

LE BILAN ENERGETIQUE DE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

Alors que l'on commence à pressentir la fin des sources d'énergie faciles et à bon marché que sont le pétrole et le gaz naturel, bien des gens pensent que l'on a trouvé avec la fission nucléaire une source d'énergie tout aussi commode et tout aussi économique. Quelques signes montrent cependant qu'on commence à en revenir du bel optimisme des années 60. Nous ne parlerons pas ici des dangers certains de la fission nucléaire, du pacte Faustien avec le Diable qu'elle implique, ni de la vive contestation qu'elle provoque. Mais des hésitations se font jour dans des milieux dont les devoirs moraux vis-à-vis de nos descendants ne sont pas le premier souci.

On apprend, par exemple, que General Electric, Union Carbide et Westinghouse se sont retirées de deux projets nucléaires américains, l'un portant sur une usine d'enrichissement d'uranium, l'autre sur une usine de retraitement des combustibles usés : ces projets sont, disent ces sociétés, trop aléatoires, pas assez bien conçus et trop chers. Les compagnies d'électricité américaines viennent d'annuler ou de retarder des contrats prévoyant l'installation de 40 000 mégawatts (MW) nucléaires. L'une d'elles, la Southern California Edison, ayant constaté que la consommation électrique de ses abonnés avait diminué de 7% en un an, a renoncé à faire construire deux réacteurs à haute température de 770 MW chacun. L'hebdomadaire "Entreprise" s'interroge souvent sur le financement des centrales nucléaires, et la presse du 12 décembre 1974 nous apprend que le Ministère des Finances émet des réserves, d'ordre financier, sur la mise en chantier de 20 000 MW nucléaires en 3 ans. D'autre part l'Energy Policy Project de la Fondation Ford, dans un rapport qui vient d'être publié (1), montre que, pour arriver au même résultat au niveau de la consommation, il est bien meilleur marché d'investir dans les économies d'énergie que dans sa production : le scénario qui prévoit la continuation de la croissance "historique" (hystérique ??) de la production d'énergie demande des efforts herculéens d'investissement.

Or que signifient ces investissements ? Malgré de fortes distorsions, dues à la nature même du système capitaliste, ils représentent finalement du travail humain, des matières premières et de l'énergie. Dans notre société de consommation à profil énergétique élevé, le travail humain, transformé en salaire, finit par accroître la demande d'énergie. Quant aux matières premières, il est évident qu'il faut souvent beaucoup d'énergie pour leur extraction et leurs transformations. On peut donc se\* si les contraintes financières ne sont pas le reflet fort déformé il est vrai, -de contraintes thermodynamiques : quel est le coût en énergie de la production d'énergie ? "Comme le secteur énergétique demande de plus en plus de capitaux, la consommation brute d'énergie et le PNB pourraient, en théorie, croître tous deux tandis que l'énergie disponible nette serait étale ou même en diminution... De plus, les technologies énergétiques qui ne produisent aujourd'hui qu'un petit bénéfice en énergie, en produiront encore moins, ou deviendront même déficitaires, au fur et à mesure que l'énergie de haute qualité, à coût énergétique bas, utilisée pour les faire fonctionner déclinera" (3) :

"Cette vérité est souvent exprimée à l'envers par les économistes, car ils ne reconnaissent pas les changements externes dans la qualité de l'énergie. Ils prétendent souvent que les sources marginales d'énergie seront rentables plus tard, lorsque les sources riches ne seront plus là. Mais une source d'énergie n'est pas une source si elle ne produit pas, et la capacité de produire des sources marginales diminue lorsque les autres sources qui leur permettent de fonctionner deviennent plus pauvres."

