

CEA - R 2642

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**PERSPECTIVES A LONG TERME DES COUTS
DE TRAITEMENT DE L'URANIUM NATUREL IRRADIE**

TAILLES ET LOCALISATIONS OPTIMALES DES USINES

par

Lucien THIRIET

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

ÉTUDES
ÉCONOMIQUES

Claude OGER, Pierre de VAUMAS

SAINT - GOBAIN NUCLEAIRE

Rapport CEA - R 2642

Genève 1964, A Conf. 28/P/ 98

AOUT 1964

Ba

Translated into english

CEA-R 2642 - THIRIET Lucien, OGER Claude, de VAUMAS Pierre,

PERSPECTIVES A LONG TERME DES COUTS DE TRAITEMENT DE L'URANIUM
NATUREL IRRADIE TAILLES ET LOCALISATIONS OPTIMALES DES USINES.

Sommaire. -

L'objet de cette communication est d'apporter une contribution à la solution du problème du choix des tailles et des localisations optimales des usines de traitement des combustibles nucléaires irradiés, associées à des programmes de puissance électrique installée.

Dans une première partie, on étudie la structure des coûts d'investissements et d'exploitation des usines de traitement de l'uranium naturel irradié, l'influence de la taille des usines sur ces coûts et ces structures de coûts. Au coût de traitement de l'uranium naturel irradié s'ajoute d'autre part le coût du transport des combustibles irradiés des lieux de production aux sites des usines de traitement.

./.

CEA-R 2642 - THIRIET Lucien, OGER Claude, de VAUMAS Pierre,

LONG TERM DEVELOPMENTS IN IRRADIATED NATURAL URANIUM PROCESSING COSTS OPTIMAL SIZE AND SITING OF PLANTS.

Summary. -

The aim of this paper is to help solve the problem of the selection of optimal sizes and sites for spent nuclear fuel processing plants associated with power capacity programmes already installed.

Firstly, the structure of capital and running costs of irradiated natural uranium processing plants is studied, as well as the influence of plant sizes on these costs and structures. Shipping costs from the production site to the plant must also be added to processing costs. An attempt to reach a minimum cost for the production of a country or a group of countries must therefore take into account both the size and the location of the plants. The foreseeable shipping costs and their structure (freight, insurance, container cost and depreciation), for spent natural uranium are indicated.

./.

La recherche du coût minimum pour la production d'un pays ou d'un ensemble de pays fait donc intervenir à la fois la taille et la localisation des usines. On indique les coûts de transport prévisibles pour l'uranium naturel irradié et la structure de ces coûts (transport, assurance, coûts et amortissement des containers).

Dans une deuxième partie, et pour différents échéanciers de combustibles irradiés à traiter chaque année, on détermine les tailles et les localisations optimales des usines de traitement et la sensibilité de ces résultats, aux hypothèses de base concernant le coût du traitement, le coût du transport, l'année de démarrage du programme d'usines, l'horizon choisi.

- le problème de nature combinatoire, assez complexe, est résolu par l'application des méthodes de la programmation dynamique.

- on montre que les méthodes sont également applicables au problème du choix des tailles et des localisations optimales des usines de traitement des éléments du type MTR, associées aux programmes de réacteurs de recherche . / .

Secondly, for various annual spent fuel reprocessing programmes, the optimal sizes and locations of the plants are determined. The sensitivity of the results to the basic assumptions relative to processing costs, shipping costs, the starting up year of the plant programme and the length of period considered, is also tested.

- this rather complex problem, of a combinative nature, is solved through dynamic programming methods.

- It is shown that these methods can also be applied to the problem of selecting the optimal sizes and locations of processing plants for M T R type fuel elements, related to research reactor programmes, as well as to future plutonium element processing plants related to breeder reactors.

Thirdly, the case where yearly extraction of the plutonium contained in the irradiated natural uranium is not compulsory is examined ; some stockpiling of the fuel is then allowed some years, entailing delayed processing. The load factor of such plants is thus greatly improved with respect to that of plants whe- . / .

CEA-R 2642 - Suite 3

ainsi qu'aux futures usines de traitement des éléments au plutonium associées aux réacteurs surrégénérateurs.

Dans une troisième partie, on étudie le cas où l'on ne s'impose pas d'extraire chaque année le plutonium contenu dans l'uranium naturel irradié, et où on peut admettre un certain stockage du combustible certaines années, conduisant à un traitement différé. Le facteur de charge de telles usines est alors très amélioré par rapport à celui des usines où la demande en plutonium est chaque année satisfaite strictement.

On montre en introduisant les coûts de stockage de l'uranium naturel irradié, qu'il existe une cadence et des tailles optimales des usines de traitement des combustibles irradiés différentes du cas de la 2ème partie.

On doit tenir compte en particulier de l'effet indirect de ces programmes de traitement sur la disponibilité de Pu, donc sur les possibilités de réalisation de programmes de réacteurs utilisant ce Pu.

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

16 p.

CEA-R 2642 - Suite 3

re the annual plutonium demand is strictly satisfied. By including spent natural uranium stockpiling costs an optimal rhythm of introduction and optimal sizes for spent fuel processing plants are shown, different from those in part two.

The indirect effect of these reprocessing programmes on the availability of plutonium, and therefore on the possibility of undertaking plutonium burning reactor programmes, must be taken into account.

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

16 p.

LISTE DES RAPPORTS ECONOMIQUES DEJA PARUS

- Rapport CEA n° 2325 - Novembre 1963
"Calcul des immobilisations financières des cycles de combustible"
par J. GAUSSENS
- Rapport CEA n° 2458 - Juin 1964
"Recherche d'une politique de gestion du combustible d'une pile piscine"
par la Section des Etudes Economiques Générales
du Département des Programmes
- Rapport CEA n° 2541 - Août 1964
"Etude Economique du Site de Marcoule"
par Henri DUPRAT

LIST OF ECONOMIC REPORTS ALREADY ISSUED

- Report CEA n° 2325 - November 1963
"Calculation of the working capital invested in fuel cycles and its interest charges"
par J. GAUSSENS
- Report CEA n° 2458 - June 1964
"Calculation of an optimum fuel policy for a pool type research reactor"
Section des Etudes Economiques Générales
Département des Programmes
- Report CEA n° 2541 - August 1964
"An economic study of the Site of Marcoule"
par Henri DUPRAT

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

PERSPECTIVES A LONG TERME DES
COUTS DE TRAITEMENT DE L'URANIUM NATUREL IRRADIE
TAILLES ET LOCALISATIONS OPTIMALES DES USINES

par Lucien THIRIET

Claude OGER)

Pierre de VAUMAS)

Commissariat à l'Energie Atomique

Saint-Gobain Nucléaire

INTRODUCTION

On sait que les filières françaises ne nécessitent pas du point de vue économique le traitement des combustibles irradiés. Il est néanmoins utile d'étudier l'économie du traitement de ces combustibles, en vue des futurs réacteurs surrégénérateurs qui ne seront viables que dans la mesure où le coût d'extraction du plutonium sera suffisamment faible.

Il importe donc d'examiner attentivement par une étude aussi précise que possible, ce coût d'extraction qui pèsera d'un poids certain sur les décisions qui devront être prises quant à la date de mise en service des réacteurs à neutrons rapides utilisant le plutonium.

L'importance des programmes d'usines d'élaboration et de retraitement des combustibles nucléaires aura des répercussions sensibles sur les coûts de l'énergie atomique. Leur optimisation est donc particulièrement souhaitable.

