

Le nucléaire, l'énergie qui mène à la bombe

par Martine Barrère

■ Réacteurs de recherche, centrales énergétiques, usines d'enrichissement ou de retraitement... des installations nucléaires fonctionnent aujourd'hui dans plusieurs dizaines de pays du monde entier. Des installations construites dans un but pacifique ! Sans doute. Mais pourquoi ne seraient-elles pas détournées à des fins militaires ? Il n'existe pas de verrou technique à ce transfert. La réalité est bien là : l'uranium 235 et le plutonium, ces ingrédients de la bombe, seront bientôt à la portée de très nombreux pays. Il semble que rien ne puisse maintenant arrêter la prolifération. Les États industrialisés en portent incontestablement la responsabilité.

■ Pour faire une bombe atomique, il suffit de six à huit kilos de plutonium 239 ou bien encore d'une vingtaine de kilos d'uranium 235. Osirak, les réacteurs irakiens bombardés par les Israéliens, nécessitaient pour leur fonctionnement vingt-cinq kilos d'uranium 235. Une quantité largement suffisante pour fabriquer une arme nucléaire ! De même, l'usine de retraitement souterraine que la France a vendue dans les années soixante à Israël doit fournir, en fonctionnement normal, une dizaine de kilos de plutonium par an (1). Ce pays a donc pu produire de dix à vingt bombes atomiques.

Ces installations nucléaires, et bien d'autres, ont été vendues à des « fins pacifiques » : il s'agissait de faire de l'atome d'uranium un outil « pour la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ». Et chaque pays concerné de s'engager solennellement à respecter cet objectif. Alors pourquoi l'Inde a-t-elle en 1974 fait exploser une bombe, pourquoi le Pakistan aujourd'hui se déclare-t-il prêt à le faire incessamment ? Parce qu'aucun verrou technique ne peut empêcher un gouvernement d'accéder à l'arme atomique à partir de l'atome pacifique, si telle est sa volonté, déclare enfin le CEA par la voix de A. Petit, directeur adjoint des relations internationales du Commissariat à l'énergie atomique, que j'ai rencontré en août.

Le problème de la prolifération nucléaire a commencé à se poser le jour même où l'uranium est passé du domaine militaire au domaine « pacifique » (2), s'assurait un chiffre d'affaires de 10 à 15 milliards de francs. Aujourd'hui, les pays industrialisés se battent pour acquérir des marchés dans le monde entier. André Giraud, ministre de l'Industrie, disait le 30 novembre 1978 au Forum des Echos sur « la France demain » : « Je rappellerai pour mémoire l'un des axes fondamentaux de notre politique industrielle : nécessité dans laquelle

nous sommes d'équilibrer nos achats de matières premières. Pour y parvenir, il faut que notre industrie réponde à certaines conditions et notamment qu'elle vende sur les marchés extérieurs. Si elle ne vend que sur le marché intérieur, la relance ne sera qu'interne donc génératrice d'inflation. Mais pour vendre sur les marchés extérieurs, notre industrie doit s'orienter sur les marchés porteurs, marchés nouveaux qui se développent rapidement et qui donnent une marge supplémentaire ». Framatome l'a bien entendu ainsi, elle qui inscrit ces phrases en tête de la brochure qu'elle a réalisée en 1978 pour son vingtième anniversaire. Dans son dernier bulletin de mai, cette société se déclare désormais premier vendeur mondial de chaudières nucléaires pour réacteurs à eau pressurisée (les réacteurs les plus répandus dans le monde) (3).

Aujourd'hui, des installations nucléaires, laboratoires de recherche ou centrales énergétiques, sont mises en place progressivement dans tous les coins du monde. Certaines sont reconnues « proliférantes », comme les usines d'enrichissement de l'uranium, de retraitement, d'autres sont plus difficilement détournables vers des objectifs militaires, comme les centrales à eau pressurisée. Cependant, quelle que soit la forme sous laquelle il est développé, le nucléaire civil conduit à plus ou moins long terme à la maîtrise de la production de l'uranium 235 et du plutonium. Par la suite, qu'un pays produise ou non sa bombe, qu'il la fasse ou non exploser, est un autre problème qui ressort de l'équilibre des forces au niveau mondial. Mais que l'énergie nucléaire mène à la bombe, nul doute à ce sujet.

La bombe à la portée de tous.

Officiellement, six pays ont jusqu'à ce jour procédé à des explosions nucléaires, les États-Unis, l'Union Soviétique, la Grande-Bretagne, la France, la Chine et plus récemment l'Inde. Chacun pense qu'Israël et l'Afrique du Sud ont fabriqué un certain nombre de bombes mais sans doute ne les ont-ils pas fait exploser !

Comment accède-t-on donc à l'arme nucléaire ? En fait, relativement « facilement » lorsqu'on possède la matière de base. De nombreux ouvrages américains très vulgarisés expliquent comment, avec une dizaine de kilos de plutonium obtenus

à partir du combustible usé des centrales nucléaires, on peut fabriquer une bombe (4). Le premier problème est donc de posséder le matériau de base. Comme le montre la figure 2, deux voies sont possibles : la voie uranium 235 et la voie plutonium. Elles ont chacune fait l'objet d'une démonstration spectaculaire : la bombe qui a explosé à Hiroshima le 6 août 1945 était à base d'uranium 235, celle qui a détruit Nagasaki le 9 août de la même année était composée de plutonium.

La voie uranium 235 passe par la maîtrise de la technique d'enrichissement de l'uranium. L'uranium naturel en effet est composé de 99,3 % d'uranium de poids atomique 238 et de 0,7 % d'uranium de poids atomique 235. C'est l'uranium 235 qui est fissile, c'est-à-dire susceptible de se scinder après avoir été bombardé par des neutrons et produire ainsi de nouveaux neutrons et de la chaleur nucléaire. Ces nouveaux neutrons servent à leur tour à provoquer la fission d'autres noyaux ; c'est ce que l'on appelle « la réaction en chaîne ». L'uranium 238, cependant, absorbe les neutrons. Pour que la réaction en chaîne s'établisse, il faut donc rassembler en un même volume une masse suffisante de matériau contenant des noyaux fissiles, dite masse critique. Dans un réacteur nucléaire, la masse critique est telle que la réaction en chaîne est contrôlée pour produire un dégagement d'énergie, continu et prédéterminé. La masse critique d'une bombe atomique entraîne par contre une proration extrêmement rapide de la réaction en chaîne qui aboutit à une explosion dégageant une énergie considérable. C'est dans les années 1940 que la première usine d'enrichissement à diffusion gazeuse a été construite aux États-Unis. Ce procédé a été le premier réellement développé à large échelle ; il fait appel aux propriétés de diffusion différentes des deux isotopes U 238 et U 235 mis sous forme de fluorures gazeux, soumis à l'écoulement forcé au travers d'une barrière poreuse. Un deuxième procédé a été développé à partir de 1955 : l'ultracentrifugation. L'uranium 238 et l'uranium 235, en raison de leur masse différente, ont tendance à se séparer sous l'action de la force centrifuge lorsque l'uranium naturel sous forme gazeuse est mis dans un récipient tournant à grande vitesse autour de son axe. L'uranium 238 plus lourd se retrouve en plus grandes quantités vers la périphérie

(1) *The Nuclear Axis*, Z. Cewenka, B. Rogers, Julian Friedman Books, London, 1978. Cette information a par ailleurs été traitée dans *le Monde* du 4 et 5 mai 1975, sans avoir été suivie, à notre connaissance, de dénégation officielle.

(2) Les actions de Framatome sont partagées principalement entre Empain-Schneider - 55 % (dont 51 % à Creusot-Loire), CEA - 30 % - et Westinghouse - 15 %.

(3) A vrai dire, ce sont essentiellement les chaudières vendues en France qui permettent à Framatome de faire cette assertion.

(4) Voir par exemple *La bombe chez vous* de John Mc Phee, 1975, traduit aux Editions Pauvert.

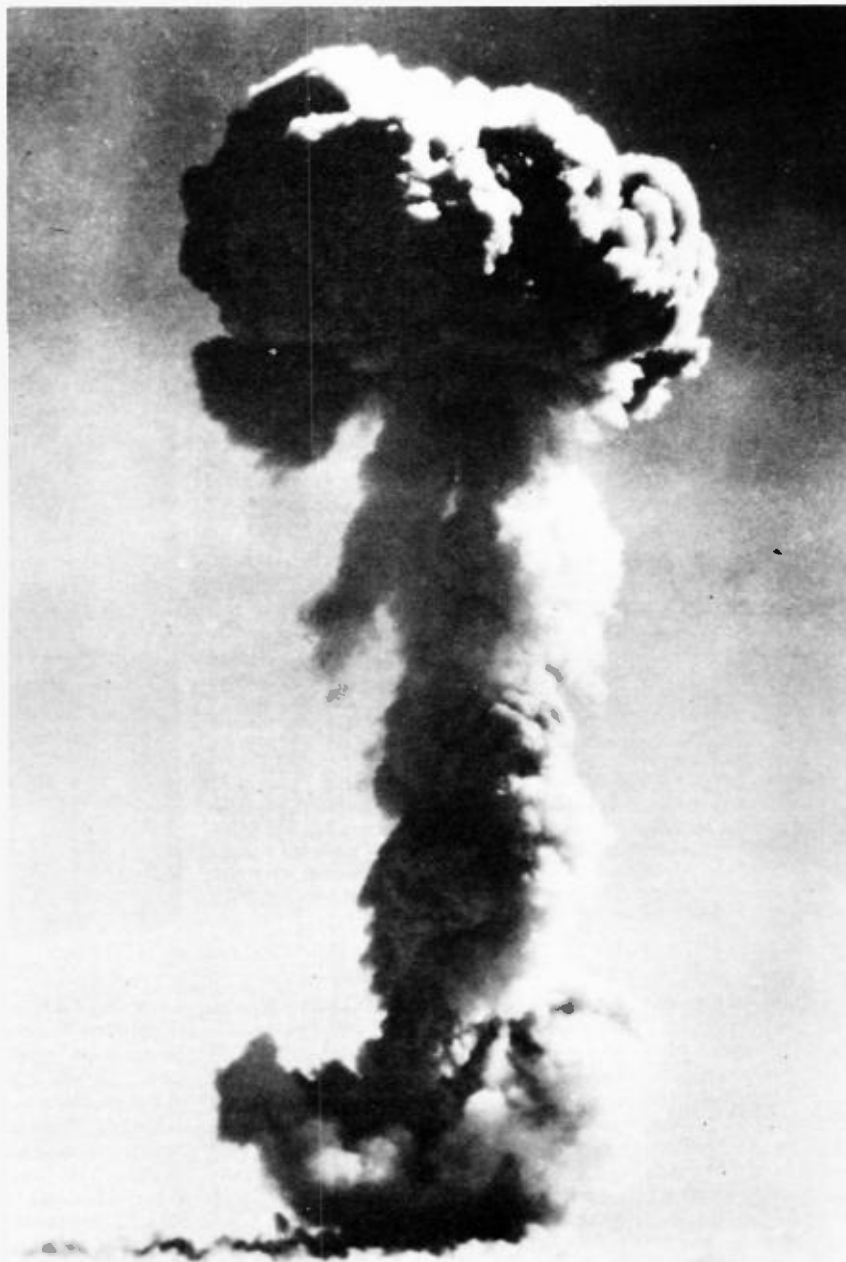
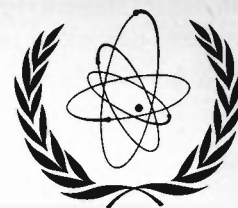


Figure 1. Le 16 octobre 1964, la Chine a fait exploser sa première bombe atomique, devenant ainsi la cinquième puissance nucléaire militaire mondiale. Le Pakistan, la Corée du Sud, et Taiwan sont maintenant clairement candidats à la possession de l'arme nucléaire (Cliché Keystone)

du récipient.

Le procédé par diffusion gazeuse a longtemps été utilisé à des fins militaires par les Etats-Unis, l'Union Soviétique, la Grande-Bretagne, la France et la Chine, puis il est passé à un stade civil et industriel avec le développement de l'énergie nucléaire, sous la houlette des Etats-Unis et de l'Union Soviétique. Cependant, la France s'est associée dans les années soixante-dix à plusieurs pays, dont l'Italie, la Belgique, l'Espagne et l'Iran, pour construire dans le cadre de la société Eurorodif l'usine de diffusion gazeuse de Tri-

castin qui fonctionne depuis 1979 (fig. 3). De leur côté, l'Allemagne Fédérale, les Pays-Bas et la Grande-Bretagne ont constitué le consortium URENCO avec l'objectif de construire une usine pilote utilisant l'ultracentrifugation dans chacun des pays. Copenhurst a démarré en Grande-Bretagne et Almelo aux Pays-Bas. Certains autres pays ont des projets d'usines d'enrichissement, comme l'Afrique du Sud, le Brésil, le Canada, le Japon, l'Australie.

Les installations de diffusion gazeuse sont très énergivores et volumineuses ; el-

les sont donc très encombrantes. Celles d'ultracentrifugation sont beaucoup plus compactes, donc peu voyantes et moins coûteuses en énergie : elles consomment dix fois moins que les précédentes. Autant de raisons expliquant que l'ultracentrifugation soit considérée comme une technique proliférante. C'est en tout cas la technique d'enrichissement la plus convoitée aujourd'hui. Un autre procédé utilisant le laser est à l'étude ; il est pour l'instant totalement couvert par le secret militaire mais la société américaine Exxon souhaite le commercialiser d'ici une dizaine d'années. Il n'a besoin quant à lui que de petits bâtiments et consommera peu d'énergie. Toutes ces techniques permettent de fabriquer de l'uranium dont le taux d'enrichissement peut théoriquement atteindre 100 %, d'où le danger énorme qu'elles représentent pour la prolifération. Aussi, en 1977, au congrès de Salzbourg, Monsieur Giraud, alors administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) s'est-il taillé un succès certain lorsqu'il a annoncé que la France était en train de mettre au point une technique, dite de séparation isotopique, non proliférante puisqu'elle ne permettait pas de dépasser des taux d'enrichissement supérieurs à 3 %. Cette technique ne semble pas pouvoir se développer aussi rapidement qu'il avait été annoncé puisque, à la suite d'un accord passé l'an dernier avec les Etats-Unis, on ne parlait que de la construction d'un laboratoire d'étude commun.

