collection Amis de la Terre

RAPPORT POINCARE

(possibilités et contraintes d'une économie du plutonium)

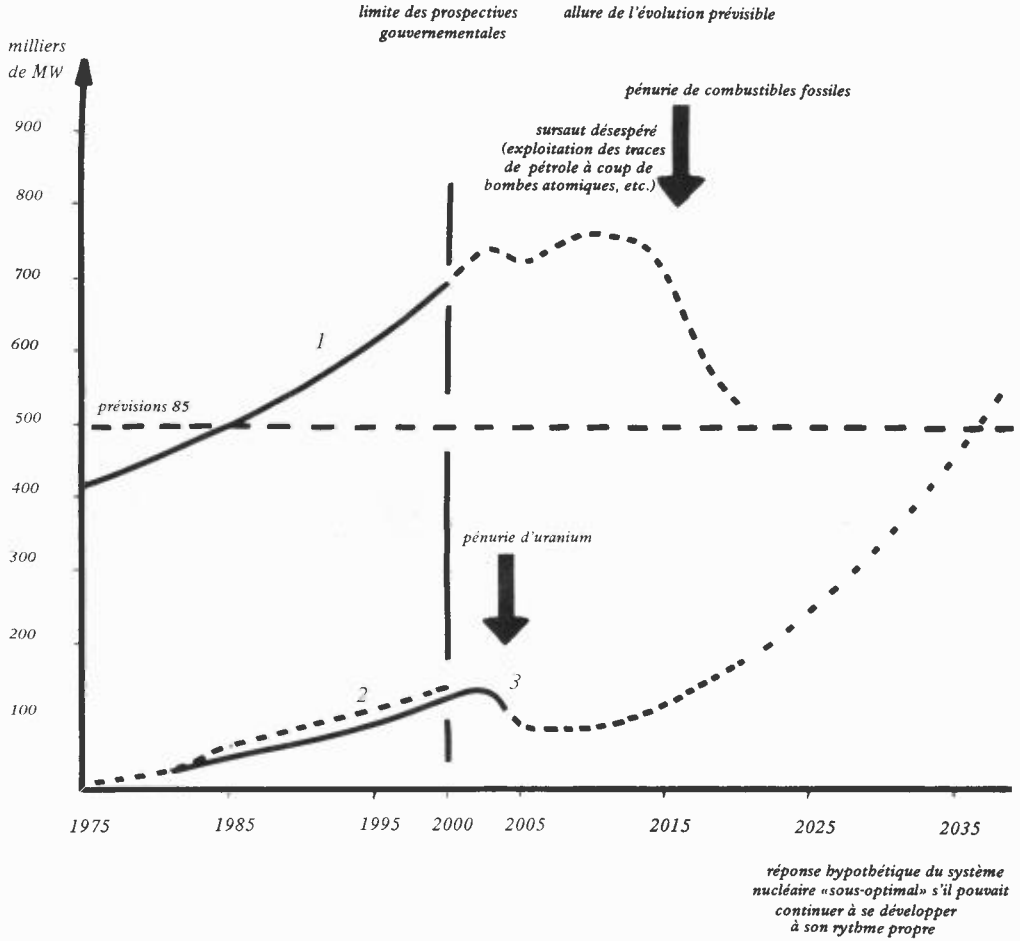
Dans lequel il est démontré que le programme nucléaire français aurait peut-être pu réussir si Poincaré l'avait lancé en 1920. Faute de cette condition, il est incapable de relayer à temps les combustibles fossiles en voie d'épuisement. Outre certaines contingences technologiques, économiques et politiques, les lois de la physique nucléaire elle-même s'y opposent. Mais s'il est trop tard pour faire du nucléaire, il est encore temps d'investir dans l'énergie solaire.

par Yves Lenoir

avec le concours de
J.-P. Marmorat
& Brice Lalonde

prix : 10 F
en vente aux Amis de la Terre
16, rue de l'Université, 75007 Paris

ALMONDE



LEGENDE

La courbe 1 traduit les prévisions du rapport d'Ornano, Localisation des centrales nucléaires, *tableau I, p. 9. La contribution du nucléaire est représentée par la courbe 2 en pointillés.*

Les courbes du rapport d'Ornano s'interrompent en l'an 2000. Aussi avons-nous prolongé en pointillés serrés la courbe 1 et nous ne retenons de cette partie de la courbe que son allure chaotique. La période sera énergétiquement très troublée. Puis les pointillés disparaissent car aucune prévision n'a de sens réel : personne ne peut prophétiser comment la société encaissera les soubresauts de l'appareil de production.

La courbe 3 représente le programme nucléaire «sous-optimal» le plus probable, sauf décision politique majeure, déduit des courbes de la figure 4. La partie pleine indique que le programme initialement prévu a pris du retard. Puis vient l'heure de la pénurie aiguë de l'uranium. Les surrégénérateurs n'étant pas au «rendez-vous», par rapport aux hypothèses de la fig. 4, le creux est plus prononcé et la remontée plus lente. Tout comme pour la courbe 1 nous avons adopté des pointillés. Les pointillés serrés indiquent une évolution probable si le pouvoir maintient en place le système de production ; les pointillés espacés traduisent le développement hypothétique *«naturel» du parc des surrégénérateurs (s'il n'était pas affecté par la récession).*

fig. 6 : l'Inévitable Récession

RESUME INTERPRETATIF

«L'humanité ne devrait jamais souffrir d'une disette d'énergie...», écrivait dans *le Monde*, au début de l'année 1974, Monsieur Alexis Dejou, délégué général d'EDF pour les orientations à long terme. Devant les difficultés pétrolières, la première mesure qui s'impose, ajoutait-il, est «l'accélération la plus grande possible de la mise en œuvre du nucléaire au niveau de la production et de l'électricité au niveau de la consommation».

Depuis, on a assisté à une floraison d'études prospectives sur la production d'énergie qui, toutes, ont deux traits communs :
1) Elles ne sont chiffrées que jusqu'en 1990 ou 2000, c'est-à-dire pour une période pendant laquelle combustibles fossiles et uranium seront encore facilement accessibles. Au-delà, c'est le vague, au point qu'il n'est même pas fait mention de l'acte de foi coutumier des technocrates, présenter les problèmes et indiquer les solutions à étudier.
2) Elles prévoient une croissance quasi linéaire de la production d'électricité d'origine nucléaire, ce qui semble indiquer que la percée des surrégénérateurs n'est pas attendue avant la fin du siècle.

Le présent rapport, reprenant les estimations les plus récentes (réf. bibliographique 4) quant à la date probable de la pénurie des combustibles fossiles, montre que, même si l'industrie nucléaire pouvait être développée de façon accélérée et optimale grâce à l'introduction immédiate des surrégénérateurs les plus performants, elle ne serait pas capable de prendre le relais à temps.

Bien plus, la faiblesse des ressources d'uranium accessibles à temps, compte tenu de l'ampleur des programmes nucléaires, et singulièrement en Europe, région pauvre en uranium, conduira rapidement, justement aux alentours de l'an 2000, le système des réacteurs à eau légère au bord de l'asphyxie. On subira alors un *creux* inévitable de la production d'électricité d'origine nucléaire, creux d'autant plus prononcé que le développement des parcs à réacteurs à eau légère aura été rapide et que l'introduction des surrégénérateurs aura été retardée.

Et ce creux coïncidera avec les débuts de la pénurie des combustibles fossiles (cf. figure 6), c'est-à-dire avec une augmentation rapide de leur prix. Dans ce contexte énergétique et financier désastreux, il sera de plus en plus difficile de faire admettre les investissements nouveaux réclamés pour poursuivre la politique énergétique, investissements qui seront très coûteux en énergie et en capital, qu'ils soient destinés au nucléaire ou au solaire. Ces difficultés s'ajouteront aux innombrables problèmes techniques soulevés par la gestion d'un parc nucléaire dont la caractéristique essentielle sera la rigidité (nous avons analysé quelques-unes des contraintes qui pèseront sur le système des surrégénérateurs).

En fait les investissements* seront vraisemblablement ralentis, voire stoppés, pour consacrer l'énergie disponible à la survie et aux gaspillages de base. Et l'industrie ne pourra sans doute pas supporter une baisse sensible de la production d'énergie ni s'adapter aux modifications rapides de la nature sous laquelle elle sera distribuée.

En somme, les choses étant ce qu'elles sont – et notamment la croissance se poursuivant –, l'énergie nucléaire ne peut se permettre de prendre le moindre retard, sous peine de s'enliser avec tout l'appareil de production. Sa survie dépend du développement exponentiel des surrégénérateurs, mais celui-ci n'est pas réalisable s'il n'est pas engagé à temps. *Or il n'a pas été engagé à temps...*

La seule façon de justifier le nucléaire serait d'instituer une croissance énergétique zéro dès maintenant, ce qui nous laisserait un répit de 150 ans pour les combustibles fossiles. Dans ces conditions (cf. fig. 5) un programme nucléaire progressif aurait le temps d'assurer une relève sans à-coup. Mais évidemment l'introduction de l'énergie solaire serait encore plus facile à assurer.

** D'autant plus que la mise en place d'un système de surrégénérateurs optimal réclame des investissements énergétiques et financiers en croissance exponentielle, peu compatibles avec les contraintes d'une sévère récession.*

- Energie solaire interceptée par terre
$180\,10^6$ GW (20 000 fois la puissance actuelle installée

haute altitude $P_{totale} = 1400\ W/m^2$
au sol (soleil zénital) $1000\ W/m^2$ uv 3% vis. IR 55%

ISBN 2 - 902003 - 02 - 1

© les Amis de la Terre, 1976
pas de copyright pour les adversaires du nucléaire

Edité par Almonde, 2, impasse Lebouis, 75014 Paris
Imp. Almonde. N. imp. 017. Dépôt légal : 1er trimestre 1976

AVANT - PROPOS

Il est universellement admis que le développement des filières à neutrons thermiques devra rapidement être relayé par celui des surrégénérateurs avant la pénurie d'uranium aisément accessible qui se profile au tournant du siècle, en même temps que celle des réserves exploitables des combustibles fossiles. Le recours aux surrégénérateurs, capables de transmuter quasi intégralement le minerai d'uranium en matière fissile, serait donc la seule chance de survie de l'humanité toujours plus nombreuse.

Les fondements de cette théorie sont les suivants :
– d'une part, il faut poursuivre la croissance économique et (donc) énergétique dans les pays industriels pour avoir une chance d'y réduire les inégalités sociales,
– d'autre part, seule une agriculture mécanisée (et donc énergivore) peut sauver le tiers monde de la famine.