La présente communication est consacrée à l'étude d'un de ces programmes optimaux : celui des usines de traitement de l'uranium naturel irradié, associées à des centrales nucléaires à uranium naturel - graphite - CO₂. Elle comprendra l'étude des perspectives à long terme des coûts de traitement de l'uranium naturel irradié, celle des tailles et des localisations optimales des usines nécessaires, et enfin un aperçu des possibilités de généralisation de la

méthode utilisée, notamment à un ensemble de plusieurs programmes de centrales nucléaires.

1° - Perspectives à long terme des coûts de traitement de l'uranium naturel irradié.

a) - Considérations générales.

Pour examiner les coûts possibles à long terme de traitement de l'uranium naturel irradié, il est nécessaire d'élaborer une méthode d'analyse des structures économiques des projets ou réalisations existantes et de prévision de l'influence de la taille des usines futures sur ces structures, donc sur leur coût. Nous évoquerons successivement la méthode utilisée et les résultats obtenus.

b) - La méthode d'analyse et de prévision utilisée.

Résumons rapidement cette méthode inspirée de celles de LANG et de BACH couramment pratiquées dans l'industrie chimique et qui a été présentée plus en détail en Septembre 1963 [1].

Les usines de traitement des combustibles irradiés, comme d'ailleurs la plupart des installations industrielles, ne sont pas constituées d'un seul atelier de production, fabriquant un produit unique (et des services généraux correspondants) mais d'une suite de fabrications ou traitements intermédiaires, chacun d'eux relatif à une fonction définie, et le plus souvent unitaire.

Les coûts d'investissement sont analysés, tant au niveau de chaque atelier de production qu'à celui de l'usine complète; par catégories de travaux et de services.

On distingue le matériel principal, non monté, des ateliers de production (dont le coût est désigné par P, c'est-à-dire notamment les dissolveurs, mélangeurs-décanteurs, évaporateurs, filtres, etc. . .) Ce matériel principal est une caractéristique essentielle du type de procédé utilisé et du flux de production, donc de la taille de l'usine (ou de l'atelier) considéré. Les autres postes du coût direct des ateliers de production peuvent être indexés sur P..

Ce sont :

- le montage du matériel principal
- les terrassements et le gros oeuvre
- le second oeuvre et l'équipement classique de bâtiment

- la manutention (y compris les charpentes)
- la tuyauterie - robinetterie
- les installations électriques
- le contrôle régulation
- les protections biologiques
- l'équipement spécial nucléaire (prises d'échantillon, boîtes à gants).

Les coûts des services généraux, structurés de la même manière et les coûts indirects (frais d'architecte industriel, frais de démarrage, intérêts intercalaires, aléas), se rapportent aux investissements et peuvent également être indexés sur la valeur P du matériel principal des ateliers de production.

Enfin, on examine séparément les frais d'aménagement du site, de traitement des effluents et des stockages, qui ne sont pas liés seulement à la capacité de production (donc à P).

Les coûts d'exploitation (hors amortissements) sont analysés en 2 types de nature économique essentiellement différente :

- 1 - Les frais proportionnels : qui dépendent directement du flux de production de l'usine (les réactifs et ce que l'on nomme souvent les utilités, c'est-à-dire la vapeur, l'énergie, l'eau, l'air comprimé).
- 2 - Les frais fixes : qui comprennent :
 - a) La main d'oeuvre et les frais généraux s'y rattachant directement, pour lesquels les dépenses en fonction de la taille varient selon le type d'exploitation, d'entretien et de sécurité choisis.
 - b) Ce qui dépend de l'investissement (l'entretien, les assurances). Ces dépenses peuvent être considérées comme proportionnelles aux investissements.

Cette analyse est faite également comme pour les coûts d'investissements soit au niveau de chaque atelier de production soit à celui de l'usine complète.

La méthode permet, en examinant les structures des coûts d'usines de tailles différentes, d'étudier l'influence économique de la taille.

Il peut être commode de caractériser cette influence par une expression simplifiée du type suivant :

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^\alpha$$

C_1 et C_2 représentant les éléments de coûts relatifs aux tailles t_1 et t_2 (exprimés en tonnes d'uranium naturel irradié traité par jour).

D'après les résultats obtenus et nos estimations, les exposants pourraient être les suivants :

$\alpha = 0,4$ si C_1 et C_2 représentent les coûts d'investissement

$\alpha = 0,3$ si C_1 et C_2 représentent les dépenses annuelles liées à la main d'oeuvre

$\alpha = 0,4$ si C_1 et C_2 représentent les frais annuels d'exploitation fixes, proportionnels aux investissements

$\alpha = 1$ si C_1 et C_2 représentent les frais annuels d'exploitation proportionnels à la production.

c) - Estimation des coûts de traitement de l'uranium naturel irradié en France selon la taille des usines.

Il s'agit ici d'usines à objectifs purement civils dont les décisions de construction pourraient être prises dans les années qui viennent.

Les chiffres évoqués représentent des coûts en tendance.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau I
(voir aussi figure I).

Taille de l'usine	1 t/j	2 t/j	3 t/j	10 t/j	20 t/j
Investissements (10^6 F)	145	190	225	360	475
Frais d'exploitation (10^6 F/an)	10	15	19	38	61
Coût de traitement (F/kg d'U ¹)	85	57	45	25	18
(en \$/kg d'U)	17	11	9	5	3,5

1) En admettant un taux d'amortissement de 10 % par an, correspondant sensiblement à un amortissement en 15 ans et un taux d'intérêt de 7 %/an.

2° - Coûts de transport de l'uranium naturel irradié.

L'estimation prévisionnelle des coûts de traitement de l'uranium naturel irradié selon la taille des usines ne suffit pas à elle seule à fournir les éléments de coûts nécessaires à la détermination de la taille et de la localisation des usines à mettre en service pour satisfaire des besoins variables dans le temps: Il faut tenir compte des coûts de transport des combustibles irradiés des lieux de production aux sites des usines de traitement.

La structure de ce coût est analysée dans la communication de M. Y. SOUSSELIER à la présente conférence [2] et nous nous limitons à en rappeler les résultats.

Selon cette étude, les coûts de transport actuels de l'uranium naturel irradié sont, de l'ordre de 32 F par tonne d'uranium et par kilomètre.

Il faut souligner que ce chiffre s'entend pour des transports très simples, de courte durée, impliquant un minimum de manutentions. L'expérience montre que les prix peuvent varier assez vite lorsqu'on s'écarte de ces conditions.

3° - Tailles et localisations optimales des usines de traitement de l'uranium naturel irradié associées à un programme donné de centrales nucléaires.

a) - Exposé du problème.

Le problème posé est le suivant : étant donné, d'une part un programme de centrales nucléaires fixé dans le temps et dans l'espace, c'est-à-dire selon une cadence et une répartition géographique déterminées, et d'autre part les coûts de traitement et de transport des combustibles irradiés que nous venons d'indiquer, quel est le programme optimal d'usines de traitement associées à ces centrales, c'est-à-dire, quelles sont les tailles et les localisations les meilleures de ces usines ainsi que la cadence la plus économique de leur mise en service. (voir figure 2)

On remarquera que la fixation du programme de centrales nucléaires détermine les quantités d'uranium irradié à traiter. Nous avons choisi, à titre d'exemple, le programme suivant de production d'électricité. (correspondant à une hypothèse pessimiste de développement de l'énergie nucléaire).

