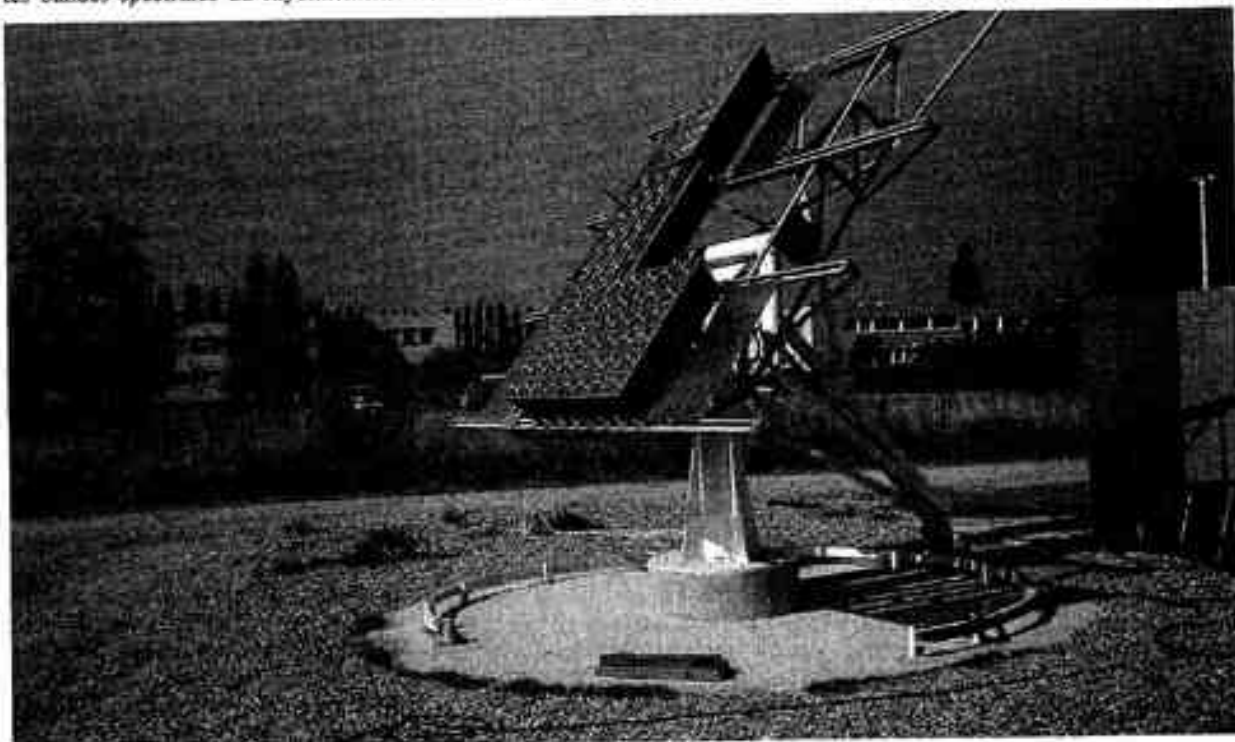


Fig. 6 - Prototype de 1 KW de la filière SOPHOCLE (solaire photovoltaïque par concentration limitée d'énergie) construit par le LAAS à Toulouse. M. Estoin - LAAS, Toulouse -

Fig. 7 - Banc de production de photopiles au Si par incrustation et recul laser (Centre de recherches nucléaires, Strasbourg).

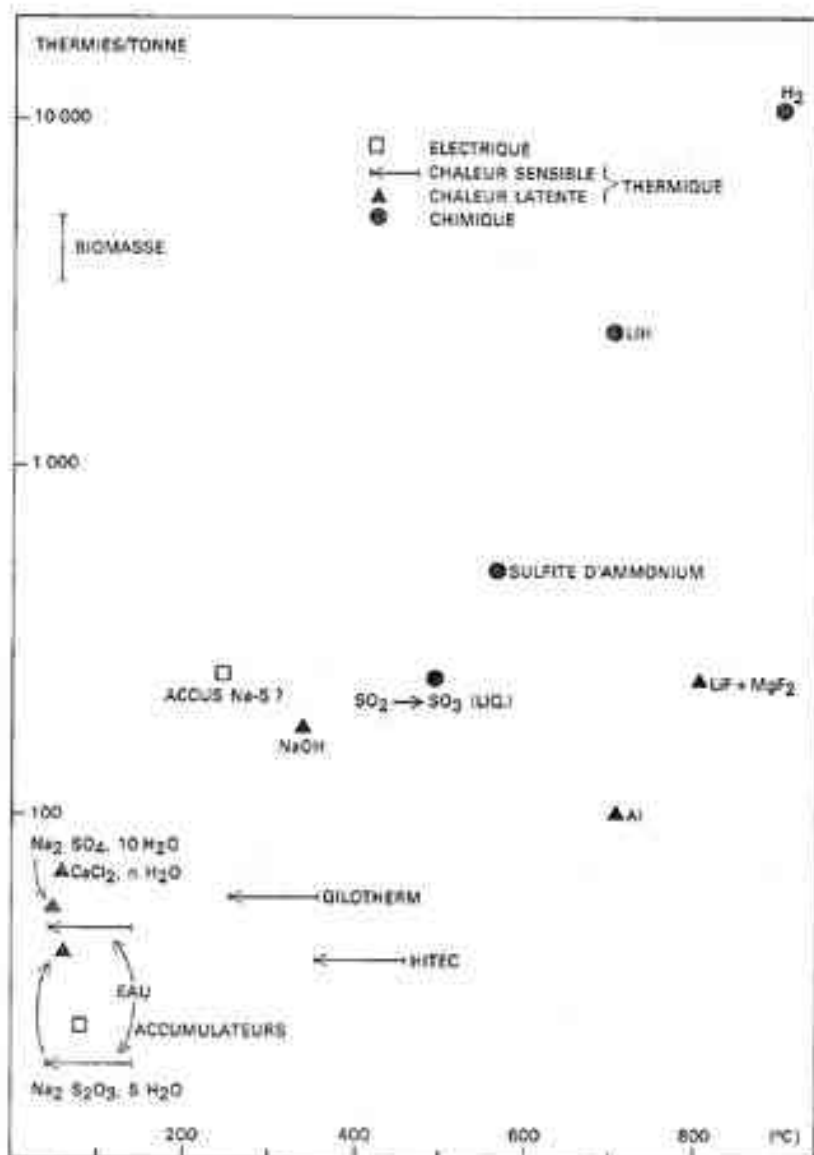


Fig. 8 - Comparaison de différents matériaux de stockage.

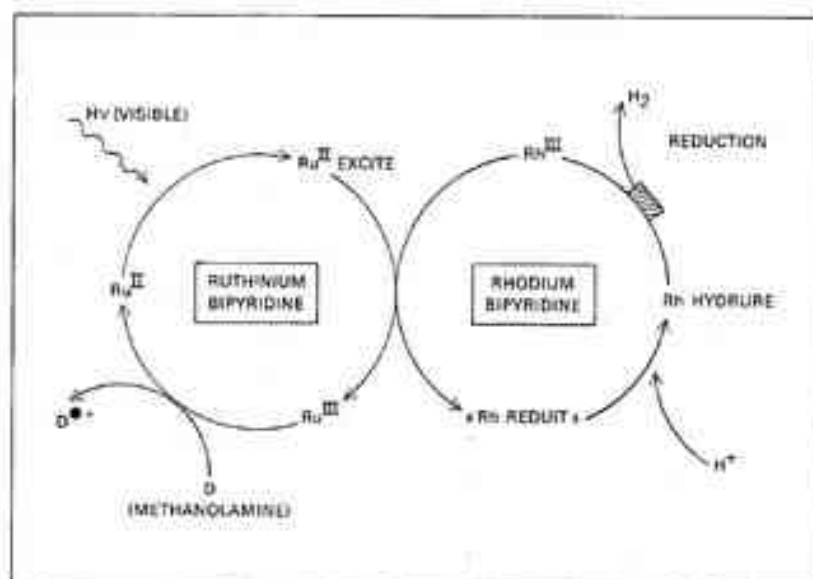


Fig. 9 - Schéma d'un cycle photochimique (Laboratoire de chimie organique physique, Strasbourg).