Sur ces bases qui n'osent s'avouer politiques, le technocrate réclame de l'énergie, encore de l'énergie, toujours de l'énergie, et propose une seule solution, l'énergie nucléaire, d'abord en faisant appel à des réacteurs à neutrons modérés, puis en recourant aux réacteurs surrégénérateurs à neutrons rapides.

Nous n'allons pas critiquer ici cette position qui, curieusement, est aussi celle de la plupart des hommes politiques. Nous nous proposons simplement de calculer ce que pourraient effectivement nous fournir des systèmes nucléaires «idéaux» (selon diverses hypothèses) et nous analyserons leurs résultats, qui sont neutres en eux-mêmes, en les comparant à notre consommation actuelle d'énergie, sous toutes ses formes.

Cette étude volontairement optimiste, prêtant au système nucléaire des qualités technologiques qu'il n'aura probablement jamais, montre que les lois de la nature, qui s'imposent au cycle du combustible, impliquent un développement des réacteurs surrégénérateurs trop tardif pour être suffisant.

Après avoir rappelé quelques notions préliminaires qui faciliteront sa lecture, et confirmé qu'un système énergétique bâti sur des réacteurs à neutrons modérés ne pouvait que s'effondrer s'il n'était pas relayé par des surrégénérateurs, le rapport passe en revue quelques contraintes qui pèsent sur l'introduction de ces derniers.

Même un système nucléaire «idéal» qui permettrait de passer le plus vite possible aux surrégénérateurs serait incapable au bout de vingt ans de fournir autant d'énergie que nous n'en consommons actuellement, toutes formes comprises.

Par conséquent, un programme «optimal» – qui assurerait la meilleure pénétration possible des réacteurs surrégénérateurs dans un programme de croissance **linéaire** du parc à eau légère – aurait un développement plus lent.

A plus forte raison les programmes **actuels** vont se trouver devant des difficultés insurmontables lorsque les pénuries de combustibles fossiles et d'uranium conjugueront leurs effets. Certes une croissance forcenée ne semble pas impossible à réaliser (mais à quel prix ?) jusqu'en l'an 2000 et – hypothétiquement – au-delà de 2040, mais, entre les deux, une récession de la production d'énergie apparaît inévitable. Les responsables l'ignorent-ils ou le taisent-ils ?

Il ne reste donc aucune justification prospective pour des programmes nucléaires accélérés *. Au contraire, tout investissement dans ce domaine se paiera très cher quand viendra l'heure de la pénurie, dans une quarantaine d'années. Les techniciens de l'énergie ont suffisamment berné le commun des mortels avec des promesses miraculeuses. Il est trop tard pour faire du nucléaire, mais il est encore temps d'investir dans l'énergie solaire.

Choisir pour le court terme, pour reproduire une structure, c'est contraindre l'avenir sans rien préparer, sinon un totalitarisme austère et sinistre. Expliquer l'inévitable, c'est accepter de rendre son pouvoir et de travailler au jour le jour avec les autres.

C'est sans doute trop demander aux maniaques du pouvoir.

* A supposer par ailleurs que l'industrie nucléaire soit sans dangers d'aucune sorte, ce qui n'est pas le cas. L'opposition des Amis de la Terre à l'industrie nucléaire est suffisamment connue pour que nous n'ayons pas à rappeler ici l'ensemble des raisons qui la fondent. Nous renvoyons le lecteur intéressé au livre *l'Escroquerie nucléaire* (Stock 2, octobre 1975).

*Nous remercions N*** des précieuses informations qu'il nous a transmises pour l'élaboration de ce rapport. Il a voulu que le service public EDF auquel il collabore remplisse sa mission d'information du public.*

RAPPORT POINCARE

(possibilités et contraintes d'une économie du plutonium)

RAPPEL PRELIMINAIRE

Le minerai d'uranium contient deux variétés, ou isotopes, de ce métal. L'une d'elles, appelée U_{238}, en représente 99,3% et n'est pas capable de subir la fission nucléaire. L'autre isotope, U_{235}, présent à 0,7%, peut, dans certaines conditions géométriques et physiques, être le siège de réactions de fission contrôlées qui libèrent de l'énergie par perte de masse (°). Les réacteurs nucléaires à neutrons modérés les plus utilisés contiennent assez peu de cet isotope U_{235} fissile (3,35% en moyenne pour ceux de la filière américaine "choisie" par nos technocrates). Leur cœur est également le siège de transmutations nucléaires qui produisent, entre autres, divers isotopes du plutonium à partir de l'uranium 238 appelé pour cette raison isotope fertile.

La majeure partie de ces isotopes du plutonium est fissile et peut soit être utilisée comme matière première pour la fabrication d'explosifs nucléaires, soit comme matière fissile à recycler dans des réacteurs à neutrons modérés ou dans des réacteurs surrégénérateurs. Les caractéristiques atomiques de ces deux familles de réacteurs conduisent à préférer les réacteurs à neutrons modérés pour l'utilisation de l'uranium 235 et les réacteurs à neutrons rapides pour celle du plutonium.

Il n'est pas possible de rendre des réacteurs à neutrons modérés capables de produire plus de matière fissile (plutonium) qu'ils n'en consomment (U_{235}). En revanche, s'ils sont assez volumineux et bien conçus, les réacteurs à neutrons rapides peuvent être rendus surrégénérateurs. Ils produiront alors plus de matière fissile par transmutation de la matière fertile qui enveloppe le cœur qu'ils ne consommeront de matière fissile dans celui-ci.

La difficulté de mettre à jour les gisements d'uranium qui n'affleurent pas et la rareté des accidents géologiques qui ont conduit à une concentration d'uranium telle que son extraction serait rentable (°), financièrement et énergétiquement, expliquent l'absolue nécessité pour l'industrie atomique d'utiliser le plus complètement possible ce précieux métal si elle désire éviter un effondrement catastrophique pour la fin du siècle.

UN EFFONDREMENT CATASTROPHIQUE

Nous avons développé une démonstration chiffrée dans l'annexe technique à laquelle nous renvoyons le lecteur. Qu'il nous excuse de lui infliger des calculs un peu ardus, mais c'est une façon rationnelle de quitter le domaine du mythe (Phénix) pour entrer dans celui de la réalité.

L'effondrement est visible à l'horizon 2000 car les réacteurs à neutrons modérés, et singulièrement ceux de la filière américaine, sont de très mauvais utilisateurs du combustible nucléaire enrichi en isotope U_{235}. Aussi la consommation d'un système nucléaire fondé sur ces réacteurs sera telle que les réserves prouvées ou estimées y seront rapidement englouties. Le recyclage du plutonium produit par la transmutation partielle de l'uranium 238 n'influencerait que très faiblement la rapide décroissance, après son apogée, de la puissance disponible.

La "nécessité" de développer les réacteurs surrégénérateurs s'impose alors d'elle-même: c'est la seule façon de justifier les gigantesques investissements du système à neutrons modérés dont la mise en place isolée ne peut qu'aboutir à un effondrement énergétique et économique.

(°) en vérifiant la fameuse loi d'Einstein, E= mc2

(°) Les réserves mondiales prouvées et estimées sont de l'ordre de 3 millions de tonnes. Pour la France, elles se montent à 70 000 tonnes.

CONTRAINTES DE LA MISE EN PLACE D'UN SYSTEME DE SURREGENERATEURS

Avant de définir une économie "idéale" du plutonium, il est bon d'avoir une idée précise des contraintes technologiques qui compromettent son développement. Elles sont principalement liées au recyclage du plutonium et, donc, au retraitement du combustible usé.

Mais d'abord, pourquoi ne pas construire directement des surrégénérateurs "brûlant" de l'uranium 235 ? C'est un problème de coût et de bilan énergétique. D'une part il faudrait disposer d'immenses usines capables d'enrichir jusqu'à 20 ou 25% l'uranium en isotope 235, ensuite ces usines consommeraient par avance la majeure partie de l'énergie que fourniraient les réacteurs durant leurs premières années de fonctionnement. Au reste, nous l'avons déjà mentionné, ça marche mieux au plutonium.

Une première condition à la mise en place de surrégénérateurs est donc de savoir extraire industriellement le plutonium du combustible usé des réacteurs à neutrons modérés. Pour la filière américaine, dite à eau légère, utilisée en France et ailleurs, il n'y a pas encore une usine au monde qui fonctionne réellement. Le combustible est, comme on dit, "plus chaud" (radioactif) que celui des réacteurs plutonigènes initialement développés pour les besoins des militaires, environ quatre fois plus, et cela rend les normes de protection des travailleurs quasiment impossibles à respecter en permanence.

Admettons néanmoins que cette condition impérative soit bientôt remplie (d'ici 1980). Le problème se reposera de nouveau avec le combustible usé des surrégénérateurs qui, pour des raisons économiques (éviter des rechargements trop fréquents pendant lesquels le réacteur est à l'arrêt), sera deux à quatre fois plus "chaud" —et peut-être même plus encore— que celui des réacteurs à eau légère. Les spécialistes envisagent donc d'autres techniques, mais pour l'instant ils ne disposent même pas des moyens sûrs pour transporter ce combustible. Admettons à nouveau cependant que ces difficultés seront surmontées un jour et à temps.

En revanche, on ne pourra éviter de perdre du plutonium lors des opérations de retraitement. Les chiffres actuellement disponibles pour les réacteurs à eau légère indiquent une perte totale de l'ordre de 1,3% à 1,5%, qui comprend le plutonium perdu dans les gaines (adsorbé par celles-ci), celui qui reste dilué dans les produits de fission et celui qui se trouve dans les boues chimiques rejetées dans l'environnement ou stockées, selon leur radioactivité.

Le diamètre plus faible des gaines de combustible des surrégénérateurs, la plus forte concentration de ce dernier en plutonium et les difficultés supplémentaires introduites par son intense radioactivité nous incitent à penser que les pertes seront plus importantes dans le cycle surrégénérateurs (disons de 1,5% à 2,5%).

Outre les problèmes de nuisances qu'elles soulèvent (°), ces pertes de plutonium vont influer sur le taux de surrégénération des réacteurs. De fait, les calculs joints en annexe montrent que le temps de doublement réel en matière fissile croît avec les pertes et que, plus il est long, plus les pertes allongent encore sa durée.

En définitive, il faut un temps de doublement théorique inférieur à vingt ans —ce qui n'a encore été tenté nulle part— pour être relativement indépendant des performances du retraitement, à supposer évidemment que celui-ci soit réalisable.