\* demander

Il y a des exemples non nucléaires de cette situation. Dans une nappe de pétrole moyenne, le taux d'extraction ne dépasse guère 30% à 35%, et il ne faut pas espérer dépasser 50% à 60% au moyen de récupérations secondaires et tertiaires, "ne serait-ce que parce que l'énergie qu'on ferait descendre dans le puits sous forme de vapeur ou autre dépasserait vite celle qu'on ferait remonter sous forme de pétrole" (2). Pour les sables asphaltiques d'Athabasca au Canada, la distillation in situ consommerait à peu près autant d'énergie qu'il n'en serait extrait ; il est vrai que cette énergie pour la distillation pourrait être extraite des sables eux-mêmes, mais leur valeur énergétique nette serait tout de même très inférieure à leur contenu brut. Un problème analogue se pose pour les schistes bitumineux.

Dans le cas de l'industrie nucléaire, on a commencé à se poser des questions dès qu'on s'est souvenu qu'une très grande partie de l'électricité produite par les immenses barrages de la Tennessee Valley Authority est consommée par le centre nucléaire d'Oak Ridge. Un calcul d'un ingénieur américain, A. J. Ackermann, montre que, jusqu'en 1971, l'USAEC a consommé 802 milliards de kwh pour une production totale de 86 milliards de kwh nucléaires. Il est vrai que l'atome militaire est inclus du côté "débit" mais, en 1970 encore, la consommation électrique des usines américaines d'enrichissement d'uranium dépassait la production d'électricité nucléaire. Au début de 1974, l'A. P. R. I. de Jean Pignero lançait un cri d'alarme. (4)

Mais, au delà de ces constatations passées, il est important d'esquisser un bilan énergétique de l'industrie nucléaire, présente et à venir. Comme la comptabilité énergétique n'en est qu'à des premiers balbutiements, comme on ne sait pas encore très bien combien de joules au total sont entrées dans la fabrication d'un tuyau, d'une cuve, d'un câble ou d'un bâtiment, un tel bilan ne peut être qu'approximatif. H. Odum et deux collègues de Floride (5) ont calculé qu'un réacteur à eau légère de 1000 MW doit fonctionner dix ans à pleine capacité pour rembourser sa dette énergétique. Nous allons résumer maintenant un autre calcul, entamé par un groupe de savants anglais (Dr. Chapman, Amory Lovins, N Mortimer, G. Leach Dr John H. Price) et mis au point par le dernier nommé (6).

La méthode de calcul est la suivante :

1) on évalue l'investissement énergétique nécessaire à un réacteur, ce qui comprend :

- sa construction,
- sa charge initiale de combustible (extraction du minerai, traitement chimique, enrichissement si la filière le demande, fabrication),
- la part de construction des installations annexes (enrichissement, re-traitement, gestion des déchets, etc...).

Ce nombre de kwh est divisé par 5, durée moyenne de la construction réelle d'un réacteur, et on obtient l'investissement annuel,  $P_i$ .

2) La production annuelle brute du réacteur,  $P^o$ , est facile à calculer connaissant sa puissance nominale (ici 1000 MW) et son facteur de charge (évalué par J Price à 62%, moyenne britannique, plus élevée que les 50% américains de 1974 (7) et que les 51% français de 1974 (8) ).

3) Il faut déduire de  $P^o$  les frais énergétiques annuels de fonctionnement, qui comprennent :

- les pertes sur les lignes et les frais non commerciaux de la compagnie productrice (total évalué en Angleterre à 11,25% de  $P^o$ ),
- les recharges en combustible (calculées comme ci-dessus),
- les transports, le traitement, la gestion des déchets, etc.

Cela fait on obtient la production annuelle nette du réacteur,  $P^o$ .

C'est le rapport  $P^0/P_i$  qui est important pour la suite. Ses valeurs calculées par J. H. Price pour diverses filières sont voisines de 3 (avec une erreur de 0,5) si on utilise un minerai d'uranium assez riche (à 0,3%) ; avec un minerai pauvre (à 0,007%), ils chutent au dessous de 1 (sauf pour la filière CANDU). Voir plus loin le détail de ce calcul que nous avons un peu perfectionné.

Un réacteur isolé a payé sa dette énergétique en  $5P_i/P^0$  ans, soit en 20 mois suivant le calcul le plus favorable de Price. Le calcul de H. T. Odum et de ses collaborateurs (5), donne  $5P_i/P^0 = 10$ , d'où  $P^0/P_i = 0,5$ .

