

Nous avons rapidement examiné dans le précédent dossier la question des énergies dites classiques : énergies tirées du charbon, du pétrole et de l'hydroélectricité. Restent les autres sources, dont l'exploitation commence ou reste au niveau de la recherche. Il s'agit principalement du nucléaire et des énergies dites «nouvelles».

A ce titre, on entend généralement l'énergie solaire, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la houle et des marées.

Le terme énergie nouvelle est particulièrement mal adapté, puisqu'il s'applique à des sources d'énergies pour la plupart déjà utilisées historiquement (chaleur de la terre, énergie des vents), ou qui sont à l'origine des énergies dites classiques. Par exemple, charbon et pétrole ne sont jamais que de l'énergie solaire accumulée par des réactions biochimiques. Vents, houles, et chutes d'eau ne sont jamais que l'énergie thermique du soleil transformée en mouvement. Une bien meilleure classification a pour fondement le caractère renouvelable ou non des sources d'énergie. Il est évident que toute source d'énergie dont les stocks sur terre est amenée à disparaître un jour ou l'autre à moins que son utilisation ne soit accompagnée d'un processus la reconstituant dans le même temps. Il est difficile d'envisager de fabriquer autant de pétrole synthétique qu'il est actuellement consommé de pétrole naturel (la formation de celui-ci, issue de la décomposition de micro-organismes, a pris plusieurs millions d'années). Il est quasiment impossible de fabriquer un noyau d'uranium 235. Par contre, l'énergie solaire issue du rayonnement solaire actuel, la chaleur géothermique ou le mouvement de l'air et des mers

sont pratiquement inépuisables, dans la mesure où elles sont constamment renouvelées par une source extérieure à la Terre (ou stable pour quelques milliards d'années en ce qui concerne la géothermie). En théorie, l'énergie thermonucléaire relève aussi de la catégorie «inépuisable», puisque sa matière première est un composant de l'eau.

Une fois examinés le nucléaire et les énergies renouvelables, il restera à voir comment se pose la question à laquelle se ramènent toutes les autres : comment assurer la transition entre énergies non-renouvelables, et énergies renouvelables.



# QUELLE ENERGIE ?

# POUR QUOI FAIRE ?

## OU EN EST LE PARI NUCLÉAIRE ?

En 1973, l'énergie nucléaire ne fournissait que 3 % de la production électrique mondiale. Il est prévu qu'en France, 200 réacteurs de plus de 1 000 MWe fonctionnent. En 1973, seulement 3 000 MWe nucléaires étaient fournis. Le tournant nucléaire s'est produit en France et dans d'autres pays industrialisés en 1974. Au «tout pétrole», on substituait le «tout nucléaire». Déjà, en 1972, la première filière qui avait donné lieu à la construction de 9 réacteurs était abandonnée. Il s'agissait des réacteurs à neutrons lents «graphite-gaz», fonctionnant à l'uranium naturel. L'EDF, et le trust Empain Schneider préféraient la filière américaine «eau légère uranium enrichi», qui permet la construction de plus grosses unités. La firme américaine Westinghouse a accepté de céder la licence, moyennant de confortables royalties et un droit de regard technologique dans le nucléaire français, par l'intermédiaire des spécifications techniques. La France, qui a l'intention de se placer le mieux possible sur ce fantastique «marché du siècle» que représente l'exportation du matériel nucléaire aux pays du Tiers-Monde dont la consommation d'énergie croît rapidement, s'est lancée également dans le développement de la filière à neutrons rapides, seule filière d'avenir (en théorie), puisqu'elle permet d'exploiter plus rationnellement les réserves en uranium.

Actuellement, dans notre pays, un gigantesque programme nucléaire est donc en route. Proportionnellement à la quantité d'énergie produite par chaque pays industrialisé, il est de loin le plus ambitieux. Il consiste aujourd'hui à construire des centrales de type Westinghouse (PWR), regroupant en général quatre «tranches» de 900 à 1 200 MWe, sur un site proche d'une abondante source d'eau froide. Pour parvenir aux 200 tranches de l'an 2000, EDF prospecte dans tout le pays, et devant l'opposition croissante de la population, n'hésite pas à violer la légalité. Les sites déjà choisis sont gardés militairement et les manifestations anti-nucléaires violemment réprimées. En particulier à propos de ce qui n'est encore qu'un aspect marginal du programme, le réacteur à neutrons rapides Superphénix, appelé à devenir la filière dominante dès 1995.

Les raisons avancées par l'EDF et les experts du plan pour justifier un tel programme sont apparemment simples et de bon sens : ces gens expliquent que la crise pétrolière a fait prendre conscience à la France de sa dépendance énergétique vis-à-vis de l'étranger. D'autre part, on sait que les ressources en pétrole et en charbon sont limitées (c'est vrai à relativement court terme pour le pétrole, ce

l'est beaucoup moins pour le charbon). Or, il faut s'attendre à un triplement de la demande d'énergie, d'électricité en particulier, d'ici l'an 2000 ; cette croissance étant, paraît-il, indispensable au développement harmonieux de notre société.

Conclusion : si l'on veut éviter les coupures d'électricité et la dépendance énergétique vis-à-vis de l'OPEP, il n'est d'autre solution que de recourir massivement au nucléaire puisqu'à la différence des Anglais, nous «n'avons pas de pétrole». Les problèmes de sécurité posés sont réels mais beaucoup amplifiés par le facteur affectif que porte en lui le nucléaire. Etant d'ordre technique, ils se résolvent progressivement par les avancées technologiques. Telle est, en gros, l'argumentation des organismes chargés par les gouvernements qui se sont succédés depuis celui de Messmer en 74, de mener à bien le programme électronucléaire, et donc de le justifier devant une hostilité populaire croissante.

Laissons de côté pour le moment le fond de l'argumentation (le choix nucléaire dicté par les circonstances, sous peine de remettre en cause le progrès), pour examiner quelques aspects de la mise en route du plan.