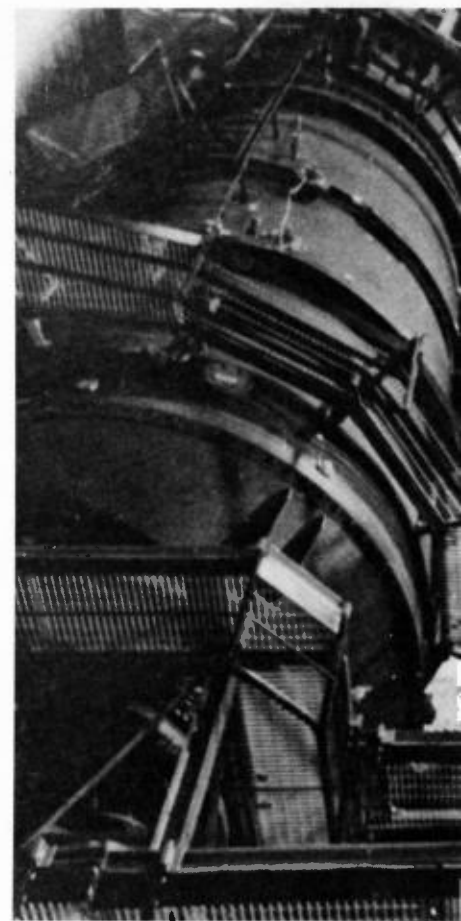
Bien sûr, la façon la plus immédiate de fabriquer une bombe avec de l'uranium 235 serait d'utiliser directement de l'uranium déjà enrichi. Ceci peut se concevoir dans le cadre des réacteurs de recherche. Ces réacteurs ont généralement une puissance de quelques MWth⁽⁵⁾, ils sont caractérisés par un flux de neutrons élevé qui leur permet d'être, selon leur configuration, un bon outil pour la physique nucléaire fondamentale et pour l'étude des matériaux de structure des centrales nucléaires. Leur combustible est de l'uranium généralement très enrichi. C'est vers 1955 que les Américains ont commencé à exporter des réacteurs de recherche dans le cadre du programme « Atomes pour la paix » de l'administration Eisenhower. Ils ont été suivis par les Soviétiques, les Allemands et les Français. Aujourd'hui, on peut dénombrer quelque 150 réacteurs de recherche de par le monde faisant appel à du combustible souvent très enrichi (fig. 4). Les deux réacteurs vendus par la France à l'Irak, par exemple, nécessitent chacun pour leur fonctionnement 12,9 kilos d'uranium enrichi à 93 %. Une telle quantité d'uranium 235 est suffisante pour fabriquer rapidement une bombe. Il faut cependant utiliser le combustible « neuf » car il se transforme dès que le réacteur est mis en fonctionnement. D'une part, la quantité d'uranium 235 diminue, d'autre part la production de neutrons rend le combustible très radioactif et son maniement devient de plus en plus complexe. Il est aussi

Une centrale surgénératrice comme Super-Phénix pourrait permettre la production de quelques dizaines de bombes par an.

matière fissile	sous forme de métal (en kg)	sous forme d'oxyde (en kg)
plutonium militaire (239)	4	6
plutonium industriel	8	10
uranium très enrichi en 235 (93 %)	17	20
uranium enrichi à 20 % en 235	250	375
uranium enrichi à 10 % en 235	1 000	1 500
uranium enrichi à 5 % en 235 (combustible pour centrales à eau légère).	inutilisable pour la fabrication d'un engin explosif.	

Figure 2. La quantité de matière fissile nécessaire à la fabrication d'une bombe atomique dépend de la qualité et de la nature de la matière fissile utilisée. C'est ce que montre ce tableau, les quantités indiquées étant des minima supposant l'existence d'un réflecteur efficace de neutrons. Suivant les documents, ces quantités peuvent différer légèrement : les chiffres ci-dessus proviennent de la *Revue Générale Nucléaire* (1977) mais sont aussi cités dans *Review of Modern Physics* (50, n° 1 janvier 1978).

Figure 3. Les diffuseurs ont été photographiés dans l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse d'Eurodif située à Tricastin. Cette technique a été développée pour la première fois aux Etats-Unis en 1940 ; elle a été utilisée principalement à des fins militaires jusque dans les années 1970. Elle est la seule technique d'enrichissement de l'uranium à avoir réellement atteint un niveau industriel ; elle est considérée comme peu proliférante car les installations sont très énergivores et volumineuses, donc difficilement dissimulables (Cliché Eurodif-CEA).



toujours possible d'imaginer le vol d'un tel combustible au cours de son transport ou de son stockage. C'est pour pallier une telle éventualité que les Etats-Unis, depuis une dizaine d'années, et la France, plus récemment, étudient la mise au point d'un combustible enrichi à moins de 20 % en uranium 235, les 20 % étant la limite au-dessous de laquelle les quantités requises pour faire la bombe sont perçues comme exorbitantes. Le problème technique consiste à fabriquer un combustible qui permette en dépit de son enrichissement plus faible les mêmes performances élevées du réacteur. Aidée financièrement par le département à l'énergie, «General Atomic», la principale compagnie américaine exportatrice de réacteurs de recherche, a mis au point un combustible enrichi à 20 % adapté aux réacteurs «TRIGA». En France, le Commissariat à l'énergie atomique a fabriqué Caramel, enrichi à 7 % en uranium 235. Il a pour l'instant seulement été testé sur le réacteur Osiris (le père d'Osirak) à Saclay qui fonctionne depuis plusieurs mois avec ce nouveau combustible. Cependant, Caramel, ou un autre combustible faiblement enrichi, ne règlera pas le problème de la prolifération. Prenons l'exemple de l'Irak. La France a pris prétexte du caractère très proliférant de l'uranium enrichi à 93 % pour ne s'engager à livrer le combustible à l'Irak qu'au

fur et à mesure de son utilisation. Mais si ce pays avait accepté Caramel, non proliférant par définition, la France aurait difficilement trouvé des arguments, comme me l'a dit A. Petit, pour ne pas lui fournir des cœurs d'avance. Ainsi, peut se constituer aisément un stock important d'uranium susceptible d'être enrichi dans des usines d'enrichissement ou encore d'être transformé en plutonium par bombardement neutronique.

Qui n'a pas sa centrale nucléaire ?

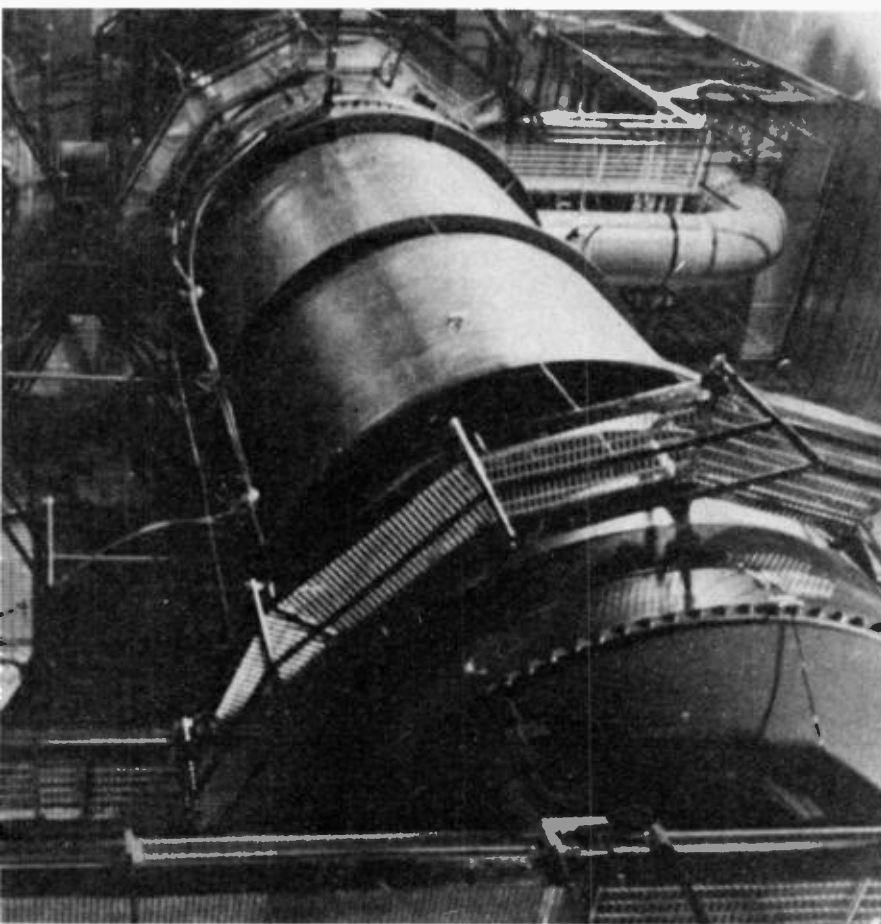
La deuxième voie d'accès à la bombe, la voie plutonium, est actuellement la plus facile. Elle passe par la production de plutonium puis par la technique du retraitement. Pendant longtemps les militaires ont affirmé que seul du plutonium très pur, ne contenant pratiquement que du plutonium 239, permettait de faire la bombe. Aujourd'hui les scientifiques sont unanimes pour dire que le plutonium produit dans les centrales nucléaires et contenant donc une certaine quantité de plutonium 240 peut aussi être employé. Il en faut simplement un peu plus (voir fig. 2), le maniement en est plus délicat, et le rendement est moins bon. Selon un journal de Los Angeles du 14 août 1977, des essais nucléaires ont eu lieu en 1962 avec des engins équipés de plutonium extrait des

centrales PWR aujourd'hui les plus répandues dans le monde. Le plutonium n'existe pas dans la nature, sa production passe par l'uranium 238, ce dernier se transformant en plutonium lorsqu'il absorbe des neutrons. C'est ce qui se passe dans les réacteurs nucléaires⁽⁶⁾.

Dans les réacteurs de recherche, le cœur lui-même contient peu d'uranium 238, la puissance du réacteur est souvent faible et la production de plutonium en fonctionnement normal sera donc négligeable. Pour un tel objectif, différentes solutions sont envisageables cependant. On peut placer des barreaux d'uranium naturel dans les emplacements internes du cœur prévus pour les expériences ; c'est la solution la moins voyante. On peut aussi remplacer une partie des barreaux d'uranium très enrichi par des barreaux d'uranium naturel ou encore entourer le cœur d'une couverture d'uranium naturel (voir encadré 1).

Dans les centrales productrices d'énergie, la quantité et la qualité du plutonium produit est variable, selon les filières. Les meilleures, en terme de production de plutonium, sont celles utilisant l'uranium naturel comme combustible. En effet, des centrales de 1 000 MWe peuvent produire en moyenne de 340 à 500 kilos de plutonium par an. Pour de telles centrales, il y a peu de problèmes d'approvisionnement

(5) 1 MWth ou MW thermique = 1/3 MWe ou MW électrique. Le rapport 1/3 provient du rendement de 33 % en puissance électrique.
(6) Le terme général de réacteur s'emploie pour désigner une installation nucléaire, siège de réactions de fission. On emploie plutôt le terme de centrale quand il s'agit de réacteur dont l'objectif est de produire de l'énergie.



brants (quatre mètres de haut) et doivent être déchargés obligatoirement à l'arrêt (le tiers des éléments est enlevé chaque année au cours d'une période d'arrêt d'au moins trois semaines).

Enfin, les meilleurs outils de production de plutonium seront, sans aucun doute, les centrales surgénératrices si elles sont un jour produites en série. La plus grosse centrale actuellement en fonctionnement est installée en Union Soviétique, elle a une puissance de 600 MWe, et la France achève la centrale Super-Phénix de 1 300 MWe dont le démarrage est prévu pour 1983-1984. Sans parler du combustible lui-même qui contient déjà au départ beaucoup de plutonium, dans les couvertures qui entourent le cœur de Super-Phénix par exemple, 140 kg de plutonium 239 pratiquement pur pourra être produit par an, de quoi fabriquer une vingtaine d'armes annuellement.

La France, championne du retraitement.

Il est certain aujourd'hui que de très nombreux pays sont capables, par des procédés divers, de transformer de l'uranium en plutonium. Mais peuvent-ils pour autant disposer du plutonium ? Pour cela, il faut retraiter le combustible qui a été brûlé dans les réacteurs. L'objectif du retraitement est en effet la séparation des différents éléments contenus dans le combustible irradié et en particulier l'uranium et le plutonium. Cette technologie a longtemps été tenue secrète et développée seulement à des fins militaires, aux Etats-Unis à Stanford, en Grande-Bretagne à Windsale, en France à Marcoule. Les premiers combustibles issus des réacteurs à uranium enrichi ont été retraités en 1966 à l'usine d'Eurochemic à Mol en Belgique. Avec cette installation européenne, la majorité des pays de l'OCDE acquerraient ainsi le savoir-faire du retraitement. En fait, cette technologie devait vite s'avérer très délicate à développer à une grande échelle et à la fin de 1974 toutes les usines civiles sont arrêtées à l'exception de La Hague en France.

Seule voie d'accès au plutonium, le retraitement apparaît comme un maillon clé de la prolifération : tout pays maîtrisant, même à l'échelle du laboratoire, cette technologie a les moyens de fabriquer l'armement nucléaire. Et c'est la peur de la prolifération nucléaire qui a souvent amené le président Carter à intervenir politiquement dans différents pays et à empêcher le développement du retraitement industriel aux Etats-Unis même. C'était peine perdue, car déjà de nombreuses installations pilotes étaient en construction du fait des Allemands, des Italiens, des Belges et des Français. Mais en y regardant de plus près, l'attitude des Etats-Unis est assez ambiguë. En effet, les contrats établis avec les pays importateurs de centrales à uranium enrichi stipulent que le devenir du combustible irradié reste entre les mains des Etats-Unis. Dans ces conditions et suivant les contrats, ou bien le combustible retourne aux Etats-

ment en combustible, puisque la plupart des pays possèdent de l'uranium sur leur territoire. Par ailleurs, les barreaux de combustibles sont en nombre très élevé, plusieurs milliers dans le cas de la filière française (dite graphite-gaz), et ils peuvent être enlevés et mis sans arrêter la centrale. Ainsi, des opérations de subtilisation de barreaux peuvent être faites à n'importe quel moment et le contrôle du combustible est donc pratiquement impossible. De telles centrales sont par essence même proliférantes : rappelons-nous que la première bombe indienne qui a explosé en 1974 a été fabriquée grâce aux centrales à uranium naturel CANDU vendues par le Canada. Les centrales à base d'uranium naturel se sont développées les premières dans les pays occidentaux. La raison en était militaire : elles permettaient de fabriquer du plutonium 239 très pur. Les exportations ont commencé en 1955 par la vente de la centrale canadienne à l'Inde. Cette même année, la France a vendu à Israël le réacteur à uranium naturel installé à Dimona. La Grande-Bretagne participait elle aussi à ces premiers marchés : elle vendait à l'Italie, le réacteur de Latina, et au Japon, le réacteur de Tokai-Mura. Une décennie plus tard, la France cédait le réacteur de Vandellós à l'Espagne, l'Allemagne le réacteur d'Attucha à l'Argentine. Depuis dix

ans, les Canadiens restent les seuls exportateurs de réacteurs à uranium naturel qu'ils ont vendus en Inde, au Pakistan, à Taïwan, en Corée du Sud et en Argentine (encadré 2).