Une voie bien différente, enfin, est celle des photopiles en couches minces, utilisant au lieu de Si cristallin des composés semiconducteurs produits en grandes surfaces à bas coût, même si leur rendement de conversion n'est pas excellent. De nombreuses équipes du CNRS, qu'il serait fastidieux de nommer toutes, travaillent dans cette voie :

- une dizaine d'équipes sur le silicium hydrogéné amorphe ;
- cinq équipes sur le sulfure de cadmium ;
- trois équipes sur le tellure de cadmium ;
- une équipe sur le sélénure d'indium.

Il est vraisemblable que ces cellules pourront être obtenues à des coûts inférieurs à 200 F/m², mais leur problème est d'atteindre un rendement de conversion suffisant pour permettre un amortissement du générateur photovoltaïque. Si leur rendement atteint 5 %, elles pourront concurrencer des photopiles au silicium coûtant 3 F/W crête - à condition toutefois que leur fiabilité soit au moins égale.

Il est clair que d'autres possibilités peuvent encore être découvertes (photopiles organiques ? électrochimiques ?) mais que les voies qui viennent d'être citées constituent le champ d'action principal. Deux conclusions peuvent être retenues :

La carrière des photopiles s'engage dans des conditions très favorables. Les années 80 verront la naissance d'une industrie (24) ; à partir de l'an 2000 on peut espérer une contribution notable des photopiles aux bilans nationaux (pouvant atteindre 1 % aux USA selon un rapport récent de l'American physical society).

La technologie des photopiles est dans un état rapidement évolutif, justifiant simultanément un effort de l'industrie et des laboratoires de recherche de type CNRS. L'effort industriel consiste en investissements dans les procédés actuels et en recherches sur les procédés qui peuvent les remplacer rapidement. L'effort du CNRS doit être en grande partie orienté vers le court et le moyen termes, et en petite partie seulement vers les filières « exotiques » ; il doit tenir compte d'une analyse de conjoncture qui, nous l'avons montré schématiquement, accorde à la filière silicium un préjugé favorable tout en n'excluant pas la possibilité de percée d'une autre filière. Résumons schématiquement cette conjoncture : fabriquer des rubans de silicium de façon rapide et économique serait l'idéal pour hisser les photopiles au niveau de la grande électrotechnique ; à défaut, l'emploi de hautes concentrations ou l'émergence

du silicium amorphe garantirait également un bel avenir à cette technique.

Sur la piste de la photolyse de l'eau...

Si on cherche à aller plus loin que l'héliostat et plus loin que la photopile, on peut partir de l'inadéquation évidente du stockage thermique et du stockage électrique à l'énergétique solaire. Une solution s'impose : le stockage chimique. Mais la nature l'a déjà réalisé, avec quelque succès, par la biomasse (fig. 8). Peut-on faire aussi bien que la photosynthèse ?

On peut d'abord essayer de la comprendre, ce qui est en bonne voie (25). L'école française de photosynthèse est réputée, elle a reçu le soutien du PIRDES en 1976-77 et devrait bénéficier à partir de 1980 du développement du programme national sur la biomasse.

On peut ensuite tenter d'utiliser la photosynthèse en fonction d'intérêts très égoïstes. Une première possibilité résulte de la présence chez certaines bactéries, d'enzymes (hydrogénases) capables d'orienter la photosynthèse vers la production d'hydrogène ; on étudie donc certains types de bactéries photosynthétiques (26) capables de se nourrir de déchets organiques et de synthétiser les hydrogénases, on cherche à caractériser ces enzymes et à optimiser la production d'hydrogène.

Les bactéries photosynthétiques sont incapables d'hydrolyser l'eau. C'est ce que savent faire les chloroplastes des végétaux, mais ceux-ci ne contiennent pas d'hydrogénase. Peut-on alors associer des chloroplastes avec une hydrogénase fixée sur leurs membranes ? La réponse est positive, et sous réserve d'ajouter encore un transporteur d'électrons, la ferredoxine, on obtient alors de ces chloroplastes qu'ils hydrolysent l'eau en produisant de l'hydrogène (27).

Bien entendu, il existe aussi d'autres systèmes photochimiques que ceux élaborés par la nature, qui soient excitables par le rayonnement solaire. Encore faut-il, pour notre application, qu'un tel système contienne plusieurs éléments :

- une espèce photoactive, dont on exploite la réactivité dans son état excité par le rayonnement visible ;
- un accepteur, capable de prendre un électron à l'espèce photoactive excitée, et un donneur pour la régénération de l'accepteur (ou réciproquement) ;
- un catalyseur permettant à ces réactions de se coupler à l'hydrolyse de l'eau ;

- un système de séparation des charges, ce qui implique une certaine hétérogénéité du milieu (membrane ou interface).

Premier exemple, étudié sous des formes voisines par plusieurs équipes (28) : l'état excité (par le rayonnement visible) à longue durée du ruthénium-bipyridine. Dans cet état, la molécule peut réduire une amine. Cette réaction de réduction est schématisée par la figure 9 : sous réserve d'approvisionner constamment cette amine, on obtient une production continue d'hydrogène. C'est là, la première moitié (côté réduction) d'un cycle imitant *in vitro* la photosynthèse.

D'autres équipes partent de la recherche de membranes : on a pu proposer par exemple des phyllosilicates (29) se présentant en feuillets minces entre lesquels la dissociation ionique de l'eau se fait de façon très anormale. Le ruthénium-bipyridine est utilisé comme espèce photoactive et le méthylviologène comme accepteur.

Troisième exemple (30) : on cherche à sensibiliser une cellule électrochimique par deux colorants solubles, dont l'un est un fort oxydant et l'autre un fort réducteur dans leur état excité. Ces colorants sont des phthalocyanines sulfonées de différents métaux. Rappelons que le domaine des cellules photoélectrochimiques a été largement exploré récemment, mais plutôt sous la forme de photopiles semiconducteur-électrolyte ou de systèmes redox pilotés par une électrode semiconductrice.

Le problème de la photooxydation semble plus difficile que celui de la photoréduction et fait également l'objet d'études spécifiques (31).

Alors que la photochimie en général est une discipline très bien représentée au CNRS, la mention « solaire » implique une réduction drastique des spectres d'excitation, et donc des molécules intéressantes. A ce premier guidage s'ajoute un second, portant sur la durée de vie des états excités, qui doit être assez grande pour qu'une interaction chimique précède la désexcitation. La méthodologie à mettre en œuvre pour faire l'inventaire des possibilités pourrait ressembler à celle qui prévalut dans la recherche sur les lasers : c'est dire que ce nouveau domaine peut intéresser les physiciens des solides et des molécules autant que les chimistes.

