

CEA - R 2685

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**ASPECT ECONOMIQUE DES REACTEURS
PRODUISANT DE L'ELECTRICITE
ET DE LA CHALEUR INDUSTRIELLE**

par

Jacques GAUSSENS, Nicolas MOULLE, Françoise DUTHEIL

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

Jean ALDEBERT

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLEAIRES

Rapport CEA - R 2685

Genève 1964, A Conf. 28/P/ 46

AOUT 1964

Ba

Translated into english

CEA-R 2685 - GAUSSENS Jacques, MOULLE Nicolas, DUTHEIL Françoise,
ALDEBERT Jean,

ASPECT ECONOMIQUE DES REACTEURS PRODUISANT DE L'ELECTRICITE
ET DE LA CHALEUR INDUSTRIELLE

Sommaire. -

L'intérêt économique de centrales nucléaires productrices d'électricité décroît lorsque la puissance décroît. Cependant, lorsqu'on associe une turbine à contrepression à un réacteur et qu'il est possible d'utiliser dans de bonnes conditions la chaleur résiduelle, on peut montrer que dans certaines conditions assez réalistes, des équipements nucléaires d'une puissance unitaire peu élevée peuvent être compétitifs avec des équipements conventionnels. Cette communication a donc pour but de mettre en évidence quelles sont ces conditions particulières de rentabilité de l'énergie nucléaire. Elles sont liées à la localisation de la centrale et à son contexte économique général, à la structure de la demande d'énergie électrique et thermique à laquelle elle doit satisfaire, . /.

CEA-R 2685 - GAUSSENS Jacques, MOULLE Nicolas, DUTHEIL Françoise,
ALDEBERT Jean,

ECONOMIC ASPECTS OF ELECTRICITY AND INDUSTRIAL HEAT GENERATING
REACTORS

Summary. -

The economic advantage of electricity-generating nuclear stations decreases when their size decreases. However, when a counter-pressure turbine is joined on to a reactor and the residual heat can be properly used, it can be shown that fairly low capacity nuclear equipment may compete with conventional equipment under certain realistic enough conditions. The aim of this paper is to define these special conditions under which nuclear energy can be profitable. They are connected with the location and the general economic environment of the station, the pattern of the electricity and heat demands it must meet, the level of fuel and specific capital costs, nuclear and conventional. These conditions entail certain technical and economic specifications for the reactors used in this way otherwise they are unlikely to be competitive. . /.

au niveau des coûts des combustibles et des investissements spécifiques nucléaires et classiques.

Ces conditions de rentabilité conduisent à admettre pour les réacteurs ainsi utilisés certaines caractéristiques techniques et économiques hors desquelles la compétition est improbable.

On situe, d'autre part, ces résultats par rapport au marché potentiel de la vapeur et de l'électricité et on est ainsi conduit à examiner certaines utilisations de la chaleur des centrales mixtes telles que l'alimentation de complexes industriels, de divers types de chauffage urbain ou du dessalement des eaux de mer.

In addition, these results are referred to the potential steam and electricity market, which leads us to examine certain uses for the heat generated by double purpose power stations ; for example, to supply combined industrial plants, various types of town heating and for removal of salt from sea water.

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.

ASPECT ECONOMIQUE DES REACTEURS PRODUISANT DE L'ELECTRICITE
ET DE LA CHALEUR INDUSTRIELLE

par

Jacques GAUSSENS - Nicolas MOULLE - Françoise DUTHEIL

Commissariat à l'Energie Atomique

Jean ALDEBERT

Institut des Sciences et Techniques Nucléaires

1° INTRODUCTION

Au moment où l'on constate des symptômes de compétitivité très nets des centrales nucléaires avec les centrales classiques productrices d'électricité, on peut s'interroger sur les perspectives nouvelles et les marchés nouveaux que ces premiers succès ouvrent à l'emploi de l'énergie atomique.

Parmi ces nouveaux marchés, celui de la "chaleur industrielle" semble accessible à cette forme d'énergie dans des délais pas trop éloignés.

On sait que cette demande de chaleur industrielle est en général associée à une demande d'électricité et que l'emploi de centrales mixtes comportant des turbines à contre-pression permet dans de nombreux cas de satisfaire cette double demande au meilleur coût.

Il paraît important de définir les conditions de meilleure rentabilité des équipements nucléaires employés ainsi, comparés aux équipements conventionnels, afin d'orienter le choix des types de réacteurs, et des caractéristiques de ces réacteurs les mieux adaptés aux nécessités de la demande. Il est en particulier important de savoir si l'utilisation mixte des centrales nucléaires de puissance moyenne permet une meilleure rentabilité que si elles étaient employées pour la production de la seule énergie électrique.

Dans une première partie nous évoquerons les aspects généraux du marché de la "chaleur" associée à l'électricité, destinée à des ensembles industriels, ainsi que son évolution. La deuxième partie sera consacrée à l'étude du mécanisme de ce marché, c'est-à-dire à l'étude des meilleures conditions d'utilisation des équipements nucléaires ou conventionnels destinés à satisfaire une certaine demande de chaleur et d'électricité qui peuvent conduire à des choix techniques.

De telles études doivent nécessairement constituer l'étape initiale de tout programme de recherche et de développement consacré à la mise au point de ces centrales nucléaires à double fin, en précisant les conditions dans lesquelles doivent s'effectuer leur optimisation, en assurant une liaison permanente entre le travail de conception et les désirs des utilisateurs.

2° LES BESOINS DE CHALEUR ET D'ELECTRICITE DES ENSEMBLES INDUSTRIELS ET URBAINS

a) Caractéristiques de la demande

I - Le chauffage urbain

La chaleur est requise à un potentiel relativement bas, départ à 110 ou 140°C par exemple, favorable au transport sous forme d'eau chaude sous pression qui élimine le problème de la récupération des purges.

Les puissances des centrales peuvent atteindre plusieurs centaines de millions de calories/h, par exemple au nouveau quartier de la "Défense" à l'Ouest de Paris : 200 millions de calories/h (soit environ 250 MWth) avec extension envisagée à 300 millions de calories/h. Par contre, tout au moins sous le climat de la France, le facteur d'utilisation annuel demeure faible (25% par exemple). Ce facteur défavorable doit tendre à s'atténuer en raison du développement des besoins d'eau chaude et surtout, pendant l'été, de la climatisation par réfrigérants à absorption.

Au chauffage urbain proprement dit se rattache celui de certains grands ensembles 1)

II - Les industries mécaniques

La majeure partie des besoins, pour l'industrie automobile par exemple, peut être satisfaite à des températures analogues à celles du chauffage urbain (140 à 150° C), l'élévation locale du potentiel, nécessaire à certains usages particuliers, n'étant pas exclue.

1) Citons pour mémoire le Centre Nucléaire de Saclay dont les besoins de pointe s'élèvent à plus de 30 millions de calories/h ou l'aérodrome d'Orly : 40 millions de calories/h.

La production combinée d'énergie électrique par un groupe à contre-pression présente ici, en plus de son avantage économique, un intérêt très net pour la sécurité de la distribution électrique.

III - L'industrie du papier

Dans une usine classique il faut :

- par tonne de pâte : 4 à 5 t de vapeur à 200° C
- par tonne de papier : 5 à 6 t de vapeur

L'importance de ces besoins de vapeur conduit également ici à des centrales de 100, 200 ou 300 millions de calories/h.

Il faut néanmoins noter :

- pour la fabrication classique, la nécessité de brûler la liqueur noire de résidus de bois assurant une fraction notable des besoins thermiques

- pour la fabrication de pâte mécanique, la réduction importante des besoins de chaleur compensée par une augmentation de la consommation d'énergie électrique .

Les centrales de ces dernières usines seront donc plutôt équipées essentiellement pour la production d'électricité, la chaleur nécessaire étant obtenue par plusieurs soutirages de débits et de caractéristiques bien définies. Les facteurs de charge concernant la chaleur et l'électricité sont au moins aussi élevés que dans l'industrie mécanique.

IV - L'industrie du caoutchouc

Les besoins en énergie calorifique d'une importante usine de caoutchouc peuvent être situés dans la gamme de 100 à 200 millions de calories/h à des températures de l'ordre de :

190° C pour la fabrication

130° C pour le chauffage des locaux

Le facteur de charge est abaissé par un mois d'arrêt annuel, un jour d'arrêt hebdomadaire et l'arrêt pendant l'été du chauffage qui peut représenter 40% des besoins totaux.

V - L'industrie chimique et électrochimique

Les besoins pourront atteindre 200 millions de calories/h pour une seule usine et le double doit être envisagé pour un ensemble d'usines.

Les températures d'utilisation s'étagent entre 150° et 250°, les 2/3 environ de l'énergie étant requis à température élevée.