Sciences

## LE BLOCAGE DU RETRAITEMENT

On peut suivre toute l'industrie nucléaire à travers les transformations successives de son «combustible» préféré, l'uranium. Celui-ci, après avoir été extrait de mines (situées en majeure partie hors du territoire national, ce qui restreint l'indépendance énergétique liée au nucléaire) est traité chimiquement, enrichi (principalement aux USA, à l'heure actuelle), puis utilisé dans un réacteur d'où on l'extrait après usage. Il contient alors des «produits de fission» plus ou moins radio-actifs, et du plutonium. A ce combustible usé, ajoutons les pièces usées et contaminées par des produits radioactifs que produit un réacteur. Cet ensemble forme les «déchets». Ils sont envoyés, par camions ou par trains après avoir été isolés dans des cuves d'acier entourées de béton (des «châteaux») à l'usine de la

Hague, où l'on sépare chimiquement leurs différentes composantes de façon à récupérer le plutonium, isoler les produits très actifs et les conditionner. Il s'agit d'un travail très délicat, effectué dans des conditions qui ont provoqué une grève de trois mois chez les ouvriers de l'usine, et dont tous les aspects ne sont pas maîtrisés, comme l'a souligné un récent Comité Hygiène et Sécurité élargi. Et il reste les déchets à longue période (dont la radioactivité met plusieurs milliers, voire millions d'années à diminuer notablement). On a commencé par les immerger «discrètement» dans des fosses océaniques. Jusqu'au jour où une photo prise en batyscaphe montra que les containers «prévus pour résister à toute épreuve» s'étaient fendus. Aux USA, on a commencé à stocker les déchets (toutes les

usines de retraitement ayant été progressivement fermées). En France, où la place manque, on envisage de les concentrer, puis de les couler dans du verre liquide avant de les stocker dans des couches géologiques profondes et «stables». Seulement, comme l'a reconnu le CEA, rien ne prouve que ces couches demeureront stables et que le verre résistera plusieurs milliers d'années. Le retraitement bute donc actuellement sur un double problème : technique pour qu'il puisse être fait dans des conditions satisfaisantes (sans rejets d'effluents radioactifs dans la Manche, comme c'est le cas actuellement), théorique, en ce qui concerne les déchets à longue période. Cela fait beaucoup, et pourtant la COGEMA (filiale privée du CEA) a passé des accords avec le Japon, l'Allemagne, l'Autriche, la Suède... pour retraiter leurs déchets.

Pour beaucoup de scientifiques, ce double blocage justifierait à lui seul un net ralentissement, si ce n'est un arrêt du programme.

## LES «ENNUIS» DE LA CENTRALE PWR DE FESSENHEIM

La filière PWR, qui doit équiper presque tous les réacteurs français d'ici 1995 est expérimentée pour la première fois à sa taille réelle à Fessenheim (900 MWe par tranche). Le précédent de Chooz, centrale franco-belge de 270 MWe, n'était pas suffisamment puissant pour fournir une bonne base de référence. Or, la première tranche de Fessenheim, actuellement arrêtée, a connu de multiples ennuis. Dans le cœur de la chaufferie, où les boulons de serrage du cœur ont dû être changés plusieurs fois, où certaines parties du circuit primaire se sont révélées défectueuses. Rien de très grave, mais la preuve que la «francisation» de la technique américaine n'est pas sans poser de multiples problèmes. Du coup, le programme a pris un retard (l'EDF a l'hypocrisie de l'attribuer au mouvement anti-nucléaire) qui devient incompatible avec la cadence de construction qui nous était présentée comme le minimum indispensable. Actuellement, par exemple, la centrale est arrêtée parce qu'une partie du circuit de vapeur alimentant le turbo-alternateur (partie «classique» donc) a rouillé prématurément.

Retard, mais aussi inquiétude : l'EDF explique qu'une centrale nucléaire est plus propre que toute autre installation industrielle. Il faut donc reconnaître qu'en **quantité** de rejets, c'est tout à fait vrai. Le fait que ces rejets soient radioactifs ôte de la valeur à la comparaison. Mais le problème est plutôt celui du risque d'accident. Sans dégénérer en explosion nucléaire, celui-ci pourrait provoquer une dissémination catastrophique de produits radio-actifs. Or le constructeur, le CEA et l'EDF ont toujours défendu l'idée qu'un tel accident était «quasi-impossible». Mais avec la même certitude, les mêmes gens affirmaient que la francisation de la filière Westinghouse ne posait pas de problèmes. Alors ?



◀ *Photo de la centrale marée motrice de la Rance (une grande digue) : Sous cette digue qui barre l'estuaire de la Rance (Bretagne Nord), de grosses hélices sont mises en action par le déplacement des eaux dû à la marée. Elle est ici exceptionnelle (près de 15 mètres), et l'on a même envisagé la construction d'une immense digue (projet Caquot) qui barrerait toute la baie du Mont Saint Michel, en passant par les îles Chausey. On disposerait ainsi annuellement de 8 millions de tonnes équivalent pétrole (4,5 % de la demande 74). Cependant ce projet risquerait de causer de profonds dommages à la baie du Mont Saint Michel et perturberait la pêche. Aussi n'est-il pas envisagé dans le projet ALTER. L'usine de la Rance a connu des difficultés de corrosion mal surmontée actuellement. Mais une autre «retombée» technique peut être envisagée : pour fournir de l'énergie avec un faible courant, EDF a dû faire concevoir des turbines à vitesse de rotation lente, dites «groupes-bulbes». Cette technique pourrait permettre de mettre en valeur l'énergie motrice des fleuves et rivières, actuellement exploitées. Pour des besoins locaux, évidemment, car la production serait à chaque fois faible.*

## LES «ERREURS DE CALCUL» DE SUPERPHÉNIX

A la fin 1977, une série de calculs faits au Centre d'Études Nucléaires de Grenoble (CENG), à la suite d'expériences concernant la sécurité de certains organes du futur réacteur Superphénix, montraient qu'une partie du cœur était à reconcevoir. Sans entrer dans les détails, disons qu'on s'est aperçu qu'en cas d'accident mettant hors circuit tous les circuits d'évacuation de la chaleur (accident fort improbable, mais non impossible), la convection naturelle ne suffirait pas à refroidir suffisamment le réacteur. Il pourrait alors se produire la fonte du cœur et la dispersion de plusieurs tonnes de plutonium (cela provoquerait la mort de plusieurs centaines de milliers de personnes). Les calculs effectués avant les expériences de Grenoble indiquaient pourtant un comportement satisfaisant du cœur. Seulement ces calculs étaient fondés sur l'expérience de Phénix, prototype de 300 MWe, alors que Superphénix doit faire 1 200 MWe et ses successeurs 1 800 MWe. L'extrapolation, par quelque méthode mathématique que ce soit, n'était pas justifiée, affirmaient plusieurs physiciens. Ils n'y connaissent rien, répliquaient les dirigeants du CEA. Pourtant, ils avaient raison.