Enfin une dernière contrainte retardera l'introduction des premiers surrégénérateurs: la quasi-impossibilité d'avoir retraité le combustible moins d'un an après sa sortie du réacteur. Il faudra donc disposer d'une quantité de combustible supérieure à leur charge initiale pour faire fonctionner sans interruption les premiers surrégénérateurs. En effet, les réacteurs à eau légère ne sont pas capables de produire en un an assez de plutonium pour recharger les réacteurs à neutrons rapides. Il faudra donc accumuler patiemment pour chaque surrégénérateur presque une charge et demie avant de le mettre en marche pour la première fois.

Lorsqu'on aura beaucoup de surrégénérateurs, on pourra planifier les opérations de rechargement et de retraitement, de manière d'une part à avoir assez de plutonium hors pile disponible pour les rechargements venus à échéance, d'autre part à minimiser le stock. Dans les conditions optimales on ferait donc circuler un demi-cœur de réacteur en réacteur. Cette distribution sera extrêmement délicate à réaliser. Elle imposera de soumettre le combustible à une normalisation qui risque d'opposer une forte inertie à d'éventuelles innovations technologiques. Le système sera très sensible à la moindre interruption du retraitement (accident, grève).

On peut facilement imaginer qu'un arrêt de trois mois de l'usine de retraitement entraînera à coup sûr (à moins de stocks de plutonium très importants, donc un sous-équipement en réacteurs et des risques accrus de vols de matière fissile) une réduction de la puissance disponible d'au moins 25% et un rattrapage très difficile, au détriment des extensions

(°) Un parc de surrégénérateurs de 500 000 MW suppose la manipulation de 1 200 tonnes de plutonium par an. Les pertes seraient de l'ordre de 30 tonnes dont 0,3 à 1 tonne serait dispersée dans la mer (boues de retraitement).

planifiées du système.

On conçoit donc que la fiabilité énergétique d'un système de surrégénérateurs sera difficile à prouver à priori. Nous n'avons d'ailleurs donné qu'une idée partielle de ses nombreux aléas: le risque accidentel —et guerrier— est tout aussi menaçant. Il faut espérer que la voix des maximalistes (comme Alvin Weinberg) sera vite étouffée par celle de la raison. D'autant plus que ces maximalistes nous ont toujours menti. Nous allons démontrer ce qu'ils ont systématiquement occulté: en réalité il est trop tard pour préparer la relève des combustibles fossiles avec le nucléaire, même en stabilisant la production d'énergie au niveau prévu pour 1985.

LE SYSTEME NUCLEAIRE "IDEAL"

Nous appelons ainsi un système qui permettrait de passer le plus vite possible aux surrégénérateurs en épuisant simultanément l'uranium 235 consommé dans les réacteurs à neutrons modérés (°) pour produire le maximum de plutonium dans le délai le plus court. Comme la France est le pays de Descartes, de Phénix et des Amis de la Terre, nous allons la prendre pour exemple.

Supposons qu'à l'instant zéro on dispose d'un stock d'uranium naturel de 100 000 tonnes —ce qu'on peut espérer trouver chez nous d'ici la fin du siècle pour le plus grand malheur des coins encore tranquilles qui dorment sur des microgisements (•). Comme il en faut 520 t pour un réacteur de 940 MW, on a là de quoi remplir 200 réacteurs, justement le chiffre visé par le programme Messmer pour l'an 2000.

La puissance initiale du système serait donc de 188 000 MWé qui fourniraient en un an autant d'énergie électrique que 300 millions de tonnes de pétrole si on les brûlait dans des centrales thermiques. Or les officiels prévoient justement que la France consommera au total l'équivalent en énergie de 300 millions de tonnes de pétrole vers 1985-1990. L'énergie nucléaire n'est certes pas la solution transitoire ainsi qu'elle est présentée pour convaincre les modérés, puisque les réserves d'uranium, selon les estimations les plus optimistes, permettraient tout juste de tenir douze mois. Au bout d'un an en effet on retirerait le tiers des cœurs de réacteurs pour retraitement (qui serait achevé encore un an plus tard).

La deuxième année verrait donc sa puissance réduite aux deux tiers. Et ainsi de suite (voir en annexe).

Le plutonium produit dans les réacteurs serait utilisé le plus vite possible pour produire de l'énergie dans les surrégénérateurs. Mais les calculs révèlent que la croissance du système des surrégénérateurs serait toujours trop lente pour compenser la chute de puissance exponentielle des réacteurs à eau légère. Et cela quel que soit le temps de doublement prêté aux surrégénérateurs. (Nous avons retenu quatre hypothèses. Un temps de doublement chimérique de dix ans qui nécessiterait un combustible de nature nouvelle. Un autre de quinze ans qui est le minimum envisageable avec le combustible actuel. Un autre de vingt ans: il représente une performance qui n'a pas encore été tentée dans le monde. Enfin un dernier de quarante ans qu'on atteindra dans des réacteurs qui sont seulement en projet.)

Ainsi une énergie prétendument transitoire, destinée à assurer la soudure avec le développement retardé de la technologie solaire sera incapable, même dans une situation «idéale», absolument irréaliste, de fournir vingt ans après son introduction massive autant d'énergie que nous en consommons actuellement, toutes formes comprises. Il faut en être conscient.

DU SYSTEME "IDEAL" AU PROGRAMME OPTIMAL

Mais que pourrait-on attendre d'un programme analogue au programme français actuel, c'est-à-dire un développement linéaire du parc des réacteurs à eau légère (5 nouveaux réacteurs par an), *et rendu optimal grâce au développement simultané d'un parc de surrégénérateurs qui gérerait au mieux le stock de plutonium disponible à un instant donné ?*

A coup sûr moins de puissance disponible que dans le système "idéal". Mais dans quelles proportions ? Nous avons évalué ses performances avec diverses hypothèses qui montreront l'influence de trois variables principales: le stock d'uranium disponible, la vitesse de croissance du parc à eau légère et le temps de doublement de la matière fissile des surrégénérateurs.

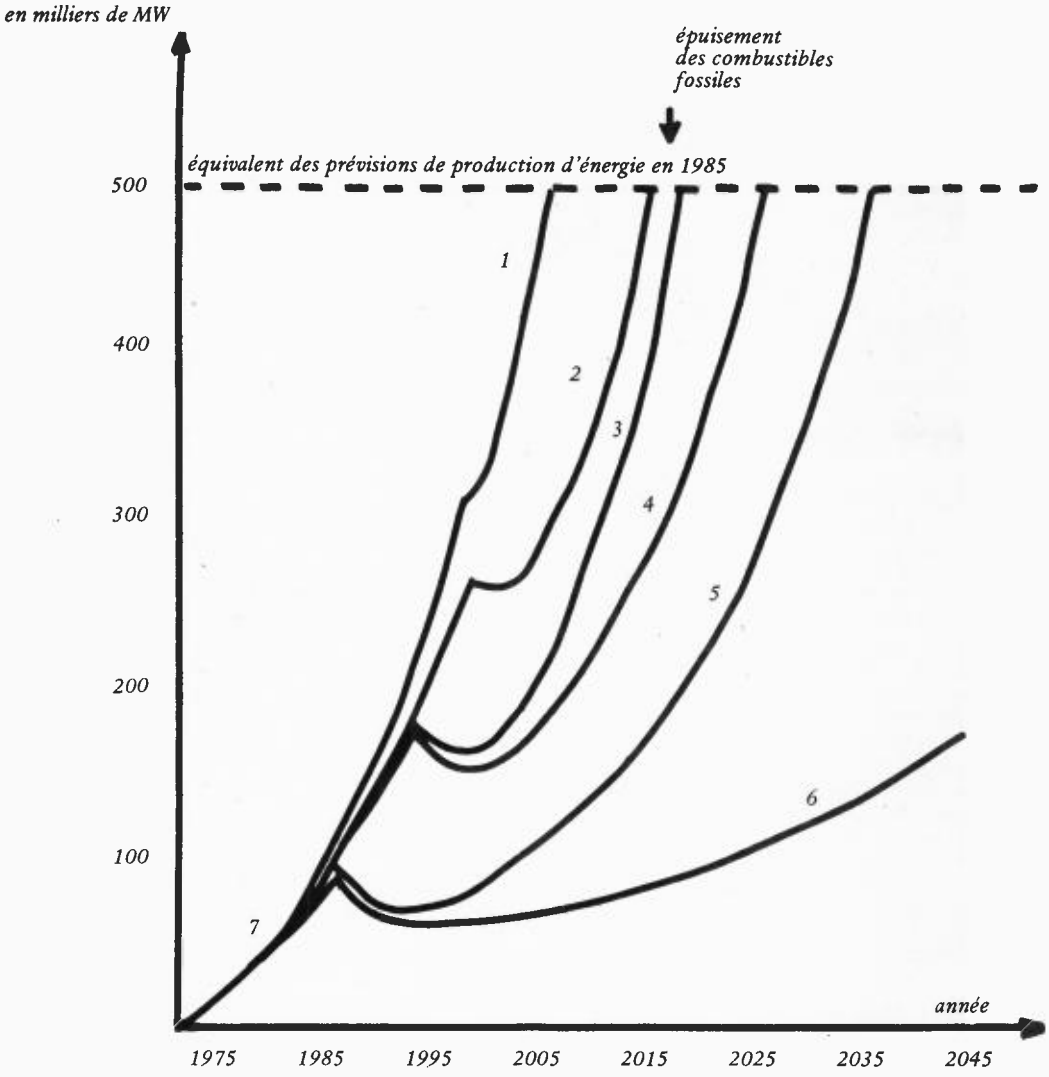
Nous avons considéré trois stocks possibles d'uranium naturel exploitable à discrétion: 100 000, 200 000 et 300 000 tonnes.

Nous avons supposé trois courbes de croissance pour le parc des réacteurs à neutrons modérés (filière américaine): 1 000 MW par an, 5 000 MW par an (ce qui est approximativement le cas pour le programme français actuel) et 10 000 MW par an.