De son côté, la Grande-Bretagne continue le développement sur son territoire de réacteurs MAGNOX à uranium naturel. Cependant, la majorité des centrales en construction ou en fonctionnement dans le monde utilise de l'uranium faiblement enrichi, environ 3 % d'uranium 235. Un tel combustible a été conçu à l'origine pour répondre aux impératifs de la propulsion des sous-marins à l'aide de l'énergie nucléaire. Dans les années soixante-dix, les industriels américains qui disposaient d'une avance importante sur les autres pays inondaient le monde entier de leurs centrales à uranium enrichi à 3 %.

On compte aujourd'hui plus de trois cents centrales de ce type en fonctionnement (fig. 5). Elles peuvent produire, pour une puissance de 1 000 MWe, 250 kilos de plutonium par an. Ces centrales sont néanmoins considérées comme non proliférantes car seul un nombre très limité de pays, comme on l'a vu, a le monopole de la production du combustible enrichi. Par ailleurs, il est beaucoup plus aisé de garder le contrôle sur le devenir des éléments combustibles : ceux-ci sont en effet peu nombreux (de l'ordre de 150), encom-

Tout pays maîtrisant, même à l'échelle du laboratoire, la technologie du retraitement, a les moyens de fabriquer l'armement nucléaire.

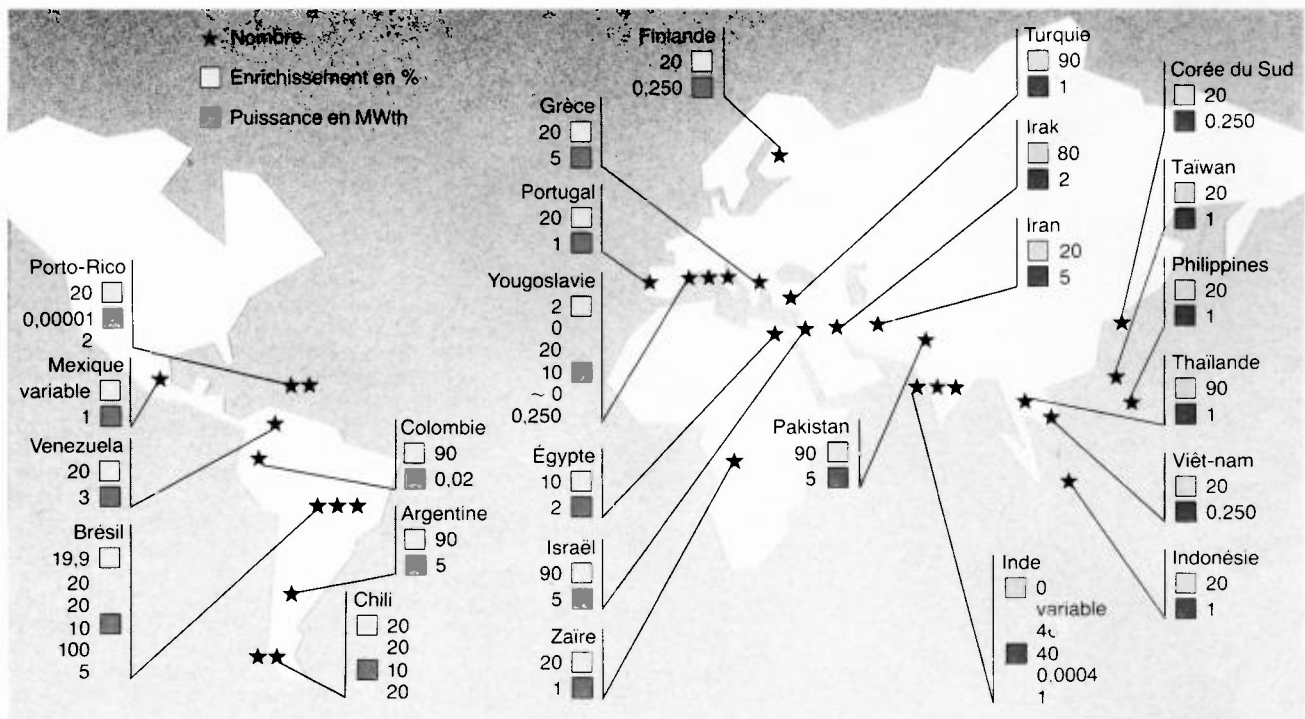


Figure 4. Les réacteurs de recherche sont répartis un peu partout dans le monde. Nous avons reporté ici les pays ne maîtrisant pas officiellement le cycle du nucléaire, indiquant chaque fois le nombre de réacteurs de recherche qu'ils possèdent, l'enrichissement de leur combustible en uranium 235 et la puissance du réacteur. Pour que la liste des réacteurs de recherche soit exhaustive, il faut rajouter les quelque deux cents réacteurs qui existent en Afrique du Sud, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Suisse, Danemark, Espagne, Etats-Unis, France, Hollande, Italie, Japon, Norvège, Allemagne fédérale, Royaume-Uni, Suède. (Ces chiffres proviennent de la *Revue Générale Nucléaire*, 320, n° 4, août-septembre 1978).

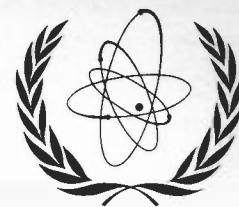
Unis où il est stocké dans des piscines, ou bien il peut être retraité en France sous couvert de l'autorisation américaine. Ainsi, de fait, les Etats-Unis ont-ils permis indirectement à la France de développer sur son territoire le retraitement, technologie «sale» dont ils ne voulaient pas chez eux. Le marché proposé aux pays importateurs de centrales était simple : si les conditions requises n'étaient pas remplies, les Etats-Unis ne fournissaient pas le combustible enrichi à 3 % dont ils étaient jusqu'à l'an dernier les seuls fabricants (avec l'Union Soviétique bien sûr).

La France tout particulièrement s'est spécialisée dans l'exportation d'usines de retraitement à l'étranger. Elle a commencé par la vente à Israël, outre du réacteur à uranium naturel dont il a déjà été question, d'une petite usine d'extraction du plutonium souterraine située à Dimona. Elle a continué avec le Japon. C'est fin 1970, que la société Saint-Gobain Techniques Nouvelles (SGTN), filiale à 100 % du groupe Saint-Gobain Pont-à-Mousson, s'est vu confier par le Japon le rôle d'entrepreneur général d'une usine de retraitement avec le soutien d'une société japonaise. Le marché total se montait à 200 millions de francs de l'époque dont 20 de matériel français et environ 20 de prestations SGTN. En mars 1975, l'usine était en fait estimée à 640 millions de francs. Cette usine a été réalisée à Tokai-Mura, elle a une capacité de retraitement de 200 ton-

nes d'uranium à 3 % par an. Une usine de cette taille peut, si un fonctionnement à pleine capacité est observé, fournir aux alentours de 1 500 kilos de plutonium par an. Ce n'est qu'en 1977 que l'usine construite à Tokai-Mura a produit son premier kilo de plutonium. Des discussions serrées ont été menées, parallèlement, entre les Japonais et les Américains avant le démarrage de l'usine. Les Japonais ont dû observer une période probatoire de deux ans pendant lesquels l'usine a marché à faible cadence ; ils ont aussi dû adapter son fonctionnement au coprocessing, technique permettant de ne pas isoler l'uranium du plutonium. Jusqu'à cet été sa production théorique était encore limitée par le gouvernement américain. Quelques années après la signature du premier contrat, Saint-Gobain T.N. s'intéressa à l'installation d'une deuxième usine japonaise beaucoup plus importante (1 500 tonnes par an), mais la tentative échoua en raison de l'ultimatum posé par les Américains. En fait, l'usine de Tokai-Mura a toujours mal marché et ses périodes d'arrêt pour réparation sont bien plus nombreuses que ses périodes de bon fonctionnement.

Un troisième accord passé par la France a fait grand bruit : il s'agit de la vente au Pakistan d'une usine de retraitement de 100 tonnes d'uranium par an. Depuis les années 1960, le Pakistan a vu croître progressivement la capacité nucléaire de

l'Inde. Un premier réacteur a démarré en 1956, un second en 1960, un troisième en 1964. Une première usine de retraitement, vendue par les Canadiens, a fonctionné à Tarapur en 1960, suivie par une seconde en 1971. Et, le 19 mai 1974, l'Inde procédait à une explosion nucléaire souterraine. Si l'on peut attribuer la responsabilité de cette première bombe au Canada, qui a financé la moitié de la première centrale, fourni le combustible et formé le personnel, ce sont cependant les Etats-Unis qui ont procuré l'eau lourde indispensable au fonctionnement des réacteurs canadiens. Les pays nucléaires furent consternés à l'époque. Une exception, Paris : l'administrateur général du CEA, A. Giraud, adressait au président de la Commission indienne de l'énergie atomique un télégramme de félicitations. Il est vrai que la France avait offert à l'Inde sa collaboration pour la construction près de Madras d'un premier surgénérateur de 15 MWe. En fait, c'est en 1969, un an avant que Madame Gandhi n'annonce l'intention de son pays de procéder à des explosions nucléaires et à des fins pacifiques, que le Premier ministre du Pakistan, Ali Bhutto, décide de se doter d'une usine de retraitement. Fin 1970, le CEA déclare que le gouvernement français ne met pas d'objection à un tel projet sous réserve qu'il soit soumis au contrôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique de Vienne, l'AIEA. Et, en mars 1973, Saint-



1. Comment se servir d'Osirak à des fins militaires

■ Osirak, réacteur d'étude vendu par la France en 1975 à l'Irak, était une réplique du réacteur Osiris installé sur le Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay⁽¹⁾. Son installation ne s'était pas faite sans mal⁽²⁾ : en avril 1979, une explosion endommagea dans le hangar des Constructions navales et industrielles de la Méditerranée, à la Seyne-sur-Mer dans le Var, la cuve du réacteur ; le 30 septembre 1980 un premier bombardement irakien est effectué sur les installations nucléaires ; sans oublier les deux scientifiques, irakien et égyptien, collaborant au projet, qui ont été assassinés en France, ni les menaces qu'ont reçu certaines des sociétés françaises impliquées en Irak par le Comité pour la Sauvegarde de la révolution islamique de ne plus envoyer de personnel à Osirak (les principales sociétés sont la CNIM (déjà plastiquée), Technicatom (qui assure l'ingénierie du projet), Bouyghes (chargé du génie civil), COMSIP (qui s'occupe de la partie électrique).

Osirak, tout comme Osiris, consiste en un réacteur d'une puissance de 70 MWth (Tamuz I) doublé d'une maquette neutronique en vraie grandeur mais de faible puissance : 0,8 MWth (Tamuz II). Chacun des réacteurs nécessite, pour son fonctionnement, la même quantité de combustible : 13,9 kilos d'uranium métal contenant 12,9 kilos d'uranium 235. Le cœur de Tamuz I doit en moyenne être changé par tiers tous les mois, donc, en comptant les

arrêts habituels de tout réacteur, la consommation de Tamuz I serait de 3 cœurs par an, c'est-à-dire de quelque 40 kilos d'uranium 235. Le cœur de Tamuz II par contre s'use très peu, cette maquette est « un auxiliaire destiné à effectuer tous les essais neutroniques relatifs à la configuration du cœur », elle permet donc de simuler le comportement d'Osirak. Le système contient de plus « des cellules chaudes de démantèlement dans lesquelles les éléments irradiés peuvent être récupérés ».

Imaginons le cœur d'un réacteur comme une boîte parallélépipédique contenant une grille trouée qui maintient un certain nombre d'éléments combustibles. Dans la configuration classique de Tamuz I, les trente-deux éléments sont formés par un assemblage de plaques d'alliage d'aluminium et d'uranium enrichi. Il existe 6 des barres de contrôle. Il reste dix-huit positions disponibles pour placer des « éprouvettes expérimentales ». Il semble que pour produire des quantités significatives de plutonium, la voie la plus aisée serait d'insérer des éléments d'uranium naturel dans le cœur même. En effet, la chaleur supplémentaire dégagée par la transformation de cet uranium pourrait être éliminée par le système de refroidissement existant. Il est aussi possible de disposer autour du cœur d'une couverture d'uranium naturel. Dans ce cas le système de refroidissement serait vraisemblablement à modifier.

Pour calculer la production éventuelle de plutonium, il faut connaître le nombre de neutrons susceptibles de transformer l'uranium naturel en plutonium. Un réacteur comme Osirak produit environ $3 \cdot 10^{14}$

neutrons par seconde, pour la puissance de 70 MW th. Cette quantité de neutrons n'est en fait pas réellement disponible puisque certains noyaux, outre l'uranium 235, formés lors du fonctionnement du réacteur absorbent des neutrons. Il faut aussi tenir compte des temps d'arrêt du réacteur, du fait que si l'option de la couverture est choisie, cette dernière ne peut complètement entourer le cœur et qu'il y a des fuites de neutrons. Dans la réalité, les calculs de neutronique ont toujours une certaine imprécision dans la mesure où l'on ne sait pas modéliser exactement le fonctionnement du cœur. Cependant, quelle que soit la configuration du cœur adoptée, la production de plutonium peut vraisemblablement être d'une dizaine de kilos par an.

Un réacteur de recherche type Osirak peut donc produire du plutonium⁽³⁾. Il paraît cependant difficile qu'une telle production ne soit pas détectée par des contrôleurs, ce qui suppose par contre que des inspections sérieuses aient lieu et à un rythme rapproché.

(1) En fait, un bidon d'eau lourde a été ajouté pour approcher les performances d'un autre réacteur de Saclay : Orphée.

(2) En Irak même, le gouvernement s'attaque à certains scientifiques accusés d'être réactionnaires. C'est ainsi, en particulier, qu'en 1980 le directeur du centre de recherches nucléaires, Hussein Sharistani, et un de ses subordonnés, D. Jaffar, ont été jetés en prison ; le premier est condamné à mort.