Recherches et Innovation

L'éventail des recherches actuelles, on le voit, est large. On pourrait vouloir l'ouvrir encore davantage, car les applications de l'an 2000

seront peut-être fondées sur des techniques qui ressortent aujourd'hui du rêve, telles que :

- au plan thermique, sur le stockage et le transport chimique de l'énergie concentrée sur des cibles à très haute température... ;
- au plan photoélectrique, sur l'association aux photopiles de techniques optiques plus sophistiquées que la concentration, telles que fibres optiques, changement de fréquence, etc... ;
- au plan chimique, sur l'arbre à hydrogène « comme le voit Marchetti, qui héberge des bactéries productrices d'hydrogène comme les légumineuses hébergent des bactéries fixatrices d'azote... »

Mais le réalisme impose des limites plus précises. C'est la tâche des secteurs scientifiques d'élaborer les bases des découvertes futures. Plus modestement le PIRDES se propose d'exploiter les thèmes les plus prometteurs à moyen terme, de faire profiter la collectivité nationale de tous les acquis qui sont à portée de main. Dans ce but il doit sélectionner ses actions avec une claire vision des débouchés possibles, les mener avec continuité et leur consacrer des moyens suffisants. Ces moyens d'ailleurs diffèrent largement, en quantité et en nature, d'un domaine à un autre : la thermodynamique demande de gros crédits (prototypes), les photopiles des groupes assez nombreux (taille critique), la photochimie de petites équipes imaginatives : ces disparités ne sont pas plus choquantes que celles qui existent entre différentes disciplines du CNRS.

A ces conditions le PIRDES sera porteur d'innovations : bénéficier du vif d'idées neuves qu'est le CNRS ; mener une politique qui prenne en considération les contraintes économiques et industrielles extérieures à la recherche.

(24) La loi Mc Cormack prévoit une production USA de 2 000 MW crête par an en 1988 ; les prévisions du COMES pour la France, plus modestes, sont de 20 MW crête en 1985. La production mondiale actuelle est de 2 MW crête.

(25) Cf. article de J. Lacombe, La recherche 9, n° 95 (1978) : 113.

(26) Equipe membranes et bioénergétique bactérienne, CEN-Grenoble.

(27) Laboratoire de technologie enzymatique, université de Compiègne.

(28) Laboratoire de chimie organique physique, Strasbourg ; laboratoire de tythèses asymétriques, Orsay ; institut de chimie des substances naturelles Gif-sur-Yvette.

(29) Centre de recherche sur les solides à organisation cristalline imparfaite, Orléans.

(30) Laboratoire de chimie physique, Lille.

(31) Laboratoire de physico-chimie des rayonnements, Orsay.

L'habitat solaire en France : une analyse socio-économique

Les applications de l'énergie solaire au domaine de l'habitat présentent un intérêt très immédiat. Mais il appartient à l'économiste, de s'interroger sur les conditions de pénétration des innovations solaires dans l'habitat et sur les marges d'action dont disposent les Pouvoirs Publics pour mettre en place une politique de l'habitat solaire conforme aux intérêts de la collectivité.

Patrick CRIQUI

Un important effort de recherche appliquée est aujourd'hui consacré aux filières directes de conversion de l'énergie solaire : conversion thermique pour l'habitat, l'industrie ou l'agriculture, conversion thermodynamique et photovoltaïque. L'impact du développement respectif de ces différentes filières dépend étroitement de l'horizon temporel considéré.

Evaluation économique et conditions de diffusion de l'innovation

En France, la production d'électricité solaire sera vraisemblablement précédée par la mise en œuvre des technologies permettant de produire de l'énergie thermique solaire.

Parmi celles-ci, les applications à l'habitat présentent un intérêt particulier du point de vue de l'analyse socio-économique.

On commence, en effet, à déceler dans ce domaine :

- l'émergence de solutions technologiques dont les caractéristiques économiques sont, à terme, satisfaisantes ;
- l'existence d'une demande sociale pour un habitat de qualité, consommant moins d'énergie conventionnelle.

Le passage de la phase technique du processus d'innovation (recherche, expérimentation) à la phase économique (développement, diffusion) est envisageable dans un futur immédiat.

Il importe donc de s'interroger sur les conditions de pénétration des innovations solaires dans l'habitat et sur les marges d'action dont disposent les Pouvoirs Publics pour mettre en place une politique de l'habitat solaire conforme aux intérêts de la collectivité.

Les conditions du développement de l'habitat solaire en France dépendent tout d'abord des caractéristiques technico-économiques des solutions envisagées ainsi que des contraintes introduites par les inerties dans le renouvellement du parc de logement. L'étude de ces deux groupes de facteurs permet de mieux appréhender le potentiel maximum de développement des solutions actuellement maîtrisées. Leur développement réel dépendra cependant des stratégies adoptées par les entreprises du secteur industriel et du secteur de l'énergie et des conditions de leur insertion dans le processus de production du bâtiment.

L'élaboration d'une politique de l'habitat solaire devra s'appuyer sur une analyse des écarts entre le développement maximum, le développement réel prévisible sans intervention gouvernementale et le développement souhaitable.

L'état de la technique et les objectifs de coût

L'évaluation micro-économique des technologies solaires appliquées à l'habitat doit procéder d'une comparaison du couple « investissement initial – consommation d'énergie commerciale » pour un bâtiment solaire et un bâtiment de référence (par exemple chauffage au gaz avec une bonne isolation). Il est alors possible d'identifier le différentiel d'investissement initial

(ΔI) et les économies annuelles d'énergie finale (en valeur, ΔE) occasionnées par la mise en œuvre de la solution solaire. L'investissement maximum admissible (ΔI_A) pour atteindre la compétitivité économique est égale à la valeur actualisée des économies d'énergies annuelles :

$$\Delta I_A = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+a)^i} (1+b)^i \Delta E$$

avec n = durée de vie de l'installation
 a = taux d'actualisation (taux d'intérêt réel ; en francs constants)

b = dérive du prix de la source conventionnelle économisée (francs constants)

Cette approche est limitée car purement micro-économique : elle ne prend pas en compte les coûts et les avantages sociaux de l'habitat solaire. Cependant, elle permet de faire paraître des « coûts d'objectif » que les concepteurs de bâtiments solaires devraient s'efforcer d'approcher.

Il est possible de tirer trois conclusions des études menées dans cette perspective.

- L'investissement admissible varie peu entre le nord et le sud de la France lorsque l'on s'intéresse aux solutions solaires pour les besoins en confort thermique. La faiblesse de l'ensoleillement dans le nord est compensée par le plus grand volume des besoins et la plus longue durée de la période de chauffage. Au contraire, la compétitivité économique du chauffe-eau solaire (besoins constants sur l'année et identiques dans toutes les régions) s'établira d'abord dans le sud de la France.

- Dans une optique statique et dans les conditions de 1978, la plupart des réalisations actuelles sont caractérisées par des niveaux d'investissements réels

□ Patrick Criqui, attaché de recherche au CNRS – Institut économique et juridique (ER 94), Grenoble.

bien supérieurs aux niveaux admissibles (de l'ordre d'un facteur 2 pour le chauffage solaire, d'un facteur 1 à 2 pour le chauffe-eau selon les régions).

• Dans une optique dynamique, le rapport investissement réel-investissement admissible pourrait être amélioré :

- par la baisse de l'investissement réel (selon les cas, effet d'apprentissage (1) ou effet de production de série) ;
- par l'augmentation de l'investissement admissible lorsque l'on s'éloigne dans le temps, du fait de la dérive des prix des sources alternatives.