Les besoins d'énergie électrique peuvent être de l'ordre du tiers des besoins d'énergie calorifique. Le facteur d'utilisation est très élevé.

b) Caractéristiques de l'offre correspondante dans le domaine des techniques conventionnelles

- centrales ne produisant aucune énergie électrique :
 - . à eau chaude ou émulsion pour des pressions et températures limitées. (200° C)
 - . à vapeur saturée lorsqu'on recherche la rusticité et que les circonstances se prêtent mal à l'installation d'un groupe à contre-pression
- centrales produisant de l'électricité à contre-pression :
 - . chaudières timbrées à 50 ou 60 bars - surchauffe vers 450°, caractéristiques compatibles avec l'emploi d'aciers ordinaires et correspondant sensiblement à celles des anciennes centrales du réseau français de 50 MW ayant un rendement de 30 à 32%.
- centrales équipées d'un groupe à condensation et soutirages de vapeur
 - . chaudières timbrées de 130 à 160 bars - surchauffe de 540 à 565°C - caractéristiques compatibles avec l'emploi des chromesco sans qu'il soit encore nécessaire de passer aux aciers austénitiques.

Il faut remarquer que, même pour des puissances notables, les centrales du 3e type n'ont pas systématiquement détrôné celles du 2e type qui demeurent

- plus rustiques
- plus souples d'exploitation
- mieux adaptables si les caractéristiques de la vapeur sont susceptibles de varier
- plus économiques de leur établissement

En fait, il semble bien que les centrales à caractéristiques très poussées ne se justifient que pour l'alimentation de machines nettement définies et lorsque la production électrique prend une grande importance comme dans certaines papeteries. Dans les autres cas, l'aptitude à la transformation en énergie électrique ne jouant que sur une fraction de l'énergie produite, la centrale à 50-60 bars et 400-450°C, semble préférée.

c) Conclusions relatives au marché de la chaleur industrielle

On peut retenir de ce qui vient d'être exposé :

D'abord l'importance de certains besoins en chaleur s'élevant de 200 à 300 millions de calories par heure et dont un groupement systematique permettrait d'atteindre ou de dépasser 400 millions de calories/h avec un facteur de charge élevé soit des puissances de l'ordre de 500 à 600 MW_{th}.

Ensuite, le fait que dans le cas des centrales mixtes - chaleur et électricité - conventionnelles, le choix de caractéristiques modérées (50 à 60 bars

400 à 450° C) est souvent maintenu. Dans le cas de production d'électricité, les rendements nets dans ces conditions seraient de 30 à 32% au lieu de 36 à 38% pour les grandes centrales électrogènes.

3° LES BESOINS DE CHALEUR ET D'ELECTRICITE POUR LE DESSALEMENT DES EAUX DE MER

Cette utilisation de l'énergie fait l'objet d'un paragraphe spécial car elle se différencie par divers aspects des utilisations industrielles évoquées plus haut. D'abord, elle n'interviendra massivement que dans un avenir assez éloigné, par suite de la pénurie prévisible d'eau. De plus, les unités de production étant vraisemblablement très importantes, on devra faire appel à des puissances unitaires supérieures à celles souvent employées pour la production d'électricité.

a) Les besoins en eau

Les besoins d'eau totaux annuels de la France, de 30 milliards de m³ en 1955 s'élèveront à 57 milliards de m³ dès 1970. Ainsi, dans un pays relativement riche en eau comme la France, on peut prévoir que dans 10 ans la consommation (sauf recyclage) atteindra plus du quart des ressources totales.

Encore faut-il considérer que certaines régions font, d'ores et déjà, l'objet de planification pour l'eau d'irrigation et que dans les régions industrielles du Nord, de l'Est et du Bassin Parisien, des mesures sévères d'économie doivent être prises.

Citons le cas des besoins en eau de la sidérurgie de Dunkerque, de l'ordre de 27 500 m³/h pour une production de fonte de 1 250 000 t/an, réductible à 1 000 m³/h par un recyclage d'ailleurs relativement onéreux.

Ce sont les secteurs industriels qui ont présenté l'augmentation la plus importante entre 1955 et 1960. L'agriculture vient en seconde place, ensuite les besoins domestiques.

Le problème de l'eau se pose aussi bien dans le cadre d'une économie insuffisamment développée que dans celui d'une économie développée. L'Afrique Noire, le Moyen-Orient, sont des régions pour lesquelles ce besoin "clé" est pressant à satisfaire puisque, avec l'énergie, il conditionne toute opération de développement économique. Citons en particulier les cas actuels des Etats d'Israël et de Tunisie.

b) Energie requise par les principaux procédés de dessalement

L'état actuel des connaissances en matière de technique de dessalement de l'eau de mer bien que laissant présager un futur engageant, ne laisse cependant actuellement à notre disposition que les résultats d'usines pilotes ou les estimations de réalisations encore à l'étude. C'est pourquoi les chiffres que nous récapitulons au tableau suivant ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeur.

Tableau I

Procédés	Consommation en thermies/ m ³	Consommation en kWh/m ³
- <u>Utilisation de chaleur</u> 2)		
. Distillation à plusieurs effets (L.T.V.)	67 à 134	puissance de pompage négligeable
. Distillation éclair à plusieurs effets	50 à 90	
- <u>Utilisation d'électricité</u>		
. Compression de vapeur		16
. Electrolyse	faible	6,7 - 18,6
. Osmose inverse		13,5
. Congélation		16

Pour les procédés utilisant la chaleur, les températures de la vapeur primaire communément admises sont très variables, de l'ordre de 250° C à 450° C pour la production mixte d'électricité et de chaleur.

c) Tailles des installations de dessalement envisageables

Si on cherche à rapprocher les besoins spécifiques en eau des puissances thermiques nécessaires pour les produire, on obtient les ordres de grandeur suivants :

- 10 000 m³/jour correspondent à l'alimentation par exemple d'une savonnerie de 5 à 7 000 t/an ou aux besoins agricoles de 4 à 10 ha en région semi-aride.
- 100 000 m³/jour permettent d'alimenter une usine de caoutchouc synthétique de 15 à 20 000 t/an.
- 1 000 000 m³/jour sont nécessaires pour une usine d'aluminium de 200 à 300 000 t/an.

Pour produire 10 000 m³/jour il faut de 20 à 40 MW_{th} par les procédés de distillation "éclair" et de 3 à 8 MW_{e1} par électrolyse.

L'emploi de réservoirs peut améliorer le facteur de charge qui, selon les utilisations industrielles, peut varier dans des limites plus ou moins importantes. Les usages agricoles, par contre, sont saisonniers et peuvent plus difficilement être régularisés.

2) O.S.W. - Saline Water Conversion Report 1962

4° AVANTAGES GENERAUX DE L'ENERGIE NUCLEAIRE POUR LA PRODUCTION DE VAPEUR ET D'ELECTRICITE PAR RAPPORT AUX PROCEDES CLASSIQUES

Avant d'aborder l'étude du mécanisme de confrontation de l'offre et de la demande d'énergie, rappelons les avantages les plus généraux de l'énergie nucléaire par rapport aux sources conventionnelles dans cette confrontation :

- le faible coût du combustible par unité d'énergie produite qui a plusieurs conséquences : l'utilisateur subit moins que pour le combustible fossile les conséquences des aléas de la conjoncture en matière de prix. Des régions à desservir d'accès difficile ou éloigné des sources d'énergie primaire ne sont plus défavorisées (Centre-Afrique, région Arctique, Antarctique). Enfin, lorsque des centrales classiques entrent en concurrence avec des équipements nucléaires, ces derniers seront amenés à fonctionner à un plus haut facteur de charge, puisque leur coût marginal de production est plus bas.
- la possibilité d'atteindre de très fortes tailles avec une diminution constante et importante des investissements spécifiques par kW, rend l'énergie nucléaire sans rivale pour certaine production mixte de grand volume tel que le dessalement associé à la production d'électricité.
- l'intérêt d'adapter les caractéristiques et le coût de fabrication du combustible aux conditions de vapeur demandées et d'aboutir ainsi à des économies, plus difficiles dans le cas des combustibles fossiles.

5° MECANISME DE CONFRONTATION DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE

Pour exposer ce mécanisme, nous allons partir de la situation relativement simple suivante : on veut satisfaire les besoins en chaleur et électricité d'un ensemble industriel, ces besoins étant supposés constants d'une année à l'autre, à un haut facteur de charge de 80%.