(3) Voir sur le problème Osirak le document rédigé par G. Amsel, J.-P. Pharabaud et R. Sené, publié dans les *Temps modernes*, septembre 1981.



Osirak, en construction. Ce réacteur fut bombardé par l'aviation israélienne le 7 juin 1981. (Cliché Marc Riboud).

Les pays industrialisés portent la responsabilité du développement de l'arme nucléaire dans les pays en développement.

Gobain T.N. signe un contrat d'étude conceptuelle pour une usine de 100 tonnes par an. Parallèlement, il est entendu que des ingénieurs pakistanais viendront se familiariser en France avec la technique du retraitement. Peu après l'explosion indienne, l'ambassade d'Islamabad demande au ministère des Affaires Etrangères d'appuyer le financement par le secrétariat au commerce d'une usine Renault (145 MF), d'une usine d'engrais (250 MF) et de l'usine de retraitement (180 MF). A la fin de 1974, Saint-Gobain T.N. signe un contrat pour l'étude de détail de l'usine et la construction, sans attendre l'engagement du Pakistan auprès de l'agence de Vienne. Ce pays jugeait en effet prématuré de signer des accords de contrôle pour une usine qui ne devait démarrer que cinq ans plus tard. C'est à cette époque que les négociations entre la France et le Pakistan commencent à dépasser les frontières des deux pays et le 19 décembre 1974 *Nucleonics Week* titre : «Le Pakistan pourrait commander une usine de retraitement à la France». A cette annonce s'ajoute la dénonciation d'un accord identique passé par la France avec la Corée du Sud. Ces nouvelles sont particulièrement mal venues puisque faites très peu de temps après l'entrevue des présidents Ford et Giscard d'Estaing à la Martinique. La France ne peut alors faire autrement que d'exiger en mars 1975 de Saint-Gobain T.N. d'interrompre toutes relations avec le Pakistan, prenant prétexte de la non signature de l'accord avec l'AIEA. Un an plus tard, l'accord de garantie est signé à Vienne. Mais les Etats-Unis ne l'entendent pas ainsi et le 8 août 1976 Henry Kissinger somme Ali Bhutto de rompre les négociations avec la France, le menaçant s'il n'obtempérait pas de ne plus recevoir d'aide économique (1 milliard de francs en 1976) ni de soutien militaire (une centaine d'avions d'attaque A7 pour un montant de 2,5 milliards de francs). Cependant, il tempère aussitôt cette position en suggérant «la mise en place d'un contrôle international de la future installation à l'image de ce que les Américains et les Iraniens sont en train de mettre au point». Ce plan prévoit la possibilité pour les Etats-Unis d'interdire la construction d'une usine iranienne de retraitement si elle ne satisfait pas aux normes de sécurité américaines, permettant en particulier de pallier le danger éventuel qu'ils voyaient dans l'accord franco-pakistanaï : la possibilité d'une diversion à des fins militaires d'une partie du plutonium retraité. Quelques mois après, Ali Bhutto, qui n'avait pas cédé, est renversé par un coup d'Etat militaire, favorisé par les Américains diront certains. Toujours est-il que le gouvernement suivant ne change pas de ligne. Les Américains maintiennent alors leur pression sur les Pakistanais et sur les Français. C'est à cette époque que le Concorde est interdit aux Etats-Unis... Et, progressivement, les Français essayent de renégocier le contrat avec le Pakistan. Le 9 septembre 1977, Louis de Gueringaud, ministre des Affaires Etran-

gères, propose à son homologue pakistanaï, Aga Shahi, «d'étudier des modifications du plan de l'usine afin de permettre le retraitement par des techniques ne dégageant pas de plutonium pur». Le gouvernement pakistanaï refuse, mais peu de temps après, et quelques jours avant sa venue à Paris, le président Carter — satisfait de la bonne volonté dont fait preuve le président Giscard d'Estaing — lui envoie un telex l'avertissant de l'autorisation de laisser le Concorde atterrir à New York. Progressivement, bien qu'aucune information officielle ne soit donnée à ce sujet, la France va se dégager des obligations qui la lient au Pakistan. Il faut cependant attendre le 12 juillet 1979 pour que les deux derniers ingénieurs français quittent le site de Chasma où se poursuivaient les travaux de l'usine de retraitement.

A cette même époque éclate le scandale de Abel Qader Khan, l'espion pakistanaï. L'histoire remonte à 1972, date à laquelle l'ingénieur pakistanaï Khan est embauché par le laboratoire de recherche FDO à Amsterdam. Ce laboratoire travaille en particulier pour URENCO, le consortium hollandais, anglais et allemand qui construit à Almelo l'usine d'enrichissement isotopique par ultracentrifugation. Comme la plupart des deux cents scientifiques et techniciens de FDO, Qader Khan, après avoir subi l'enquête des services de sécurité hollandais, a accès à toute une série de documents concernant l'ultracentrifugation. Ce chercheur a l'occasion de consulter de nombreux ouvrages «classifiés» et passe même un certain temps dans l'usine ultra-secrète d'Almelo. C'est vers la fin de 1975 que Khan quitte le pays pour se rendre définitivement au Pakistan. Peut-être les Pays-Bas n'auraient-ils fait part à personne de cette fâcheuse aventure si, en juillet 1978, un membre du Parlement britannique, Frank Allaun, n'avait demandé des comptes à son gouvernement sur la société Emerson Industrial Controls, antenne d'une compagnie américaine, spécialisée dans la vente d'éléments de base de la technique de la centrifugation. Et l'on découvre ainsi que Emerson vend ces éléments à la compagnie Weargate Ltd située au Pays de Galles, qui elle-même les fait parvenir au Pakistan. Les deux tiers des capitaux de Weargate appartenaient à un couple pakistanaï. C'est alors que le lien avec la disparition de Q. Khan apparaît et le gouvernement hollandais ne peut faire autrement que de l'annoncer au grand jour.

Cet été, un rapport officiel américain annonçait que le Pakistan était prêt à faire la bombe (fig. 6). Des négociations seraient même en cours avec la Chine pour y faire une première explosion souterraine ; d'autres sources, comme le *Financial Times* du 29 avril 1981, indiquaient que le Pakistan construirait un tunnel près de la frontière afghane ! Il paraît sûr qu'aujourd'hui ce pays a toutes les connaissances et moyens suffisants pour la fabriquer et les deux voies, uranium et plutonium, lui sont ouvertes. Celle du plutonium grâ-

ce à la France en particulier. Une note du CEA certifiât en janvier 1975 que le projet pakistanaï était engagé, que Saint-Gobain T.N. y était directement impliqué, que les essais de l'usine avec le matériel radioactif pourraient démarrer en juin 1979. Mais les Belges aussi pourraient être compromis dans l'histoire puisqu'en juillet 1975 un atelier pilote de retraitement était en cours d'installation avec le concours de Belgo-nucléaire. L'uranium irradié qui serait retraité proviendrait quant à lui du réacteur canadien. La voie de l'uranium passe par Qader Khan, par Emerson, mais par le Niger aussi. C'est en effet une tractation à trois pays, France, Niger, Pakistan, et même quatre puisque la Lybie y est impliquée, qui est découverte en 1979 parce qu'un camion contenant de l'uranium en provenance du Niger est retrouvé vide près de la frontière de la Lybie. Aussitôt, en raison des liens militaires existant entre la Lybie et le Pakistan, on a soupçonné que cet uranium avait été détourné par la Lybie au profit du Pakistan. Mais il apparaît rapidement, et de source officielle, que l'uranium des mines nigériennes d'Arlit et Akouta, dont l'exploitant principal est la COGEMA, filiale du CEA, est dirigé pour la plus grande part vers la France à partir de Cotonou, port du Bénin d'Afrique de l'Ouest, mais aussi dans une quantité moindre vers la Lybie et le Pakistan. Il ne manquait que les usines d'enrichissement. C'est chose faite selon le *Financial Times* du 14 août 1979 puisque, d'après un de ses correspondants à Islamabad, une unité de séparation isotopique serait installée à Kahuta près de la capitale et une autre fonctionnerait déjà à Sihala, sur la route de Lahore.

Après le Pakistan, la Corée du Sud et Taïwan.

De la même façon que le Pakistan peut se sentir menacé par l'Inde, la Corée du Sud ne s'est jamais sentie en sécurité à côté de la Corée du Nord. Une des raisons pour que, dès le début de 1972, elle négocie avec Saint-Gobain T.N. l'achat d'une installation pilote de retraitement. Cette négociation aboutit vers la mi-1972 à la remise au CEA d'un projet d'accord de coopération pour la construction d'une importante usine de retraitement. Au début de l'année suivante, les perspectives de coopération sont étendues à la fabrication d'éléments combustibles. Cependant, cette coopération est accompagnée par la demande du ministre des Affaires Etrangères français de l'engagement du gouvernement coréen à placer ces installations (retraitement et fabrication du combustible) sous le contrôle de l'AIEA. Un contrat est effectivement signé en 1973 entre Saint-Gobain T.N. et l'institut de l'énergie atomique de Corée du Sud pour un montant de 30 millions de dollars, un accord France-Corée-AIEA devant être ultérieurement conclu sur le problème du contrôle. Il n'y a guère de traces sur les tractations qui ont dû se poursuivre pendant les deux années suivantes, mais bru-



La centrale nucléaire KANUPP à Karachi est une centrale CANDU, dont la conception a été fondée sur celle de la première centrale nucléaire du Canada. Elle fonctionne depuis le début des années 1970.

2. Si l'on voulait vraiment faire de l'électricité nucléaire

■ La filière qui paraît optimisée pour la production d'énergie électrique est la filière canadienne CANDU. Ces centrales utilisent de l'oxyde d'uranium naturel, ce qui évite d'avoir recours à des services d'enrichissement. Elles chargent et rechargent leur combustible en continu ce qui explique leur production réelle d'électricité fort élevée. Enfin, elles sont beaucoup moins uranivores que les centrales à uranium en-

richi (étant donné la présence d'eau lourde indispensable au fonctionnement des CANDU). C'est cette dernière caractéristique qui est la plus importante pour le développement d'une politique d'indépendance énergétique à long terme. Ainsi, alors que les centrales à uranium enrichi développées en France (centrales PWR pour pressurised water reactors) consomment 100 en uranium naturel, les centrales CANDU n'en consomment que 75. Si l'uranium est faiblement enrichi à 1,2 % (au lieu de 0,7 pour l'uranium naturel), les CANDU utilisent seulement 53 en uranium naturel. Un pays comme la France, disposant actuellement officiellement de 360 000 tonnes d'uranium naturel (120 000 tonnes de réserves nationales exploitables économi-

quement et 240 000 tonnes contrôlées à l'étranger), pourrait alimenter le programme nucléaire prévu par le parti socialiste⁽¹⁾ jusqu'en l'an 2050 sans retraitement et recyclage du plutonium. L'utilisation de ces 360 000 tonnes d'uranium dans des centrales à eau lourde sous la forme enrichie à 1,2 % permettrait quant à elle de réduire la consommation actuelle d'un facteur 2 et d'alimenter le même programme jusqu'en l'an 2110.

La production d'eau lourde réclame des usines spécialisées dont le coût n'est cependant pas aussi élevé que celui des usines d'enrichissement de l'uranium.

(1) «Energie : l'autre politique».

talement, le 12 juin 1975, dans une interview publiée par le *Washington Post*, le président sud-coréen Park Chung Hee déclare que si la protection du parapluie nucléaire américain lui était retiré, son pays se doterait de son propre armement nucléaire. «Nous en avons les moyens» affirme-t-il. Les réactions ne se font pas attendre et le *New York Times* du 30 octobre 1975 indique que «la décision prise par la France de vendre à la Corée du Sud des matériels et la technologie pour produire du plutonium militaire vient de faire franchir à l'humanité un grand pas vers la prolifération mondiale des armes nucléaires. Si la Corée du Sud se dotait d'un armement nucléaire, la Corée du Nord pourrait être amenée soit à l'attaquer soit à acquérir elle-même des armes nucléaires, ce qui risquerait d'inciter le Japon à en faire autant». Enfin, des «pressions qui frisent la menace» ont été, selon le *New York Times* du 1^{er} février 1976, exercées par le gouvernement américain sur la Co-

rée du Sud, qui décide d'annuler le contrat passé avec Saint-Gobain T.N. Pendant ce temps, le Canada signe avec la Corée du Sud un accord de vente pour un réacteur à uranium naturel et eau lourde. Quant aux installations pilotes négociées avec la France, ont-elles été suffisamment mises en chantier pour que Séoul puisse en tirer profit comme le disait dès 1975 le président sud-coréen ? Difficile de le savoir pour le moment. Ce qui est clair c'est que la Corée du Sud est un champ où s'affrontent Américains, Canadiens et Français pour l'exportation du nucléaire «civil». Depuis un certain temps déjà, la société américaine Westinghouse était présente sur le marché sud-coréen, mais c'est en août 1979 qu'elle emporte la première vente importante de deux centrales nucléaires de 1 000 MWe chacune. Il est vrai que la banque américaine Eximbank apportait un important soutien à cette firme en finançant directement près de 85 % du coût des équipements achetés

aux Etats-Unis ainsi que de certains travaux locaux. La France prend sa revanche un an plus tard car la société Framatome obtient la commande de deux centrales d'une même capacité (1 000 MWe). A ce contrat s'ajoute la garantie par la France de fournir l'uranium nécessaire au fonctionnement de ces centrales pendant dix ans à dater de 1986 et de former des ingénieurs coréens (certains sont en ce moment à Framatome).

Pour retracer l'histoire de Taiwan qui sera la dernière dans ce chapitre plus spécifiquement consacré aux «histoires à scandale», peu de documents sont passés dans le domaine public. Cette histoire remonte à 1969, date à laquelle les Etats-Unis refusent de vendre à Formose l'usine de retraitement qu'elle lui a demandée. C'est vers 1974 que le *Canard Enchaîné* dévoile que Saint-Gobain T.N. a repris le projet et que des ingénieurs et du matériel français sont arrivés à Formose. Un article de presse qui reste sans suite, jusqu'à ce

Une centrale et sa première charge de combustible se vendent en moyenne près de 5 milliards de francs. Une aubaine pour le pays qui emporte le marché !

qu'un article de la *Washington Post* du 8 juin 1976 signale la disparition de dix barreaux de combustible contenant 500 grammes de plutonium du réacteur de recherche de Taïwan. Les inspecteurs de l'AIEA qui s'en étaient rendu compte s'étaient fait répondre que les barreaux avaient été transférés à un autre endroit. Et trois mois plus tard, le même *Washington Post* annonce qu'une petite usine de retraitement du combustible irradié provenant des réacteurs de recherche et des centrales de puissance fonctionnerait depuis un certain temps dans l'île de Formose. Ce communiqué indique par ailleurs que «plus de 700 techniciens nucléaires ont été formés aux Etats-Unis et que, de plus, un scientifique a travaillé pendant un an dans un centre américain de Chicago, étudiant les problèmes de retraitement». Comme le précise la revue *Nuclelec* le 3 septembre suivant, l'information a été confirmée le 30 août de source officielle américaine. Le plus grand secret a été tenu autour de ce projet où la France semble avoir joué un rôle de premier plan.