Ce phénomène peut être illustré par un graphique sur lequel sont représentés l'investissement réel en fonction du temps (« courbe d'apprentissage ») ainsi que l'investissement admissible pour quatre hypothèses de calcul (deux taux d'actualisation et deux dérivées de prix de la source conventionnelle). Les dates d'entrée en compétitivité correspondent aux intersections de la courbe de l'investissement réel et des courbes d'investissement admissible.

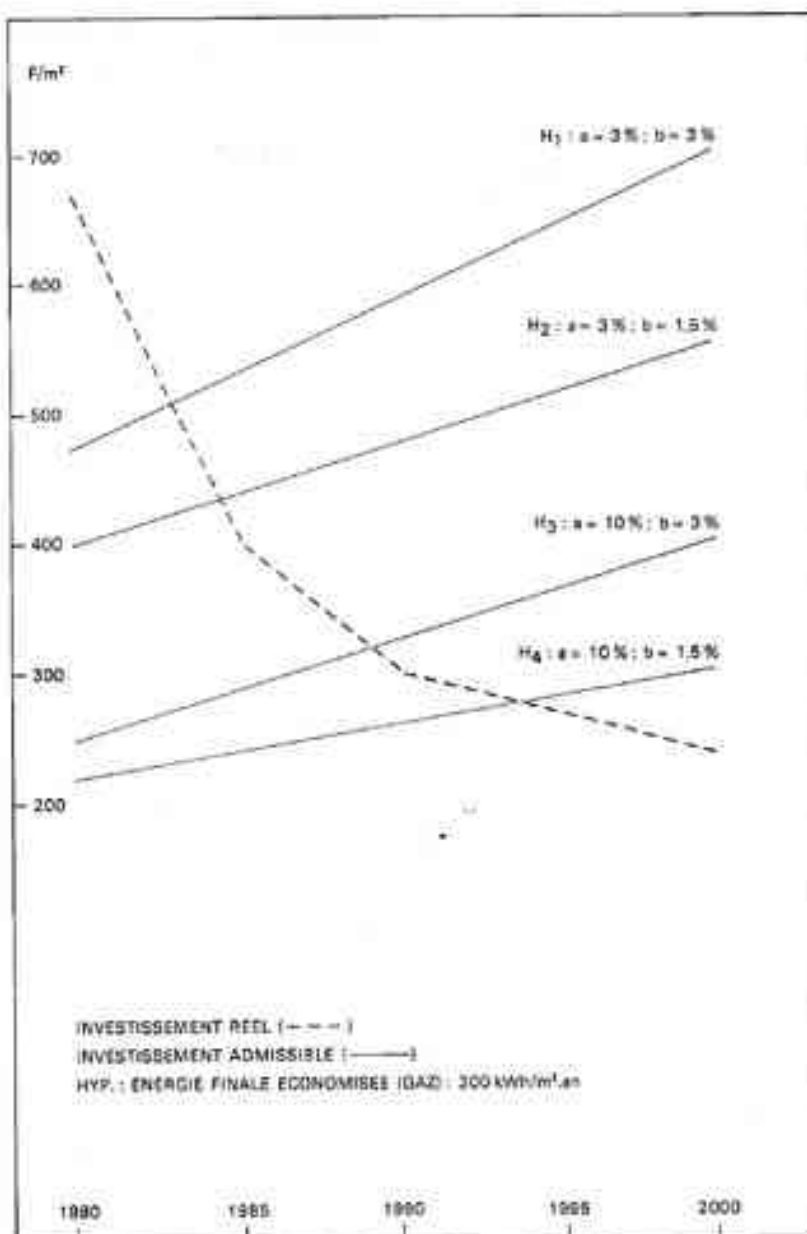
Le graphique ci-contre fait apparaître l'extrême sensibilité des évaluations micro-économiques au choix du taux d'actualisation. Selon que l'on adopte un taux de 10 %, qui est celui préconisé par le plan, ou un taux de 3 %, qui représenterait le coût du capital pour un décideur individuel (taux d'intérêt réel pour un taux nominal de 12 % dans un contexte d'inflation à 9 %) l'entrée en compétitivité des technologies solaires est retardée ou avancée de dix ans. Nous nous contenterons de noter que de nombreux économistes estiment le taux d'actualisation actuel trop élevé et que certains le qualifient de « taux d'imprévoyance nationale ».

Le potentiel maximum de pénétration à horizon 2000

Les solutions actuellement maîtrisées trouveront leur principal domaine d'application dans la construction neuve. Le rythme de développement de l'habitat solaire sera donc étroitement subordonné au rythme de la construction.

Si l'on prend en compte les conséquences à long terme des facteurs démographiques ainsi que les nouvelles orientations de la politique du logement qui favoriseraient les opérations de réhabilitation (sanitaires et thermiques) face aux opérations de destruction-reconstruction, on peut évaluer le nombre des logements à construire entre 1980 et 2000 à : 350 000 logements

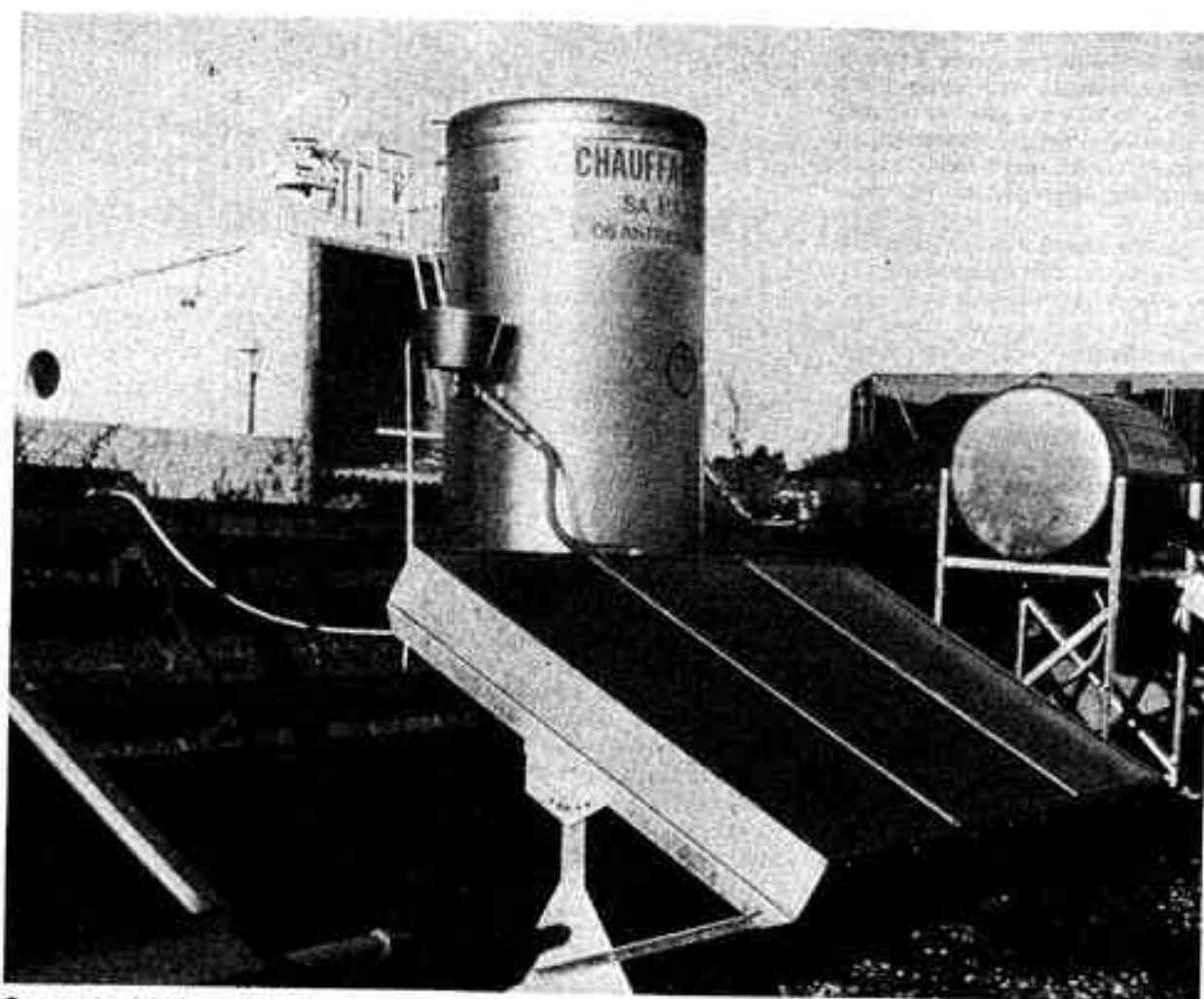
(1) amélioration du savoir-faire technologique pour la fabrication et la mise en œuvre des systèmes de captations.