Il s'agit de choisir entre plusieurs politiques globales combinant différentes stratégies et divers systèmes de production de vapeur haute pression compte tenu du contexte économique.

a) Les stratégies

- I - Les besoins calorifiques (puissance exigée : P_{cal}) peuvent être satisfaits à l'aide de :
- la vapeur produite dans une chaudière basse pression
 - ou la vapeur sortant d'une turbine à contre-pression

II - Les besoins électriques (puissance exigée : T_{e1}) peuvent être satisfaits par :

- l'achat d'énergie au réseau extérieur
- une turbine à contre-pression associée à un alternateur
- une turbine à condensation associée à un alternateur
- une turbine globale (contre-pression plus condensation) associée à un alternateur

La réalisation simultanée de ces deux types de besoins peut conduire, par exemple, à cinq stratégies de principe représentées globalement sur la figure 1.

Tableau II

Énoncé des stratégies	Production de chaleur	Production d'électricité	Interrupteur de la figure 1 ouvert
(A)	Chaudière BP	Achat au réseau	2 - 3 - 4 - 5
(B)	Chaudière BP	Centrale électrique	2 - 6
(C)	Vapeur de la turbine à contre-pression	Turbine à contre-pression et réseau	1 - 3 - 4
(D)	Vapeur de la turbine à contre-pression	Turbine à contre-pression et turbine à condensation	1 - 6
(E)	En hiver : stratégie D En été : stratégie C		1

b) Les systèmes de production de vapeur haute pression

- chaudière thermique conventionnelle (symbole Th)
- réacteur nucléaire de type N_1
- réacteur nucléaire de type N_2

(N_1 se différencie de N_2 par un coût d'investissement plus élevé et un coût de combustible plus faible).

La combinaison de ces cinq stratégies et de ces trois systèmes de production de vapeur permet de définir treize politiques (la stratégie A est indépendante du type de chaudière haute pression), que nous nous proposons de comparer.

c) Comparaison économique des différentes politiques

I - Critère de choix

Il s'agit de rendre minimum les dépenses annuelles (achat d'électricité au réseau, charges financières d'amortissement, dépenses d'exploitation et de combustible), dépenses variables suivant la politique adoptée.

9
On notera que la confrontation des diverses politiques permettra, en particulier, de situer l'intérêt de l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité et de chaleur par rapport à la production de la seule électricité dans la stratégie B.

II - Le contexte économique - Les hypothèses de base

Un certain nombre d'hypothèses de base sont retenues pour les calculs donnés à titre d'exemple. Nous donnerons par la suite quelques conséquences de la variation de ces hypothèses, montrant ainsi comment le modèle est généralisable.

Les hypothèses économiques sont les suivantes :

- montant spécifique des investissements en fonction de la puissance électrique installée (figure 2).
- dépenses d'exploitation en fonction de la puissance électrique installée (figure 3)
- coûts d'utilisation du combustible : c_t en centime/kW_{th}h (classique)
 c_{n1} " (nucléaire 1)
 c_{n2} " (nucléaire 2)
- taux d'amortissement : 10% par an
- prix de revient moyen de l'énergie électrique demandée au réseau électrique extérieur :
 p_e en c/kW_eh
(nous supposons en première approximation ce prix indépendant de la puissance souscrite)
- p_e^h et p_e^e prix de revient moyens de l'énergie électrique demandée au réseau pendant les périodes correspondantes (p_e^h en hiver, p_e^e en été) en c/kW_eh
- prix de revient moyen de l'énergie calorifique fourni par une chaudière conventionnelle BP p_c en c/kW_{cal}h ($p_c = 2,5$ c/kW_{cal}h).

Les hypothèses techniques sont les suivantes :

- les besoins calorifiques exigent de la vapeur à 200°C
- la température de la vapeur à l'admission de la turbine à contre-pression est identique quel que soit le système producteur de calories haute pression
- le rendement net de la turbine à contre-pression est η_{cp}
- le rendement net de la turbine à condensation est η_{cd}
- les différentes pertes thermiques sont négligées

Les données numériques sont les suivantes :

Tableau III

T _{el} : puissance électrique	P _{cal} : puissance calorifique	η_{cp} rendement turbine contre-pression	η_{cd} rendement turbine condensation	Prix du courant		
				moyen	été	hiver
100 MWe	255 MWcal	15 %	18 %	5 c/kWh	3 c/kWh	7 c/kWh

III - Les résultats

Le tableau ci-dessous rassemble les dépenses annuelles correspondant aux différentes politiques.

Tableau IV

Options techniques	T _h	N ₁	N ₂	REMARQUES
Stratégies				
Stratégie A	79,6 10 ⁶ F	79,6 10 ⁶ F	79,6 F	Achat de 100 MWe et de 255 MWcal
Stratégie B	83,8 10 ⁶ F	81,2 10 ⁶ F	79,6 10 ⁶ F	Achat de 255 MWcal
Stratégie C	58,5 10 ⁶ F	55,9 10 ⁶ F	54,2 10 ⁶ F	Achat de 55MWe
Stratégie D	60,4 10 ⁶ F	47,2 10 ⁶ F	50,4 10 ⁶ F	
Stratégie E	58,5 10 ⁶ F	51,6 10 ⁶ F	52,3 10 ⁶ F	Achat de 55MWe pendant 3 500h en été

Ce tableau met en évidence les points principaux suivants :

- il existe une stratégie optimale différente pour chaque système producteur de vapeur haute pression :
 - . stratégies C ou E pour une chaudière conventionnelle haute pression
 - . stratégie D pour un réacteur nucléaire de type N₁ ou N₂
- parmi ces stratégies optimales, il existe une politique préférable aux autres, c'est-à-dire conduisant à une dépense globale annuelle minimale. Dans notre cas, la solution consiste à utiliser un réacteur nucléaire de type N₁ comme chaudière haute pression et à suivre la stratégie D (satisfaction simultanée des besoins électriques et calorifiques sans emploi de chaudières conventionnelles basse pression ni recours au réseau électrique extérieur).

- on remarquera que la politique optimum nucléaire (D - N₁) donne un avantage considérable par rapport à la politique optimum thermique (C - T_h) alors que pour la seule production d'électricité (stratégie B) la différence nucléaire -classique est négligeable

IV - Remarques

- Avec les données retenues, le classement des différents systèmes de production de vapeur haute pression en fonction de la puissance thermique installée s'établit ainsi :

Tableau V

Q MW _{th}	0 < Q < 100	100 < Q < 240	240 < Q < 385	Q > 385
Ordre de préférence	T _h N ₂ N ₁	N ₂ T _h N ₁	N ₂ N ₁ T _h	N ₁ N ₂ T _h

Les stratégies envisagées qui nécessitent une puissance thermique installée différente sont susceptibles d'entraîner une modification de l'ordre établi. Ainsi, dans l'exemple étudié :

- . N₂ - N₁ - T_h avec les stratégies B et C (Q_B = Q_C = 300 MW_{th})
- . N₁ - N₂ - T_h avec la stratégie D (Q_D = 485 MW_{th})
- L'emploi de la stratégie C (utilisation d'une turbine à contre-pression permettant de satisfaire les besoins calorifiques et simultanément une partie des besoins électriques) permet une économie appréciable par rapport à la stratégie A quel que soit le type de chaudière haute pression employé.

Tableau VI

	T _h	N ₁	N ₂
Economie, en % des dépenses globales de la stratégie A	26,5 %	30 %	32 %

Sur le plan général, la stratégie C est meilleure que la stratégie A si l'inégalité suivante est satisfaite :

$$(a I + g)_{Q=Q_c} + c h Q_c < P_{cal} h \left(p_c + p_e \frac{\eta_{cp}}{1 - \eta_{cp}} \right)$$

c'est-à-dire si les dépenses annuelles liées à l'installation d'une centrale de production mixte de chaleur et d'électricité de puissance thermique Q_c sont inférieures à la somme des dépenses annuelles résultant de la production des besoins

calorifiques par une chaudière conventionnelle basse pression et de l'achat d'une partie des besoins électriques au réseau extérieur (partie correspondant à l'énergie électrique fournie par la turbine à contre-pression).

- L'emploi de la stratégie D permet, en augmentant la puissance thermique installée de la chaudière haute pression et en partageant la vapeur sortant de la turbine à contre-pression entre le réseau calorifique et une turbine à condensation, d'éviter les achats au réseau extérieur d'une partie des besoins électriques (stratégie C). Il en résulte une modification du résultat global par suite de l'évolution différente du coût marginal des divers équipements en fonction de la puissance thermique installée.