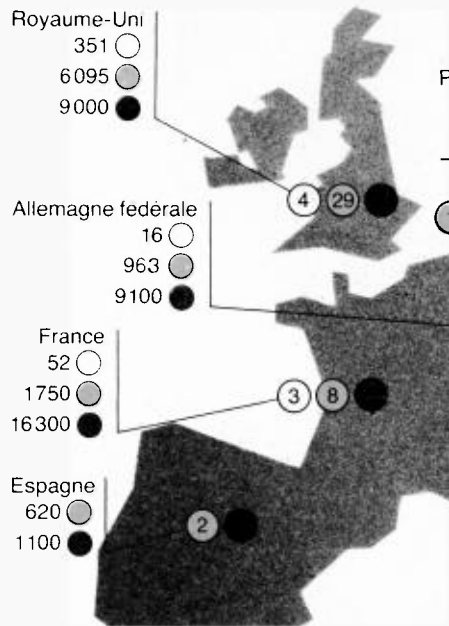
Une preuve peut en être une note adressée le 5 février 1973 au service scientifique du ministère des Affaires Etrangères, par B. Goldschmidt, directeur des relations internationales du CEA. Celui-ci, faisant état d'une réaction déjà engagée lors de la fourniture d'un laboratoire de retraitement, pensait en effet qu'il serait regrettable que la France n'en tire pas les fruits et ceci d'autant plus que l'industrie allemande semblait s'intéresser aussi vivement au projet. Cet avis suivait de peu les craintes qu'avait formulées, lors de la réunion AIEA du 15 janvier, le représentant de la Grande-Bretagne, M. Jackson, au sujet d'une éventuelle usine de retraitement, sans toutefois citer nommément aucun groupe industriel européen : «Il n'est pas certain que des contrôles adéquats puissent être appliqués à une telle usine ; — l'existence de matières nucléaires non contrôlées dans un pays qui éprouve des craintes pour sa survie indépendante présenterait un risque grave de détournement à des fins non pacifiques ; il serait utile que les Etats susceptibles de fournir l'installation se mettent d'accord sur un embargo».

Ni la pression morale qu'a essayé d'exercer la Grande-Bretagne par la suite sur les pays européens, ni la pression politique qu'ont effectivement fait subir les Etats-Unis à Formose n'ont empêché que Taïwan ait son usine de retraitement. Malgré cette réalité, les Etats-Unis n'ont pas interrompu leurs relations avec Formose comme on faisait état l'*International Herald Tribune* du 26 décembre 1978 : «Sur le plan de l'énergie nucléaire civile, Formose et les Etats-Unis entretiennent une coopération étroite. Une centrale fournie par les Américains est déjà opérationnelle et cinq autres sont en commande ou en construction. Toute tentative d'«orientation stratégique» pourrait selon le contenu du Traité de Non-Prolifération porter atteinte à cette coopération technique, ce que ne semblent pas souhaiter les offi-

ciels américains». Et c'est peut-être cette dernière opinion qui explique le peu de bruit qui se soit fait autour de la mort d'un inspecteur français de l'AIEA en service à Taïwan le 30 janvier 1978. Pierre Noir, spécialiste des problèmes de retraitement, ancien ingénieur à l'atelier pilote de Marcoule, est mort — selon les déclarations officielles — par électrocution, alors qu'il branchait dans une centrale une caméra de télévision. Un accident de travail tout à fait original ? ou la complicité du silence qui unit de fait tous les pays, vendeurs ou acheteurs, impliqués dans la concurrence internationale ? Il est vraisemblable que nous ne le saurons jamais et peut-être, comme le dénonce un document de la CFDT adressé à François Mitterrand à propos de certains dossiers du CEA, les traces de l'enquête qu'a dû mener l'AIEA sur la mort de son inspecteur ont-elles déjà disparu ?

Des affaires financières considérables.

Il est a priori assez étonnant de voir la France impliquée dans la plupart des grandes affaires «proliférantes» de ces dernières années. Pourquoi le Commissariat à l'énergie atomique et Saint-Gobain T.N. ont-ils donc promu la vente d'usines de retraitement à l'étranger ? Le contrôle dans une usine de retraitement ne peut s'exercer valablement, comme nous allons bientôt le voir, sur la totalité du plutonium. Tous les pays ayant l'expérience industrielle du retraitement le savent bien et le 10 août 1976 H. Kissinger ne s'est pas fait faute de le rappeler. Sur le plan commercial, la vente d'une usine de retraitement est peu importante à l'échelle des contrats nucléaires : quelques centaines de millions de francs pour une usine de cent tonnes par an par exemple alors que le coût d'une centrale énergétique se chiffre en milliards. Par contre, un tel accord se conçoit très bien s'il conditionne la vente simultanée de centrales de puissance comme ce fut le cas pour le fabuleux contrat germano-brésilien. En 1975, en effet, l'Allemagne fédérale passait un accord avec le Brésil pour la construction de huit centrales à uranium enrichi de 1 300 MWe, une usine d'enrichissement d'uranium, une usine de fabrication de combustibles et une usine de retraitement de combustibles irradiés. Ce marché était estimé à l'époque à plus de 50 milliards de francs répartis sur dix à quinze ans. Cependant, fin 1979, la société brésilienne Electrobras réévaluait le potentiel hydraulique du Brésil qui s'avérait considérable. Parallèlement, au cours des trois ans passés, le coût global du nucléaire était multiplié par trois, et le nucléaire devenait de fait trois fois plus cher que l'hydraulique. La nouvelle conjoncture entraîna l'opposition de scientifiques et responsables politiques et économiques brésiliens. Cette opposition, s'ajoutant à la pression des Etats-Unis exercée tant sur le Brésil que sur l'Allemagne, amena de fait un blocage du programme. Il semble aujourd'hui que seules deux centrales,



sous contrat allemand, verront le jour, ANGRA 2 et 3, et encore la seconde est-elle incertaine !

Pour l'affaire pakistanaise, une explication a souvent été avancée. La France, chacun le sait, réalise des chiffres d'affaires fabuleux au Moyen-Orient avec la vente d'avions Dassault. Or l'exportation d'avions militaires vers ces pays nécessite, pour l'entraînement, des pilotes chevronnés et ce sont précisément des Pakistanais qui assurent l'entraînement des pilotes arabes... Serait-ce en vendant une usine de retraitement au Pakistan que la France remercie ce pays de son concours efficace... ? Mais ceci n'explique pas Formose et la Corée du Sud.

Dans les différentes opérations, on peut en fait noter plusieurs attitudes. Celle, commerciale, de Saint-Gobain T.N. qui, appuyée par le groupe Saint-Gobain Pont-à-Mousson, utilise au mieux de ses intérêts ses appuis au CEA et dans les différents ministères. Celle, de prestige, du CEA qui retire peu de bénéfice de ses ventes et n'informe pas le ministère des Affaires Etrangères de l'impossibilité pratique de contrôler le plutonium dans une usine de retraitement. Celle enfin des ministères, et en particulier celui des Affaires Etrangères qui pourrait avoir été abusé par Saint-Gobain T.N. et le C.E.A. Si les Etats-Unis n'étaient pas intervenus dans les affaires de la France, il est fort probable que Saint-Gobain T.N. aurait continué, comme par le passé, à exporter des usines de retraitement sans que l'opinion publique n'en ait été avertie. Cependant, la mise au grand jour de ses tractations nucléaires ayant porté un préjudice certain à Saint-Gobain Pont-à-Mousson et au gouvernement français, Saint-Gobain T.N. a été lâchée par la société mère et

(7) Etats-Unis, Union Soviétique, Canada, Grande-Bretagne, République Fédérale d'Allemagne, France, Japon, auxquels s'ajouteront Pologne, République Démocratique d'Allemagne, Suisse, Tchécoslovaquie, Suède, Belgique, Pays-Bas, Italie.

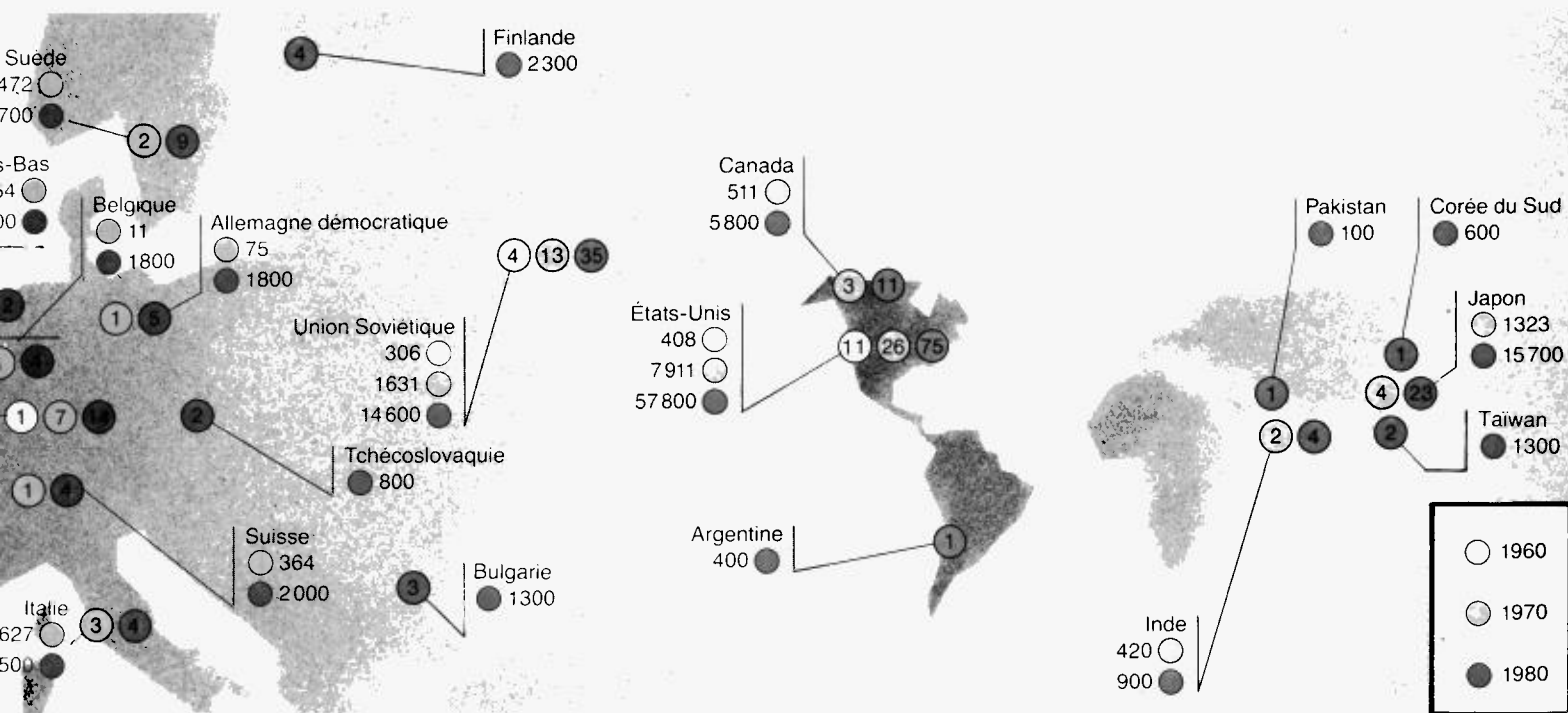
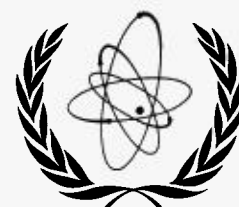


Figure 5. Sur cette planisphère est figurée la puissance électrique mondiale d'origine nucléaire en MWe bruts pour les années 1960, 1970 et 1980. Chaque fois est indiqué entre parenthèses le nombre de tranches nucléaires, une tranche pouvant regrouper sur un même site plusieurs centrales. Les chiffres des années 1960 et 1970 sont tirés du livre de la CFDT : *Le dossier électronucléaire* (Seull, 1980) ; ils font référence à la puissance électrique installée. Ceux de 1980 proviennent du Commissariat à l'Energie Atomique (DPg/Banque de données ELEC-NUC.CEA/PDg), ils prennent aussi en compte les unités qui vont être sous peu raccordées au réseau électrique de chacun des pays.

absorbée par la COGEMA, son principal client. En effet, un décret du 7 septembre 1977 a autorisé la COGEMA à acquérir dans la limite de 13 MF une participation de 60 % au capital de Saint-Gobain T.N. Ainsi est née la SGN : Société Générale pour les Techniques Nouvelles. La COGEMA, société de droit privé, acquiert par là même la maîtrise de la construction des usines de retraitement dont la réalisation est étroitement liée aux contrats passés avec les pays européens et le Japon.

S'il n'est pas facile d'appréhender l'ensemble des raisons expliquant l'attitude de la France, on peut encore se demander pourquoi les pays industriels ont fait preuve d'un tel laxisme dans leur attitude par rapport à la France mais aussi dans leur propre politique d'exportation ? C'est sans doute une raison principalement économique qui est susceptible d'expliquer ces comportements. La vente d'équipements nucléaires peut porter sur des sommes considérables : 4 milliards de francs environ pour une centrale à uranium enrichi de 1 000 MWe et sa première charge. La compétition est acharnée entre les différents pays exportateurs. Aussi ces pays acceptent-ils des accords parfois peu intéressants économiquement à l'origine et parfois aussi dangereux sur le plan de la prolifération dans l'espoir d'acquiescer ultérieurement des marchés importants. Il y a aussi tout simplement des trocs : un pays veut du pétrole et l'autre veut du nucléaire par exemple. Cependant, pour paraître conformes à la morale politique ambiante,

les exportateurs de nucléaire se doivent de mettre en place des verrous en apparence suffisants pour ne pas favoriser la prolifération des armes nucléaires. Et pour faciliter leur relation avec les pays exportateurs, les pays importateurs se doivent, en apparence, d'y souscrire. Ces verrous sont aujourd'hui symbolisés par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique.