Alors, lorsque le CEA explique que les dimensions de la dalle recouvrant le cœur sont prévues pour résister à tous les accidents imaginables, doit-on le croire ?

A ces trois problèmes posés par le programme électronucléaire, on pourrait ajouter celui du bilan énergétique : le cycle de l'uranium, depuis la mine jusqu'au retraitement (sans oublier le démantèlement des centrales hors d'usage) est très gourmand en énergie. Il s'agit de savoir si le programme «mangera» plus d'énergie qu'il n'en apportera, ou plutôt, car il semble que le bilan sera positif, au bout de combien de temps le programme sera rentable en énergie. Une étude faite à Grenoble par le groupe Diogène indique qu'il ne le sera jamais. Une étude officielle faite aux États-Unis indique (pour une centrale) que la rentabilité est acquise au bout de trois ans. Mais même l'EDF conteste son sérieux. Une étude faite par le SNPEA-CFDT situe entre 1985 et 1990 la première année de rentabilisation énergétique. Or, l'EDF explique que son programme est nécessaire dès les années qui viennent pour satisfaire à la demande. On serait plutôt porté à croire que sa mise en œuvre risque de causer une pénurie d'énergie.

## LE BLOCAGE DU RETRAITEMENT

Ces quatre exemples, blocage du retraitement, difficultés de la filière PWR, modification du cœur de Superphénix, bilan énergétique, ont été choisis pour montrer que du point de vue même des partisans d'un ambitieux programme nucléaire, de graves incohérences se font jour.

Le problème de fond — celui de l'indépendance énergétique et de la satisfaction des besoins en énergie — n'est pas pour autant posé. Nous avons choisi de le faire en présentant brièvement une étude récente : le projet ALTER. Son hypothèse : satisfaire les besoins énergétiques d'une France de 60 millions d'habitants par des sources d'énergie renouvelables.

## LES DIFFÉRENTES FILIÈRES

L'objet d'un réacteur nucléaire est de fournir une quantité importante de chaleur à une température la plus élevée possible. Le réacteur, qui produit la chaleur, constitue la partie proprement nucléaire de la centrale. Le circuit d'eau, vaporisée par la chaleur qui alimente les turbo-alternateurs producteurs d'électricité, constitue la partie «classique» (quoique de dimensions nouvelles).

Deux procédés permettent de mettre en évidence la considérable énergie des liaisons internes aux atomes de matière :

- La fission d'un noyau lourd (Uranium 235, plutonium 239, principalement) libère l'énergie auparavant nécessaire à maintenir la stabilité de ce noyau.

- La fusion de deux atomes légers (deutérium, tritium, tous deux isotopes de l'hydrogène) libère le trop plein d'énergie que contient le noyau issu de la fusion. Celui-ci est en effet très stable et nécessite très peu d'énergie pour se maintenir en l'état.

Seule la fission est aujourd'hui «domestiquée», sous deux principales formes :

- **filière à neutrons lents.** Le succès de la fission nucléaire vient de ce que, déclenchée par l'apport d'un neutron dans le noyau fissile (c'est-à-dire susceptible de se fissurer), elle produit à son tour des neutrons pouvant provoquer d'autres fissions. Très énergétiques (on dit «rapides») les neutrons de fission provoquent peu d'autres fissions. Aussi les ralentit-on avec divers matériaux (modérateurs) de façon à les rentabiliser. D'où le nom de filière à neutrons lents. Deux variantes ont été construites en France :

- **filière uranium naturel graphite-gaz :** élaborée par le CEA, elle utilise de l'uranium naturel (qui ne contient que 0,3 % d'U 235), du graphite comme modérateur, et du gaz carbonique comme vecteur de chaleur. Considérée comme éprouvée, utilisant des matériaux simples, elle a cependant été abandonnée pour sa «faible rentabilité».

- **filière uranium enrichi-eau légère.** Elaborée aux USA, cette filière utilise l'eau naturelle comme modérateur. L'eau n'étant pas très efficace dans ce rôle, l'utilisation d'uranium enrichi en noyaux fissiles (à 5 %) est indispensable. La chaleur est transportée par de l'eau naturelle. La variante adoptée en France par EDF comporte deux circuits d'eau. Dans le premier, dit «primaire», l'eau pénètre sous pression dans le cœur du réacteur et transmet la chaleur acquise à un circuit secondaire, au moyen d'«échangeurs de chaleur». Il s'agit de la filière PWR (Pressed water reactor).

- **filières à neutrons rapides.** Si l'on se passe complètement de modérateur, la faible efficacité des neutrons de fissions (rapides) demande une grande concentration de noyaux fissiles. Aussi utilise-t-on un mélange enrichi à 23 %. Un grand nombre de neutrons s'échappe cependant du cœur. On les emploie à convertir de l'uranium 238 (non fissile) en plutonium 239. C'est là le grand avantage de cette filière, puisqu'elle permet d'utiliser les masses considérables d'uranium laissées pour compte par les filières à neutrons lents. La contrepartie est de taille : de dimensions très réduites, le cœur ne peut être refroidi que par un métal liquide (sodium pour Phénix) difficile à manier et susceptible de violentes réactions chimiques. D'autre part, le bon emploi de la filière nécessite la manipu-

lation de quantités importantes et croissantes de plutonium (dont la radioactivité est divisée par deux au bout de 24 000 ans) métal dangereux par sa radioactivité. Enfin, cette filière est la seule où la configuration du cœur puisse se modifier dans le sens d'une accélération de la réaction nucléaire.