Enfin nous avons testé les quatre temps de

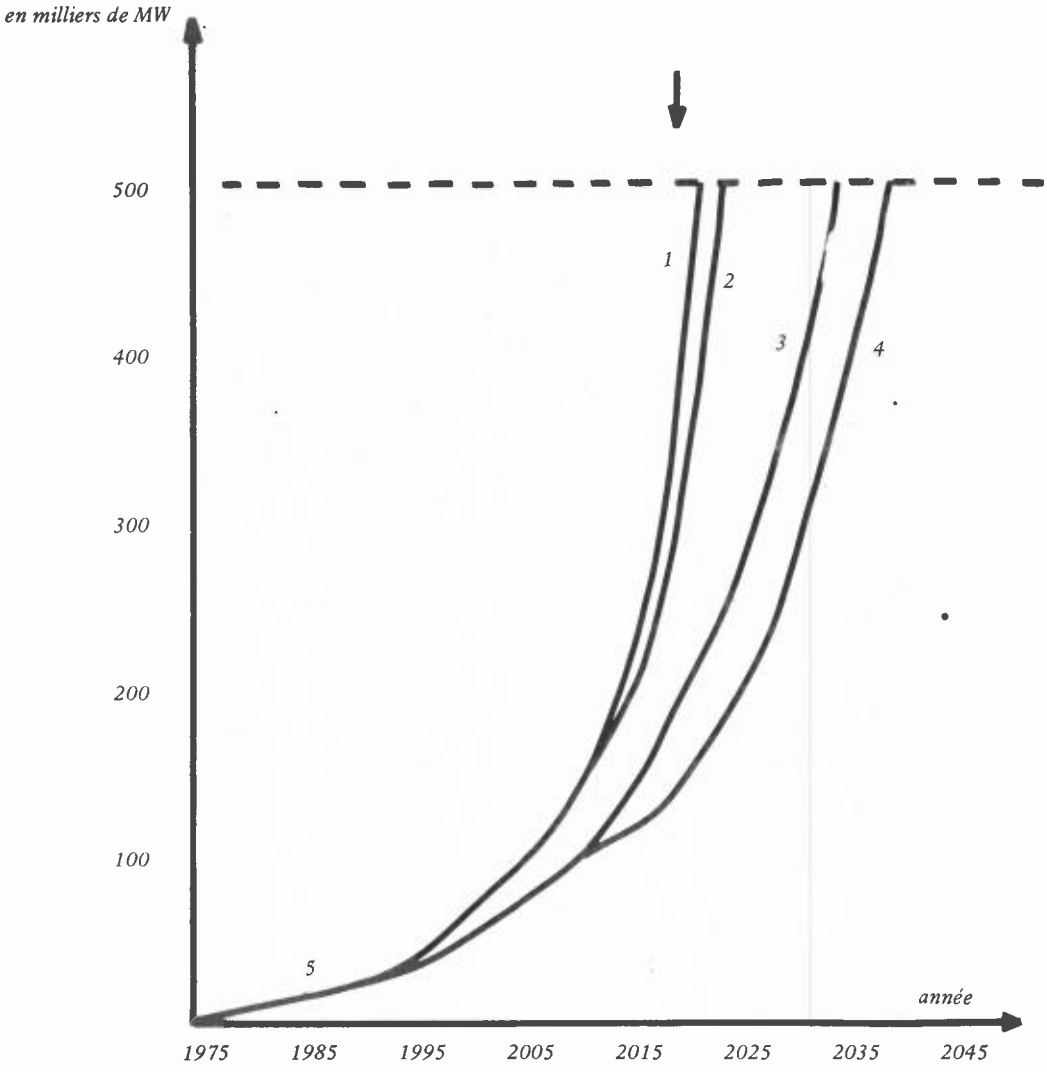
(°) La filière graphite-gaz, plus plutonigène, permettrait un passage deux fois plus rapide aux surrégénérateurs. D'un point de vue prospectif, son abandon est la marque d'une imbécillité consternante.

(•) Comme celui de Suin, en Saône-et-Loire, où le C.E.A. a repéré 15 t d'uranium métal... et va l'exploiter. Il y a juste de quoi faire fonctionner un réacteur de 1 000 MW pendant un mois !



courbe	accès à l'uranium (en tonnes)	E (temps de doublement)
1	300 000	0,1 (10 ans)
2	300 000	0,066 (15 ans)
3	200 000	0,066 (15 ans)
4	200 000	0,05 (20 ans)
5	100 000	0,05 (20 ans)
6	100 000	0,025 (40 ans)
7 : rampe à 5 000 MW/an (programme français actuel)		

fig. 4 : le Programme Optimal



courbe	accès à l'uranium (en tonnes)	E (temps de doublement)
1	300 000	0,1
2	100 000	0,1
3	300 000	0,066
4	100 000	0,066
5 : rampe à 1 000 MW/an		

fig. 5 : un Programme Progressif Optimal

doublement de 10, 15, 20 et 40 ans.

En appliquant une méthode analogue à celle qui a été utilisée pour le système "idéal" décrit plus haut, nous avons obtenu 36 tableaux de chiffres correspondant aux 36 combinaisons différentes des hypothèses. Nous en avons tiré quelques courbes caractéristiques (cf. fig. 4 et 5) qui permettent de se faire une idée de la quantité d'électricité que produirait dans les décennies à venir une gestion optimale et infaillible de l'énergie nucléaire.

Avant de commenter ces résultats, nous rappelons au lecteur distrait que nous avons –indûment– supposé que toutes les difficultés technologiques encore non surmontées actuellement étaient résolues, qu'aucun problème de rythme industriel et financier ne se posait que la fiabilité des installations était absolue (facteur de charge: 80%, usines de retraitement du combustible parfaitement adaptées etc..), qu'il n'y avait aucune contrainte écologique ni aucune opposition politique. Ces circonstances féeriques ne sont nulle part près d'exister. En fait l'expérience nucléaire n'est qu'une succession de retards, de paris non tenus, d'acrobaties technologiques pour des résultats en définitive décevants, mais coûteux.

Nos courbes traduisent donc des performances pratiquement inaccessibles et nous conseillons vivement de les interpréter de manière réaliste en ajoutant un retard de vingt ans, au moins, au temps nécessaire à l'accomplissement d'une performance donnée.

On remarquera qu'il y a toujours une baisse de puissance du parc nucléaire après l'apogée du système à neutrons modérés, sauf pour le taux de croissance de 1 000 MW par an, le plus faible.
L'épuisement de l'uranium et/ou la faiblesse des moyens d'enrichissement poseront des problèmes quasi insolubles pour la planification à moyen terme.

La volonté de donner rapidement une grande place au nucléaire dans le système français est incompatible avec les lois de la physique. Il faudrait alors surinvestir en centrales thermiques classiques pour éviter la phase et les risques de pénurie d'électricité!

Tout retard (°) dans l'introduction de surrégénérateurs très performants (temps de doublement de dix ou quinze ans) se paiera extrêmement cher en énergie fossile. Bref, il faut être imprudent, il faut brûler les étapes. Or des atomistes au-dessus de tout soupçon critiquent fortement le passage direct de Phénix (250 MW) à Super-Phénix (1 200 MW) - dont le temps de doublement est pourtant supérieur à vingt ans. Et nos calculs prouvent que Super-Phénix vient de toute manière trop tard. Le lièvre nucléaire a décidément trop tardé. En attendant, le public est abusé par le bagou de ses entraîneurs et oublie qu'il existe une tortue qui a fait ses preuves depuis longtemps : le soleil.

Pour bien montrer à quel point nous avons été dupés, évaluons à l'aide des prévisions de la Délégation générale à l'énergie –et en tenant compte du rendement des installations nucléaires (moyenne de 36% pour cette évaluation) –le parc nucléaire capable de se substituer à toutes les sources d'énergie prévues pour l'an 1985 (3). Nous supposerons que tous les combustibles sont remplacés par de l'hydrogène et que celui-ci est produit par catalyse grâce à l'énergie nucléaire avec un rendement de 70%, ce qui dépasse ce que l'on sait faire à ce jour (°).
Les besoins ventilés par rubrique sont:

	combustible	électricité	nucléaire
chauffage domestique	95 MTEC		env. 300 MTEC
électricité résidentielle		60 MTEC	60 MTEC
chauffage industriel	60 MTEC		env. 200 MTEC
combustible pour moteurs industriels	30 MTEC		env. 120 MTEC
électricité industrielle		50 MTEC	50 MTEC
transports	82 MTEC	3 MTEC	330 MTEC
Total	270 MTEC	113 MTEC	1 060 MTEC soit l'équivalent de 3 300 TWh

Ainsi une substitution totale du nucléaire aux autres sources d'énergie, pour un niveau de consommation égal aux prévisions de l'année 1985, nécessiterait un parc de quelque 500 centrales de 1 000 MW ayant un facteur de charge de 80%.

Or les combustibles fossiles seront probablement épuisés ou devenus rares dans une quarantaine d'années. Si nous admettons maintenant une croissance énergétique zéro à partir de 1985, quand donc le système nucléaire optimal pourra-t-il relayer les combustibles fossiles ?

(°) L'abandon des surrégénérateurs implique la décroissance –l'effondrement– du système nucléaire dès l'an 2000 lorsqu'on aura consommé les 300 000 t d'uranium naturel...

(°) Une tonne-équivalent-charbon (TEC) d'hydrogène ainsi obtenue demande 1/0,36 x 1/0,7 = 4 TEC d'énergie thermique nucléaire. Aucune étude prospective à long terme n'a encore eu l'honnêteté d'introduire ce petit facteur correcteur de 4 pour comparer les stocks de combustibles fossiles et nucléaire (cf. référence (4) de la bibliographie, en particulier).

Avec une croissance de 5 000 MW par an du parc à eau légère (qu'EDF a déjà tant de mal à réaliser!), les réponses sont :

	temps de doublement de la matière fissile des surrégénateurs	relais assuré dans
– si la France a accès à 100 000 t d'uranium	40 ans 20 ans 15 ans 10 ans	110 ans 66 ans 51 ans 37 ans
– à 200 000 t d'uranium	20 ans 15 ans 10 ans	52 ans 43 ans 35 ans
– à 300 000 t d'uranium	15 ans 10 ans	41 ans 32 ans

Rappelons que le temps de doublement minimal théorique est de quinze ans. Il faudrait avoir accès à des stocks d'uranium de l'ordre de 200 000 à 300 000 t dans les vingt-cinq ans à venir (production actuelle : 1 600t/an en France et 1 200 t/an au Niger et au Gabon) et maîtriser dès aujourd'hui la technique des surrégénérateurs les plus performants pour réussir la "prouesse" de substituer le nucléaire aux combustibles fossiles au début du siècle prochain après une longue stagnation de la production d'énergie.

Qui oserait parier ?