Mais la situation énergétique est moins favorable si, au lieu d'un réacteur isolé, on considère plus réalistement un programme de réacteurs prévoyant une croissance exponentielle dont le temps de doublement  $T$  est peu élevé. Un calcul comportant quelques intégrations de fonctions exponentielles indique en combien de temps ce programme aura payé sa dette énergétique... s'il peut la payer. Car il y a des cas où il reste toujours en déficit : ce sont ceux où le rapport  $P^0/P_i$  est inférieur au nombre  $e^{a \cdot (e^{5a} - 1)}$  (on pose  $a = (\log 2)/T$ ).

Cette circonstance peut s'expliquer sans appareil mathématique : si le temps de doublement du nombre des réacteurs est suffisamment faible, il peut y avoir à chaque instant beaucoup plus de réacteurs en construction que de réacteurs en fonctionnement, de sorte que ces derniers ne peuvent pas fournir l'énergie nécessaire à la construction de leurs congénères.

Bien entendu, une croissance exponentielle indéfinie est impossible. Mais on verra plus loin qu'une croissance trop rapide implique de très difficiles problèmes de fin de croissance. En tous cas, le calcul mathématique auquel il a été fait allusion permet de tracer une fort intéressante courbe (voir feuille jointe). Elle indique, pour un rapport  $P^0/P_i$  donné et pour un temps de doublement  $T$  donné du programme nucléaire, quel pourcentage de la production énergétique nette doit être affecté à l'investissement énergétique.

Reste à tirer quelques conclusions, traduites librement de l'article de J. Price (6). Dans les calculs, on a négligé un certain nombre de termes dont l'inclusion aurait probablement rendu les résultats pires (c'est-à-dire  $P^0/P_i$  plus petit) de façon significative mais inconnue pour l'instant. Cette évaluation optimiste montre que les réacteurs nourris d'uranium provenant de minerais riches fournissent de l'énergie 2 à 3 fois plus rapidement qu'ils n'en consomment pendant leur construction. Si l'uranium provient de minerais pauvres (celui de Chattanooga Shale par exemple) le rapport  $P^0/P_i$  est entre  $1/4$  et  $5/4$ , de sorte qu'un réacteur isolé produit (le plus souvent) à peine un peu plus d'énergie qu'il n'en faut pour l'alimenter.

Dans le cas "dynamique", -c'est-à-dire lorsque les réacteurs ne sont pas considérés isolément mais comme partie d'un programme nucléaire dont le total des entrées et des sorties est ce qui importe à chaque instant, - les exigences portant sur le rapport de puissance  $P^0/P_i$  des réacteurs sont beaucoup plus strictes. Si le nombre des réacteurs s'accroît trop rapidement, l'énergie annuelle qui doit être continuellement investie dans la construction nouvelle est une large part de celle que produit le programme. Par exemple, si un programme nucléaire, fondé sur la filière énergétiquement la plus avantageuse (graphite-gaz ou eau légère) et utilisant un minerai riche en uranium, doit fournir à la société la moitié de l'énergie qu'il est théoriquement supposé fournir (l'autre moitié étant investie dans le programme), alors que le temps de doublement du nombre des réacteurs ne doit pas dépasser 4 ans ; avec la filière la moins avantageuse (CANDU), le temps correspondant est de 5,5 ans. Si ce temps de doublement est moindre que 2,6 ans pour les filières les plus avantageuses (3,5 ans pour les moins avantageuses), alors le programme nucléaire dépensera continuellement plus d'énergie qu'il n'en fournira. Or le temps de doublement du programme nucléaire est de 4,3 ans pour la

Grande Bretagne, de 3 ans pour la CEE, de 2,5 ans pour les U. S. A., et de 2 ans pour la France (NDT : Cocorico !). Tous ces programmes vont donc fournir, comme apport net à la société chaque année, moins de la moitié de la demande énergétique qu'ils sont supposés couvrir ; les produits énergétiques nets de l'américain et du français seront même négatifs.