Tableau II

Année	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995
Puissance nucléaire installée en MWe	400	1400	3000	7000	16000	25000	31000

De plus, les localisations possibles d'usines de traitement ne sont pas quelconques et dépendent essentiellement de diverses conditions, principalement géographiques et météorologiques : l'étude systématique montre généralement que, dans un pays de dimension moyenne, le nombre des sites envisageables est assez limité. Dans l'exemple illustré ici, nous n'avons retenu que 4 sites, désignés par les lettres A, B, C, D, comme présentant les conditions voulues, ce qui a permis de limiter raisonnablement les calculs.

b) - La méthode séquentielle d'optimisation des programmes d'usines.

- La méthode d'optimisation utilisée, empruntée aux travaux du Mathématicien Richard BELLMAN est celle de la "programmation dynamique" ou séquentielle, [3]. Nous nous bornerons à rappeler son principe de base dit d' "optimalité", voisin de celui de Fermat en optique géométrique, et selon lequel une politique optimale se décompose en sous-politiques optimales. C'est ainsi que, si on considère n phases successives de décisions possibles, l'optimum à la phase n peut être obtenu par l'exploration systématique des optimums successifs aux phases 1, 2,, n-1.

- Pour un programme correspondant à un horizon fixé, il existe une quantité donnée d'uranium naturel irradié à affecter à un certain nombre de sites : A, B, C, D. On ne considère tout d'abord que deux de ces sites : A et B et on recherche l'affectation optimale de cet uranium irradié et les tailles d'usines correspondantes.

Si on considère, par exemple, le début du programme, le calcul s'effectue de la manière suivante :

L'année 1 du programme, une seule usine peut être envisagée en A ou en B pour satisfaire les besoins. On évalue les dépenses correspondantes (coûts d'investissement, d'exploitation de cette usine et de transport des combustibles) jusqu'à la fin du programme (l'horizon H) en tenant compte du renouvellement éventuel de l'usine si H est situé au-delà de sa durée de vie

supposée. Ces dépenses sont actualisées et cumulées l'année 0.

Si on considère maintenant la quantité à retraiter l'année 2, deux solutions sont possibles :

- On conserve l'usine construite l'année 1 en A ou B à laquelle on ajoute une usine supplémentaire l'année 2 en A ou en B.
- On décide de construire dès l'année 1 en A ou en B une usine plus grosse, donc plus économique, mais qui ne fonctionnera la première année qu'à capacité réduite.

On compare les coûts de l'une et de l'autre solution, évalués comme précédemment et on retient l'optimum.

Pour l'année 3 et les suivantes, on continue le même processus. On introduit ensuite successivement les sites C et D pour obtenir la solution globale.

L'utilisation de calculatrices permet évidemment de déterminer un optimum rigoureux. Mais compte tenu des incertitudes liées aux prévisions à long terme qui donnent un caractère illusoire à un tel optimum, on a préféré utiliser cette méthode qui fournit pas à pas les conséquences économiques des choix effectués et permet de définir des solutions avec un certain pragmatisme, sans trop s'écarter des optimums théoriques.

c) - Quelques résultats obtenus

Nous avons été amenés à construire un modèle, un mécanisme permettant de déterminer la politique et les sous-politiques optimales dans un contexte technique et économique donné, ainsi que la sensibilité de l'optimum aux hypothèses adoptées.

Le programme d'énergie nucléaire installée est celui indiqué précédemment (tableau II). Quatre sites possibles (A, B, C, D), d'usines de traitement ont été retenus. Les hypothèses économiques sont les suivantes :

- Horizon : 30 ans
- Durée de vie des usines : 15 ans
- Taux d'actualisation : 7 %
- Coût de transport : 32 F/Tonne-km

La solution trouvée est :

Années	1965 - 1979	1980 - 1995
Taille des usines (en t/j d'uranium)	4	17 ²⁾
Localisation	A	A

- On peut remarquer la stabilité des résultats obtenus vis à vis de certaines variations des paramètres économiques du problème

Si le coût de transport s'abaissait aux alentours de 20 F/tonne-km ou si le taux d'actualisation était porté de 7 à 10 %, ou si l'horizon était de 40 ans au lieu de 30 ans, cette solution demeurerait inchangée : mais, dans cette dernière éventualité, une usine de 26²⁾ tonnes/jour devrait être mise en service à partir de 1996.

Compte tenu de la faiblesse relative des coûts de transport par rapport aux coûts de traitement, il s'avère qu'il est préférable de construire une seule usine de taille suffisante pour satisfaire la demande pendant toute sa durée de vie et qu'une seule usine, mais de taille plus importante devra prendre la relève sur le même site à la fin de la vie de la première.

Il faut particulièrement souligner la stabilité de la politique optimale à court ou moyen terme à la variation de l'horizon.

- Les résultats restent néanmoins sensibles à l'accroissement des coûts de transport et la durée de vie des usines.

Nous venons de voir que dans les cas précédents, la politique optimale à court et moyen terme est relativement indépendante de certaines variations des paramètres économiques étudiés.

Cette stabilité est beaucoup moins grande vis à vis de l'accroissement du coût de transport et de la variation de la durée de vie des installations.

2) Des chiffres tels que 17 t/j et 26 t/j, qui dépassent largement les capacités habituellement évoquées, sont parfaitement concevables sur le plan technique, compte tenu des programmes futurs et de la rareté des sites. Il faut se préparer à de telles capacités.

Il convient de souligner, que; si le coût de transport était plus élevé par suite de frais importants de manutention d'ailleurs très difficiles à préciser actuellement, la politique optimale serait fortement perturbée ; c'est ainsi que pour des frais de transport de l'ordre de 50 F/tonne-km ³⁾, il s'avère qu'une seconde usine doit être construite sur le site B, avant la fin de la vie de la première, localisée en A.

La politique optimale à court et moyen terme est très sensible à la durée de vie supposée des usines. Si cette durée de vie était de 25 ans, au lieu de 15 ans, la solution optimale consisterait à construire une usine de 14 t/j en A de 1965 à 1989, puis de 17 t/j toujours en A de 1989 à 1955.

- Si on désire stocker l'uranium naturel irradié et le traiter seulement en 1980, (date possible de démarrage accéléré des réacteurs à neutrons rapides) le modèle permet de trouver la solution la plus économique. Le stockage pendant 15 ans doit en effet être prévu en A (minimisation des frais de transport). L'usine à prévoir l'année 15 sera également située en A. Sa taille dépendra seulement de la quantité d'uranium naturel irradié à traiter la dernière année de sa durée de vie supposée. Le stock d'uranium accumulé pourra être absorbé sans difficulté étant donné le mauvais facteur de charge de l'usine dans les premières années de son fonctionnement.

En conclusion, pour le programme d'énergie nucléaire installée étudié, et avec les hypothèses retenues, le site A est toujours à retenir, et la taille optimale de l'unique usine à construire ne dépend pratiquement que de l'hypothèse faite, on pourrait presque dire le pari effectué sur la durée de vie de cette usine.

4° - Extensions possibles de la méthode utilisée.