Un outil international de surveillance.

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), dont le siège est à Vienne, existe depuis 1957. Selon son statut, son objectif est « de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ». L'une de ses principales fonctions est d'appliquer des mesures visant à garantir que l'équipement et les matières nucléaires destinés à des fins pacifiques ne sont pas détournés à des fins militaires. Les Etats intéressés passent des accords avec l'AIEA. Ces accords reposent invariablement sur un engagement fondamental pris par l'Etat, aussi c'est à lui qu'il appartient de faire la preuve que les matières nucléaires et le matériel ne sont pas utilisés pour des activités qui vont à l'encontre de l'engagement fondamental. Mais comment prouver, techniquement, d'une façon convaincante qu'une action n'a pas eu ou ne va pas avoir lieu ? C'est en 1970 que l'Agence a dégagé les garanties qui sont appliquées

aujourd'hui aux différents stades du cycle du combustible. Cette même année entrait en vigueur le Traité sur la Non-Prolifération des armes nucléaires (TNP). Initié à l'origine par les Etats-Unis, soutenus par la Grande-Bretagne et l'Union Soviétique qui cherchaient à limiter le club des puissances nucléaires militaires aux cinq premiers ayant fait des explosions, le TNP compte aujourd'hui cent quatorze membres. Cependant nombre d'Etats importants en sont absents : ainsi, outre la France et la Chine qui ont toujours refusé de s'y associer, le Brésil, l'Argentine, l'Inde, le Pakistan, Israël, l'Afrique du Sud, l'Espagne, l'Algérie et l'Arabie Saoudite. Les Etats signataires s'engagent à ce que l'énergie nucléaire ne soit pas détournée de ses utilisations pacifiques vers la fabrication de dispositifs explosifs nucléaires. Ainsi les Etats dotés d'armes nucléaires ne doivent-ils aider aucun pays à s'en procurer et les Etats sans armes nucléaires ne doivent-ils eux en acquiescer ou en construire. Par ailleurs, les Etats concluent avec l'AIEA des accords pour le contrôle de tout leur nucléaire civil. Parallèlement au TNP est né en 1975 le Club de Londres. Il réunissait, à l'initiative des Etats-Unis, les sept principaux pays exportateurs (7) dans l'objectif de coordonner leur politique d'exportation de matières et d'équipements nucléaires. Il regroupe aujourd'hui quinze pays (7) et ses directives reprennent d'une part les règles établies par le TNP, ceci essentiellement à l'usage de la France en ce qui concerne

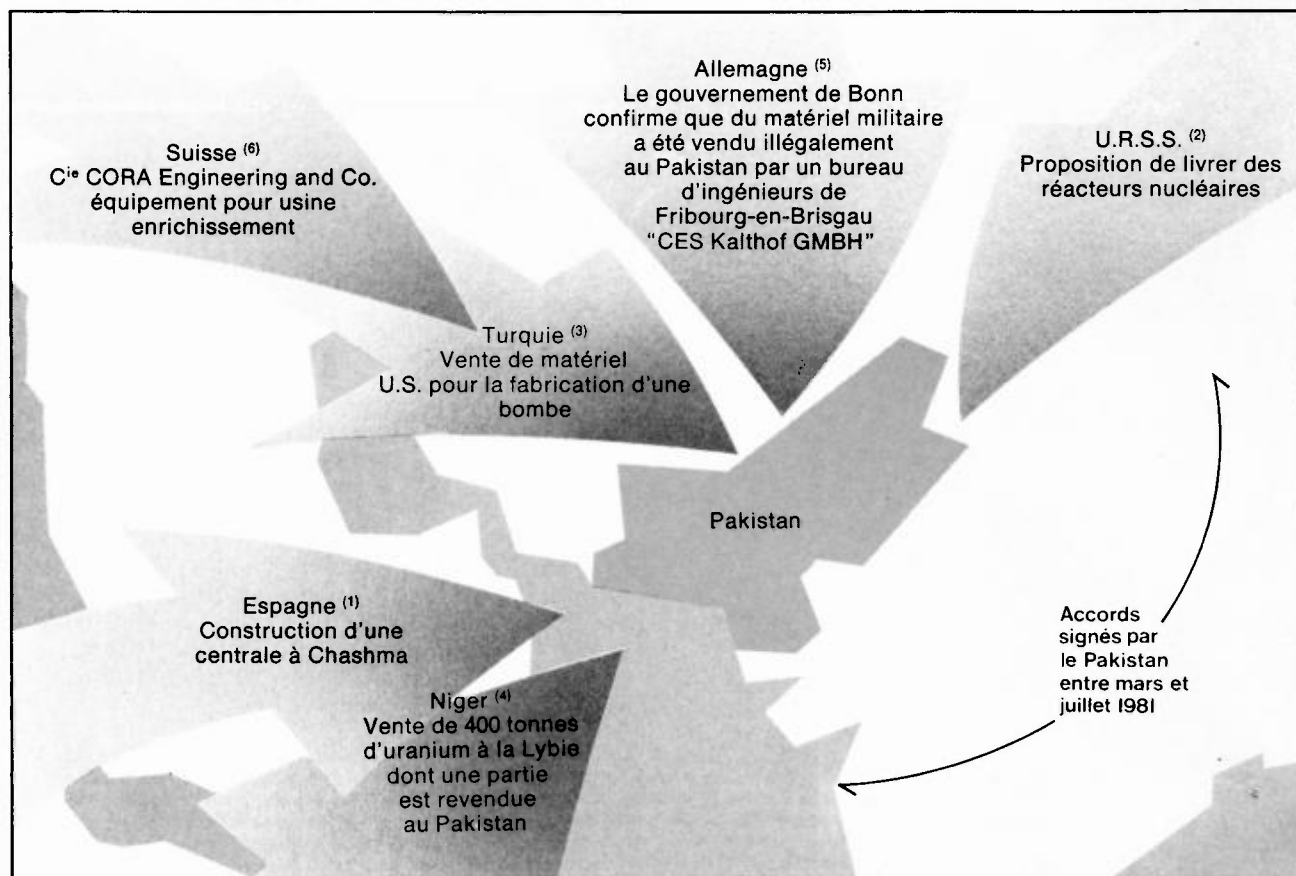


Figure 6. C'est au début des années soixante-dix que le Pakistan a signé son premier contrat nucléaire. Depuis cette époque il a multiplié les accords avec de nombreux pays. Cette dernière année simplement, comme il est indiqué ici, le Pakistan a passé des accords, connus officiellement, avec six nations différentes. (1) AFP, 7 avril 1981. (2) *Financial Times*, 8 mai 1981. (3) *Financial Times*, 19 juin 1981. (4) *Intern. Herald Trib.*, 11 avril 1981. (5) AFP, 15 juillet 1981. (6) *Herald Tribune*, 20 mars 1981.

le contrôle par l'AIEA, et renforcent les contraintes de contrôle pour les installations dites sensibles (principalement enrichissement et retraitement). L'AIEA, qui dispose aujourd'hui de cent cinquante inspecteurs «internationaux», est ainsi devenue l'outil technique universel dont se munissent les Etats pour ne pas accélérer l'escalade nucléaire militaire.

Les techniques de l'AIEA doivent permettre un contrôle rigoureux des matières nucléaires de l'installation soumise à surveillance. Il s'agit de vérifier que les quantités d'uranium, de plutonium et de produits de fission sont bien celles qui correspondent au fonctionnement indiqué de l'installation. Le contrôle peut faire appel à des analyses destructives : une prise d'échantillon permet de vérifier par des méthodes physico-chimiques la conformité de l'élément. Ce type de contrôle est très précis mais doit être fait dans un laboratoire spécialisé : il ne peut donc être réalisé sur place. Par ailleurs, les résultats ne sont obtenus qu'après plusieurs semaines. Si la matière nucléaire est enfermée dans un dispositif ou une gaine nucléaire, il est impossible de procéder à un prélèvement. On mesurera alors, par exemple par spectrométrie, les rayonnements gamma émis par le plutonium ou

l'uranium. Il est aussi possible de mesurer l'émission neutronique due à la fission spontanée à l'aide d'un compteur à coïncidence à haut flux de neutrons. Dans le cas d'un combustible irradié, l'observation visuelle de la lumière bleue émise par ce dernier par effet Tcherenkov permet de connaître son temps de séjour dans le cœur. L'intensité de la lumière étant proportionnelle à l'irradiation du combustible, elle permet aussi de contrôler que le combustible n'est pas factice. Enfin, on peut aussi vérifier l'intégrité de scellés disposés préalablement. Des scellés modernes sont à l'étude permettant une vérification par test optique, ultrasons ou électronique. Les inspecteurs peuvent aussi placer des caméras qui prennent des clichés à des intervalles de temps donnés, toutes les dix à vingt minutes. Des films spéciaux à grande capacité (7 200 images) permettent une surveillance de cinquante à cent jours. Certains Etats exigent que le film soit développé à l'intérieur du pays et parfois même de l'installation. Des caméras de type polaroid sont à l'étude et des techniques plus sophistiquées, comme le détecteur de mouvement, sont en cours d'élaboration afin d'enregistrer définitivement les «images utiles» tout en augmentant la fréquence

de des clichés. Enfin, un contrôle à distance, reporté au siège de l'AIEA, système «RECOVER», permettrait une alarme immédiate en cas de fraude ou d'anomalies. Ce système est en cours d'essai dans huit pays (8).

La prolifération, tare inéluctable du nucléaire civil.

Dans les jours qui ont suivi le bombardement de Tamuz par les Israéliens, de nombreuses voix se sont élevées contre l'inefficacité des contrôles de l'AIEA. Les critiques étaient de différente nature. De caractère technique tout d'abord : les contrôles peuvent-ils être rigoureux ? L'objectif du contrôle est de «détecter rapidement le détournement de quantités significatives de matières nucléaires des activités pacifiques vers des activités militaires», il s'agit donc de quantifier les matières nucléaires. Or, selon les textes mêmes de l'AIEA, «étant donné l'incertitude inhérente aux mesures, il y a en général une certaine différence entre la quantité qui «devrait» être présente et celle qui est présente». Par ailleurs, «certaines parties du stock ou pertes de matières ne peuvent être mesurées». Dans les installa-

(8) Australie, Autriche, Bulgarie, Canada, République Fédérale d'Allemagne, Japon, Grande-Bretagne, Etats-Unis.

(9) Alf Larsson, AIEA, vol. 17, n° 2, avril 1975.



tions de retraitement par exemple, les inspecteurs contrôlent les résultats de mesure de la teneur en uranium et plutonium des solutions de nitrate d'uranyle entrant dans l'usine après dissolution du combustible et clarification des solutions. Ils mesurent par ailleurs le poids de l'oxyde de plutonium sortant. Mais ils ne peuvent pas mesurer la teneur en plutonium à l'entrée car il leur faudrait sur place des laboratoires spécifiques, ce qui n'est pas le cas. Ainsi ne connaissent-ils donc pas la quantité de plutonium entrant ; celle-ci est laissée à la discrétion de l'exploitant qui réalise les analyses d'entrée dans ses propres laboratoires. On pourrait se dire qu'*a priori* la quantité de plutonium créé dans un combustible connu ayant été irradiée dans une centrale connue devrait être elle aussi parfaitement connue. Or ce n'est pas le cas, ces quantités sont évaluées à partir de codes de calcul imprécis, et la marge d'incertitude sur la quantité de plutonium contenue dans un combustible irradié peut se situer aux alentours de 20 à 25 %. La teneur en plutonium ne peut donc être établie avec certitude qu'après dissolution du combustible⁽⁹⁾. Cette valeur occulte néanmoins la fraction collée à la gaine du combustible et celle relative aux particules insolubles restant après l'attaque nitrique (quelques %). Par ailleurs, dans les usines de retraitement, comme dans celles d'enrichissement, une partie du plutonium dans l'un, de l'uranium dans l'autre, se dépose sur les différentes parois des installations. Ainsi se produisent des pertes en plutonium et uranium non chiffrables. A l'usine de retraitement d'Eurochemie en Belgique par exemple, qui était pourtant une usine contrôlée par une organisation européenne, Euratom, des pertes de 6,5 % furent déclarées officiellement en 1976. Les pertes en plutonium ont été encore bien supérieures à l'usine de Windscale en Grande-Bretagne puisqu'elles atteignaient presque 8 %⁽¹⁰⁾. Dans un deuxième ordre d'idées, le contrôle de l'AEIA s'effectue uniquement sur les installations pour lesquelles un accord spécifique est passé. Ainsi, par exemple, peut-on relever la déclaration du 9 juin 1981 de M. Sigvard Eklund, directeur général de l'AIEA :

«D'après nos dossiers, les installations nucléaires qui existent en Irak sont les suivantes : IRT 2000, réacteur de recherche fourni par l'Union Soviétique, Tamuz 1 et 2, fournis par la France — un emplacement de stockage séparé où est stocké de l'uranium naturel et appauvri». Huit jours plus tard, la note Inter-Info du CEA indiquait que la société italienne Snia Techini installait, depuis 1978, des laboratoires de recherche pour le retraitement de produits nucléaires dans le secteur médical, chimique et industriel. Autre exemple : sur les quatre centrales indiennes en exploitation, seule celle de Tarapur peut recevoir une inspection internationale. Et, tout récemment, New-Delhi vient d'annoncer que l'Inde n'autoriserait aucune inspection internationale de sa cinquième centrale nucléaire⁽¹¹⁾. Le sénat américain,

quant à lui, s'est particulièrement insurgé sur la façon dont s'effectuent ces contrôles, prenant appui sur les déclarations d'un inspecteur américain à l'AIEA, Roger Richter, faites le 19 juin après le bombardement israélien de Tamuz. Selon ce dernier, un pays a le droit de refuser un inspecteur si sa nationalité ne lui convient pas ; ainsi a-t-il témoigné que, depuis 1976, toutes les inspections en Irak ont été effectuées par des Soviétiques ou des Hongrois. Par ailleurs aucune inspection impromptue ne peut être faite, les gouvernements doivent être prévenus selon les cas quelques jours voire quelques semaines à l'avance et l'inspecteur ne peut pénétrer dans un pays sans son visa⁽¹²⁾. Dans le cas de l'Irak par exemple, Sigvard Eklund a précisé que «la dernière inspection de garanties avait eu lieu en janvier de cette année. Une nouvelle inspection qui devait être effectuée les 7 et 8 juin a été reportée à la fin de ce mois à la demande des autorités irakiennes car les hauts fonctionnaires compétents étaient à ce moment à Vienne».