Tableau VII

	T_h	N_1	N_2
Economie ou dépense résultant du passage de la stratégie C à la stratégie D, en % des dépenses annuelles de la stratégie C	- 3,2 %	+ 15,5 %	+ 7 %

- On montre, dans le cas général et avec les notations utilisées, que la stratégie D est meilleure que la stratégie E si l'inégalité suivante est vérifiée (c coût d'utilisation du combustible) :

$$c < p_e^e (\eta_{cp} + \eta_{cd} - \eta_{cp} \eta_{cd})$$

soit :

$$c < 0,9 c/kW_{th} h (1)$$

Pour un réacteur nucléaire (type N_1 ou N_2) la stratégie D est meilleure que la stratégie E, c'est-à-dire que le faible coût marginal de production (coût du combustible) concurrence favorablement un prix de revient faible de l'énergie électrique.

Pour une chaudière conventionnelle la stratégie E est meilleure que la stratégie D (coût marginal élevé de production). Mais, comme dans ce cas, la stratégie C est meilleure que la stratégie D, il est nécessaire de comparer les stratégies C et E.³⁾

3) On peut montrer que la stratégie C est meilleure que la stratégie E si :

$$p_e - \frac{p_e^e}{2} < \frac{(a I + g) \text{ entre } Q_c \text{ et } Q_d}{h (T_{el} - \eta_{cp} Q_c)} + \frac{c}{2 (\eta_{cp} + \eta_{cd} - \eta_{cp} \eta_{cd})}$$

$$p_e - p_e^e / 2 < 1,5 + 2 < 3,5 c / kW_{eh}$$

avec $p_e = 5$ centimes et $p_e^e = 3$ centimes, cette expression devient une égalité ce qui exprime l'équivalence des stratégies C et E dans le cas d'une chaudière conventionnelle.

V - Modifications des résultats en fonction de la variation des besoins

Toujours pour concrétiser les idées sur un exemple précis, nous donnons figure 4 et 5, pour chacune des options techniques, les courbes correspondant aux politiques optimales pour deux groupes d'hypothèses concernant la demande :

- la demande de chaleur est constante et la demande d'électricité croît (figure 4)
- les demandes de chaleur et d'électricité croissent dans le même rapport (figure 5)

Ces résultats peuvent être évidemment profondément perturbés selon les hypothèses de base. On remarque cependant les écarts relatifs entre les stratégies optimales correspondant aux trois systèmes de production de vapeur haute pression et la rentabilité différente du nucléaire selon qu'est envisagée une production mixte de chaleur et d'électricité ou seulement une production d'électricité. En outre les deux types envisagés de nucléaire conduisent à des dépenses annuelles minimales différentes selon l'importance des besoins à satisfaire.

VI - L'obsolescence

Nous nous proposons, pour une industrie dont les besoins d'énergies électrique et calorifique sont ainsi définis :

- besoins passés : 102 MW_{cal} (satisfaits à l'aide de chaudières basse pression)
40 MW_e (satisfaits par un réseau électrique extérieur)
- accroissement des besoins : 153 MW_{cal}
60 MW_e

de rechercher parmi les deux politiques suivantes, celle qui conduit aux dépenses annuelles minimales.

- politique P₁ : maintien des chaudières basse pression et des achats d'énergie électrique au réseau extérieur pour satisfaire les besoins passés
. installation nouvelle pour satisfaire l'accroissement des besoins
- politique P₂ : installation nouvelle pour satisfaire l'ensemble des besoins passés et futurs.

Ces résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau VIII

	Politique P ₁	Politique P ₂
Dépenses globales	65,9 10 ⁶ F	47,2 10 ⁶ F

Avec les valeurs adoptées, la politique P₂ conduit à une meilleure économie que la politique P₁ (gain de 40% sur les dépenses annuelles).

La recherche de la politique optimale sur le plan économique pour satisfaire des besoins donnés doit tenir compte de l'accroissement des besoins futurs, mais également de l'importance des besoins passés.

Le déclassement possible des chaudières conventionnelles basse pression entraîne une majoration des besoins nouveaux à satisfaire, donc, conformément aux résultats obtenus, modifie la nature (stratégie et système de production de vapeur haute pression) de la politique optimale. Avec les données numériques de l'étude, l'accroissement des besoins d'énergies électrique et calorifique conduit à préférer une installation haute pression, dont le coût marginal est plus sensible aux variations de la puissance thermique installée, donc un réacteur nucléaire de type N₁ (faible coût de combustible, décroissance du montant spécifique des investissements en fonction de la puissance thermique installée).

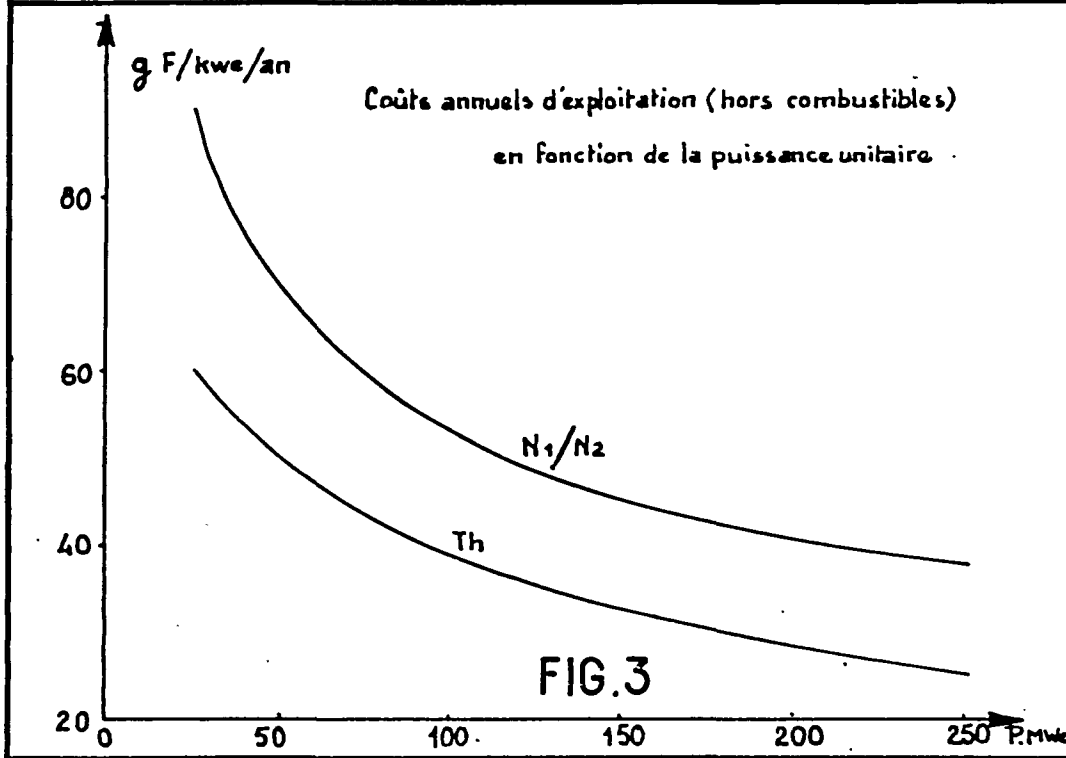
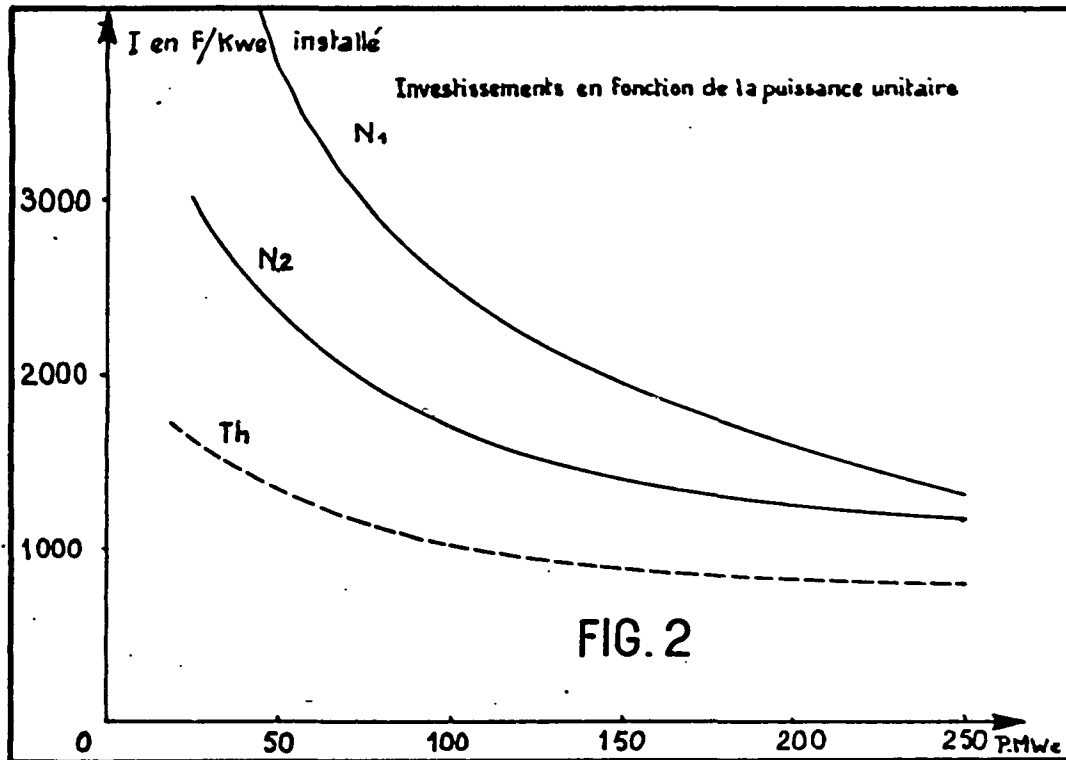
6° CONCLUSIONS

Nous avons essayé de montrer que pour des réacteurs de moyenne puissance la production de chaleur et d'électricité peut valoriser mieux l'énergie nucléaire que la seule production d'énergie électrique, et que les réacteurs les mieux adaptés à cette production n'étaient pas nécessairement les meilleurs lorsqu'ils sont utilisés à double fin.