Nous avons étudié les localisations, les tailles et les cadences de mise en service optimales des usines de traitement de l'uranium naturel irradié associées à un programme de centrales nucléaires donné. Nous avons situé la sensibilité de l'optimum obtenu à certaines des hypothèses adoptées (coût de transport,

3) Le coût de 32 F/tonne-km que nous avons évoqué précédemment correspond à 2 \$/kg U pour un parcours très simple en France. Les chiffres habituellement cités pour les transports en Europe font état de 5 à 6 \$/kg U, pour des distances un peu supérieures, et impliquant surtout des manutentions plus compliquées.

choix de l'horizon, taux d'actualisation). L'influence sur la séquence d'usines optimale de son année de démarrage, et des divers programmes possibles d'énergie nucléaire installée peut être appréciée d'une manière analogue.

La méthode élaborée s'analyse essentiellement comme un mécanisme général de détermination de l'optimum dans des conditions techniques et économiques fixées. Elle permet en outre, d'évaluer les pertes économiques résultant du choix pour des raisons autres qu'économiques d'une politique non optimale.

L'exemple d'application retenu (le traitement de l'uranium naturel irradié), supposait une demande en plutonium à satisfaire strictement chaque année, ou, ce qui revient au même, des quantités d'uranium naturel irradié à traiter effectivement chaque année. Cette hypothèse est celle de l'existence d'un système complémentaire de centrales à neutrons thermiques productrices d'uranium irradié, donc de plutonium et de centrales à neutrons rapides productrices et consommatrices de plutonium, mais essentiellement consommatrices dans les premières décades de leur développement (compte tenu de l'importance des premières charges en plutonium nécessaires à l'extension de ces programmes de centrales). Ce système est supposé autarcique du point de vue du plutonium, aucun apport extérieur de ce métal n'étant envisagé.

L'étude des usines de traitement des combustibles irradiés au plutonium provenant des réacteurs surrégénérateurs, associées à ces programmes de réacteurs doit être, elle aussi, justiciable de la même approche. Par contre, le retraitement des éléments combustibles des réacteurs de recherches (du type MTR) peut être envisagé d'une manière plus souple. Ces combustibles peuvent en effet être stockés, la récupération de l' ^{235}U contenu différée, l'uranium enrichi nécessaire aux réacteurs de recherches étant disponible sur le marché extérieur que constituent les possibilités commerciales américaines. Ce modèle économique se rapprochera alors du cas le plus général où un ensemble nouveau de production peut s'insérer dans le cadre d'une économie de marché.

Dans le problème que nous avons étudié et dans les exemples que nous venons d'évoquer, les quantités annuelles de combustibles irradiés à traiter sont supposées données : le système d'usines associées a pour fonction de restituer chaque année les matières fissiles contenues dans ces combustibles. Cette fonction peut éventuellement être remplie en faisant appel à des approvisionnements extérieurs (éléments à U enrichi) et en modifiant la cadence de

mise en service des usines.

Mais, dans tous les cas, les quantités de combustibles irradiés à traiter sont supposées fixées chaque année. Cette hypothèse a la signification économique suivante : on détermine séparément les programmes optimaux de centrales nucléaires à neutrons thermiques et rapides (compte tenu des disponibilités en plutonium des premières et des besoins des secondes) et ceux des usines de traitement de l'uranium naturel irradié produisant le plutonium.

Ces évaluations séparées peuvent conduire à des pertes économiques qu'une optimisation globale éviterait. Cette dernière en effet doit faire apparaître les conséquences d'un retard éventuel dans le traitement de l'uranium irradié, donc dans la disponibilité en plutonium, susceptible de porter atteinte au développement des centrales utilisant ce dernier combustible, ou au contraire les conséquences d'une utilisation non optimale des usines de traitement.

Les localisations et les tailles des usines de traitement des combustibles irradiés associées à des programmes séparés de centrales nucléaires peuvent de plus être combinées au mieux en tenant compte de l'intégration possible sur les mêmes sites et de la polyvalence éventuelle de ces usines.

Il est alors possible de déterminer des optimums globaux de programmes de centrales et d'usines conduisant à des gains économiques par rapport aux optimums séparés.

REMERCIEMENTS

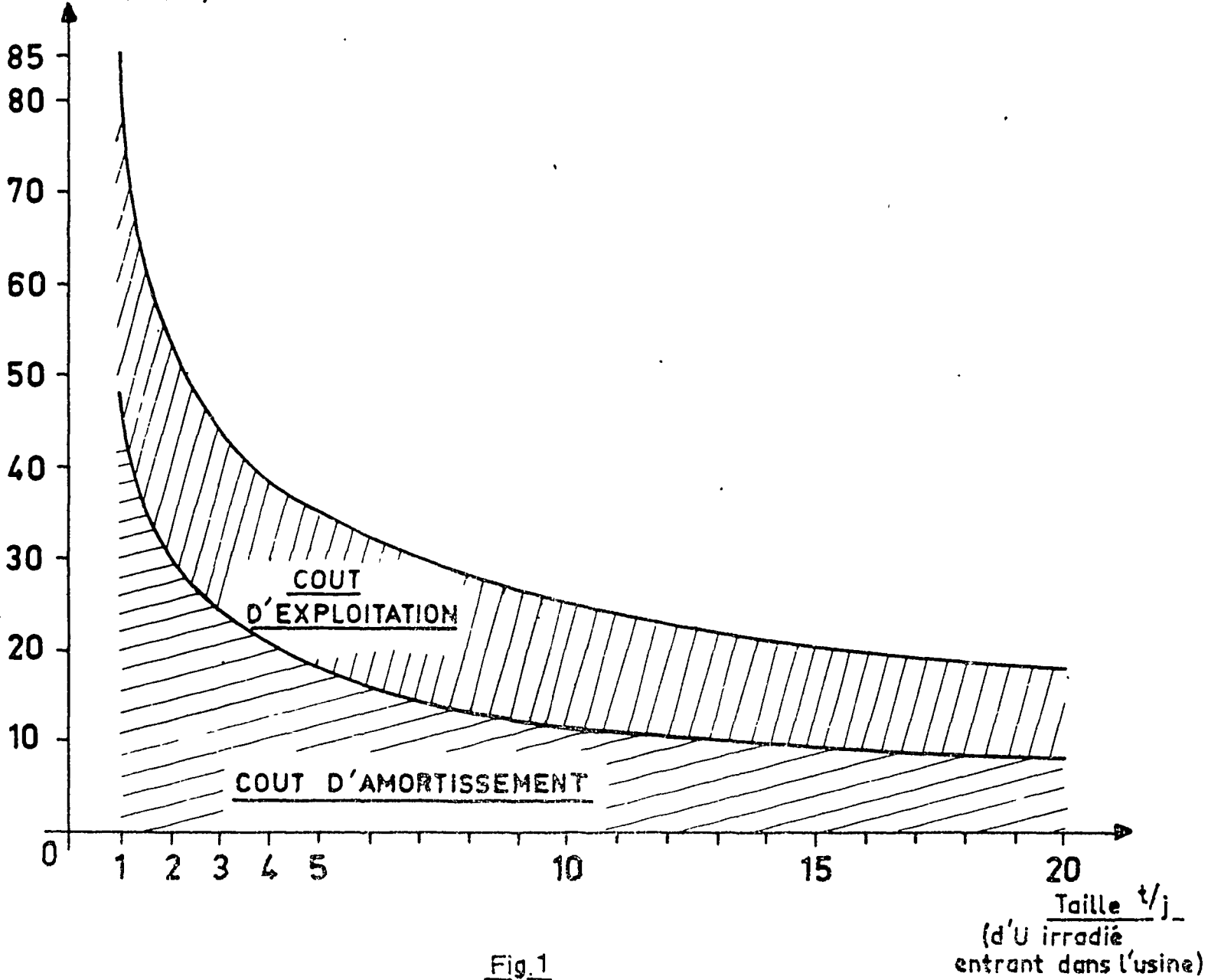
Nous tenons à remercier Mademoiselle F. ROBIN, Stagiaire Universitaire au COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, dont la collaboration a été particulièrement précieuse pour mener à bien la partie mathématique de cette étude.