La zone hachurée sur la courbe montre les contraintes imposées par des temps de doublement nucléaires supposés assez brefs pour permettre une substitution substantielle au pétrole en quelques décennies. Les temps de doublement inclus dans la zone hachurée, - de 2 à 4,5 ans, - couvrent les taux de croissance "historiques" et officiellement prévus dans presque tous les pays. Tous ces temps de doublement sont assez brefs pour qu'on soit sûr, -avec des rapports de puissance  $P_0/P_1$  réalistes ( $// 3$ ), - que pas plus d'environ la moitié des fournitures attendues sera disponible pour d'autres usages que l'investissement dans de nouveaux réacteurs ; de plus, dans la plupart des cas, cette énergie disponible sera bien plus faible ou même négative (les combustibles fossiles subventionnant alors l'industrie nucléaire).... Avec de l'uranium provenant de minerais pauvres (Chattanooga Shale), un programme nucléaire continu ayant un temps de doublement de 4,3 ans serait perpétuellement un consommateur net d'énergie : plus nous construirions de réacteurs, plus d'énergie nous perdriions.

Deux types de conclusions politiques découlent de ces considérations. Le premier est que des temps de doublement de quelques années (2-3 ans et même 4) ne sont certainement pas possibles avec l'énergie nucléaire si elle doit fournir des bénéfices énergétiques nets ; en fait, c'est probablement vrai de toute autre technologie énergétique majeure. Ces temps de doublement si courts viennent de ce qu'on cherche à la fois à maintenir un rapide taux de croissance et à substituer l'énergie nucléaire à celle des sources traditionnelles (comme le pétrole du Moyen Orient). Les nouvelles technologies énergétiques majeures peuvent, pour un temps, faire l'un ou l'autre, mais pas les deux ; ou, si elles essayent de faire les deux, elles ne produiront pas d'énergie nette. C'est là un bon argument (s'il en fallait un de plus (9) ) pour stabiliser ou réduire la demande d'énergie, afin de se donner le temps de rendre disponible un bon substitut au pétrole ; ce besoin de temps a déjà été perçu par beaucoup de gens en raison des inextricables problèmes de rythme et d'ordre de grandeur (9), de nature purement logistique, qui s'opposent à la prolifération très rapide de n'importe quelle technologie complexe....

Un autre type de conclusions politiques est suggéré par la question : quand obtient-on les apports cumulatifs d'énergie nette les plus favorables lorsqu'un programme exponentiel, initialement trop rapide, est plus tard ralenti ou arrêté ? Aucun processus exponentiel ne peut continuer indéfiniment ; mais quelles sont les conséquences énergétiques d'une réduction du taux de croissance ? La réponse dépend des conditions initiales mais, en général, le temps nécessaire pour combler les déficits énergétiques cumulatifs (dûs à la croissance initiale rapide) sont très longs ; ils dépasseront en général la durée de vie des installations construites (25 ans environ pour les réacteurs nucléaires). De plus, des calculs préliminaires semblent montrer que, au moins vers le début d'un programme trop rapide qui est en déficit énergétique, il est moins pénible à long terme (et plus efficace dans l'utilisation des ressources nationales) d'arrêter le programme et de détourner les ressources qu'on lui affecte vers une direction plus prometteuse, plutôt que de simplement le ralentir dans l'espoir de rentrer dans ses frais.

Une analogie économique peut être utile ici. Si une économie industrielle avec un taux fixe de formation de capital croît exponentiellement à un rythme trop rapide, son taux de formation de capital interne sera trop lent pour soutenir l'investissement, de sorte qu'un apport externe à croissance exponentielle est nécessaire. Si les taux de croissance sont ensuite diminués, ou si la marge de profit disponible pour rembourser la

cette dette extérieure pourra être très long ; s'il dépasse la durée de vie des usines construites avec le capital emprunté, on peut se dire qu'il aurait mieux valu ne pas les construire... Le capital dépensé pour elles peut tomber dans un gouffre sans fond. Les personnes familières avec les cash-flows et les comptes de profits et pertes verront aussitôt qu'accumuler une importante dette extérieure, comme décrit ci-dessus, ne relève pas d'une saine gestion, et devrait au moins être limité à des sommes et à des périodes aussi petites que possible (Note d'un traducteur cynique : s'appuyant sur de nombreux précédents, on peut toujours espérer ne pas rembourser ses dettes extérieures ; mais, sur le plan énergétique, ce n'est pas possible, on a les principes de la thermodynamique contre soi !)...