Contrairement au marché de l'électricité dont les conditions de concurrence et de développement sont bien définies, le marché de la production de chaleur associé ou non à la production d'électricité, est en cours de formation. Il fera appel à des unités de plus en plus fortes et on a vu à quel point les caractéristiques de la demande pouvaient influencer sur les choix à effectuer (stratégies et systèmes de production de vapeur haute pression). Il n'est pas douteux que l'adaptation à ces nouveaux usages de réacteurs actuellement éprouvés pour la production électrique, exige des études de recherche et de développement, à plus forte raison, la mise au point de réacteurs encore au stade expérimental.

De plus, dans le cas du dessalement, les procédés de déminéralisation associés à la production d'énergie sont actuellement en pleine évolution.

On dispose donc d'un certain temps pour une confrontation permanente de l'offre et de la demande conduisant à un véritable marché. Nous avons essayé de montrer que cette confrontation n'est pas simple et qu'il importe de disposer d'une méthodologie éprouvée pour éviter des erreurs d'orientation et des pertes économiques.



STRATEGIES POSSIBLES
(Schéma de principe)

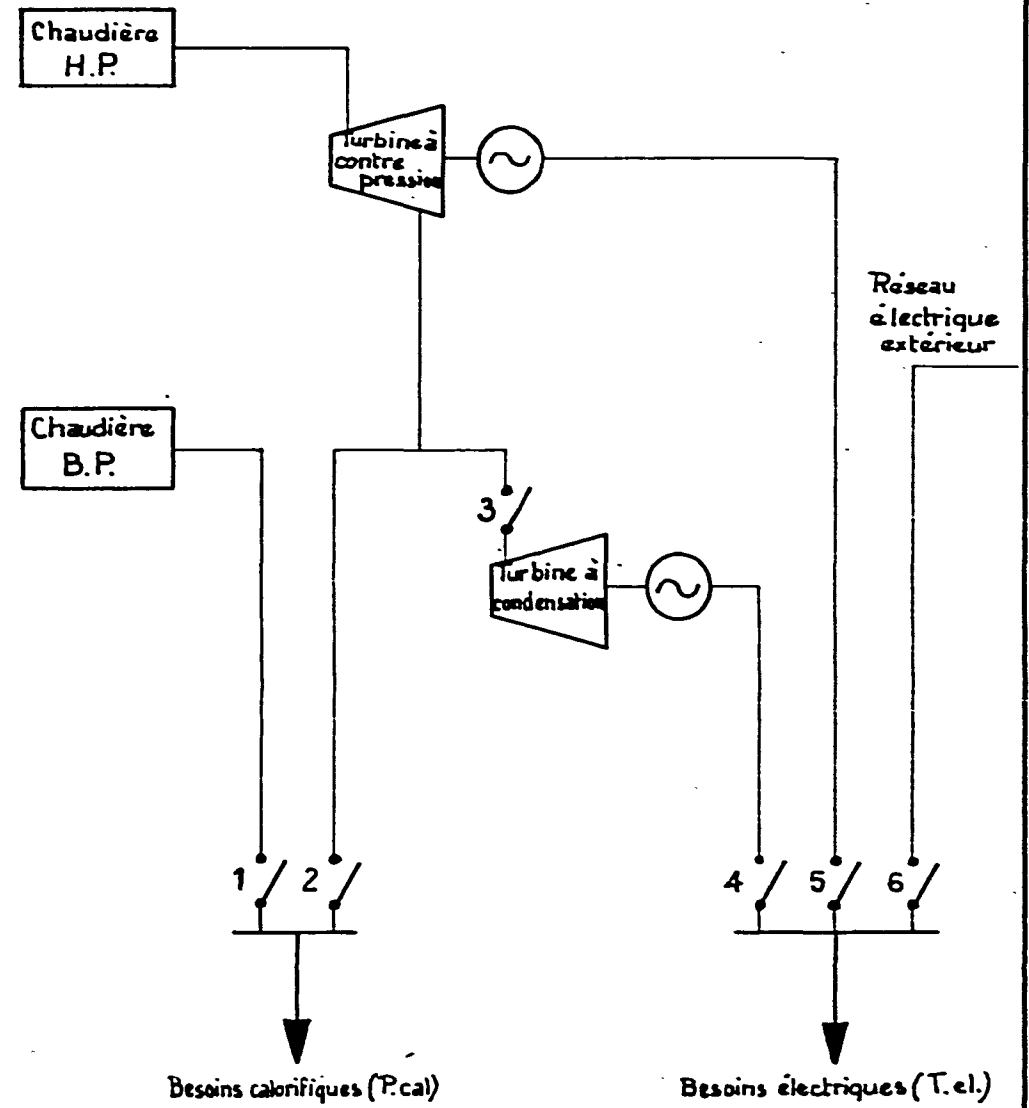
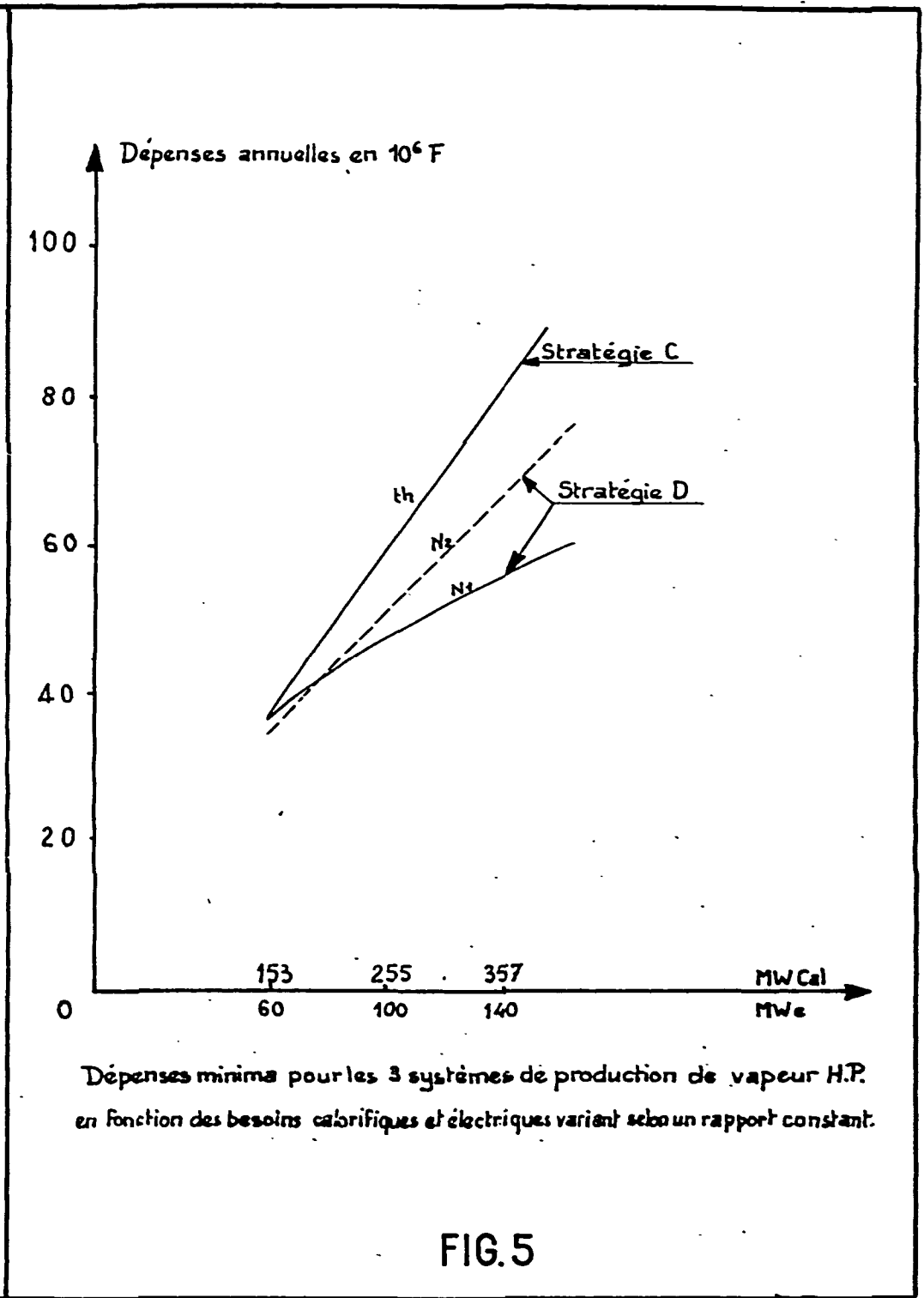
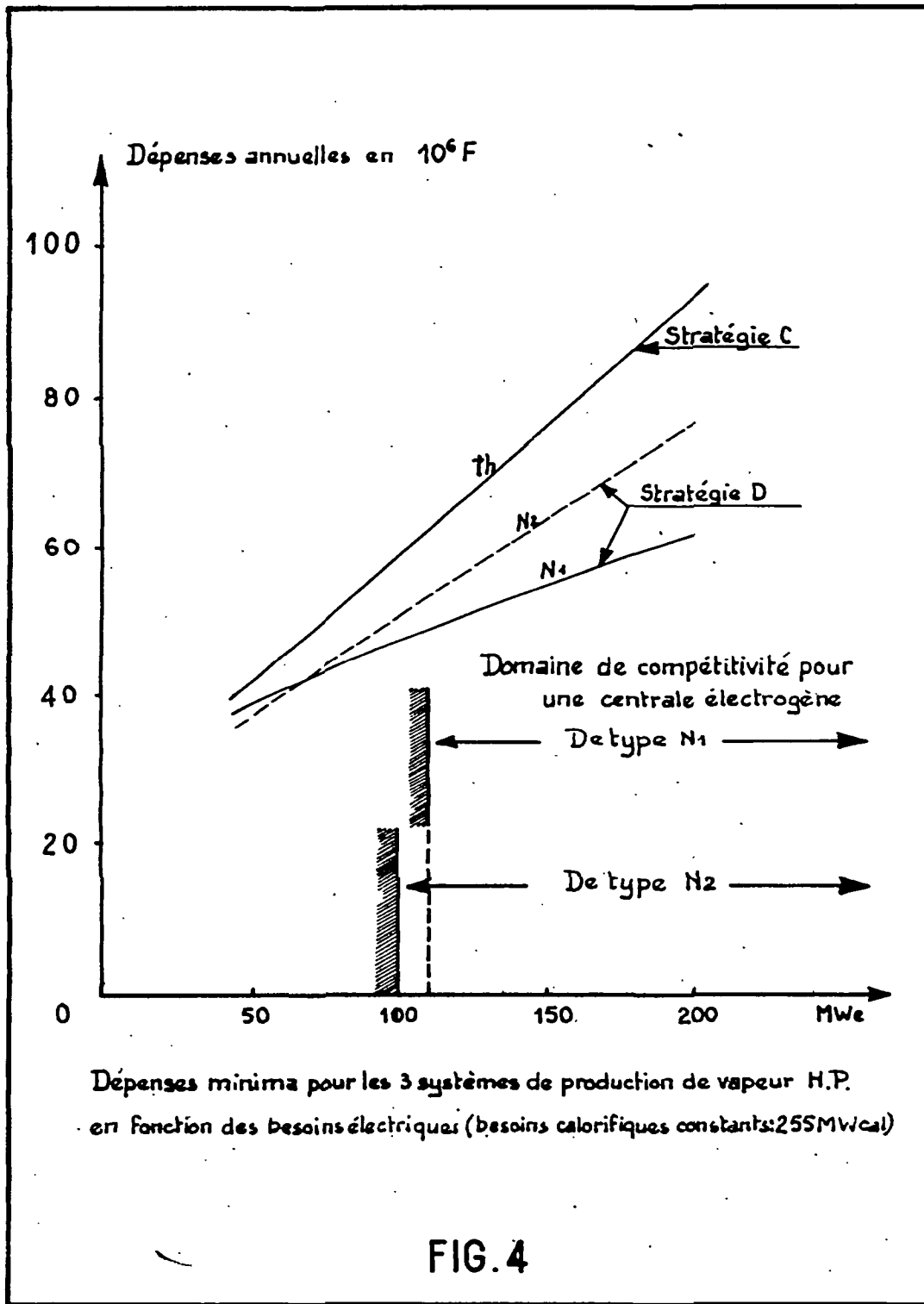