Mais qui accepterait en retour de laisser stagner pendant quarante ans la production d'énergie, même au niveau prévu en 1985 (environ 40% de plus qu'aujourd'hui), sans remettre en cause l'organisation sociale en France, les structures de pouvoir et l'exploitation de l'homme par l'homme ?

Il n'est pas étonnant qu'aucun programme politique ne présente la moindre esquisse des bouleversements prévisibles pour le début du siècle prochain.

Le nucléaire nous promet des difficultés insurmontables; il n'est pas d'autre issue raisonnable que d'y renoncer, détruire progressivement l'appareil de production industriel fondé sur le gaspillage des combustibles fossiles et bâtir sur ses cendres un système de production convivial faisant appel à l'énergie solaire. Il reste le temps nécessaire (deux générations sans doute, car le démarrage sera long). A titre d'exemple rappelons qu'il faudrait l'équivalent de 6 centrales de 1 000 MW (coût : 12 milliards de francs au moins et 15 milliards pour les ballons d'eau chaude) pour les besoins d'eau chaude domestique en France. Les 10 millions de chauffe-eau solaires capables d'assurer le même service 200 à 250 jours par an coûteraient (vendus en pièces détachées ou construits en grande série) 40 milliards de francs. La différence de 13 milliards de francs correspond à la consommation d'uranium et à l'entretien des 6 centrales pendant 13 ans. Ces chiffres peuvent se passer de commentaires.

SI CA NE TOURNE PAS ROND, C'EST POINCARE

Compte tenu des délais de mise au point du système nucléaire, quand donc aurait-il fallu commencer les études afin de relayer à temps les combustibles fossiles ?

Si les centrales à eau légère sont définitivement sûres en 1980, il se sera écoulé un délai de vingt-sept ans entre les premiers réacteurs opérationnels dans cette filière et les réacteurs industriels fiables. Pour les réacteurs graphite-gaz, ce délai a été beaucoup plus court : une dizaine d'année. Les réacteurs surrégénérateurs, quant à eux, représentent un saut technologique considérable et nécessitent des études de sûreté très délicates (portant par exemple sur la détente adiabatique de la vapeur d'oxyde de plutonium lors d'une excursion nucléaire). Nous estimons que leur mise au point réclamera au moins quarante ans (°). C'est en 1966 qu' Enrico Fermi, premier surrégénérateur de grande taille, fut partiellement détruit par une fusion. Il faudra donc attendre les environs de l'an 2000 pour assister à la percée des surrégénérateurs, plus de 65 ans après les débuts héroïques de Joliot-Curie et Frish. Il faudra encore une bonne vingtaine d'années pour atteindre le niveau des 500 000 MW retenu comme hypothèse. Ainsi 90 à 95 ans seraient nécessaires pour passer du laboratoire au système industriel désiré par nos nucléopathes, et qu'il nous faut absolument pour 2015 sous peine de voir la "civilisation" s'anéantir.

C'est donc Poincaré, président de la République à la fin de la Première Guerre mondiale, qu'ils peuvent taxer d'imprévoyance. C'est lui le principal responsable de nos difficultés futures, lui qui n'a pas lancé le lièvre nucléaire à temps. Bref, à cause de Poincaré il est maintenant trop tard pour compter sur l'énergie nucléaire, *quod erat demonstrandum.*

CONCLUSION

Il n'a évidemment pas été question ici de démontrer que l'énergie nucléaire ne peut fournir de l'énergie. Ce serait grotesque, les morts d'Hiroshima et Nagasaki en témoignent.

(°) On en construira peut-être 50 d'ici 35 à 40 ans, mais le passage à la série ne nous paraît guère être possible avant (comparer avec les réacteurs actuels et leurs difficultés à démarrer).

Nous avons voulu mettre en évidence une contradiction insurmontable, liée à la nature du combustible nucléaire :
1) seuls les surrégénérateurs sont théoriquement capables de rentabiliser les investissements consentis pour les filières à neutrons thermiques,
2) mais les surrégénérateurs ne pourront pas relayer en temps utile les filières à neutrons thermiques!

Aussi faut-il cesser tout investissement dans ce domaine et consacrer les crédits et toute l'énergie qui nous reste au développement de la technologie solaire.
Il n'y a pas de point de non-retour : il est toujours temps d'abandonner une entreprise vouée à l'échec. C'est faire preuve d'intelligence de le reconnaître, et de stupidité d'espérer un miracle.

REMARQUES EN POSTFACE

Clément Ader mit quelques mois pour construire quasiment seul le premier avion qui prit l'air, l'Eole. Le jeu en valait la chandelle : réaliser une expérience inconnue, un saut qualitatif extraordinaire. Enfin c'est ce qu'on se croit obligé de dire. Concorde a demandé quatorze ans d'études et des millions d'heures de travail pour la satisfaction de quelques schizophrènes ventripotents.

Enrico Fermi eut besoin de deux ans pour réussir la première réaction en chaîne. Il faudra quarante ans pour mettre au point le seul type de réacteur capable de "rentabiliser" les réservoirs d'uranium.

L'automobile stagne depuis près d'un demi-siècle.

Contrairement aux idées reçues, la technologie n'est pas capable, semble-t-il, d'affronter les difficultés qu'elle sécrète. Nous voyons apparaître des points d'accumulation de problèmes insurmontables. Alors pourquoi admettons-nous de consacrer tant de travail, d'argent, de temps de vie à des projets sans valeur, à la mégalomanie de quelques déséquilibrés ?

On a coutume d'accuser les hommes au pouvoir de conforter celui-ci par des réalisations prestigieuses et un système d'oppression toujours plus perfectionné. On a raison. Il faudra bien un jour que chacun reprenne, regrignote ce pouvoir et échappe tout d'abord au chantage de la survie hétéronome en choisissant la vie autonome. Mais l'homme politique n'est pas seul en cause.

A ses côtés s'agite un trio non moins redoutable qui, lui aussi, trompe le public, exhibe des mirages séduisants et se présente comme l'infaillible spécialiste du présent et de l'avenir. On a l'habitude de prendre pour cible le joueur le plus vulnérable de la triplette, le scientifique. Mais que serait-il sans les hauts fonctionnaires qui distribuent ses crédits et organisent sa carrière, et les industriels qui parfois le stipendient ?
C'est cette triade intéressée et carriériste qui monte le spectacle pour le public et les politiciens. Le scientifique avide de subsides et de considération est acculé aux projets mirifiques. Il l'est d'autant plus que ses trouvailles antérieures présentent des imperfections. Le système industriel, pour exploiter théories séduisantes et procédés miraculeux, se limite aux fictions de la science-faction. La faction atomiste propose une économie de l'hydrogène basée sur un complexe de réacteurs surrégénérateurs si possible à haute température. La faction charbonnière promet la gazéification in situ tandis que la faction solaire prévoit des milliers d'hectares de capteurs à la mesure des milliers de mégawatts des atomistes. Chacun courtise le pouvoir pour conserver le sien. Quant aux hauts fonctionnaires sollicités, la plupart choisissent entre les projets à court et moyen terme en fonction de la date à laquelle ils ont décidé de pantoufler, c'est-à-dire de monnayer contre une situation intéressante au sein des cliques dirigeantes des grandes entreprises les services qu'ils auront rendus à celles-ci.

Si l'on peut tempérer la condamnation du scientifique en lui accordant le bénéfice des circonstances atténuantes, compte tenu de l'irrésistible fascination qu'il subit devant ses créations, en revanche il n'est presque jamais rien de grand dans la cupidité et la bonne conscience des industriels, ni dans le fameux "sens de l'Etat" et l'apolitisme de façade des hauts fonctionnaires. A la suite de quelle catastrophe le public cessera-t-il de s'ébaubir devant les transes mécaniques programmées par ces trois comparses ? Quand prendra fin l'obscurantisme spectaculaire ?

BIBLIOGRAPHIE

(1) A. Giraud : conférence prononcée au congrès «la Maturité de l'énergie nucléaire» (Paris, avril 1975), reproduite dans **la Technique moderne** (juillet-août 1975).

(2) S.N.P. - C.E.A. (C.F.D.T.) : **l'Electronucléaire en France** (le Seuil, novembre 1975).

(3) I.E.J.E. : **Réflexions sur les choix énergétiques français** (janvier 1975).

(4) L. Korek : E.D.F., direction des études et recherches (décembre 1975) : **les Centrales nucléaires à neutrons rapides,** document F 639/75/021 d'«accessibilité restreinte».

Ce dernier document, relativement difficile à obtenir, est le compte rendu d'une session d'étude interne à E.D.F. sur les réacteurs à neutrons rapides. Ses termes n'engagent donc pas son signataire qui ne fait que rapporter les exposés d'autres personnes.

L'introduction souligne le caractère «fabuleux» de l'accroissement de notre consommation d'énergie par tête qui a été multipliée par 3 000 en cent ans. Suit une brève analyse des sources d'énergie disponibles qui oublie d'inclure, sinon en réglant rapidement son compte à l'hydraulique, l'énergie solaire. Conclusion obligatoire : il nous faut développer les surrégénérateurs. Le gros du rapport est consacré à une étude technique très intéressante car elle décrit clairement toutes les subtilités atomiques des surrégénérateurs. Là encore, un «oubli» symptomatique : pas une seule difficulté technologique sur l'autoroute du futur. Pénurie de minerai, goulots à l'enrichissement, au retraitement, connais pas... Enfin, après avoir montré que le «facteur de pénétration» des surrégénérateurs dans un parc de réacteurs à eau légère n'était pas sensationnel (26 % pour un temps de doublement du parc nucléaire total de six ans), le rapport suggère d'explorer des voies prometteuses pour améliorer cette performance, prometteuse en études et recherches évidemment.

ANNEXE TECHNIQUE

Cette annexe a été jointe au rapport Poincaré pour permettre à chacun de s'assurer de la validité des propositions avancées selon les différentes hypothèses de calcul.

1°)POURQUOI UN EFFONDREMENT CATASTROPHIQUE ?

Effondrement est pris dans le sens de "collapsus", pour désigner une glissade désastreuse s'accélérant d'elle-même. Nous allons montrer que cette notion s'applique particulièrement bien à un système de réacteurs à neutrons modérés n'ayant plus d'uranium "frais" à consommer.