HYPOTHÈSE DE CALCUL	DATE DE PERCÉE	SYSTÈME COMPTABLE		
		ÉNERGIE UTILE (Mtep)	ÉNERGIE FINALE I* (Mtep)	ÉNERGIE FINALE II** (Mtep)
H 1	1983	6	7,8	10,5
H 2	1985	5	6	8,5
H 3	1990	2	2,5	3,5
H 4	1995	1	1,2	1,7

* Électricité économisée : 30 % du total, comptabilisée en équivalence à la consommation (statistiques mondiales : 1 T wh = 0,08 Mtep)

** Électricité économisée : 30 % du total, comptabilisée en équivalence à la production (statistiques françaises : 1 T wh = 0,22 Mtep)



Capteur plan à Méjannes (Gard).

par an, en moyenne. Les locaux de secteur tertiaire représenteraient sur cette période 100 000 équivalents logements de 100 m² par an.

On peut alors évaluer la borne supérieure des apports solaires au bilan énergétique 2000 en supposant qu'à partir de la date de percée, la quasi-totalité des bâtiments construits seront des bâtiments solaires.

La très forte contrainte introduite par la lenteur des transformations du parc de logements montre :

- la nécessité du passage rapide au stade du développement massif, si l'on veut obtenir que l'énergie solaire ne figure pas pour quantité négligeable dans le bilan énergétique 2000 ;
- la nécessité de développer conjointement de nouvelles solutions technologiques permettant un taux de couverture plus élevé des besoins pour chaque réalisation (passage du taux actuel de 30 à 50 % à un taux proche de 100 %) ou la « solarisation » de l'habitat existant. De ce point de vue, les solutions s'appuyant sur le concept du *mockage* à long terme, de la « *chaufferie solaire* »

ou de « l'héliogéothermie » devraient être l'objet d'un important effort de recherche et développement.

L'habitat solaire et la stratégie des entreprises

Le développement des technologies solaires par des entreprises industrielles ou du secteur énergétique est sans doute un phénomène trop récent pour que l'on puisse formuler des conclusions définitives. Il est cependant possible d'identifier plusieurs types d'acteurs et de stratégies.

• Les entreprises industrielles

Les petites entreprises spécialisées ont été les premières à développer des composants ou des systèmes de captation. En raison même de leur taille, elles sont le plus souvent « condamnées à réussir » puisqu'un échec de leur activité solaire aurait de graves répercussions sur l'ensemble de l'entreprise. Elles peuvent être également condamnées en cas de réussite, si leur acquis technologique devient intéressant pour un concurrent plus important ou

si elles sont dans l'incapacité de financer leur propre développement.

Les entreprises de taille moyenne (notamment les fabricants de matériel de chauffage) se sont lancées plus récemment dans ce domaine. Leur activité semble s'être limitée à la mise au point de composants compatibles avec l'utilisation de l'énergie solaire (ballons d'eau chaude).

Les groupes industriels diversifiés ont aujourd'hui à leur tour des activités « habitat solaire ». Il semble que l'on puisse distinguer deux types de stratégies : la première s'appuie sur la production de composants industriels standardisés (capteurs plan) pour lesquels les effets de production en série peuvent être importants ; la seconde s'attache à la conception et à la mise en œuvre de systèmes intégrés de captation permettant de valoriser plusieurs produits ou compétences du groupe.

• Les entreprises énergétiques

Le problème du développement de l'habitat solaire se pose en des termes radicalement différents aux entreprises pétrolières et aux entreprises nationales.



Maisons solaires d'Odello - Procédé Trombe-Michel.

du gaz et de l'électricité.

D'une part les groupes pétroliers se sont depuis longtemps orientés vers des activités de type industriel (pétrochimie, chimie, pharmacie, matériaux pour le bâtiment et matériel de chauffage) alors qu'EDF et GDF se sont limitées à la mission qui leur avait été attribuée, celle de produire et de vendre un vecteur énergétique spécifique. D'autre part, les produits pétroliers (fuel ou GPL) peuvent être stockés au niveau de l'utilisateur ; l'association « solaire - produits pétroliers » ne pose donc aucun problème spécifique de distribution. L'association de l'énergie solaire avec l'électricité ou le gaz naturel, vecteurs distribués en réseau, pourrait au contraire modifier la courbe de demande, dans le temps, de chaque installation : la puissance maximum appelée sera identique à celle d'un bâtiment chauffé à l'électricité ou au gaz mais les consommations globales seraient moindres.

Le développement de l'énergie solaire peut donc apparaître aux groupes pétroliers comme un point de conver-

gence entre leurs préoccupations énergétiques et industrielles. Pour EDF et GDF au contraire, le développement des technologies actuelles pourrait entraîner des perturbations dans les conditions d'exercice de leur activité principale, d'autant plus graves que ce développement serait massif.

La recherche de l'adaptation des solutions technologiques aux besoins des utilisateurs et aux contraintes de gestion du système énergétique suppose donc que les pouvoirs publics définissent clairement les grandes orientations de la politique de développement de l'habitat solaire.

L'insertion de l'habitat solaire dans le processus de production du bâtiment

L'existence de composants industriels n'est pas une condition suffisante et n'est pas toujours une condition nécessaire de la mise en œuvre de l'énergie solaire dans le bâtiment.

Les solutions solaires, qu'elles soient à dominante technologique ou architecturale, doivent en effet répondre à

une demande et s'insérer dans un système de production et de régulation (réglementations, normes...)

• Les éléments de la demande

L'habitat solaire représente pour les utilisateurs une autonomie et une sécurité accrue face aux futures crises de l'énergie (crise des prix ou même pénurie physique).

Pour les réalisations existantes, les motivations économiques à court terme n'ont vraisemblablement joué aucun rôle. Ces motivations devraient être plus importantes dans le futur. L'amélioration du coût global du logement par l'utilisation de l'énergie solaire ne sera cependant pas prise en compte de la même manière par les différents types de maîtres d'ouvrage (particulier, promoteur public ou privé, dans le secteur locatif ou celui de l'accession à la propriété).