FIG. 1



ECONOMIC ASPECTS OF ELECTRICITY
AND INDUSTRIAL HEAT GENERATING NUCLEAR PLANTS

by MM. Jacques GAUSSENS
Nicolas MOULLE
Miss Françoise DUTHEIL (1)

Commissariat de l'Energie Atomique.

1° - INTRODUCTION -

At a time when nuclear plants are beginning to show very definite signs of competitiveness with conventional electricity - generating stations, we can wish to examine the new prospects and markets opened to atomic energy by these first successes.

Amongst these new markets that of "industrial heat" seems accessible to this type of energy in the not too distant future.

We know that industrial heat demand is generally associated with a demand for electricity, and in many cases these two requirements can be most economically met by the use of counter pressure turbines dual purpose power stations.

It seems important to define the conditions under which nuclear equipment can be most profitably used for this purpose as compared with conventional equipment, as a guide in choosing the types of reactors and the reactor characteristics best adapted to the requirement of demand. It is especially important to know whether dual-purpose medium-power nuclear plants present better economics than simple purpose electricity generating plants.

In the first part of this paper we shall review the general aspects of the combined "heat" and electricity market for industrial groups, and its development.

1) with the collaboration of M. Jean ALDEBERT - I.N.S.T.N.

The second part will be devoted to a study of the mechanism of this market, in other words, to a study of the best conditions in which to use nuclear or conventional equipments to answer a given heat and electricity demand, conditions on which technical decisions may depend.

Studies of this kind must necessarily constitute the initial stage of any research and development programme devoted to the elaboration of these dual purpose nuclear plants ; they will point out the conditions of their optimization and provide for a permanent link between the design work and the wishes of the operators.

2° - THE HEAT AND ELECTRICITY NEEDS OF INDUSTRIAL AND TOWN GROUPS.

a) Characteristics of the demand

I - Town heating.

Heat is required at a relatively low level, 110 or 140°C at the outset for example, convenient for transport as pressurized hot water which eliminates the problem of blow off recovery.

Power stations can produce several hundred million calories/h, for example in the new "Defense" district, West of Paris : 200 million calories/h (or about 250 MW (th), extension being planned to 300 million calories/h. On the other hand, in the French climate at least, the annual load factor is still low (25 % for example). Increasing needs for hot water and in summer, for air-conditioning by absorption refrigeration should tend to increase this factor. To town heatings may be added that of some large systems or works. ⁽¹⁾

II - Mechanical industries.

The biggest part of the demand, in the automobile industry for example, can be satisfied at temperatures similar to those of town heating (140 to 150°C). A local increase in this level, necessary for certain special uses, is however possible.

In this case, joint heat and electricity generated by a counter pressure group, offers very distinct advantages, not only from the economical view point but also from that of reliability of electricity distribution.

III - The paper industry.

A conventional facility requires :

(1) One can quote for instance the Saclay Nuclear Centre, the peak consumption of which reaches more than 30 million calories/h, or Orly airport : 40 million calories/h.

- per ton of pulp : 4 to 5 t of steam at 200° C
- per ton of paper : 5 to 6 t of steam.

Here again these large demands for steam are met by stations generating 100, 200 or 300 million calories/h.

We should note nevertheless ;

in the conventional manufacturing process, the black liquor of wood residues must be burned, providing an appreciable part of the heat needed ;

- for the mechanical manufacture of pulp, the large reduction in heat requirements is compensated by an increase in the consumption of electrical energy.

The power stations for these plants will therefore be mainly equipped for the production of electricity, the necessary heat being obtained by various tappings at well-defined flows and characteristics. The load factors with regard to both heat and electricity are at least as high as in the mechanical industries.

IV - The rubber industry.

The heat energy needs of a large rubber plant can be placed in the range of 100 to 200 million calories/h at temperatures of the order of :

190° C for manufacturing

130° C for heating the premises.