Malheureusement, les dirigeants qui auraient à arrêter une croissance exponentielle exagérément rapide et déjà largement entamée (par exemple dans l'énergie nucléaire), pourraient créer de sérieux problèmes futurs par leur effort pour résoudre des problèmes présents. Par exemple, le rythme de construction actuel devra être essentiellement reproduit dans 25 ans (durée de vie prévue des réacteurs) afin de remplacer les installations déclassées. Si notre politique de construction est en "accordéon", il faudra partiellement reproduire ces hauts et ces bas 25 ans plus tard, au grand dam du fonctionnement régulier de la machinerie financière et industrielle. Clairement, le meilleur moyen de minimiser ces problèmes présents et futurs est d'abandonner au plus vite les programmes accélérés : plus longtemps on attend, plus les transitions seront difficiles, et plus graves seront leurs implications sociales et économiques. Une fois qu'un pays est fortement engagé dans une croissance nucléaire assez rapide pour impliquer un déficit énergétique, ou bien la croissance doit continuer (ce qui augmente encore le déficit), ou bien elle doit s'interrompre (ce qui causera de difficiles transitions 25 ans plus tard). Un moyen évident d'éviter ce dilemme est de ne pas entreprendre cette croissance ; une réflexion instamment nécessaire peut alors révéler d'autres stratégies, plus complexes et plus satisfaisantes.

On a cependant un atout pour les transitions : aussitôt que l'investissement dans de nouveaux réacteurs est réduit ou stoppé, une tranche d'énergie (et aussi d'argent, de matériaux et de main d'oeuvre qualifiée) devient immédiatement disponible pour être utilisée dans d'autres efforts de production ou d'économie d'énergie, ou vers d'autres buts sociaux. On entend souvent dire que les apports d'énergie venant de la fission nucléaire (ou du pétrole des mers européennes) doivent croître rapidement maintenant afin de créer du capital disponible pour l'investissement futur dans d'autres sources, - par exemple la captation directe ou indirecte de l'énergie solaire. Mais réorienter dès maintenant les ressources actuellement allouées à l'énergie nucléaire vers d'autres efforts, - bien que cela demande une planification soigneuse afin que les reconversions se passent harmonieusement, - est une voie, présentement plus commode, et à long terme moins traumatisante et plus économe d'énergie et d'autres ressources, pour réaliser l'objectif à long terme de bien capter les énergies actuelles (c'est-à-dire renouvelables et inépuisables).

Si l'énergie nucléaire était une technologie "douce", - avec une échelle plus petite et de moindres appétits énergétiques, - il serait moins pénible d'y réduire nos investissements une fois le processus largement entamé ; nous aurions plus de place pour les erreurs et un plus large spectre pour les expérimentations ; or c'est le cas pour les énergies actuelles. Il y a d'ailleurs un rapport entre ces expérimentations et notre politique nucléaire ; dans bien des pays industrialisés, comme le Grande Bretagne et la France, les organismes où l'on trouve le plus de talents et de ressources techniques sont ceux qui s'occupent de recherche et de développement nucléaires ; ils devraient être réorientés vers les options énergétiques non-conventionnelles, vers les économies d'énergie, vers les technologies décentralisées à la dynamique énergétique plus favorable

(NDT : ce qui impliquerait des réorganisations structurelles, car on voit mal un organisme "dur" se livrer tel quel à des recherches "douces").