Trois types de facteurs pourraient freiner le développement d'une large demande pour l'habitat solaire :

- à court terme, les risques de défaillance associés à toute solution nouvelle ;

- la nécessaire modification des conditions de confort qui est liée à la mise en œuvre des solutions « passives » ou architecturales, bien que cette modification n'entraîne en aucun cas une moindre satisfaction des besoins réels ;
- les contraintes de financement de l'investissement.

• L'insertion dans le système de production

On oppose souvent : systèmes passifs et systèmes actifs (2) ; solutions architecturales et solutions technologiques ; construction traditionnelle et construction industrialisée ; matériaux traditionnels et composants industriels.

Les réalisations existantes et les projets en cours, montrent au contraire que les combinaisons possibles entre ces différents éléments sont multiples. On rencontre en effet des systèmes actifs greffés sur des constructions traditionnelles ou des « bâtiments capteurs » avec des composants industriels. Cependant la recherche de l'intégration et de l'adaptation au climat pourrait :

- minorer les avantages relatifs de la construction industrialisée (standardisation, répétitivité)
- majorer ceux de la construction traditionnelle (maçonnerie lourde, inertie thermique).

Les obstacles au développement de l'habitat solaire au sein du secteur de la construction pourraient découler de la nécessité d'une nouvelle organisation de la conception et des travaux sur le chantier, ainsi que des besoins en nouvelles qualifications (par ex. corps de métiers polyvalents : plombiers-tecticiens).

• L'insertion dans le système de régulation

L'action de régulation des pouvoirs publics est aujourd'hui très importante dans le secteur du bâtiment. Le développement de l'habitat solaire est-il compatible avec le cadre réglementaire existant ?

Qualité architecturale et permis de construire : la pratique actuelle est marquée par un « néo régionalisme » se satisfaisant du placage d'éléments extérieurs diversifiés sur une structure standardisée. L'habitat solaire, s'il résulte d'une démarche d'adaptation au climat, pourrait au contraire offrir des garanties d'intégration au site. Dans la plupart des cas cependant, ses caractéristiques ne correspondent pas aux nor-

mes en vigueur qui devraient être révisées et enrichies.

Le droit au soleil et l'implantation : la prise en compte des flux solaires pourrait augmenter les contraintes d'implantation au niveau d'un bâtiment, d'un lotissement, d'un plan d'urbanisme. Le problème du droit au soleil n'est aujourd'hui que très rarement abordé. Il pourrait l'être, en France, dans le cadre réglementaire des plans d'occupation des sols (POS) (intégration dans les POS d'un zonage tridimensionnel solaire, par exemple).

Normalisation, garantie, contrôle des performances : actuellement, les normes portent exclusivement sur les composants industriels de type capteur-plan ou chauffe-eau solaire. L'extension du système de normes ou de « règles de l'art » (« document technique unifié » du centre scientifique et technique du bâtiment) aux autres solutions solaires apparaît nécessaire, afin d'améliorer l'information et la protection des utilisateurs et maîtres d'œuvre. Mais surtout, l'instauration de procédures d'évaluation et de contrôle des performances, applicables à toutes les solutions, serait indispensable dans l'hypothèse d'une politique d'aide au financement des investissements solaires. Le danger à éviter est, en effet, celui de l'exclusion de certaines solutions adaptées ou de certaines catégories d'acteurs.

Les politiques de l'habitat solaire

Deux stratégies peuvent aujourd'hui être envisagées pour le développement de l'habitat solaire en France.

Celle du développement progressif et limité, s'appuyant principalement sur le lancement de quelques nouveaux produits pour les créneaux d'utilisation les plus favorables et les catégories d'utilisateurs les plus motivées.

Celle du développement massif, ayant pour principal objectif une contribution non négligeable de l'énergie solaire dans le bâtiment à l'horizon 2000 et plus. Cette option concernerait un plus grand nombre de catégories de bâtiments et d'utilisateurs, elle impliquerait sans doute un effort plus soutenu de l'Etat en matière de recherche et développement et d'aide au financement.

Ces deux stratégies ne sont pas totalement exclusives, elles peuvent être complémentaires dans le temps. Cependant les inerties que nous avons mises en valeur posent de manière aiguë le problème du rythme de pénétration de l'énergie solaire entre 1980 et 2000.

Différents facteurs pourraient motiver la recherche d'un rythme de pénétration élevé et d'un passage rapide au stade du développement massif :

- l'impératif énergétique national lié aux incertitudes qui pèsent sur l'approvisionnement futur, notamment pour les sources fossiles importées (incertitudes sur les prix et éventuellement sur la disponibilité physique de ces sources) ;

- l'impératif industriel : de nombreux pays développent des programmes solaires importants (USA, RFA...) ; la concurrence extérieure pourrait entraîner la nécessité de hâter la prise en charge des innovations solaires par le secteur de l'industrie et du bâtiment et des travaux publics sous peine de « disqualification technologique » ;

- l'impératif social : dans la mesure où l'énergie solaire apporte à chaque utilisateur un élément de sécurité, le développement des technologies solaires devrait concerner l'ensemble de la population, et non les catégories les plus favorisées par leur niveau de revenu ou d'éducation.

Une politique de développement de l'offre de l'habitation solaire devrait comporter deux aspects majeurs :

- une action d'identification des solutions technologiques et des produits industriels réellement adaptés aux besoins sociaux (politique de recherche et développement et politique industrielle) ;

- une action visant à la prise en charge des innovations solaires par l'ensemble des entreprises du secteur de la construction (formation professionnelle, système réglementaire).

Du point de vue de la stimulation de la demande, le problème du financement apparaît comme un élément central, car il pourrait être une cause majeure de blocage. Au contraire, la mise en œuvre d'un circuit de financement permanent, spécifique aux investissements solaires et de conservation d'énergie, permettrait aux utilisateurs et maîtres d'œuvre de raisonner en termes de coût global du logement ; les pouvoirs publics disposeraient par là-même d'un outil d'incitation souple et efficace.

Cependant, le développement de la conception solaire de l'habitat, l'émergence des principes d'un urbanisme solaire, supposent une évolution des modes de vie et des pratiques sociales. L'évaluation de la profondeur des changements nécessaires et de leur acceptabilité sociale pourrait être l'apport majeur des juristes, des urbanistes et des sociologues, à la définition d'une politique globale de l'habitat solaire.

(2) une solution active se caractérise par l'adjonction pour un bâtiment d'éléments séparables de captation, de stockage, de distribution et de régulation ; dans les solutions passives, ces fonctions sont assurées par le bâtiment lui-même.

Une autre vue du soleil : la mission internationale solaire polaire

La mission internationale solaire polaire est une mission conjointe de l'Agence spatiale européenne (ASE) et de la NASA. Son objectif principal est l'exploration de l'héliosphère et l'observation du soleil à toutes les latitudes héliographiques.

Michel PETIT

Cette mission repose sur deux sondes spatiales qui doivent être lancées en février 1983. Les deux engins suivront des trajectoires interplanétaires semblables pour aller de la Terre à la planète Jupiter. Le champ gravitationnel de cette dernière sera alors utilisé pour dévier les sondes le long de trajectoires elliptiques dont le plan est pratiquement perpendiculaire au plan de l'écliptique. L'une des sondes, après un long voyage au-dessus du plan de l'écliptique, finira par passer au-dessus du pôle nord du soleil, tandis que l'autre, après un trajet semblable au-dessous du plan de l'écliptique, survolera le pôle sud du soleil. Ensuite les sondes traverseront le plan de l'écliptique pour aller explorer l'hémisphère solaire opposé. L'arrivée à Jupiter est prévue pour mai 1984, le premier passage au-dessus des pôles solaires, à une distance de deux unités astronomiques (deux fois la distance terre-soleil) pour octobre, novembre 1986 ; le second survol des pôles aura lieu en juillet 1987, la mission s'achevant le 30 septembre 1987, en principe.