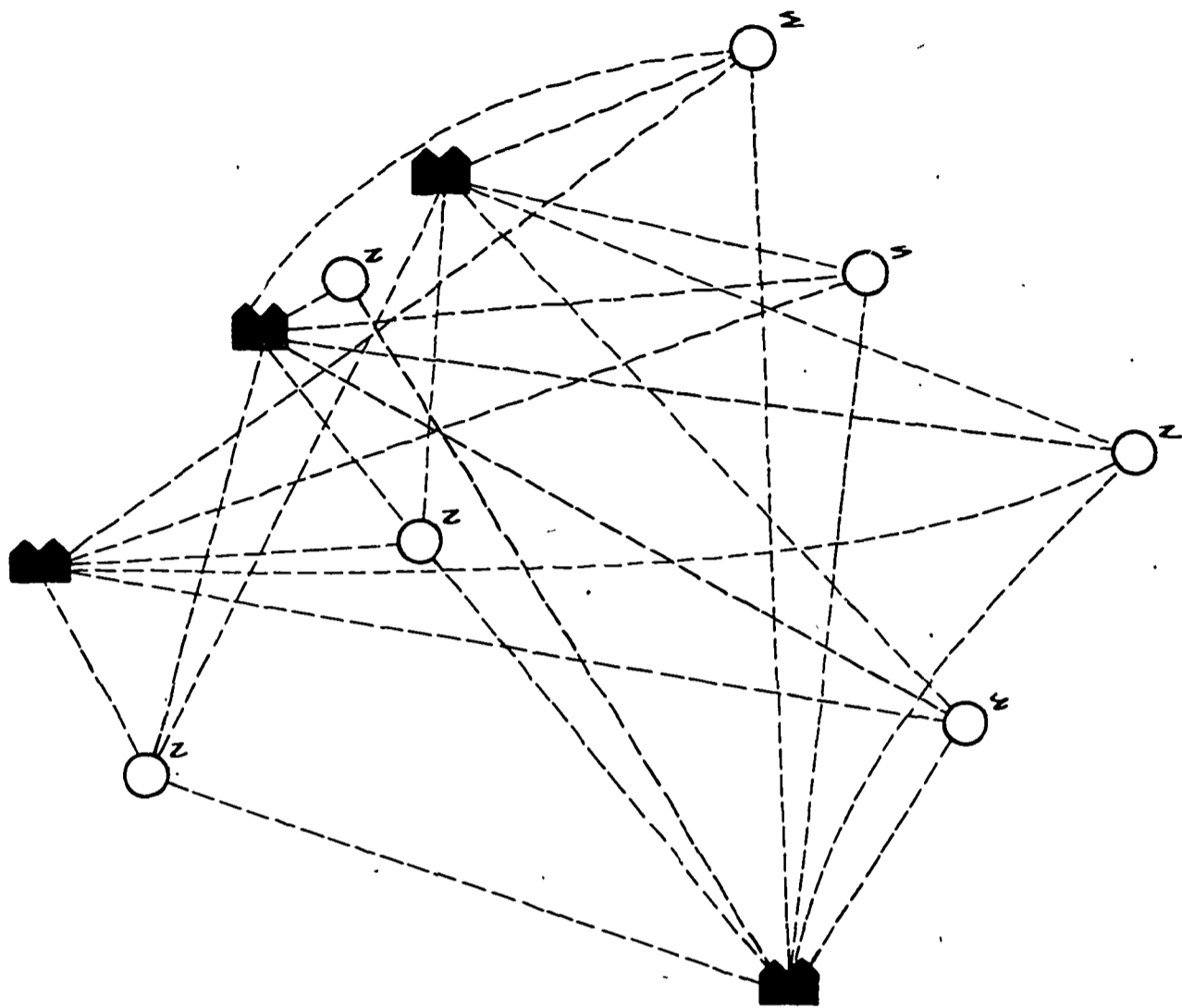
BIBLIOGRAPHIE

- [1] Coûts d'investissements et d'exploitation des usines de retraitement de l'uranium naturel irradié,
par THIRIET L. , JOUANNAUD C. , COUTURE J. , DUBOZ J. , OGER C.
Société Européenne d'Energie Atomique
Colloque élargi
"Cycles de combustibles pour les réacteurs de puissance"
BADEN-BADEN (Allemagne) - 9/14 Septembre 1963.
- [2] Coût de transport des combustibles irradiés et coût d'entretien d'une usine de traitement chimique des combustibles irradiés
par SOUSSELIER Y. , ALLES M. , IDEE M. , MARTINET R. , CAPET M.
et AUPETIT A.
- [3] Dynamic Programming par Richard E. BELLMAN
Princeton University Press 1957
Applied Dynamic Programming
par Richard E. BELLMAN
et Stuart E. DREYFUS
Princeton University Press 1962.

COÛT DE TRAITEMENT DE L'URANIUM NATUREL
IRRADIÉ EN FONCTION DE LA TAILLE
DES USINES.

Coût de traitement
Frs/Kg U
(entrant dans l'usine)





Sites des centrales



Sites possibles des usines de traitement de l'uranium naturel irradié

FIG. 2

LONG-TERM PROSPECTS OF IRRADIATED NATURAL URANIUM PROCESSING
COSTS OPTIMUM PLANT SIZES AND SITES

by

Lucien THIRIET

Commissariat à l'Energie Atomique

Claude OGER and Pierre de VAUMAS

Saint-Gobain Nucléaire

INTRODUCTION

We know that the French reactor systems do not entail fuel reprocessing. It is, nevertheless, useful to study the economics of the reprocessing of these fuels, in view of the fact that future breeder reactors will not be viable unless the cost of plutonium extraction is sufficiently low.

Therefore, through a study as accurate as possible, it is important to examine this extraction cost which will weigh so heavily on the decisions to be taken regarding the date of commissioning of plutonium fueled fast reactors.

The size of nuclear fuel fabrication and reprocessing plant programmes will have an appreciable bearing on atomic energy costs. This optimization is therefore most desirable.

The present paper is devoted to the study of one of these optimum programmes, a programme of irradiated natural uranium reprocessing plants associated with natural uranium-graphite-CO₂ nuclear power stations. It comprises a study of the long-term prospects of irradiated natural uranium reprocessing costs, a study of the optimum sizes and sites of the plants required and, finally, an outline of the possibilities of extending the method used, notably to a combination of several nuclear power station programmes.

1) LONG TERM PROSPECTS OF IRRADIATED NATURAL URANIUM PROCESSING COSTS

a) General considerations

To examine the possible long-term costs of processing of irradiated natural uranium it is necessary to develop a method for analyzing the economic structure of planned or current installations and for predicting the influence of the size of future plants on these structures, and hence on their cost. We shall present in succession the method used and the results obtained.

b) Analysis and forecasting method used

Let us briefly summarize this method which proceeds from the Lang and Bach method now in current use in the chemical industry and was presented in more detail in September 1963. [1]

Irradiated fuel processing plants, like most industrial installations, do not consist of one single shop producing a single item (and the corresponding general services). Rather, they comprise a series of intermediate operations or processes, each of which is related to one definite function.