Pour être concrets, nous allons considérer un seul réacteur à eau légère, par exemple, l'un de ceux qu'on n'en finit pas d'achever à Fessenheim. Nous ferons une supposition tout à fait arbitraire, dont on comprendra l'intérêt dans l'étude consacrée au système nucléaire "idéal" : admettons que ce réacteur de 940 MW ne puisse fonctionner qu'à partir du stock d'uranium naturel (520 t) nécessaire à la fabrication de sa première charge (80 t d'uranium à 3,35% d'U235). Il n'aura pas droit à un gramme d'uranium supplémentaire. En échange de cette contrainte, nous lui donnons la possibilité irréaliste de fonctionner à puissance de plus en plus réduite, en proportion de la réduction que nous ferons subir à son cœur au fur et à mesure qu'il épuisera son lot de matière fissile.

Pour simplifier nous allons considérer des cycles de trois ans. Cela signifie que le réacteur fonctionnerait trois ans à puissance constante et que tout son cœur serait alors déchargé pour une extraction instantanée de l'uranium 235 restant et du plutonium produit, qui constitueraient la matière fissile du nouveau cœur.

a) première possibilité : mettre de côté le plutonium et ne recycler que l'uranium 235

Il faut renvoyer l'uranium extrait du combustible usé à l'uranium d'enrichissement pour faire remonter sa concentration en isotope fissile de 1,12% à 3,35%. La séparation étant imparfaite à l'issue de cette opération, il restera 0,25% d'U235 dans l'uranium appauvri. Ainsi seulement environ 0,9% d'uranium 235 – concentration correspondant à la masse de la première charge- sera utilisé dans le second cycle. Comme il faut assurer au réacteur une concentration de 3,35% d'U235, le facteur de réduction du cœur sera égal à 0,9/3,35, soit environ 27%. Le second cycle s'effectuera donc avec une charge égale à un peu plus du quart de la première.

Au début du premier cycle les proportions sont :

U238..	96,65%
U235..	3,35%
Pu.....	0
p. de fission	0

A la fin du cycle, elles sont devenues :

U238...	94,28%
U235...	1,12%
Pu fissile.	0,824%

p. de fission et transuraniens non fissiles : le complément à 100%.

Et ainsi de suite, chaque nouveau cycle verra la puissance du réacteur réduite du quart de celle fournie lors du cycle précédent, comme le montre *la figure 1 :*

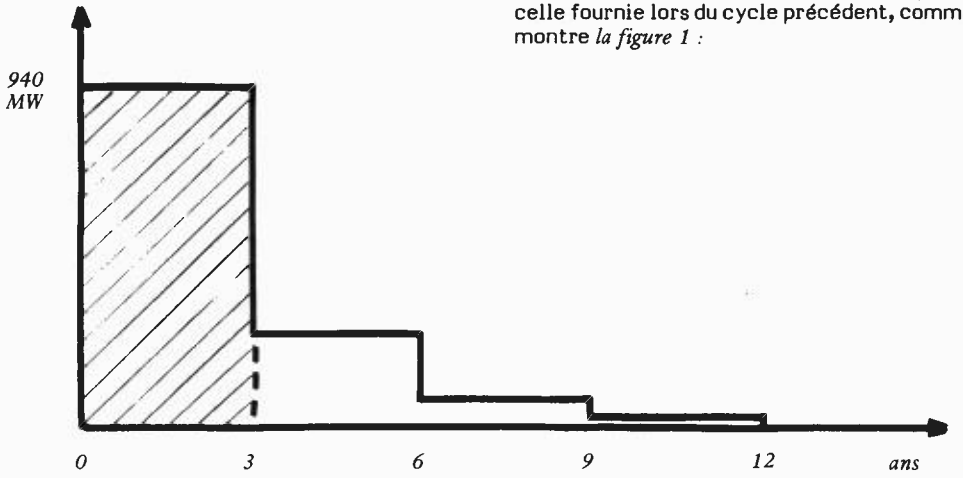


fig. 1 : Effondrement sans recyclage du Plutonium

Si l'on appelle E l'énergie fournie par le premier cycle (surface hachurée), le réemploi systématique de l'uranium 235 non fissionné permet de produire une énergie totale égale à 1,37 E (surface totale de la courbe en escalier). Dans un même temps les transmutations auront produit une masse de plutonium égale à presque 1,2% de la masse de la première charge.

b) recyclage du plutonium

Le recyclage du plutonium dans le réacteur lui-même, au fur et à mesure de son extraction (supposée instantanée) à la fin de chaque cycle, améliore un peu les choses.

Compte tenu de ses caractéristiques atomiques, le plutonium permettrait de limiter le facteur de réduction à 45% environ, au lieu de 27%. La courbe en escalier est donc moins rapidement décroissante.

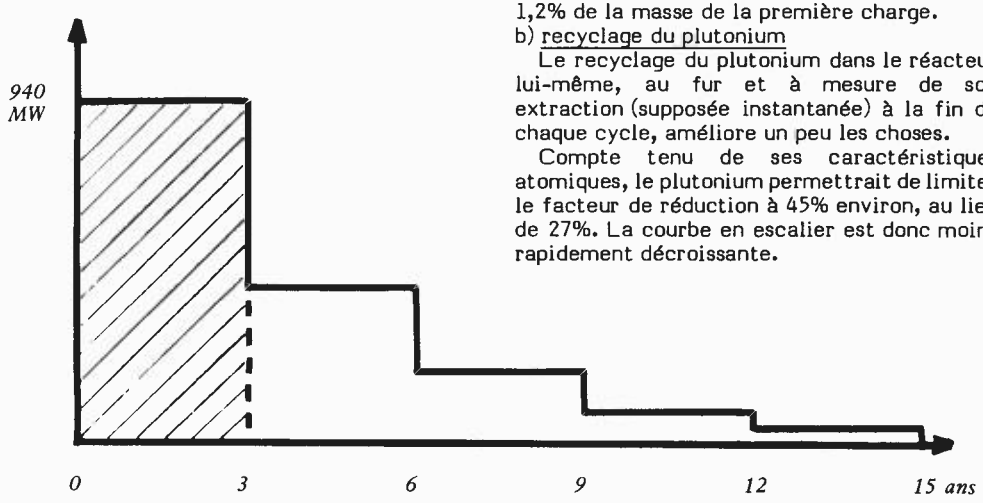


fig. 1bis : Effondrement avec recyclage du Plutonium

L'énergie totale devient 1,8 fois celle du premier cycle. La matière fissile effectivement "brûlée" avec cette méthode s'élève à environ 5 t, soit un peu moins de 1% de la masse d'uranium naturel donnée au départ, laquelle reste ainsi à peine entamée et pourtant inutilisable puisqu'elle ne contient plus que 0,25% d'uranium 235.

Le lecteur peut maintenant apercevoir le collapsus à l'horizon : l'épuisement des gisements connus, conséquence de l'ampleur des programmes nucléaires dans le monde, provoquera l'arrêt des réacteurs. Il semble que la pénurie commencera aux alentours de l'an 2000, dans moins de vingt-cinq ans. D'autres calculs réalisés plus loin confirmeront ce chiffre.

2°) TEMPS DE DOUBLEMENT, TAUX DE SURREGENERATION, PERTES DE PLUTONIUM

Le temps de doublement pour un réacteur surrégénérateur est défini comme le nombre d'années qui lui sont nécessaires pour fournir à un frère jumeau la matière fissile d'une première charge, en plus de son propre réapprovisionnement qu'il assure lui-même durant toute cette période.

Le temps de doublement est étroitement dépendant de la nature du combustible, du taux de surrégénération et des pertes de plutonium lors du retraitement.

a) Influence de la nature du combustible

La nature du combustible impose la puissance maximale dissipable par unité de masse et, donc, la masse totale du cœur pour une puissance désirée donnée. La concentration en matière fissile dépend alors essentiellement de cette puissance (plus la puissance augmente, plus le cœur est gros et plus la concentration diminue).

Avec les combustibles actuels (oxyde de plutonium et d'uranium) la limite théorique du temps de doublement est de quinze ans environ. Si l'on pouvait disposer d'un combustible plus performant, le cœur pourrait être plus petit et, comme il contiendrait moins de matière fissile, son temps de doublement serait, à taux de surrégénération égal, plus court. C'est pourquoi on essaie actuellement de mettre au point un nouveau combustible : le carbure de plutonium et d'uranium. Avec lui le temps de doublement théorique minimal serait proche de dix ans.

b) taux de surrégénération

Le taux de surrégénération est le rapport entre la masse de matière fissile produite par transmutation dans la couverture du cœur et celle de la matière fissile "brûlée" dans le même temps au sein du cœur. Le taux maximum paraît être de 1,3 (pour Super-Phénix il est calculé à 1,18). Cela signifie donc que si 1 kg de plutonium est fissionné dans le cœur, 1,3 kg est produit dans la couverture, d'où un excédent de 300 g.

c) Influence des pertes sur le temps de doublement

Prenons l'exemple d'un réacteur de 3 000 MW thermiques, 1 200 MWé, dont le cœur contient initialement 4,5 t de plutonium, et supposons que son temps de doublement soit de quinze ans. Chaque année ce réacteur produira un excès de plutonium de 0,3 t.

Il est très probable que les cœurs de réacteurs seront renouvelés par moitié tous les ans. On aura donc à extraire :

2,25 + 0,3 = 2,55 t de plutonium chaque année.

Si la perte est de 2 %, alors la masse réellement récupérée sera de 2,55 x 0,98 = 2,5 t. L'excédent passe de 0,3 à 0,25 t et le temps de doublement est alors augmenté de 3 ans, soit 20 % de plus.

Et plus le temps de doublement théorique,c'est-à-dire sans pertes, est long, plus la sensibilité aux pertes du temps de doublement réel est grande.

Si on suppose un temps de doublement triple, soit 45 ans, pour le réacteur pris en exemple, la production excédentaire théorique annuelle serait de 100 kg. La masse de plutonium à extraire chaque année devient :2,25 + 0,1 = 2,35 tonnes. Des pertes de 2% correspondant toujours à quelque 50 kg, l'excédent réel diminue de moitié : il est réduit à 50kg. Le temps de doublement passe alors à 90 ans, soit une augmentation de 100%.