Cette mission exploratoire fera ainsi les premières mesures *in situ* du milieu interplanétaire en dehors du disque mince proche du plan de l'écliptique, à l'intérieur duquel se trouvent toutes les planètes et auquel ont été confinées toutes les sondes spatiales antérieures. Pour la première fois, on pourra ainsi observer le soleil le long d'une ligne de visée orthogonale aux directions habituelles.

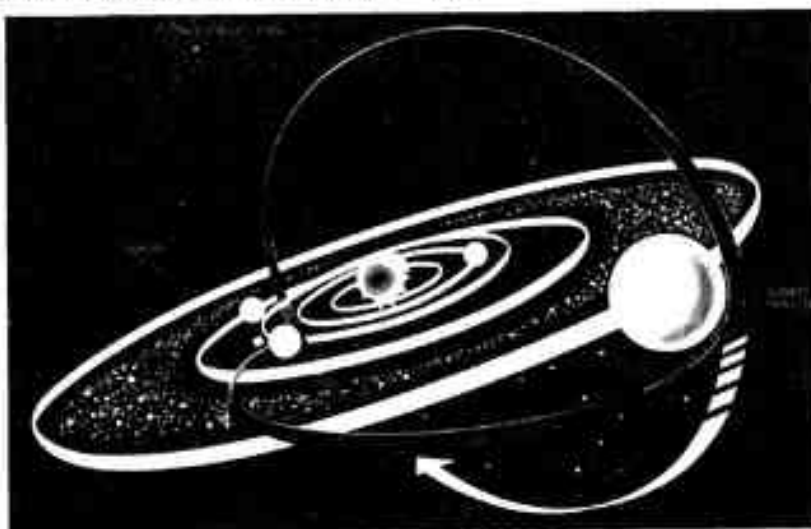
Les objectifs principaux de la mission sont l'étude, en fonction de la lati-

□ Michel Petit, ingénieur en chef des télécommunications est à la direction scientifique des sciences de la terre, de l'océan et de l'atmosphère.

tude solaire, des propriétés de la couronne et du vent solaire, du champ magnétique héliosphérique, des particules d'origine solaire et des rayons cosmiques galactiques (qui sont modulés de façon mal connue par le champ magnétique interplanétaire) et enfin du gaz neutre et des poussières interstellaires ou interplanétaires. Plus de deux cents chercheurs appartenant à soixante-cinq centres de recherche disséminés dans treize pays participeront à ce programme. Seize expériences constituent la charge utile des deux sondes. Chacune d'entre elles emporte des instruments qui mesureront les paramètres caractéristiques du vent solaire, le champ magnétique, les particules dans une large gamme d'énergie, les sursauts X solaires et les émissions radioélectriques. D'autres instruments, comme un détecteur d'ondes de plasma, un détec-

teur de poussière cosmique, un détecteur de gaz neutre et un dispositif d'étude de la lumière zodiacale ne seront embarqués que sur l'une des deux sondes. Des instruments pointés vers le soleil, un coronographe en lumière blanche et un télescope X UV, seront placés sur une plate-forme contrarotative portée par l'un des deux engins et permettront d'observer le soleil sous un angle nouveau, parallèlement à la ligne des pôles.

La contribution de l'Europe à ce programme consiste à fournir l'une des deux sondes et environ la moitié des expériences. La NASA fournit la deuxième sonde, le reste des expériences, les générateurs d'énergie pour les deux sondes. Elle est de plus responsable du lancement de l'ensemble et de l'acquisition des données de télémé-



Mission internationale solaire polaire - Schéma de la trajectoire de la sonde par rapport au plan de l'écliptique : on a représenté les orbites de Mercure, Vénus, la Terre, Mars et Jupiter ainsi que la ceinture d'astéroïdes.

Où trouver des informations sur le soleil et ses applications :

Le Centre de documentation sciences humaines

Près de 2 000 références bibliographiques sont actuellement disponibles sur des sujets qui touchent au soleil, d'un point de vue économique, historique, littéraire, etc., avec leurs analyses et mots clés :

- Énergie solaire : problèmes économiques, juridiques, sociologiques, etc. ; implantations et aménagements.

Les articles traitant de ces questions sont régulièrement signalés dans la base « économie de l'énergie », celle de « géographie » du laboratoire Intergeo et celle de « science administrative ».

- Ensoleillement, insolation, rayonnement solaire et radiation (base « géographie ») ;

- Histoire de l'astronomie : l'étude du soleil (base « histoire des sciences et des techniques ») ;

- Cultes et mythes du soleil (bases « ethnologie » ; « histoire et sciences des religions » ; « art et archéologie » ; « préhistoire ») ;

- Représentation du soleil dans les œuvres d'art (base « Répertoire d'art et d'archéologie ») ;

- Le soleil dans la littérature (base « histoire et sciences de la littérature »).

Des services diversifiés

Le CDSH et le laboratoire Intergeo sont en mesure de fournir des bibliographies à la demande sur ces sujets. Elles peuvent être rétrospectives et porter sur plusieurs années à partir de 1972 (1977 pour Intergeo). Elles peuvent également être périodiques : elles signalent alors les articles au fur et à mesure de leur dépouillement (mise à jour toutes les six semaines).

Qu'on veuille faire un bilan sur ce qui a été écrit ou qu'on veuille se tenir informé de ce qui se fait, les bibliogra-

phies à la demande vous permettent au moins de défricher le sujet, en général de le creuser, et parfois de l'épuiser.

Par ailleurs, le service recherches en cours du CDSH peut fournir des infor-

mations détaillées sur les unités de recherche liées ou non au CNRS, travaillant dans le domaine des sciences humaines et sociales, et sur les programmes et contrats de recherches.

Francis

Depuis 1970, date de sa création, le CDSH produit des bibliographies analytiques permettant la constitution de bases de données regroupées sous le nom de FRANCIS (fichier des recherches bibliographiques automatisées sur les nouveautés, la communication et l'information en sciences sociales et humaines).

Près de 500 000 références sont actuellement en machine, qui concernent des disciplines aussi variées que la philosophie ; les sciences de l'éducation ; la sociologie ; l'histoire des sciences et des techniques ; l'histoire et les sciences de la littérature ; les sciences du langage ; la préhistoire ; l'art et l'archéologie (Proche-Orient, Asie, Amérique) ; l'histoire et les sciences des religions ; la science administrative ; l'ethnologie ; le répertoire d'art et d'archéologie (de l'époque paléochrétienne à 1939) ; la géographie ; l'économie de l'énergie ; l'emploi-formation ; l'informatique et sciences juridiques ; les sciences humaines de la santé (RESHUS).

L'accroissement annuel de FRANCIS est d'environ 75 000 références, provenant du dépouillement de plus de 5 000 périodiques, d'ouvrages, de thèses, de rapports, etc.

Le fichier FRANCIS permet la publication des bulletins signalétiques et autres périodiques bibliographiques ; l'édition de bibliographies à la demande sur des sujets personnalisés.