Après l'affaire irakienne, les Etats-Unis ont donc violemment critiqué l'AIEA, d'autres pays comme la France par contre, comme me l'a dit André Petit, estiment que l'AIEA fait tout ce qui est en son pouvoir pour éviter la prolifération nucléaire. Serait-il si simple de penser que le lobby antinucléaire présent au Sénat depuis le temps de Carter, doublé du lobby pro-israélien, suffit pour expliquer la position des Etats-Unis ? Et pourrait-on penser que la France est convaincue que des verrous techniques existent pour empêcher le détournement du nucléaire pacifique à des fins militaires ? Certes non. Mais le jeu de la domination politique et économique à l'échelle mondiale de certains pays sur d'autres, du Nord sur le Sud comme chacun le dit aujourd'hui, devient tous les jours un peu plus complexe et nul ne sait comment enrayer l'escalade des contradictions. Six pays ont aujourd'hui officiellement démontré qu'ils maîtrisaient l'arme atomique, deux autres sont fortement soupçonnés de l'avoir et plusieurs dizaines de pays possèdent le combustible pour la fabriquer. C'est ainsi que le 14 juillet dernier, M. Donnelly, président de «l'Energie Atomique du Canada» pouvait déclarer à Ottawa devant la commission parlementaire sur les relations entre le Canada et l'Amérique Latine : «Je crois que l'Argentine a des connaissances technologiques suffisantes pour mettre au point une arme nucléaire». Aujourd'hui la stratégie politique mondiale repose sur la garantie offerte par les Etats-Unis et l'Union Soviétique aux pays qui n'ont pas la bombe de les protéger de leurs voisins et du reste du monde par leur parapluie atomique. C'est la doctrine que reprend à son compte et proclame haut et fort M. Reagan, le nouveau président des Etats-Unis. Mais, comme pour reconnaître d'emblée l'irréalisme de ses propos, il déclare en même temps que plus nombreux seront les pays à posséder la bombe atomique, plus faible sera le danger qu'elle

soit effectivement utilisée. De son côté, B. Goldschmidt, ancien directeur des relations internationales du CEA et ancien gouverneur adjoint de l'AIEA, l'un des maîtres d'œuvre de toutes les affaires françaises du retraitement, m'a dit : «on ne peut que retarder le moment où de nouvelles bombes vont exploser». B. Goldschmidt justifie ainsi d'une certaine façon la doctrine française des années soixante-dix d'exportation du nucléaire qui peut se résumer admirablement avec cette phrase d'A. Giraud : «il est tout à fait immoral d'imaginer que l'utilisation de l'énergie nucléaire à des conditions économiques acceptables puisse être réservée aux seuls pays industrialisés»⁽¹³⁾. La morale voudrait qu'on ajoute que seule la vente à l'ensemble des pays a une chance de rendre les conditions économiques du nucléaire acceptables. Mais l'époque n'est plus de répondre à A. Giraud. Quelles que soient la réalité et les contradictions flagrantes des propos tenus, chacun s'accroche encore au mirage d'un outil technique et politique pouvant éviter que «la coopération internationale soit détournée de son objet»⁽¹³⁾.

Cet outil, l'AIEA, survivra tant que les pays du Sud sont dépendants des pays du Nord pour la transformation des matières nucléaires et pour la technologie elle-même. Accepter les conditions de l'AIEA est encore la seule façon pour de nombreux pays d'acquiescer la maîtrise du nucléaire. Mais déjà certains d'entre eux s'organisent. Les pays arabes se sont réunis en juin dernier à Damas pour leur première conférence sur l'énergie nucléaire. Le Brésil passe des accords avec l'Irak, le Niger avec le Pakistan. L'Afrique du Sud exporte de l'uranium à Taïwan et en Israël, Israël assiste Taïwan pour le développement d'une fusée pouvant porter des armes nucléaires, Taïwan et Israël travaillent à l'enrichissement de l'uranium en Afrique du Sud⁽¹⁴⁾.

Pendant ce temps, le Sénat américain déplore «l'absence d'un consensus au niveau mondial sur des contrôles effectifs concernant les transferts de technologies nucléaires et sur des mesures permettant d'éviter la mauvaise utilisation de cette technologie». Il souhaite donc que «les Etats-Unis adoptent une position ferme de leadership en durcissant leurs accords d'exportation, en prévoyant des sanctions pour ceux qui violeraient les accords et en précisant la volonté américaine d'établir un nouveau régime nucléaire international»⁽¹⁵⁾. C'est dans ce sens que le sénateur John Glenn a écrit au président Reagan courant juin. Mais, le 4 septembre, *Financial Times* indiquait que non seulement le gouvernement américain n'imposerait plus de restrictions au Japon en ce qui concerne le retraitement de ses combustibles irradiés à Tokai Mura, mais bien plus l'autoriserait à construire une deuxième usine d'une capacité de 1 200 tonnes par an. Est-ce du pessimisme de penser que rien ne peut stopper la prolifération ? Non, c'est simplement du réalisme. ■

(10) *Le dossier électronucléaire de la CFDT*, Seuil, 1980, p. 240.

(11) Inter-Info du CEA, n° 101, 1^{er} août 1981.

(12) En ce qui concerne les relations France-Irak, le visa n'est donné que moyennant l'attestation d'un certificat de baptême.

(13) Entretien avec André Giraud, R.G.N., 266, n° 4, juillet-août-septembre 1977.

(14) *Herald Tribune* du 30 juin dernier.

(15) Hearings au Sénat du 24 juin 1981.

L'étude des oscillations de la surface solaire nous permet enfin de pénétrer dans les couches profondes du Soleil.

Quand le Soleil vibre

Paradoxalement, l'intérieur du Soleil n'était connu, jusqu'à présent, que par application de la théorie de l'évolution stellaire. En effet, notre Soleil n'est qu'une étoile très banale parmi tant d'autres, et pour ce qui concerne sa structure interne, sa proximité ne nous est d'aucun secours puisque ses couches extérieures sont opaques à toute forme de rayonnement électromagnétique, quelle qu'en soit la longueur d'onde. C'est donc l'observation d'un grand nombre d'étoiles de dimensions, de masse, de composition et d'âge différents qui a permis de tester la validité des hypothèses de cette théorie de l'évolution. Appliquée au cas particulier du Soleil, cette théorie permet alors de construire un « modèle » d'intérieur solaire qui doit être en conformité avec ce que l'on peut en voir de l'extérieur : masse, luminosité, rayon, composition chimique de surface.

Les astronomes ne se sont évidemment pas satisfaits de cette situation et ont cherché des moyens autres que les ondes électromagnétiques afin d'obtenir par l'observation des informations directement liées à l'intérieur du Soleil. Après certaines observations dont les résultats ont posé plus de problèmes qu'ils n'en ont résolus, il semble qu'avec l'étude des oscillations de la surface solaire, on puisse enfin pénétrer dans les couches profondes du Soleil. Peut-être comprendrons-nous bientôt le fonctionnement du célèbre cycle de onze ans. Nous n'en sommes encore pas là mais des observations passionnantes réalisées récemment au pôle Sud permettent d'entrer réellement dans la physique solaire.

Des neutrinos à l'aplatissement du Soleil.

La première idée qui ait été mise en œuvre consiste à détecter les neutrinos solaires, particules fantomatiques dénuées de masse et qui sont produites lors des réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium au cœur du Soleil. Capables de sortir du Soleil et d'atteindre la Terre sans absorption intermédiaire, les neutrinos sont évidemment extrêmement difficiles à détecter puisque la presque totalité de ceux qui atteignent la Terre peu-

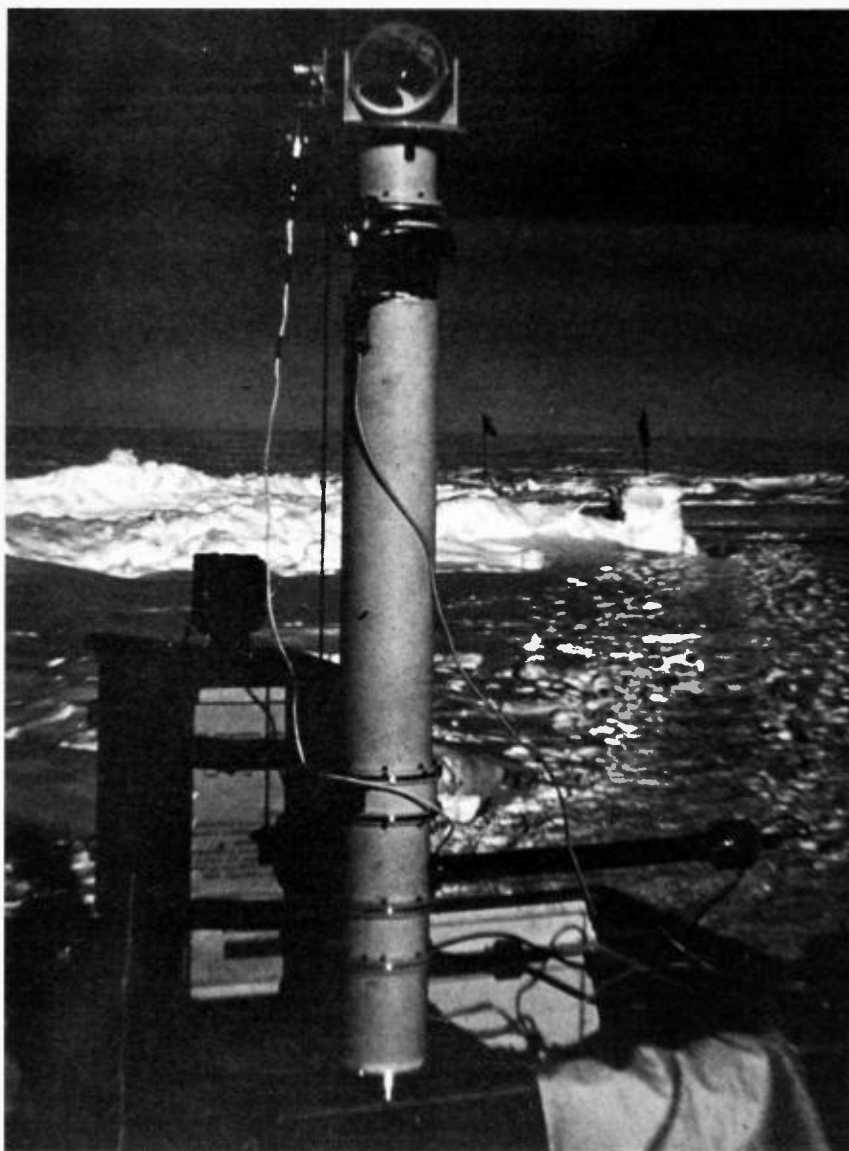


Figure 1. Installé sur la surface des 3 000 mètres d'épaisseur de neige du plateau polaire antarctique, à 8 km du pôle Sud, ce petit télescope a permis d'effectuer les premières observations astronomiques en Antarctique. A 3 400 m d'altitude et par une température estivale moyenne de -30°C , la survie des observateurs était assurée par une cabane de bois de 2 m x 3 m environ, enfouie sous la neige dans une tranchée de 4 m de profondeur à 30 m derrière le télescope. (Cliché Gérard Grec).

vent la traverser sans rien toucher... Cette mesure, effectuée par l'équipe de Davis aux Etats-Unis depuis une quinzaine d'années, a vu sa barre d'erreur se réduire avec le temps et l'accumulation des données, et finalement il a fallu se rendre à l'évidence : on mesure un flux de neutrinos solaires environ trois fois plus faible que celui que l'on peut prévoir à partir des modèles solaires qualifiés de « standard ». La réconciliation de la prévision et de l'observation nécessitait donc de remettre en cause soit la théorie de l'évolution stellaire, soit la physique des particules élémentaires, soit même les deux à la fois. Etant donné l'ampleur des conséquences de l'une ou l'autre de ces remises en question sur l'astrophysique ou même

toute la physique, l'intérêt de l'étude de l'intérieur du Soleil s'est d'un seul coup accru dans des proportions considérables.

La seconde mesure possible, l'aplatissement du Soleil, non seulement n'a pas permis de solutionner le problème des neutrinos, mais n'a fait au contraire qu'amplifier le débat. Liée à la forme des équipotentielles gravitationnelles, la forme plus ou moins aplatie du disque solaire apparent dépend donc de la distribution de masse à l'intérieur ainsi que de la vitesse de rotation dans les couches profondes. Cette mesure, dont le résultat est particulièrement intéressant comme test des théories de gravitation, est encore une fois d'une extrême difficulté en raison