## FUSION THERMONUCLÉAIRE A LONG TERME ?

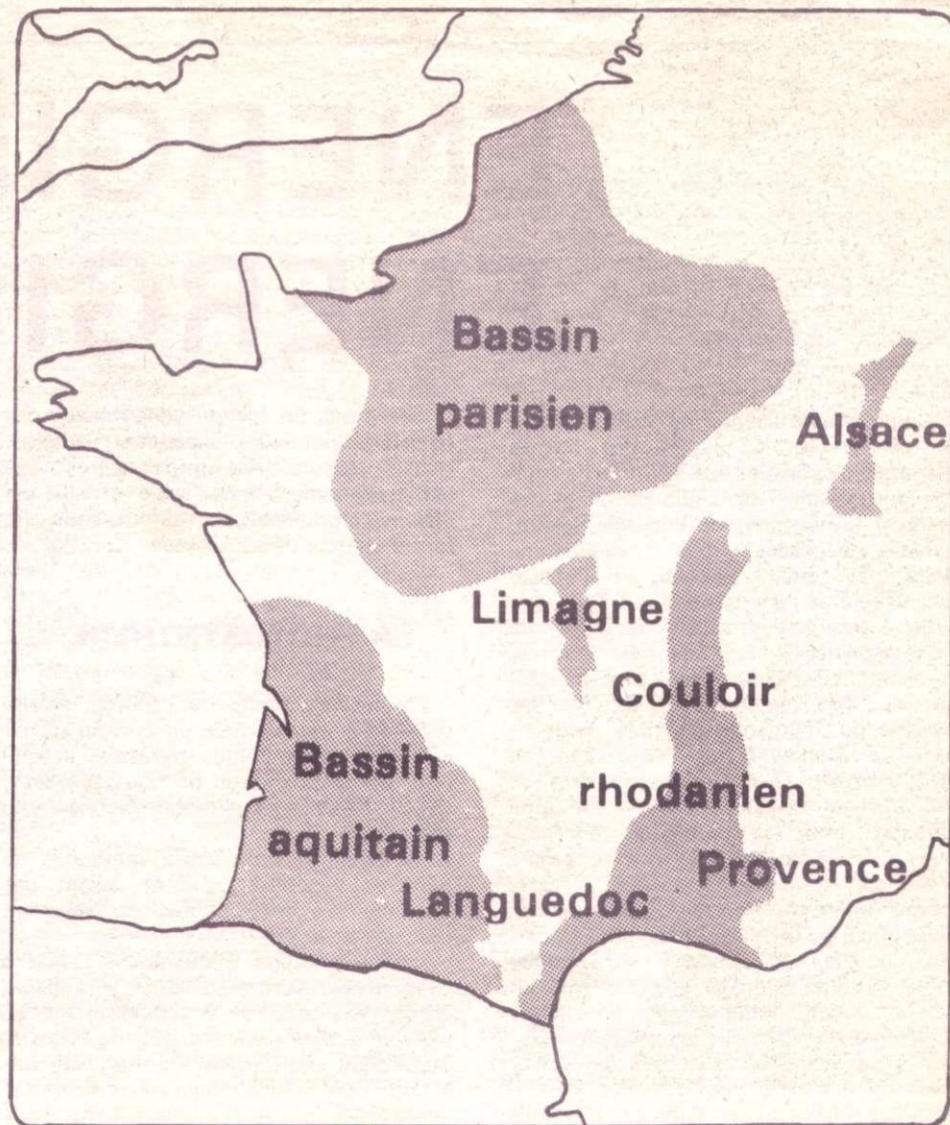
La fusion n'est utilisée actuellement que dans les bombes H (H pour hydrogène). Elle ne se déclenche que si les noyaux de deutérium sont très fortement comprimés et portés à des températures de plusieurs millions de degrés. Deux voies sont principalement explorées pour produire ces conditions : la compression de la matière (débarrassée de ses couches électroniques, on l'appelle plasma) par un champ magnétique très puissant à l'intérieur d'un tore, et la fabrication de très hautes températures par des lasers de puissance. La première voie sera étudiée par l'appareil européen JET. La seconde semble aboutir plus rapidement à des résultats.

Il ne semble pas que le stade industriel sera atteint avant la fin du siècle. Et de toutes façons, la fusion ne sera vraiment une énergie «propre» : d'importantes quantités de tritium radioactif (mêmes propriétés chimiques que l'hydrogène) seront produites. L'avantage décisif reste l'abondance de la matière première : les océans recèlent une quantité quasiment inépuisable de deutérium et le tritium, qu'on peut au besoin fabriquer à partir de l'hydrogène.