Des calculs systématiques permettent alors de tracer les courbes suivantes :

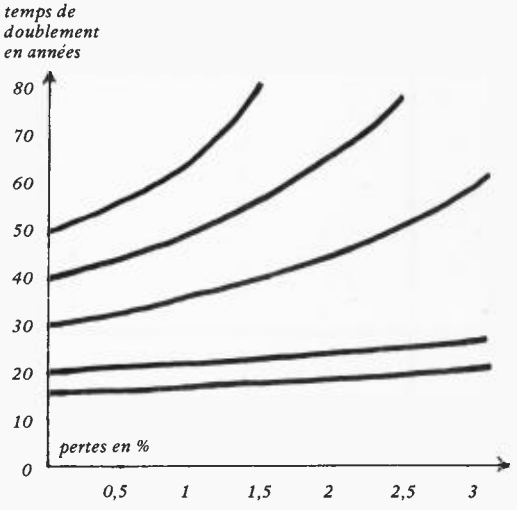


fig. 2 : sensibilité aux pertes des temps de doublement

On constate qu'il faut disposer de réacteurs ayant un temps de doublement hors pertes inférieur à vingt ans (ce qui n'est encore tenté nulle part) pour qu'ils soient relativement indépendants des performances du retraitement.

3°) UN SYSTEME NUCLEAIRE "IDEAL"

Nous rappelons que le retraitement du combustible est achevé un an après sa sortie du réacteur.

a) Calcul plus précis de la puissance du parc de réacteurs à eau légère (avec facteurs de charge de 80%!)

Ce calcul est effectué en pourcentage de la puissance initiale de 188 000 MW, accessible "idéalement" avec un stock d'uranium naturel de 100 000 t intégralement investi dans la première charge de 200 réacteurs de 940 MW.

Chaque année on retire un tiers du cœur des réacteurs en fonctionnement pour retraitement et on répartit le combustible utilisable sous forme de charges complètes. Pour simplifier on n'a pas imposé au système de donner une puissance qui soit un multiple entier de la puissance unitaire de base 940 MW (rien n'empêche en effet de disposer de réacteurs de puissance différente).

Après la première année à 188 000 MWé, le système de réacteurs subit une diminution de puissance d'un tiers. La puissance délivrée la seconde année se monte donc à 66,6% de celle de la première année. Cette seconde année est mise à profit pour retraiter le tiers déchargé et en extraire d'une part l'U235 récupérable, d'autre part le plutonium produit. La puissance que peut fournir l'U235 récupérable s'élève à 8,7% de la puissance initiale du système.

A la fin de la seconde année, on fera subir aux réacteurs un nouveau déchargement par tiers, mais on rajoutera l'uranium récupéré après le premier retraitement et réenrichi à la concentration de 3,35%.

La puissance fournie la troisième année (°) serait donc de:

$$0{,}66 \times 2/3 + 0{,}087 = 0{,}531$$

soit 53,1% de la puissance initiale. Et ainsi de suite. La formule itérative qui donne la puissance Wk de l'année k en fonction de celles des années k-1 et k-2 est donc:

$$W_k = 2/3\, W_{k-1} + 0{,}087\, W_{k-2}$$

(°) En fait elle est un peu plus faible car notre modèle postule qu'une quantité, certes décroissante, d'uranium ne quitte jamais le cœur des réacteurs. Impossible de nous taxer, par conséquent, de pessimisme à tout crin!

Elle a servi à dresser le tableau 1 où l'on peut suivre le collapsus du système à eau légère. Parallèlement nous avons indiqué quel était le pourcentage de puissance, par rapport à la puissance initiale du parc des réacteurs à eau légère, susceptible d'être produit par des réacteurs à neutrons rapides "brûlant" le plutonium produit l'année précédente lors du retraitement du combustible des réacteurs à eau légère.

Comme nous avons admis qu'il fallait constituer un stock de plutonium capable d'assurer à la fois la première charge et la première recharge des réacteurs surrégénérateurs, nous avons par conséquent retardé d'un an leur introduction dans le système nucléaire "idéal".

La référence bibliographique (2) nous a permis d'évaluer à 5,85% de la puissance initiale des réacteurs à eau légère la puissance que l'on pouvait attendre de réacteurs surrégénérateurs alimentés avec le plutonium du premier retraitement.

K année	puissance des réacteurs à eau légère %	puissance supplémentaire pour les surrégénérateurs %
0	100	0
1	66,60	0
2	53,10	0
3	41,20	5,85
4	31,90	3,90
5	24,80	3,10
6	19,30	2,41
7	15	1,86
8	11,70	1,45
9	9,10	1,13
10	7,07	0,877
11	5,50	0,684
12	4,27	0,532
13	3,32	0,414
14	2,58	0,322
15	2	0,250
16	1,55	0,190
17	1,20	0,150
18	0,93	0,117
19	0,72	0,090
20	0,56	0,070

tableau 1 : évolution de Wk

b) Introduction des surrégénérateurs

Nous notons 1 + E le taux de croissance des surrégénérateurs, où E est l'inverse du temps de doublement déjà défini.

Appelons maintenant Wi l'accroissement de charge procuré l'année i par les réacteurs à eau légère aux surrégénérateurs (cf. tableau 1).

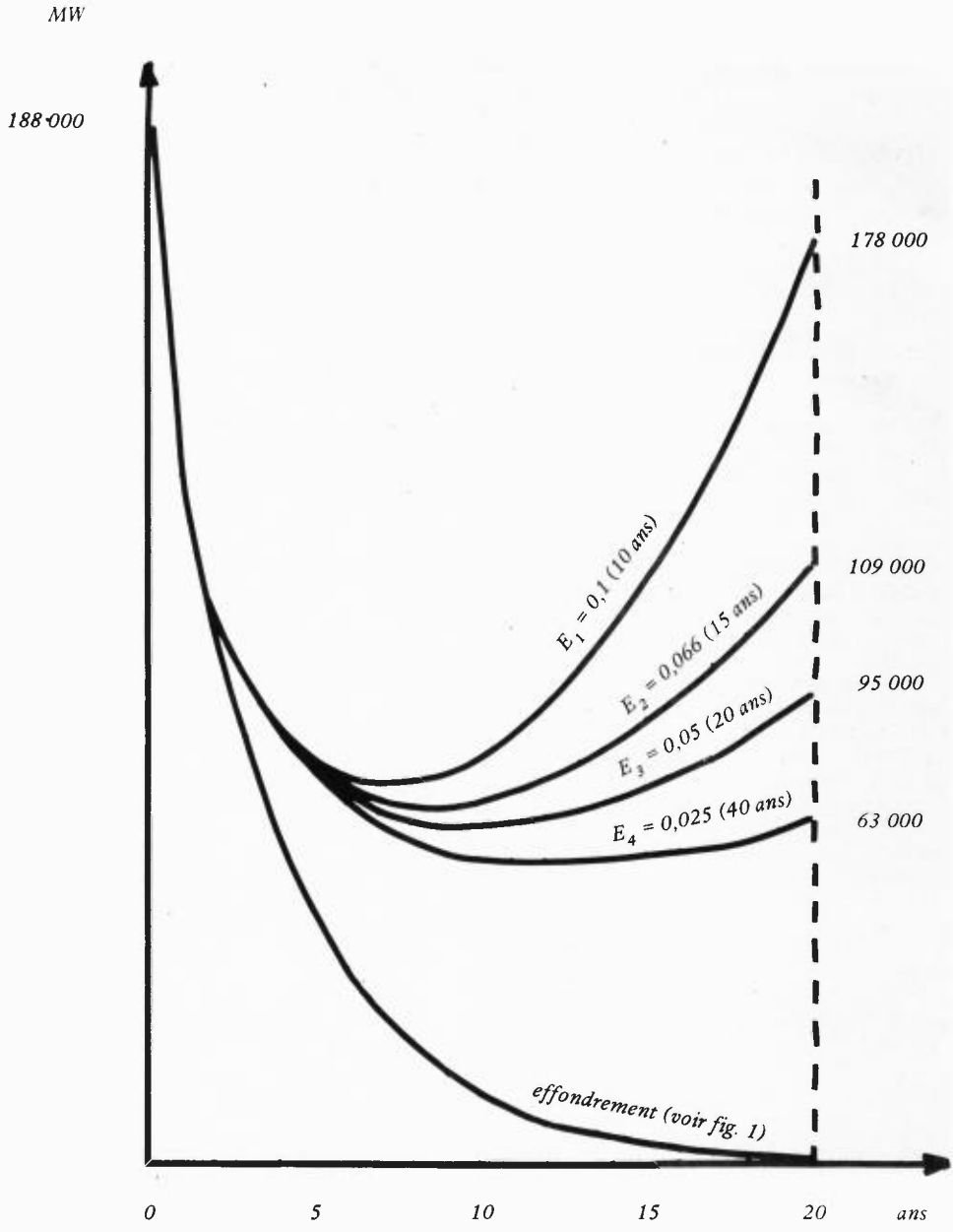


fig. 3 : Evolution de la puissance du «Système idéal» suivant le temps de doublement

La puissance disponible des surrégénérateurs lors de l'année k a pour expression:

$$W'_k = \sum_{i=3}^{k} W_i (1 + E)^{k-1}$$

où Wi est multiplié par le taux d'accroissement élevé à une puissance égale à la différence entre l'année k et l'année i d'introduction de Wi. La somme, notée Σ, de toutes les contributions des Wi où i est inférieur à k fournit alors l'énergie totale du système des surrégénérateurs.

Nous avons dressé un tableau (cf. tableau 2) où l'on peut suivre l'évolution de W'k en fonction des diverses valeurs de E. Nous avons retenu 4 valeurs significatives pour E :

E1= 0,1
soit un temps de doublement de 10 ans.

E2= 0,066
soit un temps de doublement de 15 ans

E3= 0,050
soit un temps de doublement de 20 ans

E4= 0,025
soit un temps de doublement de 40 ans

Rappelons qu'E1 représente une performance hypothétique, accessible seulement avec un nouveau combustible (carbure d'uranium et de plutonium), qu'E2 est la performance maximale théorique avec le combustible actuel (oxyde d'uranium et de plutonium), qu'E3 n'a pas pas encore été tenté dans le monde, et qu'E4 est visé par les installations en projet.

Pour k supérieur à 20, on néglige l'apport quasi nul du système à eau légère et le parc double sa puissance selon la règle des intérêts composés en :

$E_1 = 0,1$ ..... 8 ans
$E_2 = 0,066$ ..... 12 ans
$E_3 = 0,050$ ..... 15 ans
$E_4 = 0,025$ ..... 28 ans

Le tableau 3 fournit la puissance totale Pk du parc nucléaire complet les 20 premières années de son développement (Pk = Wk + W'k).

Tous ces résultats sont résumés sur la figure 3 qui, rappelons-le, montre ce que l'énergie nucléaire serait au mieux capable de nous donner (en énergie brute), avec 4 hypothèses sur le temps de doublement des surrégénérateurs, à partir de tout l'uranium vraisemblablement accessible en France d'ici l'an 2000. Cet uranium est supposé disponible en 1975 et déjà entièrement investi dans 200 réacteurs du type Fessenheim.