The load factor is reduced by an annual shut-down of one month, a weekly shut-down of one day, and, in summer, by the complete shut-down of heating, which may represent 40 % of the total needs.

V - Chemical and electrochemical industry.

The demand may reach 200 million calories/h for a single plant, and twice this figure must be expected for a group of factories.

The temperatures required vary between 150° and 250°, about 2/3 of the energy being needed at high temperature.

The electric power demand may be about a third of the heat demand. The load factor is very high.

b) Characteristics of the corresponding supply in the field of conventional techniques.

- stations producing no electric power :
- . using hot water or emulsion for limited pressures and temperatures (200° C);
- . using saturated steam when simplicity is required and circumstances are unfavourable to the installation of a counterpressure group.

- Electricity generating counterpressure stations :

boilers warranted at 50 or 60 bars - superheat at about 450°, characteristics compatible with the use of ordinary steel and corresponding more or less to those of the old 50 MW stations of the French network with a 30 to 32 % efficiency.

- stations equipped with a condensation unit and tapping of steam.

boilers warranted at 130 to 160 bars - superheat at 540 to 565°C - characteristics compatible with the use of chromescos austenitic steels not been needed yet. It should be noted that even for quite high powers, the third type of station has not systematically replaced those of the second type, which remain :

- simpler,

- more flexible in operation,

- more adaptable, if the characteristics of the steam are liable to vary,

- more economical to establish.

In fact it would seem that stations with very elaborate characteristics are only justified for supplying certain clearly defined machines, and where electricity generation is very important, as in the case of certain paper factories. For other purposes, since the capacity for conversion into electrical energy only involves a fraction of the energy produced, the 50-50 bar 400 - 450°C station seems preferable.

c) Conclusions relative to the industrial heat market.

From the above we can remember :

Firstly the size of certain heat requirements, which reach from 200 to 300 million calories an hour and which if systematically grouped could attain or exceed 400 million calories/h with a high load factor, i. e. power of the order of 500 to 600 MW th.

Secondly the fact that in the case of conventional dual purpose stations - heat and electricity - the choice of moderate characteristics (50 to 60 bars, 400 to 450°C) is often maintained. For electricity generation, the net efficiency under these conditions would be from 30 to 32 %, instead of 36 to 38 % for the large electricity - generating stations.

3° - HEAT AND ELECTRICITY DEMANDS FOR DESALINATION.

This use for energy is given a section to itself, since it can be distinguished in various ways from the industrial uses mentioned above. First of all it will only take place on a large scale in the fairly distant future as a result of the anticipated

shortage of water. In addition, production units probably being very large, it will be necessary to call on unit - capacities greater than those usually needed for electricity generation.

a) The water demand.

The total annual water demand in France, which was 30,000 million m³ in 1955, with rise to 57,000 million m³ by 1970. Thus in a country relatively well provided with water like France, it can be predicted that in 10 years time consumption (excluding recycling) will reach more than a quarter of total resources.

It must also be remembered that even now, plans are being made for irrigations, and that in the industrial regions of the North, the East and the Paris area, strict economy measures have to be taken.

The case of the Dunkerque iron and steel industries can be quoted, the demand for water being of the order of 27,500 m³/h for a cast-iron production of 1,250,000 t/year; this demand is reduced to 1000 m³/h by a relatively costly recycling process.

The industrial sectors have been those responsible for the largest increase between 1955 and 1960, agriculture coming second, and domestic needs third.

The water problem arises in the case of an under-developed as well as of a developed economy. Africa and the Middle East are regions for which it is urgent to answer this since, together with power, it conditions any operation involved in economic development. We can mention in particular the present cases of the States of Israel and Tunisia

b) Energy needed for the main processes of desalination.

The present state of knowledge concerning the removal of salt from sea water, although showing great promise for the future, is at present only based on results from pilot plants or on estimations of work still in progress. For this reason the figures summed up in the following table can only be considered as indicators of magnitude.

TABLE I.

Processes	Consumption in therms/cm ³	Consumption in KWh/m ³
- <u>Utilization of heat</u>		
Multi-purpose distillation (L. V. T.)	67 to 134	pumping power
Multi-purpose flash distillation	50 to 90	negligible
- <u>Utilization of electricity</u>		
Vapor compression		16
Electrodialysis		6.7 - 18.6
Inverse osmosis	weak	13.5
Freezing		16

2) O. S. W. - Saline water conversion report 1962.

For heat using processes, the commonly accepted temperatures of the primary steam are very variable, about 250°C to 450°C for dual electricity and heat generation.

c) Anticipated size of desalination installations.

If we attempt to compare the specific demand for water with the thermal capacities necessary to meet it, we obtain the following orders of magnitude :

- 10,000 m³/day correspond for instance, to the feed of a soap factory producing 5 to 7,000 t/year, or to the agricultural needs of 4 to 10 ha in a semi arid region.
- 100,000 m³/day will supply a synthetic rubber plant producing 15 to 20,000 t/year.
- 1,000,000 m³/day are needed for an aluminium plant producing 200 to 300,000 t/year.

The production of 10,000 m³/day requires 20 to 40 MW th by the "flash" distillation processes and 3 to 8 MW el by electro dialysis.

The use of reservoirs can improve the load factor which can vary within more or less wide limits according to the industrial use. Agricultural uses on the other hand are seasonal, and are more difficult to regulate.

4° - GENERAL ADVANTAGES OF NUCLEAR ENERGY FOR STEAM AND ELECTRICITY GENERATION, AS COMPARED WITH CONVENTIONAL METHODS.

Before we examine the mechanism involved in the energy supply and demand balance, we shall outline the most general advantages of nuclear energy over conventional sources in this context :

- a low fuel cost per unit of energy produced, which has several results : the user suffers less from the consequences of the hazards of conjecture in the matter of cost than with the standard type of fuel ; regions which are difficult of access or remote from the sources of primary energy are no longer at a disadvantage (central Africa, the Arctic and Antartic regions) ; finally, when conventional stations enter into competition with nuclear installations the latter will operate at a higher load factor since their marginal production cost is lower.
- the possibility of attaining very large capacities with a large and constant decrease in capital cost per KW ; this means that nuclear energy is unrivalled for certain dual-purpose, large-scale productions such as saline water conversion combined with electricity generation.
- the desirability of adapting fuel characteristics and fabrication costs to steam

demand conditions thus saving money, which is more difficult in the case of standard fuels.

5° - THE MECHANISM OF SUPPLY AND DEMAND.

To explain this mechanism, we shall start from the following relatively simple situation : we wish to meet the heat and electricity demand of an industrial group, this demand being assumed constant from one year to the next, with a high load factor of 80 %.

We must choose amongst several overall policies combining different strategies and various systems of high-pressure steam generation taking into account the economic context.

a) Strategies.

I - Heat requirements (power required : P_{eal}) can be met by means of :

- low-pressure boiler generated steam.
- counterpressure turbine steam.

II - Electricity needs (power required : P_{el}) can be answered by :

- buying the power from the national grid,
- a counterpressure turbine associated with an alternator,
- a condensation turbine associated with an alternator,
- a complete turbine (counterpressure plus condensation) associated with an alternator.

Figure 1 shows five examples of overall strategies which can be adopted to meet these two demands simultaneously.

TABLE II

Strategy	Heat generation	Electricity generation	Switch of figure 1 open
(A)	LP boiler	Purchase from grid	2-3-4-5
(B)	LP boiler	Generating station	2-6
(C)	Steam from Counterpressure turbine	Counterpressure turbine and grid	1-3-4
(D)	Steam from Counterpressure turbine	Counterpressure turbine and condensation turbine	1-6
(E)	In winter : strategy D In summer : strategy C		1

b) High-pressure steam generating systems.

- conventional boiler (Th symbol)
- nuclear reactor of type N₁
- nuclear reactor of type N₂

(N₁, differs from N₂ by a higher investment cost and a lower fuel cost).

The combination of these five strategies and these three systems of steam generation gives us thirteen policies (strategy A is independent of the type of high-pressure boiler); which we propose to compare.

c) Economic comparison of the various policies.

I - Selection criterion .

Annual expenditures must be reduced to a minimum (purchase of electricity from the grid, depreciation, operating and fuel costs), these expenses varying according to the policy adopted.

It will be noted that a comparison of the various policies will show, in particular, the advantage of using nuclear energy for the generation of electricity and heat, as against the generation of electricity alone in strategy B.

II - The economic back ground - Basic assumption.

A number of basic assumptions have been made for the computations given as examples. Afterwards, will be given certain consequences of the variation of these assumptions, thus showing how the model can be generalized.