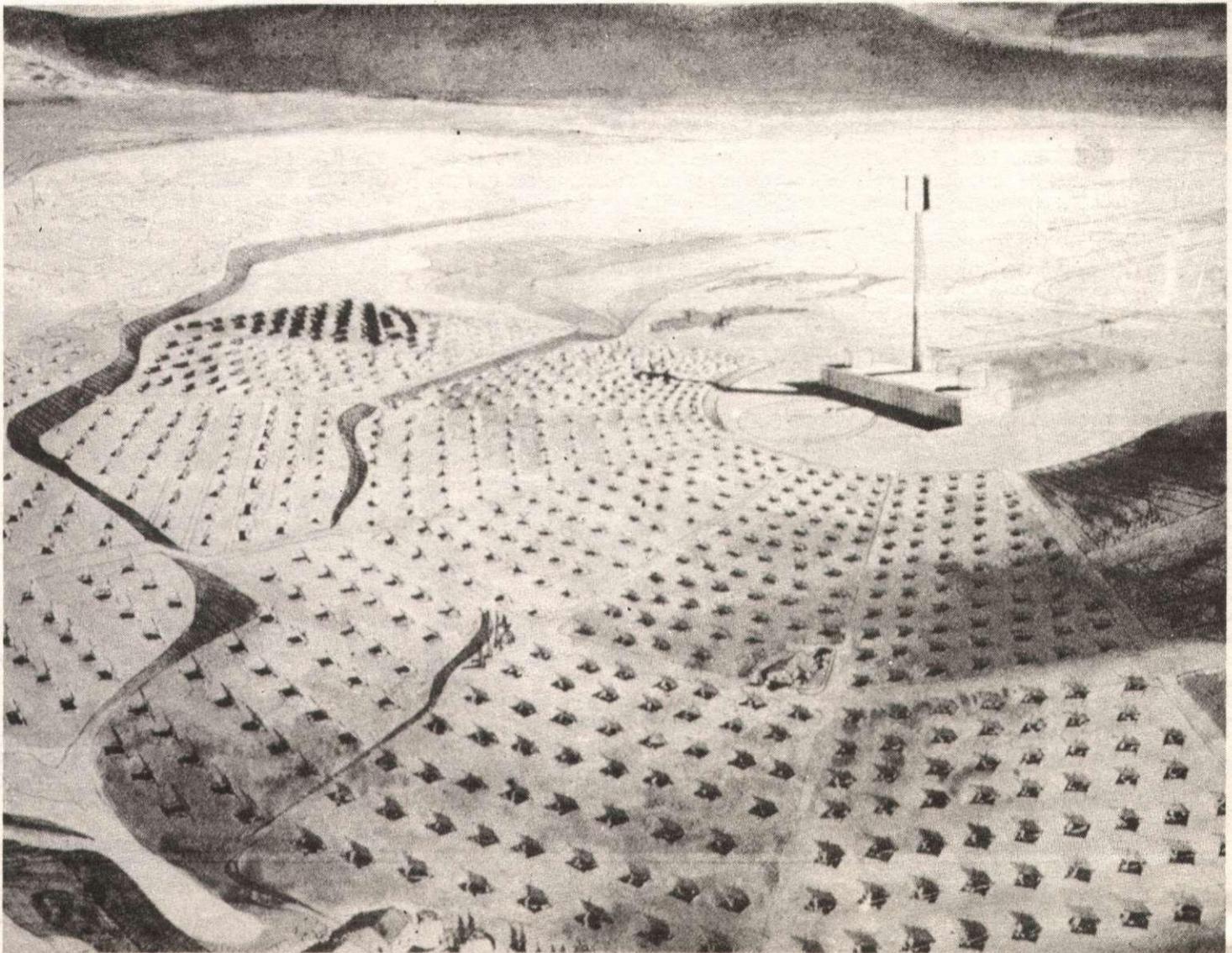
## La France géothermique

Dépourvue de sources d'eau très chaude, comme en Italie ou en Islande, la France dispose cependant d'importantes quantités d'eau chaude à «basse température» (60 à 80° C). Ce potentiel pourrait être largement utilisé pour le chauffage des habitations, en remontant certaines températures avec des pompes à chaleur, éventuellement. Ces «gisements» ne sont pas inépuisables car l'eau prélevée est remplacée par de l'eau froide, qui met très longtemps à se réchauffer. Il faut donc envisager une «économie» de ces gisements. D'autres utilisations de la chaleur du manteau terrestre existent : on peut envoyer de l'eau froide en contact de roches brûlantes (à plusieurs milliers de mètres sous terre) et la récupérer. On peut aussi stocker de l'eau chaude (solaire, par exemple) dans des cavités souterraines de température moyenne (40° C). Elle se conserverait d'un été à un hiver.

Sont indiqués sur la carte les régions de France intéressantes sur le plan géothermique.



Le projet Thémis, conçu par EDF et le CNRS. Il s'agit d'une «mini» grosse centrale solaire, devant produire 2 MWe (600 fois moins que Superphénix). On voit le champ de miroirs plans orientables focalisant le rayonnement solaire au sommet d'une tour où un liquide spécial («hitec») la transporte vers un échangeur de chaleur à vapeur, de façon à alimenter un turboalternateur. La surface occupée est relativement importante. Il suffirait pourtant de 240 km<sup>2</sup> pour subvenir aux besoins en chaleur de la région parisienne, selon le projet ALTER.



# ENERGIE SOLAIRE : ENERGIE DE L'AVENIR

Comme nous l'avons rappelé au début de cet article, la plupart des formes d'énergie disponibles sur Terre (à l'exception du nucléaire, de la géothermie et des marées) proviennent de l'énergie solaire, actuelle ou passée. Nous n'examinerons donc que certains aspects de l'utilisation directe de l'énergie solaire.

Le rayonnement solaire reçu par la Terre représente l'équivalent de 120 millions de TEP (tonnes équivalent pétrole) par an. Cela représente 20 000 fois les besoins de l'humanité en 1974. Pour sa part, la France reçoit l'équivalent de 60 000 MTEP, ce qui représente près de 350 fois les besoins de 1974. De quoi résoudre tous les problèmes énergétiques ? A ceci près que l'énergie solaire n'est pas toujours disponible avec la même intensité (moins abondante en hiver, alors qu'on a besoin de plus d'énergie), qu'elle est dispersée sur chaque mètre carré de territoire, et qu'on ne peut pas la convertir intégralement en énergie directement utilisable. Son utilisation systématique risquerait d'ailleurs de provoquer d'importants changements climatiques et écologiques, l'apport d'énergie

solaire étant un facteur déterminant des équilibres naturels. Cependant l'énergie solaire présente deux atouts maîtres : elle est pratiquement inépuisable et elle est disponible pratiquement partout, sous une forme «toute» décentralisée.

## LA PHOTOSYNTHESE

La majeure partie de l'énergie solaire utilisée est transformée en énergie chimique dans les végétaux terrestres et marins, par le processus de photosynthèse. On peut envisager plusieurs façons de la récupérer :

— le brûlage, (fort vieille méthode) de matières végétales, que ce soient des déchets, ou des cultures spécialement conçues à cet effet.