Capital costs are analyzed, both at the level of each production shop and at that of the entire plant, by category of work and service.

We distinguish the basic equipment, not installed, of the production shops (whose cost is designated by P, i.e. chiefly the dissolvers, mixer-settlers, evaporators, filters, etc). This basic equipment is an essential feature of the type of process used and of the rate of production, hence of the size of the plant (or shop) being considered. The other direct cost items of production shops may be indexed under P. They are :

- installation of main equipment
- earth moving and building
- finishing and conventional building equipment
- handling (structures included)
- piping and valves

- electrical equipment
- instrumentation and control
- biological shielding
- special nuclear equipment (samplers, glove boxes).

The cost of general services, structured in the same way, and the direct costs (engineering, start-up costs, interests during construction, contingencies) relate to the investments and can also be indexed under the value P of the main production workshop equipment.

Finally, we examine site improvement, waste and storage costs which are not solely linked to the production capacity (and hence to P).

Operating costs (depreciation excepted) are analyzed as two types with a very different economic nature :

1) Proportional costs

They are directly related to the plant output (reagents and what are often called utilities, i. e. steam, power, water, compressed air).

2) Fixed charges

a) Labour costs and overheads directly related to them. Their amount varies according to the size and the type of operation, maintenance and safety chosen.

b) Capital charges (maintenance, insurance). These expenditures can be regarded as proportional to the investment.

This analysis is made in the same way as that of capital costs, either at the level of each production shop, or at that of the entire plant.

The method makes it possible, by examining the cost structure of plants of different sizes, to study the economic influence of size.

This influence can be conveniently described by the following type of simplified expression :

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^\alpha$$

where C_1 and C_2 are the elements of cost for sizes t_1 and t_2 (expressed in tonnes of irradiated natural uranium processed per day).

According to the results obtained and our estimates, the exponents could be as follows :

$\alpha = 0.4$ if C_1 and C_2 are the capital cost

$\alpha = 0.3$ if C_1 and C_2 represent the annual labour cost

$\alpha = 0.4$ if C_1 and C_2 are the fixed annual operating expenses proportional to the investments

$\alpha = 1$ if C_1 and C_2 are the annual operating expenses proportional to the output.

c) Assessment of irradiated natural uranium processing cost in France in relation to plant size

Here we are concerned with purely civilian plants, decisions on the construction of which could be taken in the coming years. The figures given represent prospective costs.

The results obtained are as follows :

Table I (see also figure 1)

Plant size	1 t/day	2 t/day	3 t/day	10 t/day	20 t/day
Investments (10^6 F)	145	190	225	360	475
Operating expenses (10^6 F/year)	10	15	19	38	61
Processing cost F/kg of U ⁽¹⁾ (in \$/kg of U)	85	57	45	25	18
	17	11	9	5	3.5

2) IRRADIATED NATURAL URANIUM SHIPPING COSTS

Estimating the provisional cost of processing irradiated natural uranium according to the size of plants only, is not in itself enough for furnishing the cost elements required to determine the size and site of plants that are to be put into service to answer needs which will vary with time. It is necessary to consider the cost of shipping irradiated fuels from the site of origin to the site of processing.

(1) Assuming a 10% per annum depreciation rate corresponding to a 15-year depreciation period and a 7% per annum interest rate.

The structure of this cost is analyzed in M. Y. SOUSSELIER's paper at the present conference [2], and we shall confine ourselves to recalling the results.

According to this study, the present cost of shipping irradiated natural uranium is about 32 F per tonne of uranium and per kilometer.

It must be emphasized that this figure concerns very simple freights for short periods of time, involving a minimum of handling. Experience shows that costs may vary fairly rapidly when we deviate from these conditions.

3) OPTIMUM SIZES AND SITES OF IRRADIATED NATURAL URANIUM PROCESSING PLANTS CONNECTED WITH A GIVEN NUCLEAR POWER STATION PROGRAMME

a) Statement of problem

The problem is as follows : given, on the one hand, a nuclear power station programme fixed in time and space, i.e. according to a definite rhythm and geographical distribution and, on the other, the costs of treating and shipping irradiated fuels just indicated by us, what is the optimum programme for the processing plants associated with such power stations, i.e. what are the best sizes and sites for these plants, if the rate at which they are put into service is to be the most economical (see figure 2).

Let us note that the fixing of a programme for nuclear power stations determines the amounts of irradiated uranium to be processed. We have chosen, by way of example, the following electricity generation programme (corresponding to a pessimistic assumption for the development of nuclear power).

Table II

Year	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995
Nuclear power installed in MWe	400	1400	3000	7000	16000	25000	31000

Moreover, the sites of processing plants cannot be chosen arbitrarily; they depend essentially on various conditions, chiefly geographical and meteorological. Systematic study generally shows that in a country of average size, the number of foreseeable sites is rather limited. In the example illustrat-

ed here we retained only 4 sites, designated by the letters A, B, C and D, as offering the requisite conditions, which made it possible to keep the computation operations within reasonable limits.

b) Multistage allocation process for optimizing plant programmes

The method of optimization employed, inspired by the mathematician Richard Bellman, is that of "dynamic programming" or multistage allocations. [3] We shall confine ourselves to recalling his fundamental principle of "optimality", which resembles the Fermat principle in optical geometry. According to it, an optimum policy can be split into optimum sub-policies. Therefore, if n successive phases of possible decisions are considered, the optimum in phase n may be got by systematically scanning the successive optima in phases $1, 2 \dots n-1$.

For a programme corresponding to a fixed horizon, there is a given amount of natural uranium to be allocated to a certain number of sites : A, B, C, D. We first consider only two sites, A and B, investigating the optimum allocation of this irradiated uranium and the corresponding plant sizes.

If, for example, the beginning of the programme is considered, the calculation can be made as follows.

In year 1 of the programme a single plant may be envisaged at A or B to satisfy demand. The corresponding expenditures are evaluated (investment costs, plant operation and fuel shipment) right to the end of the programme (horizon H) allowing for the plant's eventual renewal should H lie beyond its supposed life. The expenditures are discounted back to year 0 and accrued.

If the amount to be reprocessed in year 2 is now considered, two solutions become possible : we keep the plant built in year 1 at A or B and add to another in year 2, at A or B; or we decide to build from year 1 at A or B a larger and, therefore, more economical plant, though it will run in the first year only at reduced capacity.

We compare the costs of both solutions evaluated as before and retain the optimum.

For year 3 and the following years, the same process is continued. Sites C and D are then introduced successively to obtain the overall solution.

Computers can obviously be used to determine a strict optimum. However, in view of the uncertainties inherent in long-term predictions, which

give an illusory character to such an optimum, we preferred to use this method which provides step by step information on the economic consequences of the choices made, and by means of which solutions can be defined with a certain pragmatism, without departing too much from the theoretical optima.

c) Some results obtained

We had to construct a model, a mechanism, making it possible to determine the optimum policy and sub-policies in a given technical and economic context as well as the sensitivity of the optimum to the assumptions made.