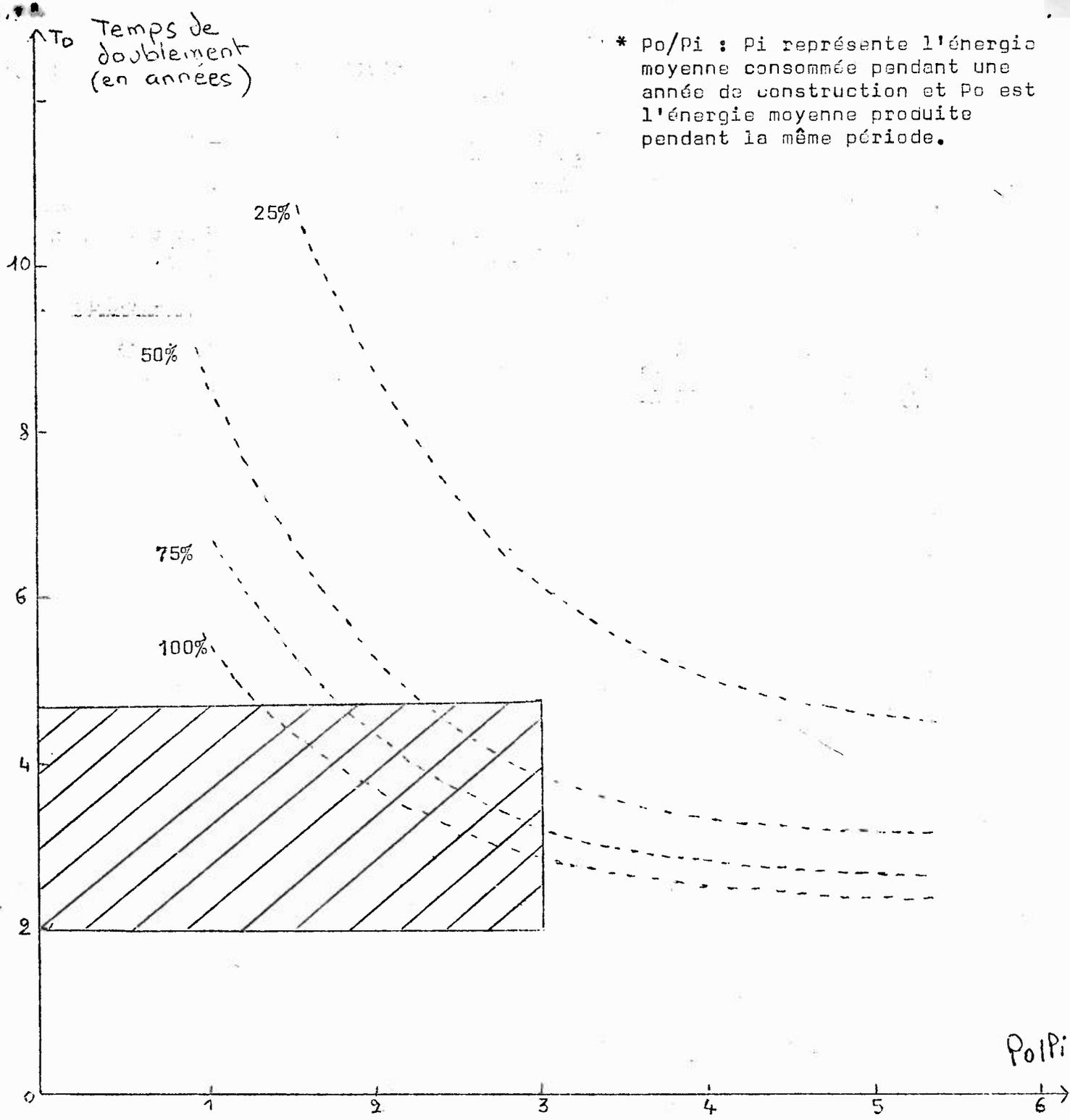
On a traditionnellement admis que nos problèmes énergétiques ne peuvent être résolus que par des substitutions de combustibles : bois, charbon pétrole, gaz, uranium... plutonium ? Mais, vu dans la perspective plus large des réflexions contemporaines sur les stratégies énergétiques, cela apparaît comme une vue plutôt courte, qui est née fort récemment à cause d'une série d'accidents historiques. Des sociétés très civilisées dans bien des parties du monde ont fonctionné très longtemps sans injections massives de combustibles fossiles ou fissiles ; l'usage largement répandu de ces combustibles date de deux siècles et leur utilisation massive a été un phénomène très bref, limité aux quelques décennies que nous venons de vivre. Les problèmes énergétiques actuels ne proviennent pas d'une vraie pénurie d'énergie, mais de difficultés à nous procurer notre drogue habituelle, - et aussi d'une pénurie d'imagination (à laquelle les divers groupes des "Friends of the Earth" vont s'efforcer de remédier).