— la fermentation méthanique. Livrés à l'action des micro-organismes en l'absence de l'air, matières végétales et animales sont progressivement décomposées et fournissent en particulier du méthane, gaz à haut pouvoir calorifique. Par exemple, une installation de retraitement des eaux

résiduelles peut produire, pour 100 tonnes de déchets récupérés, l'équivalent de 30 tonnes de pétrole en méthane.

— les «plantes à essence». Certaines plantes à forte teneur en sucre, peuvent produire de l'alcool, utilisable comme carburant (voir dossier précédent).

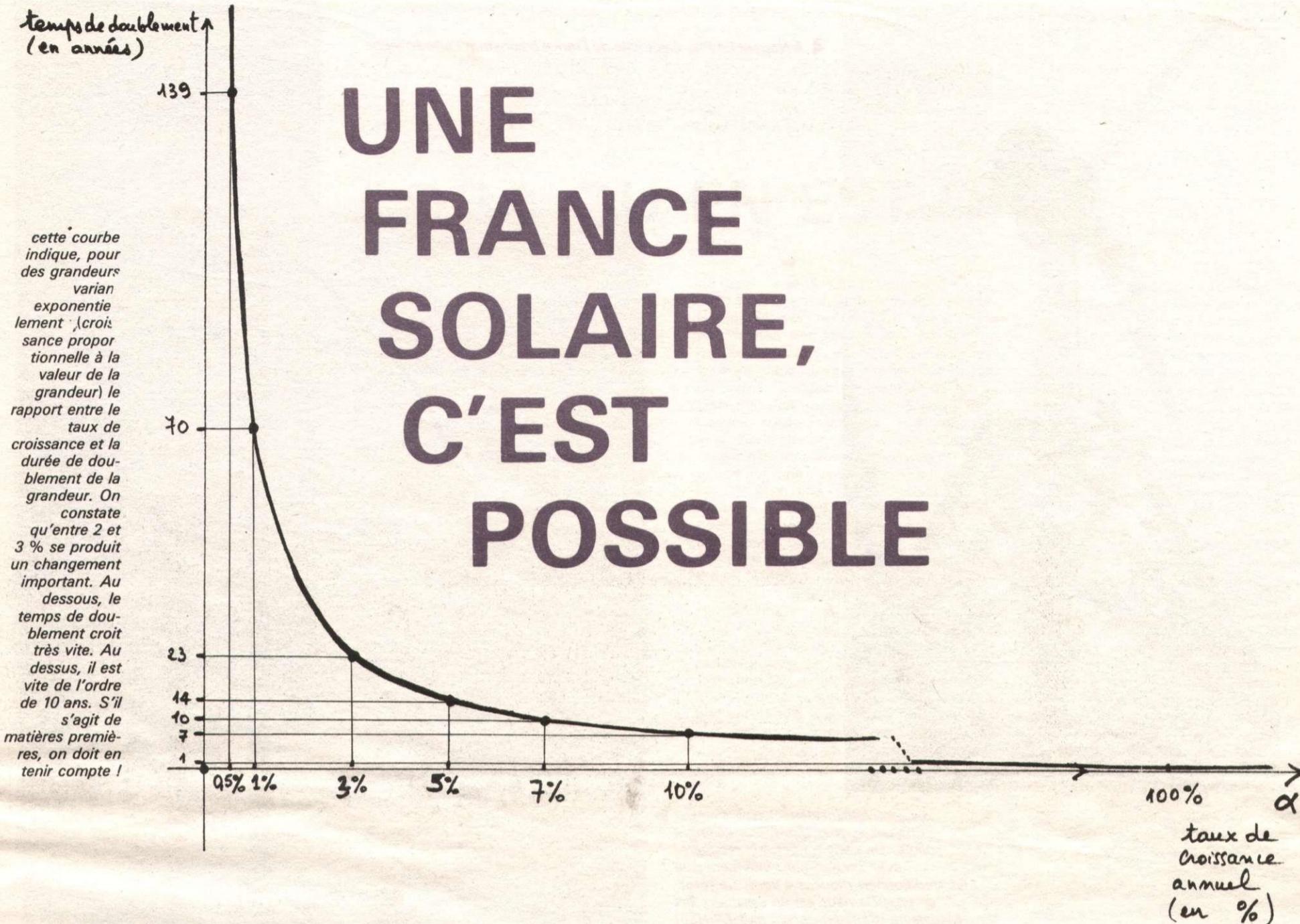
Cette utilisation de l'énergie solaire est certainement la moins explorée à l'heure actuelle.

## LES CENTRALES SOLAIRES THERMIQUES

En concentrant les rayons solaires, on parvient à produire des températures très élevées. On peut ainsi chauffer de l'eau à une température d'autant plus haute que la concentration sera plus forte. Cette eau peut servir directement (chauffage d'installations collectives, chauffage industriel) ou être stockée, de façon à ne pas dépendre de l'alternance jour-nuit et du temps. La durée du stockage dépend

de l'isolation du contenant, et de sa taille. On peut envisager des cuves souterraines, ou même l'alimentation de couches géologiques profondes et creuses (héliogéothermie). Si la température obtenue est suffisamment élevée, l'eau peut être transformée en vapeur, alimenter un turbo-alternateur, et donc fournir de l'électricité. Le rendement le meilleur envisagé actuellement (projet Bertin) est, de 20 %. Seulement, à la différence des centrales classiques, les 80 % de chaleur non transformés ne sont ni perdus ni polluants, puisqu'ils font partie de ce qui était normalement reçu au lieu d'implantation de la centrale.

Le projet THEMIS, conçu par le CNRS et l'EDF, devrait être achevé en 1980. Il fournira 2 MWe et sera composé d'un champ de miroirs plans (héliocondenseurs) dirigeant les rayons solaires vers une tour où se situerait la chaudière. Cette technique serait extrapolable à de plus fortes puissances. Une puissance de 10 MWe nécessiterait 1 500 miroirs de 50 m<sup>2</sup>.