K	E1=0,1	E2=0,066	E3=0,050	E4=0,025
3	5,8	5,8	5,8	5,8
4	10,3	10,1	10	9,8
5	14,4	13,1	13,5	13,2
6	18,3	17,2	16,6	15,7
7	21,9	20,2	19,2	17,9
8	25,5	22,9	21,5	19,7
9	28,6	25,5	23,7	21,3
10	32,4	28,1	25,8	22,7
11	36,3	30,7	27,8	24
12	40,4	33,2	29,7	25,1
13	44,8	35,8	31	26,1
14	49,6	38,5	32,9	27
15	54,7	41,2	34,7	27,9
16	60,4	44,1	36,6	28,8
17	66,5	47,1	38,5	29,6
18	73,2	50,3	40,5	30,4
19	80,6	53,7	42,6	32
20	88,7	57,4	44,8	32,9

tableau 2 : évolution de W'k

K	E1=0,1	E2=0,066	E3=0,050	E4=0,025
0	100	100	100	100
1	66,6	66,6	66,6	66,6
2	53,1	53,1	53,1	53,1
3	47	47	47	47
4	42,2	42	41,9	41,7
5	39,2	38,7	38,3	38
6	37,6	36,5	35,9	35
7	36,9 mini	35,2	34,2	32,9
8	37,2	34,6	33,2	31,4
9	37,7	34,6 mini	32,8	30,4
10	39,4	35,1	32,8 mini	29,7
11	41,8	36,2	33,3	29,5
12	44,7	37,5	33,9	29,4
13	48,1	39,1	34,3	29,4 mini
14	52,2	40,7	35,5	29,6
15	56,7	43,2	36,7	29,9
16	61,9	45,6	38,1	30,3
17	67,7	38,3	39,7	30,8
18	74,1	51,2	41,4	31,3
19	81,3	54,4	43,3	32,7
20	89,3	58,2	45,6	33,7

tableau 3: évolution de Pk

Les Amis de la Terre rassemblent dans le monde ceux qui s'efforcent de préserver, restaurer et utiliser rationnellement l'écosphère, tout en assurant à chacun un environnement conforme à ses besoins et à ses désirs. En France, à partir de la réflexion écologique, quarante groupes mènent campagne sur des objectifs locaux et nationaux. Leur action s'étend à tous les domaines de la vie sociale et individuelle. Elle remet en cause aussi bien le système politique dominant que certaines pseudo-alternatives présentées par l'opposition. Elle est inséparable d'une lutte pour l'autogestion à tous les niveaux de la vie.

ETATS-UNIS
Friends of the Earth

San Francisco
529 Commercial St., 94111

Washington
620 C St., S.E., 20003

New York
72 Jane St., 10014,

GRANDE-BRETAGNE
Friends of the Earth, Ltd.

9 Poland St.,
London W 1 V 3DG

FRANCE
les Amis de la Terre

16, rue de l'Université,
75007 Paris

SUEDE
Jordens Vänner

Box 9062
10271 Stockholm

ALLEMAGNE FEDERALE
Freunde der Erde

Postfach 100221-2 Hamburg 1

AUSTRALIE
Friends of the Earth

59 MacArthur Place,
Melbourne, Victoria

NOUVELLE ZELANDE
Friends of the Earth

Box 39 - 065, Auckland West

THAILANDE
Friends of the Earth

26712 Acroonamarin Road,
Bangkoknoi, Bangkok

HOLLANDE
Vrienden van de Aarde

Herengracht 109, Amsterdam

YOUGOSLAVIE
Prijatelji Sveta

41 000 Zagreb, Adzijina 6

AFRIQUE DU SUD
Vriende van die Aarde

Box 11435, Brooklyn, Pretoria

IRLANDE
Friends of the Earth

8 Vergemount, Clonskeagh,
Dublin 6

AISNE - SUD
Denis Toison, B.P. 55
02400 Château-Thierry

GAP
Deux cercles : lei Amics de la Terra, 62, avenue Jean-Jaurès, 05000 Gap: cercle Champsaur, Alain Bonnardel, Laye 05500 Saint-Bonnet-en-Champsaur.

ARDECHE
39, avenue Ludovic-Bacconier
07000 Privas

MARSEILLE
Bernard Genet, 7' boulevard National, 13001 Marseille.
Tél. : 50-42-31

CAEN
M. et F. Chanial, 15, rue Pemagnie, 14000 Caen.
Tél. : (31) 82-36-85

AQUITAINE
Centre culturel et sportif
13, place de Gaulle,
24600 Ribérac. Tél. :
Léo Barconnière (53) 90-07-31

LANDES
J.-P. Dufau, rue des Lilas
40530 Labenne

NANTES
Frédéric Muller, 20, rue de la Ville-en-Bois, 44000 Nantes

CANTON DE SAINT-NICOLAS
R. Someille, 14, cité de la Butte, Varaugeville, 54110 Dombasle-sur-Meurthe
M. Fève, chemin de la Petite-Embanie, 54110 Dombasle-sur-Meurthe

NIEVRE
Colette Vallée, La Fragneau
58230 Moux-Montsauch

DOUAI
Thérèse Segard, 295, rue de Recklinghausen, Résidence des Cèdres, Apt. 222, 59500 Douai

ESCAUDAIN
10, rue du 8-Mai,
59124 Escaudain. Tél. :
52-90-25

GRAVELINES
Hôtel du Commerce
Tél. : 67-15-77

LILLE
Pierre Radanne, 51, rue de Gand
59000 Lille

ROUBAIX
Françoise Trachet, M.J.C. de la Fosse-aux-Chênes,
59100 Roubaix

TOURCOING
François-Xavier Dubois
23, rue Jacques-Cartier
59200 Tourcoing

VALENCIENNES
Marie-Paule Decourtray, 2-4, rue Degas, 59300 Aulnoy-Valenciennes

BOULOGNE-SUR-MER
M. Ryckebauer, 1, rue Saint-Nicolas, 62200 Boulogne-s/Mer

CLERMONT-FERRAND
Maurice Aubert,
35, rue J. Romme,
63000 Clermont-Ferrand

LYON
Ghislain Nicaise,
62, rue Mercière
69002 Lyon

PARIS
Librairie Entente
12, rue Honoré-Chevallier
75006 Paris

SEINE-ET-MARNE-NORD
Georges Simon, 62, quai des Mariniers, 77500 Chelles

SEINE-ET-MARNE-SUD
Yves Lenoir, chemin des Postiers, 77116 Ury. Tél. : 424-42-98. G. Dorlé, 56 quater rue de la Charité, 77210 Avon

LA CELLE-SAINT-CLOUD
Georges Bodu, 30 avenue de Verdun, 78110 La Celle-Saint-Cloud

MARLY-LE-ROI
Michel Reversat, 1, square Saint-Germain, 78160 Marly-le-Roi. Tél. :
958-86-97

A.T. DU CONFLUENT
Michel Reversat, B.P. 77
78700 Conflans-Sainte-Honorine

HOUILLES
Yolande Rivet, 5, rue Kléber
78500 Sartrouville

VAR
Patrick Lebre, 8, rue E. Renan
83600 Toulon-le-Mourillon

YONNE
Denis Baize, 2, rue des Consuls
89000 Auxerrre. Tél. :
(86) 52-56-87

ESSONNE
Jean-Marie Périnet, 24, rue du Château-d'Eau, 91130 Ris-Orangis. Tél. :
906-17-23

VILLENEUVE-LA-GARENNE
Mme Bignon, 51, avenue Jean-Moulin, 92390 Villeneuve-la-Garenne

SURESNES
150, boulevard du Maréchal de-Lattre-de-Tassigny, 92151, ou B.P. 92151 Suresnes. Tél. :
506-03-55

SEINE-SAINT-DENIS
B.P. 102 à Noisy-le-Sec 93130
Tél. : 843-49-98

VAL-DE-MARNE
Roger Boudon, 7, rue de Breteuil, Saint-Maur-des-Fossés, 94100. Robert Clairet
35, rue E. Renan, 94700 Maisons-Alfort. Tél. : 368-95-25

VAL-D'OISE
8, rue Pierre-Curie, 95300 Pontoise, tél. , Pascal Tourbe
457-40-89, et Michel Dupont,
031-10-90

VALLEE DE L'YSIEU
(SOS Sylvie), Christian Jodon
12, rue de l'Eglise
95270 Luzarches

M. Poincaré inaugurant la centrale de Fessenheim.

POINCARE REPORT

In France, where the financial chiefs claim to be organizing economic growth, nuclear power cannot be allowed to undergo the slightest delay, at the risk of collapsing along with the rest of industry. For its survival depends on the exponential development of fast breeder reactors, but this is not tenable unless it is started in time. And it has not been started in time...
The only way of justifying nuclear power would be to implement immediately zero energy growth, which would give us a breathing space of 150 years for fossile fuels. Under these conditions a progressive nuclear programme would have enough time to ensure a smooth takeover. But again, the introduction of solar energy would be even easier and more desirable.

These are the findings of the POINCARE REPORT, published by Les Amis de la Terre, in which it is shown that, even if the nuclear industry could be speedily developed under the most favourable conditions, through the immediate introduction of the most reliable fast breeders, it would not be capable of taking over from fossile fuels in time. Given the extent of nuclear programmes, particularly in Europe, the scarcity of easily accessible uranium will rapidly lead to the end of light water reactors in about the year 2000. Then there will be an **inevitable drop** in electricity production from nuclear power, a drop which will be even more accentuated the faster the development of the light water programme and the slower the introduction of fast breeders. And this drop will coincide with the start of a scarcity of fossile fuels, i.e. with a sharp increase in their price. In this context, disastrous from both the energy and economy points of view, it will be increasingly difficult to obtain the new investments necessary to continue the energy policy ; investments which will involve considerable energy and money, whether for nuclear or solar power. These difficulties must be added to the innumerable technical problems brought about by managing a nuclear programme whose essential characteristic will be its inflexibility. Moreover, industry is unlikly to be capable either of undergoing an important lowering of energy production, or of adapting quickly to changes in the way in which energy will be distributed.
Choosing to reproduce in the short term an existing structure is only placing restraints on the future, without preparing anything else than a strict and sinister totalitarianism. Explaining what is to come is to accept the handing over of one's power and working from day to day with others.
Is this too much to ask of the powermongers ?