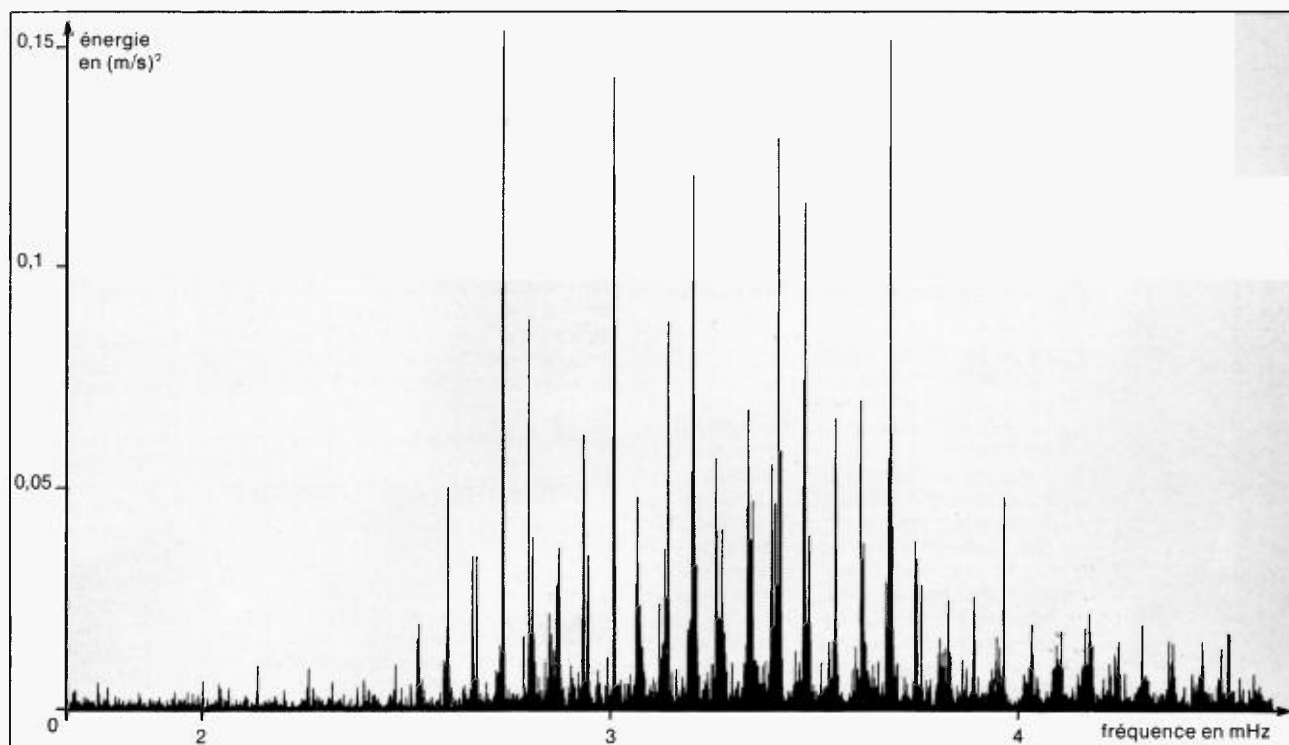


Figure 2. Obtenu à partir d'une observation ininterrompue de 120 heures (5 jours) effectuée au pôle Sud, ce spectre acoustique du soleil, observé pour la première fois par le groupe d'Isaak à Birmingham en 1979, ⁽¹⁾ est obtenu ici avec une résolution qui permet d'identifier plus de 80 modes oscillatoires distincts, dont les périodes se situent entre trois et dix minutes. Leurs amplitudes en vitesse sont comprises entre 4 et 40 cm.s⁻¹ (ce qui représente des mesures de décalage de raie spectrale par effet Doppler inférieur à 10⁻⁶Å!). La comparaison de ces 80 périodes avec celles que l'on peut calculer théoriquement à partir d'un modèle solaire permet d'ajuster les paramètres de ce modèle qui ont vu ainsi leur incertitude diminuer considérablement. C'est un modèle solaire voisin du modèle «standard» qui donne le meilleur accord théorie-observation.

de l'extrême petitesse de cet aplatissement : au moins deux ordres de grandeur plus petit que le simple «flou» du bord solaire dû à sa nature gazeuse, sans parler de notre atmosphère terrestre, à travers laquelle sont faites les observations, et qui aggrave ce flou d'au moins un ordre de grandeur supplémentaire. Actuellement, la vive controverse qui a opposé Dicke et Hill aux Etats-Unis sur l'interprétation de leurs mesures respectives ne permet même pas d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de cet aplatissement.

Interpréter les vagues du Soleil.

C'est dans ce contexte passionné et passionnant qu'est née la sismologie solaire. On savait depuis 1960 grâce aux observations de Leighton ⁽²⁾ en Californie que la surface du Soleil, un peu comme celle de nos océans, est agitée de vagues dont la période caractéristique est de l'ordre de cinq minutes. Mais ce n'est qu'en 1975 que, pour la première fois, les observations de Deubner ⁽³⁾ à l'observatoire allemand de Capri permettaient d'interpréter ces vagues comme la manifestation de surface d'oscillations globales de toute la sphère solaire.

Comme un instrument de musique, en effet, la sphère solaire peut vibrer en un fondamental et de multiples harmoniques. Si l'observation permet d'identifier cer-

tains de ces harmoniques, il est alors possible de développer des techniques d'analyse analogues à celles utilisées en sismologie terrestre. Ainsi les modes de degré élevé observés par Deubner ont-ils pu être utilisés pour restreindre l'incertitude sur notre connaissance de la zone convective. La mesure de ces modes a même atteint un tel degré de raffinement qu'une information sur la rotation des couches situées sous la surface solaire a pu en être déduite. Malheureusement, étant de degré élevé, ces modes ne pénètrent qu'à quelques dizaines de milliers de kilomètres sous la surface (quelques % en rayon) et ne fournissent donc aucune information sur les couches plus profondes. Il est nécessaire pour cela de détecter des modes de faible degré.

Mais l'observateur doit alors surmonter quatre difficultés majeures :

- les instabilités instrumentales, puisqu'il s'agit de mesurer des phénomènes d'amplitude très faible dont les périodes vont de quelques minutes à quelques heures ;
- un bruit de fond dans les mesures dû à la présence de l'atmosphère terrestre, et qui est le plus souvent très largement supérieur au signal que l'on cherche à détecter ;
- un autre bruit de fond présent à la surface du Soleil lui-même. Celle-ci est en effet soumise à des mouvements aléatoires

divers dus à la présence de la zone convective. Ces mouvements, connus sous les noms de granulation, supergranulation, cellules convectives géantes ou encore rotation différentielle, sont autant d'effets détectés comme bruit dans la recherche de mouvements oscillatoires ;

- l'alternance jour-nuit qui, outre l'effet Doppler dû à la rotation de la Terre et les limitations de résolution temporelle qu'elle impose, implique la présence dans tout signal de nombreux harmoniques de la période de 24 heures, qui peuvent être très gênants et mal interprétés.

Depuis 1976, Gérard Grec et moi-même nous sommes spécialisés dans cette recherche de pulsations solaires par effet Doppler, et nous avons attaqué ce problème observationnel en cherchant des solutions optimales aux quatre difficultés ci-dessus ;

- la stabilité spectrale nécessaire est obtenue par l'utilisation de la spectroscopie à résonance optique de sodium, une technique développée et utilisée dans notre laboratoire depuis plus de dix ans. La chaîne électronique de commande et d'acquisition utilise un microprocesseur comme organe central, ce qui a permis de la rendre suffisamment performante pour qu'elle puisse être considérée comme une source de bruit totalement négligeable, tout en constituant un équipement de campagne autonome, ne nécessitant

(1) A. Clavierie, G.R. Isaak, C.P. McLeod, H.B. Van der Raay et I. Roca Cortes, *Nature*, 282, 591, 1979.
 (2) R. Leighton, I.A.U. Symposium 12, 1960, *Nuovo Cimento Suppl.*, 22, 1961.
 (3) F.L. Deubner, *Astron. Astrophys.*, 44, 371, 1975.
 (4) G. Grec, E. Fossat et M. Pomerantz, *Nature*, 288, 541, 1980.

donc pas l'utilisation en temps réel d'un gros ordinateur encombrant ;

— Le « bruit de fond » solaire est minimisé par l'observation Doppler intégrée sur tout le disque. Ceci réduit à leur minimum possible tous les mouvements aléatoires à petite échelle. Ceci rend également les mesures sensibles essentiellement aux oscillations radiales et aux harmoniques sphériques de degré très peu élevé.

Le pôle Sud pour vaincre les parasites.

Les problèmes du bruit de fond atmosphérique et de l'alternance jour-nuit ont reçu une solution originale par l'utilisation du pôle Sud comme site d'observation. Situé à une altitude barométrique de l'ordre de 3 400 m (pression de 680 mb) dans un climat désertique, ce site, qui permet des observations continues de plusieurs jours, a pu pour la première fois être utilisé pour des observations astronomiques grâce à un financement de la National Science Foundation américaine, qui maintient en opération toute l'année une station scientifique américaine située exactement au pôle géographique. Avec l'aide de Martin Pomerantz et Lyman Page de la Bartol research foundation à Newark, université de Delaware, nous avons effectué une expédition de près de deux mois là-bas, du 19 novembre 1979 au 11 janvier 1980. Un mois s'est avéré nécessaire à la mise en place et la mise au point de l'équipement d'observation : nous avons installé un petit télescope (7 cm de diamètre, 160 cm de focale) à huit kilomètres de la station pour rester à l'écart des fumées du générateur diesel alimentant la station en électricité, des avions de ravitaillement, des engins à chenilles et de la pollution thermique en général (figure 1). Notre alimentation électrique était assurée par un autre générateur, pouvant fournir jusqu'à 50 kW et placé à 300 mètres du télescope dans la direction opposée à celle du vent dominant.

La survie des observateurs était assurée par une cabane de 2 x 3 mètres environ, enfouie sous la neige, dans une tranchée de 4 mètres de profondeur, à une trentaine de mètres du télescope. Il était difficile de prendre plus de précautions pour minimiser les effets parasites sur les observations, et c'est donc au-dessus d'un désert de neige plat, très uniforme dans toutes les directions, que 168 heures d'excellentes observations ont pu être effectuées au cours de la première semaine de janvier 1980, dont un échantillon ininterrompu de 120 heures (5 jours). Grâce à la résolution spectrale ainsi obtenue (gain d'un facteur 10 sur toute autre observation précédente) et à la bonne qualité du site, une sensibilité un peu meilleure que 5 cm.s⁻¹ est obtenue dans la recherche d'oscillations de périodes inférieures à 10 minutes (4).

La comparaison détaillée entre les fréquences visibles sur la figure et celles prévues par la théorie a été faite de deux façons différentes (avec et sans approximation asymptotique). Elle a permis

l'identification, sans ambiguïté, de plus de quatre-vingts modes oscillatoires de degrés compris entre zéro et trois et d'ordre compris entre dix et trente-cinq (figure 2). Le meilleur accord est obtenu avec un modèle très voisin du modèle standard, et ne va donc pas dans le sens d'un abaissement du flux de neutrinos. Il faut toutefois remarquer que l'unicité de la solution ne peut pas être garantie actuellement. Pour réduire encore l'incertitude sur le calcul des modèles, il faudrait pouvoir identifier des modes d'ordre plus faible, et même idéalement quelques modes de gravité. En effet, ces derniers étant piégés sous la zone convective ont des distributions

d'amplitude avec la profondeur très différentes de celles des modes de pression et contribuent donc différemment à la résolution du problème inverse.

Du point de vue dynamique, une analyse détaillée du spectre de puissance montre que les pics ne sont pas rigoureusement monochromatiques. Ils ont une largeur moyenne de 6 μ Hz environ qui indique une durée de vie moyenne de l'ordre de deux jours pour l'amplitude d'un mode oscillatoire. Cet ordre de grandeur est confirmé par l'observation séparée d'un mode oscillatoire unique en fonction du temps (difficile, mais possible pour certains modes de degré $\ell = 1$). Cette analyse indique que les oscillations sont probablement excitées de façon aléatoire par la turbulence convective située sous la surface solaire. Cependant, certains experts pensent à une auto-excitation (oscillations instables et naturellement croissantes) qui serait au contraire aléatoirement détruite par la convection. Bien que semblant moins conforme aux observations, cette hypothèse ne peut pas encore être totalement rejetée.

Cette durée de vie de deux jours n'a pas encore permis d'obtenir de l'information sur la rotation profonde du Soleil, qui est probablement plus lente. Il faut encore une fois détecter des modes d'ordre plus faible pour espérer mesurer la séparation en fréquence due à l'ordre tesseral m (voir encadré). Il est probable en effet que la durée de vie des modes oscillatoires augmente avec leur période.

Il reste donc encore beaucoup à faire dans ce chapitre tout neuf de la physique solaire, qui pourra peut-être apporter également un début de réponse à une autre question passionnante, à savoir l'origine du cycle de onze ans de l'activité magnétique. En effet, suivant la nature et la profondeur du processus physique responsable de ce comportement cyclique, il se peut que la profondeur de la zone convective change avec la phase de ce cycle. Or les fréquences des oscillations sont sensibles à cette profondeur.

Pour tenter d'apporter les réponses encore manquantes, trois autres expéditions sont prévues au pôle Sud en novembre 1982, 1983 et 1984. Ensuite, pour gagner un ordre de grandeur supplémentaire dans la précision des mesures, il faudra aller les faire dans l'espace. Pour cela, deux projets sont actuellement à l'étude. Le premier consisterait à placer un ballon captif au-dessus des nuages du pôle Sud, qui présentent l'avantage de ne jamais dépasser une altitude de trois kilomètres au-dessus du sol. Deux mois d'observation ininterrompue seraient ainsi possibles. Le second serait une participation au projet DISCO (Dual Investigation of Solar Constant and Oscillations) de l'Agence spatiale européenne. Ce projet consiste à placer un satellite en un des points de Lagrange du système Soleil-Terre, qui permettrait une observation continue de plusieurs années avec une très faible vitesse relative Soleil-Satellite.

Eric Fossat

Les différents modes oscillatoires du Soleil

■ Les oscillations libres de la sphère isolée que constitue le Soleil sont les fonctions propres d'un système d'équations différentielles ordinaires avec des conditions aux limites, au centre et à la surface. Avec les hypothèses de sphéricité parfaite et de petite amplitude des oscillations, ces équations peuvent être linéarisées et les fonctions propres s'expriment alors simplement comme produits de fonctions du temps, du rayon et des coordonnées angulaires.

La fonction du temps définit la fréquence de l'oscillation. La fonction angulaire est un harmonique sphérique $Y_{\ell m}$, où ℓ s'appelle le degré et m l'ordre tesseral. Dans l'onde stationnaire de surface, ℓ représente le nombre de lignes immobiles, ou lignes de nœuds, m est le nombre de ces lignes qui coupent l'équateur ($-\ell \leq m \leq +\ell$). Ainsi, $\ell = 0$ représente des oscillations purement radiales, alors que $\ell = 2$, par exemple, représentera une oscillation du type «ballon de rugby». Pour chaque harmonique sphérique il y a une séquence discrète de fonctions propres radiales qui dépendent de l'ordre n , nombre de nœuds le long d'un rayon, entre le centre et la surface. En absence de rotation, la fréquence dépend du degré ℓ et de l'ordre n , mais pas de l'ordre tesseral m . Cette dégénérescence est levée par la rotation, ce qui peut permettre de mesurer celle-ci même dans les couches les plus profondes du Soleil.

Suivant la nature de la force de rappel prédominante, les oscillations sont appelées modes de pression ou modes de gravité. Actuellement seuls des modes de pression ont été observés et identifiés avec certitude, dans deux bandes spectrales différentes (degré élevé, $\ell \geq 100$ et ordre faible, $n \leq 12$ d'une part, et faible degré $\ell \leq 3$ et ordre élevé $n \geq 10$ d'autre part). Les modes de gravité sont piégés dans les régions profondes de l'intérieur et leur détection serait donc riche d'informations sur ces régions. Malheureusement, leur amplitude en surface est certainement très faible (mm.s⁻¹) et il sera peut-être nécessaire d'attendre encore quelques années avant de pouvoir les identifier utilement, à partir d'observations spatiales.