Alors que les prévisions officielles n'accordent que quelques pour cent de la production totale d'énergie en l'an 2 000 aux énergies «nouvelles» (renouvelables), laissant la part du lion au nucléaire et au pétrole, une équipe de chercheurs a travaillé sur une hypothèse radicalement différente : comment couvrir la quasi-totalité des besoins en énergie de la France à partir de l'énergie solaire. «L'équipe de Bellevue», associant des chercheurs de l'INRA, du CNRS, du Collège de France et d'EDF, a travaillé en marge des projections officielles en situant leur projet en 2 050. Ils se sont refusés cependant à pratiquer l'extrapolation et s'en sont tenus à des techniques considérées actuellement comme sûres.

Première hypothèse du projet «Alter» : la consommation d'énergie primaire se stabilise à 140 millions de tonnes-équivalent pétrole, valeur proche de la consommation actuelle. C'est donc la croissance zéro dans le domaine de l'énergie.

Deuxième hypothèse : la croissance de la population se stabilise de façon à parvenir à 60 millions d'habitants en 2 050.

La clef du projet réside en sa démarche : toutes les projections officielles sont étudiées à partir des prévisions de croissance de la demande en énergie. On sait que celle-ci, entre 1950 et 1970, suivait une progression exponentielle en doublant tous les dix ans. Depuis, le rythme s'est légèrement ralenti. Pourtant

les prévisions les plus basses restent fondées sur une croissance relativement importante (une croissance de 5 % entraîne un doublement tous les 14 ans). L'équipe de Bellevue s'est refusée à vouloir satisfaire à tout prix à la demande. Elle a suivi la seule démarche correcte en la matière, inimaginable dans une économie de marché : *partir des besoins* et pas de la demande. Cela implique nécessairement certaines hypothèses sur la structure de la société. Le projet suppose «un niveau de vie confortable pour tous, mais avec économie systématique», «une activité industrielle stationnaire et minimale pour satisfaire aux besoins de la population et permettre l'équilibre d'échanges extérieurs restreints», «un approvisionnement énergétique renouvelable et auto-subsistant, basé sur la captation locale de l'énergie solaire». Chaque ménage disposerait d'un logement (plus vaste qu'aujourd'hui), ce qui suppose une utilisation très restreinte des «résidences secondaires». Il est aussi supposé disposer d'un véhicule, réservé aux transports moyenne distance (à l'extérieur des villes, moins de 100 kilomètres) à condition que son usage moyen soit de l'ordre de 8 000 km/an (le kilométrage moyen en 73 est de 11 500 kilomètres, mais le parc automobile plus restreint). Ces voitures fonctionneraient à l'hydrogène principalement.

Pour assurer l'approvisionnement nécessaire aux besoins recensés, une autre idée importante a guidé l'équipe : chaque demande en énergie est spécifique. Par

exemple, un moteur thermodynamique (par exemple le moteur à explosion), pour avoir un rendement acceptable, doit comporter une source chaude supérieure à 600° C. Par contre, le chauffage d'immeubles ne demande pas plus de 100° C. Or, actuellement, on chauffe les maisons et on fait marcher les voitures avec la même source d'énergie, le pétrole, qui a la caractéristique de fournir des températures très élevées. En cherchant à adapter chaque besoin à une forme d'énergie, on s'attaque à l'un des plus grands gaspillages actuels. Ainsi, les besoins en chaleur basse température (chauffage logement, locaux industriels, certains procédés industriels...) seraient assurés par géothermie, chauffage solaire direct avec appoint de carburant solide ou de pompe à chaleur, chauffage par petite centrale solaire comprenant un réservoir calorifugé ou, pour les grands ensembles (zones urbanisées) chauffage héliogéothermique (chaleur solaire stockée dans des nappes géologiques, ce qui permet de disposer d'une source chaude toute l'année).

Les besoins en chaleur moyenne et haute température seraient assurés par des centrales solaires plus spécialisées : concentrateurs cylindro-paraboliques, centrales à héliostat et tour avec stockage par sels fondus. Dans tous les cas, l'appoint serait fourni par des combustibles produits par l'agriculture (conversion de la bio-masse) ou de l'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau.

Le recours systématique au solaire suppose l'immobilisation d'une surface de sol relativement importante, si on la rapporte à ce qui est actuellement utilisé par les sources d'énergie fossiles ou nucléaires. Par exemple, la région parisienne (stabilisée évidemment) couvrirait ses besoins en chaleur avec une surface de 240 km<sup>2</sup>, à répartir dans les 11 300 km<sup>2</sup> que représente la dite région.

Les besoins en force motrice (transports, moteurs) et en électricité dans ses usages irremplaçables (éclairage, électrolyse, transmission de signaux, mais pas chauffage !) seraient assurés par les carburants issus de la biomasse — ce qui nécessite donc des zones agricoles réservées à des plantes «énergétiques» et par de l'électricité d'origine principalement hydraulique, secondairement solaire et éolienne.