The programme for the installation of nuclear power is the one already indicated (Table II). Four possible processing plant sites were used (A, B, C, D). The economic assumptions are as follows :

- horizon : 30 years
- plant life : 15 years
- discounting rate : 7%
- shipping cost : 32 F/tonne-km

The solution found is :

Years	1965 - 1979	1980 - 1995
Plant size (tonnes/day of uranium)	4	17 (2)
Location	A	A

- We may note the stability of the results obtained in relation to certain variations in the economic parameters of the problem .

If the transport cost were to fall to some 20 F/tonne-km, or if the discounting rate were to rise from 7 to 10% or if the horizon were 40 years instead of 30, this solution would remain unchanged. In this latter case, however, a plant of 26 tonnes per day⁽²⁾ would have to be put into service from 1996.

Considering the relatively low shipping costs as compared with processing costs, it would be preferable to build one plant, large enough to satisfy demand throughout its life, with another, larger plant then being built on the same site at the end of the first's life.

(2) Figures like 17 tonnes per day and 26 tonnes per day, which largely exceed the capacities usually given, are quite conceivable from a technical point of view if allowance is made for future programme and the dearth of sites. We must get ready for such capacities.

It is particularly necessary to emphasize the stability of the shorter medium-term optimum policy to horizon variations.

- The results are nevertheless still affected by the increase of shipping costs and by the life of plants.

We have just seen that in previous cases the short and medium-term optimum policy is relatively independent of variations in the economic parameters studied.

This stability is not nearly so true with respect to increases in transport costs and changes in the life of installations.

It is expedient to emphasize that, if the transport cost were to rise in consequence of sizeable handling expenses which are, moreover, very hard to define at present, the optimum policy would be much upset. This is why, for transport costs of about 50 F/tonne-km⁽³⁾, a second plant should be built on site B before the life of the first one at A had expired.

The short and medium-term optimum policy is most sensitive to the supposed life of plants. Were this to be 25 years instead of 15, the optimum solution would be to build a plant of 14 tonnes/day at A from 1965 to 1989 and then one of 17 tonnes/day, still at A, from 1989 to 1995.

- If we want to store natural irradiated uranium and process it only in 1980 (a possible date for the accelerated start up of fast reactors), the model permits the most economical solution to be found. Storage for 15 years must, in fact, be provided at A (to minimize transport costs). The plant to be provided in year 15 will also stand at A. Its size will depend solely on the amount of irradiated natural uranium to be processed in the last year of its supposed life. The uranium stockpiled could be absorbed easily in view of the poor load factor of the plant in the first years of its operation.

In conclusion, for the programme of nuclear power installation being studied, and with the assumptions made, site A must still be kept. The optimum size of the one plant to be built depends almost solely on the assumption made,

⁽³⁾ The cost of 32 F/tonnes-km previously mentioned by us corresponds to 2 \$/kg U for a very simple journey in France. The figure usually given for shipments in Europe is 5-6 \$/kg U for slightly longer distances involving, above all, more complicated handling.

one might almost say the bet made on the length of that plant's life.

4) POSSIBLE EXTENSIONS OF THE METHOD EMPLOYED

We have studied the optimum sites, sizes and rhythm of installation of irradiated natural uranium processing plants in association with a given nuclear power-station programme. We have ascertained the sensitivity of the optimum obtained towards some of the hypotheses adopted (transport costs, choice of horizon, discount rate). The influence on the optimum plant sequence of the year from which it starts and of various possible programmes of nuclear power installations can be estimated in a similar manner.

The method developed is essentially a general technique for finding the optimum under fixed technical and economic conditions. It allows us, moreover, to assess the economic losses resulting from the choice, for reasons other than economic, of a non-optimum policy.

In this example of application (irradiated natural uranium processing) it was assumed that the demand for plutonium would have to be strictly satisfied each year or, which comes to the same thing, that irradiated natural uranium would have to be effectively processed each year. This assumes the existence of a combined system of thermal reactor stations producing irradiated uranium, and therefore plutonium, and of fast reactor stations producing and consuming plutonium, though the latter are largely consumers of plutonium in the first decades of their development (in view of the size of the initial plutonium load necessary for the extension of these power station programmes). This system is assumed to be self-sufficient from the point of view of plutonium, with no external supply of this metal being envisaged.

The study of irradiated breeder reactor plutonium fuel processing plants in association with these reactor programmes, must also surely be amenable to the same approach. On the contrary, the reprocessing of fuel elements from research reactors (of the MTR type) may be considered in a more flexible manner. These fuels can in fact be stored, and the recovery of their U^{235} deferred, since the enriched uranium necessary for research reactors is available on the foreign market provided by commercial U.S. facilities. This economic model will then approximate to the more general case when a new production unit may be inserted in the framework of commercial economies.

In the problem studied by us, and in the examples just quoted, the annual quantity of irradiated fuels to be processed is taken as fixed : the task of the system of associated plants is to restore each year the fissile material held in these fuels. This task can perhaps be accomplished by drawing on external stocks (U-enriched elements) and by modifying the rate at which plants are put into service. But, in any case, the amounts of irradiated fuel to be processed are taken as fixed each year. The economic significance of such an assumption is as follows : we determine separately the optimum programmes for nuclear power stations with thermal and fast reactors (taking into account the plutonium available from the first and the needs of the second) and those for irradiated natural uranium processing plants producing plutonium.

These separate evaluations may lead to economic losses that could be avoided by overall optimization. This must, in fact, reveal the consequences of any delay in the processing of irradiated uranium and hence in the availability of plutonium, which is liable to interfere with the development of power stations using such fuel or, on the contrary, the consequences of the processing plants not being utilized optimally.

The locations and sizes of plants treating irradiated fuel in association with separate nuclear power-station programmes can, moreover, be combined best if allowance is made for the possible integration of these plants on the same sites and for their eventual multiple purpose.

It is then possible to determine the overall optima of programmes for nuclear power stations and plants which will be more profitable than the separate optima.