CDSH - Centre de documentation sciences humaines - 54, boulevard Raspail, 75270 Paris Cedex 06 - tél. : 344.38.49.

INTERGEO - BGI - 191, rue Saint Jacques, 75005 Paris - tél. : 633.74.31

Pascal

Dans le secteur de l'énergie solaire où l'innovation a encore plus d'importance qu'ailleurs, « être bien informé » est une nécessité vitale pour les chercheurs, les ingénieurs et les industriels.

Pour répondre à ce besoin, le CNRS - Informascience met à la disposition des utilisateurs les ressources d'un des plus vastes fichiers documentaires mondiaux : la base de données automatisées PASCAL.

PASCAL compte plus de 2 500 000 signalements de documents touchant tous les domaines des sciences et des techniques (sciences exactes, sciences biomédicales, sciences de la terre, techniques). Constantement mis à jour, PASCAL s'accroît chaque mois de 50 000 signalements nouveaux provenant des sources les plus variées (périodiques, congrès, thèses, rapports...).

Diverses formules d'accès permettent de répondre aux besoins documentaires de la manière la plus adaptée :

- pour une information spécialisée, les bulletins signalétiques ou bibliographies mensuelles par discipline (par exemple : « combustibles, énergie ») ;

- pour une information personnalisée, les « profils » ou bibliographies mensuelles sur des sujets très précisément définis (par exemple : « cellules solaires ») ;

- pour une information rétrospective sur un sujet déterminé, recherche et sélection de références, soit sur demande à Informascience, soit en mode « conversationnel » grâce à Pascaline accessible en ligne à partir de tous les postes téléphoniques à l'aide d'un très modeste terminal.

Informascience - 26, rue Boyer, 75971 Paris Cedex 20 - tél. : 797.35.50 poste 351.

Comme la mer, le soleil et ses applications, voire ses dangers, touchent à presque tous les secteurs des sciences et des techniques. C'est pourquoi un système d'informations multidisciplinaires est particulièrement bien adapté à renseigner, car il collecte tous les documents sur ces sujets dans une très large variété de sources.

Laissons ici de côté tout ce qui traite du soleil en tant qu'étoile : il y a 1 000 signalements par an sur le soleil dans la partie astronomie et géophysique du fichier PASCAL, et études de plus près l'énergie solaire et quelques effets biologiques.

PASCAL fournit un « profil », c'est-à-dire une documentation sélectionnée mensuelle en énergie solaire. On recueille chaque année environ 2 000 documents sur ce sujet. Leur nombre s'accroît d'ailleurs rapidement (il n'y en avait que 500 en 1975). En 1978, sur ces 2 000 documents, un peu moins d'un millier concernaient des aspects physiques (rayonnement solaire et surtout physique des capteurs et des cellules solaires), environ 600 traitaient de problèmes d'énergie (cellules solaires, chauffage, centrales solaires, etc) et 300 traitaient d'applications diverses (bâtiment, agriculture, chimie, technologie, etc).

Quels sont les principaux sujets sur lesquels on écrit ? Sur les 5 200 documents signalés par PASCAL depuis 1973, 1 367 traitent des cellules solaires et des convertisseurs photovoltaïques, soit plus du quart ; 890 parlent de collecteurs et capteurs (17 %) ; 859 documents concernent les applications au chauffage et au conditionnement d'air (16 %) et 290 (5,5 %) ont trait aux centrales solaires. On trouve bien entendu aussi de nombreuses études, évaluations et synthèses ; il y a des informations sur le stockage de la chaleur solaire (187 signalements), sur les fours solaires (154 signalements). Enfin l'analyse du rayonnement solaire et sa répartition tient évidemment une place notable (de l'ordre de 5 % du nombre de signalements).

On notera aussi que la proportion de brevets commence à devenir importante dans certains domaines (pour les

capteurs solaires en avril 1979, un document signalé sur trois était un brevet) alors qu'elle reste encore faible pour les cellules solaires (10 %), et même pour les applications au chauffage domestique (10 à 15 %). Enfin il semble que le monde anglo-saxon fait un effort proportionnellement plus important qu'ailleurs dans le secteur des cellules solaires (deux documents sur trois), alors que pour les capteurs, on a recueilli en avril 1/4 de documents provenant de France, 1/4 d'Allemagne, 1/4 des Etats-Unis et 1/4 du reste du monde (principalement d'Europe).

Bien entendu, il faut être très prudent dans les statistiques tirées d'un seul mois et ne pas exagérer l'importance du nombre de documents qui ne rend pas compte à lui seul de la valeur des recherches.

La place de l'énergie solaire dans l'ensemble de la recherche est encore modeste, puisque l'évaluant toujours en nombre de documents, elle se situe au-dessous de 1 %, mais cette proportion atteint déjà 2 % du secteur des documents techniques, et elle croît rapidement.

Cependant, l'intérêt principal du fichier PASCAL n'est pas de faire des statistiques, mais de faire le point sur tel ou tel sujet ponctuel, par exemple :

- photolyse de l'eau par le rayonnement solaire,
- accumulation de l'énergie solaire en opérant des transformations chimiques sur certains composés,
- stockage de longue durée de la chaleur solaire,
- application aux serres en agriculture,
- quelques projets spéciaux en zone aride,
- etc...

Il suffit pour cela d'interroger le système en ligne appelé PASCALINE à l'aide d'un petit terminal qui a l'aspect et le prix d'un simple poste de télévision accouplé à une machine à écrire. Cet appareil se branche sur n'importe quel combiné téléphonique.

On peut aussi pour se tenir au courant de tout ce qui paraît sur un sujet plus restreint, demander à s'abonner à des « profils » plus spécialisés comprenant seulement quelques docu-

ments par mois convenablement sélectionnés, par exemple sur la production d'eau chaude par énergie solaire, ou encore sur une combinaison de sujets faisant intervenir d'autres aspects scientifiques ou techniques que ceux évoqués ci-dessus.

Mais le soleil n'est pas seulement un fournisseur d'énergie, il a un rôle biologique fondamental et irremplaçable. En interrogeant PASCALINE, nous avons très rapidement sélectionné quelques exemples :

Tout d'abord sur certains effets nocifs : la phototoxicité, ou la photoallergie. On s'aperçoit que le fichier contient près de 600 documents sur les dermatoses actiniques et 1 500 sur la photosensibilité. Bien plus, certains traitements et certains produits chimiques augmentent beaucoup la susceptibilité vis-à-vis du rayonnement solaire. On trouve 19 documents sur les accidents médicamenteux provoqués par une conjonction du traitement et une exposition au soleil.

Par contre, on sait que la lumière solaire joue un rôle important dans la synthèse de la vitamine D. Ceci est connu depuis longtemps mais on travaille encore sur cette question puisque PASCAL contient plusieurs dizaines de documents sur ce sujet.

En biologie, beaucoup d'insectes voient leur activité dépendre pour une large part de l'insolation. La recherche montre que 124 documents existent sur le photopériodisme des papillons.

Mais c'est évidemment la fonction chlorophyllienne qui est la base de beaucoup des synthèses biologiques végétales et sur laquelle il a été le plus publié. Il y a 4 166 documents sur la photosynthèse. Il se trouve que beaucoup d'études fondamentales sur ce mécanisme utilisent une algue appelée *Chlorella*. Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux recherches de ce type, le système permet de sélectionner 51 documents sur ce point particulier. Nous trouvons même un document qui met en évidence le rôle de la lumière solaire dans le processus d'élimination du mercure préalablement contenu dans cette algue.