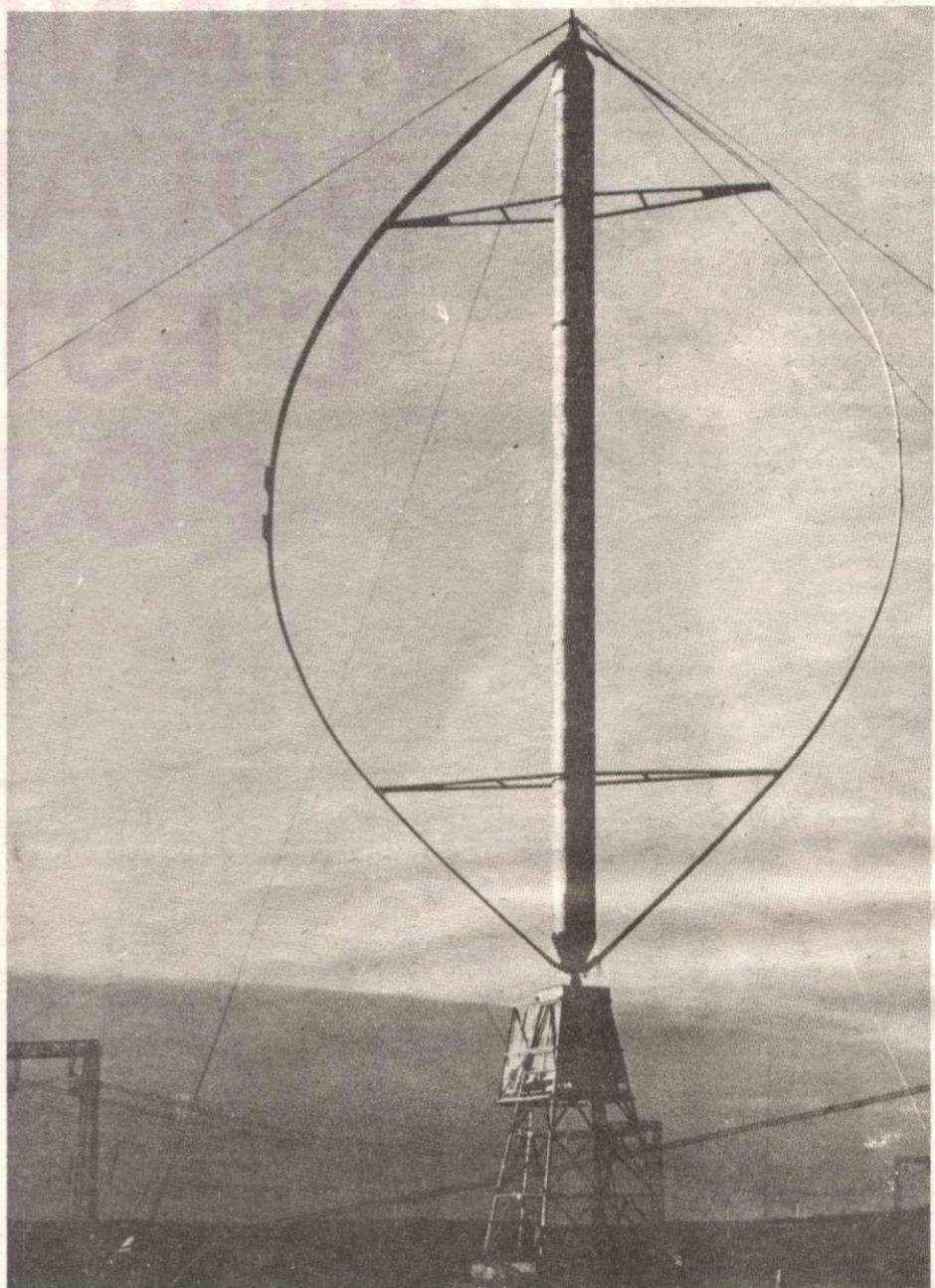
En partant d'une évaluation des besoins de l'ordre de 140 MTEP, l'équipe de Bellevue est parvenue à une adéquation relativement bonne entre besoins énergétiques et production, assurée à 50 % par le solaire direct, 29 % par la récupération des déchets et la biomasse, 21 % par les énergies hydrauliques, éoliennes et marémotrices.

L'équipe de Bellevue ne prétend pas avoir résolu tous les problèmes posés par le recours exclusif aux énergies renouvelables et reconnaît que certaines données et certains modèles doivent être affinés. Le résultat est cependant là : une France solaire, c'est possible.



◀ A Nogent Le Roi, Electricité de France a construit cette éolienne

Le mouvement des masses d'air est une des formes que prend l'énergie solaire. On peut songer à la récupérer avec un meilleur rendement que les traditionnels moulins à vent. Ce rotor, de type Darrieus est en essai aux îles Madeleine (Canada) depuis mai 77. Haut de 37 mètres, il devrait fournir jusqu'à 200 KW (l'équivalent de 40 fers électriques à pleine puissance). Dans certaines circonstances (îles...), ces 200 kW peuvent être fort précieux. Un calcul de principe indique qu'on pourrait récupérer l'équivalent de 220 TEP par an en France en bardant côtes et montagnes de telles éoliennes.



### LE SOLAIRE THERMIQUE DE FAIBLE PUISSANCE

L'une des utilisations les plus courantes de l'énergie solaire est le pompage de l'eau dans les pays arides, grâce à de petites centrales où l'on se contente de chauffer de l'eau sous des panneaux noirs, et de transformer cette chaleur en mouvement. Simple et rustique, ce procédé compense largement son faible rendement par son aspect pratique.

D'autre part, le chauffage individuel est aussi possible par panneaux solaires. Le faible rendement doit cependant être compensé par d'autres sources de chaleur, du moins dans les régions très tempérées.

### LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Les panneaux solaires des satellites ont rendu célèbres les «panneaux solaires», fournissant indéfiniment de l'électricité pour peu qu'ils soient exposés au soleil. Le principe est simple : l'énergie d'un rayon lumineux est suffisante pour arracher des électrons à certains corps et induire ainsi un courant électrique. L'application est plus délicate, car les semi-conducteurs photosensibles sont actuellement des monocristaux de silicium très coûteux à élaborer et atteignant à peine 10 % de rendement. Les importantes sommes investies sur ces semi-conducteurs (aux USA principalement) peuvent laisser espérer une baisse rapide des coûts. On escompte ainsi un rendement de 20 % et un coût de 50 000 F/KW en 1980.

### LA THERMOCHIMIE SOLAIRE

Au lieu d'utiliser directement la chaleur solaire ou de la transformer en mouvement, on peut envisager de produire des réactions chimiques, dont les produits ont des applications énergétiques. Par exemple une installation australienne décompose de l'ammoniac en hydrogène et azote, qui peuvent facilement être transportés et recomposés en azote, libérant ainsi de la chaleur. La production d'hydrogène, par photolyse de l'eau (décomposition en hydrogène et oxygène par action du rayonnement solaire) pourrait d'ailleurs être l'une des grandes voies de l'avenir, en raison des nombreux avantages de l'hydrogène comme vecteur d'énergie : c'est un carburant propre, de transport facile (non corrosif), stockable sous forme liquide et ne nécessitant pas de grandes modifications du moteur à explosion classique.