ACKNOWLEDGEMENTS

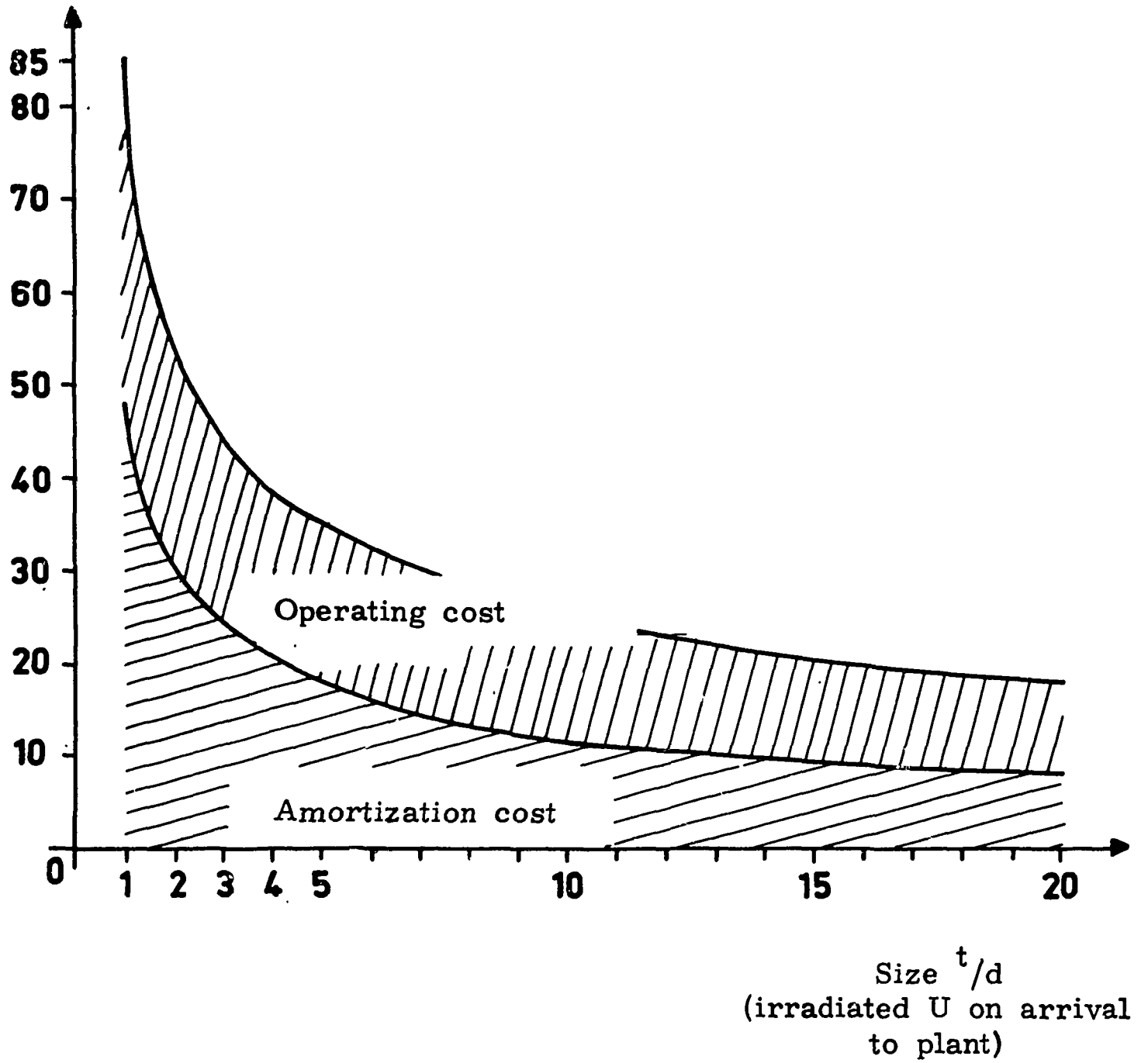
We want to thank Mademoiselle F. Robin whose collaboration was particularly valuable for carrying out the mathematical part of this study.

REFERENCES

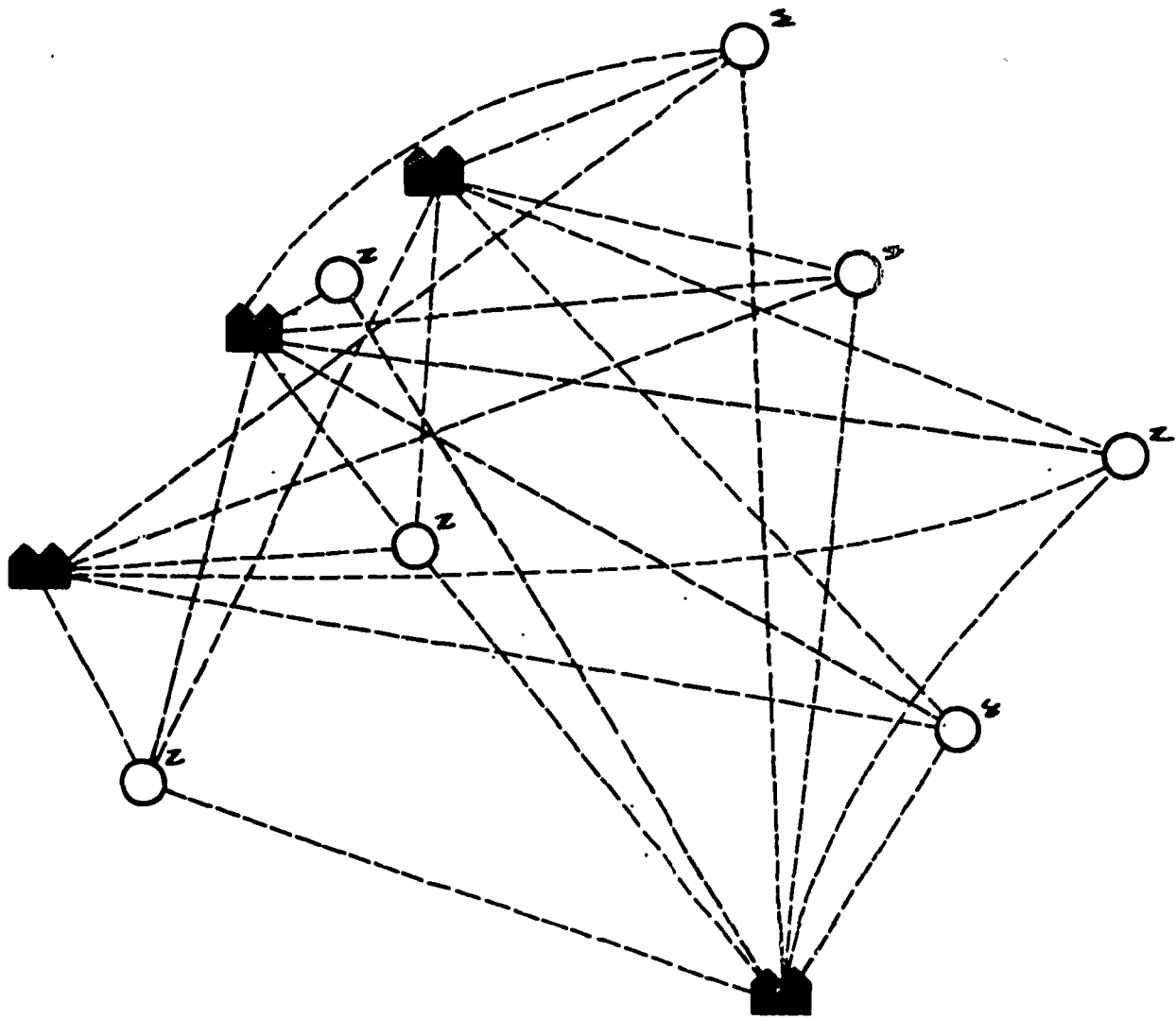
- [1] THIRIET L., JOUANNAUD C., COUTURE J., DUBOZ J. and OGER C.
Couts d'investissements et d'exploitation des usines de retraitement de l'uranium naturel irradié (Investment and running costs of irradiated natural uranium reprocessing plants). Société Européenne d'Energie Atomique. Extended colloquium "Cycles de combustibles pour les réacteurs de puissance", Baden-Baden (Germany), Sept. 9-14, 1963.
- [2] SOUSSELIER Y., ALLES M., IDEE M., MARTINET R., CAPET M. and AUPETIT A. Coût de transport des combustibles irradiés et coût d'entretien d'une usine de traitement chimique des combustibles irradiés (Irradiated fuel shipping costs and maintenance cost of an irradiated fuel chemical reprocessing plant).
- [3] BELLMAN R. E., Dynamic programming. Princeton University Press, 1957
BELLMAN R. E., and DREYFUS S. E. Applied dynamic programming
Princeton University Press, 1962.

Processing cost of irradiated uranium
versus size of plants

Processing cost
Frs/KgU
(on arrival to plant)



- Fig. 1 -



Power station sites



Possible sites for irradiated
natural uranium processing plants

- Fig. 2 -

FIN