Les nombreuses causes d'anxiété à propos des projets de rapide expansion de l'énergie nucléaire ont été souvent réprimées au moyen de l'affirmation que, quels que soient ses défauts, la fission nucléaire est au moins une source abondante et durable d'énergie, par laquelle on pourra guérir les maux de notre société. Si, comme cette analyse le suggère, la fission nucléaire n'est pas une source "d'énergie presque illimitée, relativement bon marché et assez propre" (10), mais est au contraire, dans certaines circonstances (par exemple un développement assez rapide pour paraître fournir un substitut adéquat au pétrole), un véritable tonneau des Danaïdes énergétique, alors ces arguments familiers en faveur de l'énergie nucléaire doivent être réexaminés.

Les Amis de la Terre  
(16, rue de l'Université, 75007 PARIS)

#### Notes

- (1) "A time to choose : America's energy future" (Ballinger, Cambridge, Mass, Oct. 1974. Analyses dans "La Gueule Ouverte" (n° 32, 18 déc. 1974, p. 14) et dans le "Sauvage" (n° 19, Janvier 1975).
- (2) Amory Lovins "World Energy Strategies" (Friends of the Earth, San Francisco, 529 Commercial Street, 1975). Traduction française en cours de publication.
- (3) H. T. Odum, *Ambio*, 2, 220, 1973, p.17.
- (4) "La Gueule Ouverte", n° 16, février 1974, p.17.
- (5) W. E. Bolch, P. N. Leng et H. T. Odum, "Some considerations that affect the net yield from nuclear power", 19th Annual Meeting, Health Physics Society, Houston, Texas, 7-11 juillet 1974.
- (6) Dr. J. Price "Dynamic energy analysis and nuclear power", polycopie Friends of the Earth, 9 Poland Street, London W1V 3DG, décembre 1974
- (7) D.D. Comey, "Will idle capacity kill nuclear power ?", *Bull. Atom. Scientists*, novembre 1974, pp. 23-28.
- (8) E. D. F. note d'information, octobre novembre 1974
- (9) Voir A. Lovins, loc. cit., note (2) - et Pr Mollo-Mollo, "L'énergie c'est vous", Stock 2 1974
- (10) A. M. Weinberg, *Science*, 177, 27, 1972; p.34



(NB - Pour le calcul mathématique conduisant à ces courbes, envoyer une enveloppe timbrée aux Amis de la Terre, 16 rue de l'Université, 75007 Paris).

Temps de doublement exponentiels qui, pour des valeurs données du rapport  $P_o/P_i^*$ , demanderont que les pourcentages indiqués du programme production/an contrebalancent les investissements dans ce même programme (par exemple la courbe "25%" serait justifiée par une demande de 75% de production énergétique pour des emplois autres que l'investissement dans de nouvelles installations). La durée de ces installations est supposée infinie. L'aire hachurée montre les contraintes qu'imposent des temps de doublement  $T_d$  suffisamment courts pour arriver à concurrencer le pétrole avant plusieurs décades. Ces temps de doublement couvrent l'expansion nucléaire projetée dans la plupart des pays. Ceci montre, pour des rapports accessibles ( 3), que la moitié au maximum de la production escomptée est utilisable à des fins autres que l'investissement dans de nouvelles installations nucléaires, et que dans la plupart des cas cette énergie utilisable est de loin inférieure, voire négative (ce qui signifie une aide continue des combustibles fossiles au nucléaire).