The economic assumptions are as follows :

- specific investment as a function of electrical installed capacity (fig. 2)
- running cost as a function of installed electrical capacity (fig. 3)
- fuel costs : C_+ in centimes/ kW th h (conventional)
- C_{n1} " (nuclear 1)
- C_n " (nuclear 2)
- depreciation rate : 10 % per year.
- average cost of electrical energy from the grid :

$$P_e \text{ in c/kWe h}$$

(at a first from guess this price is assumed to be independent of the power subscribed).

- P_e^h and P_e^e average costs of electrical energy provided by the grid during the different seasons (p_e^h in winter, p_e^e in summer) in c/kWe h.
- average cost of heat energy supplied by conventional LP boiler: p_c in C/kW cal^h ($p_c = 2,5 \text{ c/kW cal}^h$).

The technical assumptions are as follows.

- the heat demand is met by steam at 200°C,
- the temperature of the steam at the input of the counterpressure turbine is identical whatever the high-pressure heat generating system,
- the net efficiency of the counterpressure turbine is n_{cp}
- the net efficiency of the condensation turbine is n_{cd} .
- the various heat losses are ignored.

The numerical data are as follows.

TABLE III.

T _{el} : electricity generating capacity	P _{cal} : heat generating capacity	N _{cp} counter - pressure turbine efficiency	N _{cd} condens- ation turbine efficiency	Cost of electric ower		
				mean	summer	winter
100 MWe	255 MWcal	15%	18%	5 c/kWh	3 c/kWh	7 c/kWh

III - Results.

The table below lists the annual expenses corresponding to the different policies.

TABLE IV.

Technical options Strategies	T_h	N_1	N_2	Remarks
Strategy A	$79,6 \cdot 10^6 \text{ F}$	$79,6 \cdot 10^6 \text{ F}$	$79,6 \text{ F}$	Purchase of 100 MWe and 225 MW cal
Strategy B	$83,8 \cdot 10^6 \text{ F}$	$81,2 \cdot 10^6 \text{ F}$	$79,6 \cdot 10^6 \text{ F}$	Purchase of 255 MW cal
Strategy C	$58,5 \cdot 10^6 \text{ F}$	$55,9 \cdot 10^6 \text{ F}$	$54,2 \cdot 10^6 \text{ F}$	Purchase of 55 MWe
Strategy D	$60,4 \cdot 10^6 \text{ F}$	$47,2 \cdot 10^6 \text{ F}$	$50,4 \cdot 10^6 \text{ F}$	
Strategy E	$58,5 \cdot 10^6 \text{ F}$	$51,6 \cdot 10^6 \text{ F}$	$52,3 \cdot 10^6 \text{ F}$	Purchase of 55 MWe during 3,500 h in summer

This table shows up the following main points :

- there is a different optimal strategy for each high-pressure steam - generation system.

strategy C or E for a conventional high-pressure boiler,

strategy D for a nuclear reactor of type N_1 , or N_2 .

- amongst these optimal strategies there is one policy preferable to the others, i. e. leading to a minimum overall annual expenditure. In our case the solution lies in using a nuclear reactor type N_1 as high-pressure heater and following strategy D (simultaneously supplying electricity and heat demands without using of conventional low-pressure boilers or having recourse to the national grid.

- it will be noted that the optimum nuclear policy (D- N_1) has considerable advantages over the optimum conventional policy (C- T_h), while for electricity generation alone (strategy B), the difference between nuclear and conventional methods is negligible.

IV - Remarks.

- On the basis of the data collected, the various systems of high-pressure steam generation as a function of installed thermal capacity are to be put into the following order.

TABLE V.

Q MW_{th}	$0 < Q < 100$	$100 < Q < 240$	$240 < Q < 385$	$Q > 385$
Order of preference	T_h	N_2	N_2	N_1
	N_2	T_h	N_1	N_2
	N_1	N_1	T_h	T_h

The strategies considered, which require a different installed thermal capacity, are liable to lead to a change in the order established. Thus, in the example studied :

$$N_2 - N_1 - T_h \text{ with strategies B and C } (Q_D = 485 MW_{th})$$

$$N_1 - N_2 - T_h \text{ with strategy D } (Q_D = 485 MW_{th})$$

- Strategy C (use of a counterpressure turbine meeting the demand for heat and at the same time part of the electricity demand) offers an appreciable economy as compared to strategy A, whatever the type of high-pressure boiler used

TABLE VI.

	T_h	N_1	N_2
Economy, in % of overall expenses of strategy A.	26,5%	30%	32%

Generally speaking, strategy C is better than A, if the following inequality is observed :

$$(a I + g) Q = Q_c + Ch Q_c < P_{cal} h (P_c + P_e \frac{M_{cp}}{1 - M_{cp}})$$

that is, if the annual expenditure connected with the installation of a dual-purpose heat and electricity - generating station, of Q_c thermal capacity, is lower than the accrued annual expenses involved in the generation of heat by conventional low-pressure boiler and the purchase of part of the electricity from the grid (the fraction corresponding to the electrical energy provided by the counterpressure turbine).

- The use of strategy D, by increasing the installed thermal capacity of the high-pressure boiler and by dividing the steam from the counterpressure turbine between the heat network and a condensation turbine, enables the purchase of part of the electricity from the grid strategy C to be avoided. This changes the overall result as the marginal costs of the different equipments do not vary in the same way as a function of the installed thermal capacity.

TABLE VII.

Saving or loss resulting from a change from strategy C to strategy D, in % of annual expenses of strategy C.	T_h	N_1	N_2
		- 3,2%	+ 15,5%

- It is shown, in general instances and with the assumptions employed, that strategy D is better than strategy E if the following inequality is true (C fuel cost) :

$$C < p_e^e (\eta_{cp} + \eta_{cd} - \eta_{cp} \eta_{cd})$$

or :

$$C < 0,9 c/kW_{th} h (1)$$

For a nuclear reactor (type N_1 , or N_2) strategy D is better than strategy E, in other the low marginal production cost (fuel cost) competes favourably with a low electricity generating cost.

For a conventional boiler, strategy E is better than strategy D (high marginal production cost). However, since in this case C is better than D it is necessary to compare C with E³⁾.

3) It can be shown that strategy C is better than strategy E if :

$$p_e - \frac{p_e^e}{2} < \frac{(a I + g) \text{ between } Q_c \text{ and } Q_d}{h (\eta_{el} - \eta_{cp} Q_c)} + \frac{c}{2 (\eta_{cp} + \eta_{cd} - \eta_{cp} \eta_{cd})}$$

$$p_e - p_e^e / 2 < 1,5 + 2 < 3,5 c/kWe^h$$

with $p_e = 5$ centimes and $p_e^e = 3$ centimes this formula becomes an equation, which implies that strategies C and E are equivalent in the case of a conventional boiler.

V - Sensitivity of the results to a variation in demand.

Still with the idea of illustration notions with definite examples we show in figures 4 and 5, for each of the technical options, the curves corresponding to the optimal policies for two sets of assumptions concerning the demand :

- constant heat demand and increasing electricity demand (figure 4).
- heat and electricity demand increasing at the same rate (figure 5).

These results can of course be considerably upset by the basic assumptions. We notice however the relative ^{differences} between the optimal strategies corresponding to the three systems of high-pressure steam generation, and the difference in profitability of the nuclear system according to whether production of heat and electricity together, or of electricity alone is considered. In addition, the two types of nuclear system considered lead to different minimal annual expenses according to the size of the demand to be filled.

VI - Obsolescence.

We propose, for an industry having the following heat and electrical energy needs.

- past needs : 102 MW_{cal} (met by low-pressure boilers)
40 MW_e (met by an external grid)
- incremental needs : 153 MW_{cal}
60 MW_{el}

to find out which of the two following policies leads to lower annual expenditures :

- policy P₁ : retaining the low-pressure boilers and outside purchase of electricity to meet past needs,
installing new equipment to meet the new demand ;
- policy P₂ : Installing new equipment to satisfy all needs past and future.

The results are shown in the following table :

TABLE VIII

	Policy P ₁	Policy P ₂
Overall expenditure	65.9.10 ⁶ F	47.2.10 ⁶ F

With the values adopted, policy P_2 leads to a better economy than policy P_1 (40 % gain on annual expenditure).

The search for an optimal economic policy in answering a given demand must take into account not only future growth of demand but also the extent of post-demand.

The possible obsolescence of conventional low-pressure boilers leads to an increase in the new demand to be filled and therefore, according to the results obtained, modifies the nature (strategy and system of high-pressure steam generation) of the optimal policy. Given the numerical data of this study, the increased demand for electrical and heat energy leads us to prefer a high-pressure installation, the marginal cost of which is more sensitive to a variation in installed thermal capacity and thus a nuclear reactor of type N_1 (low fuel cost, decrease in the specific capital cost as a function of the installed thermal capacity).

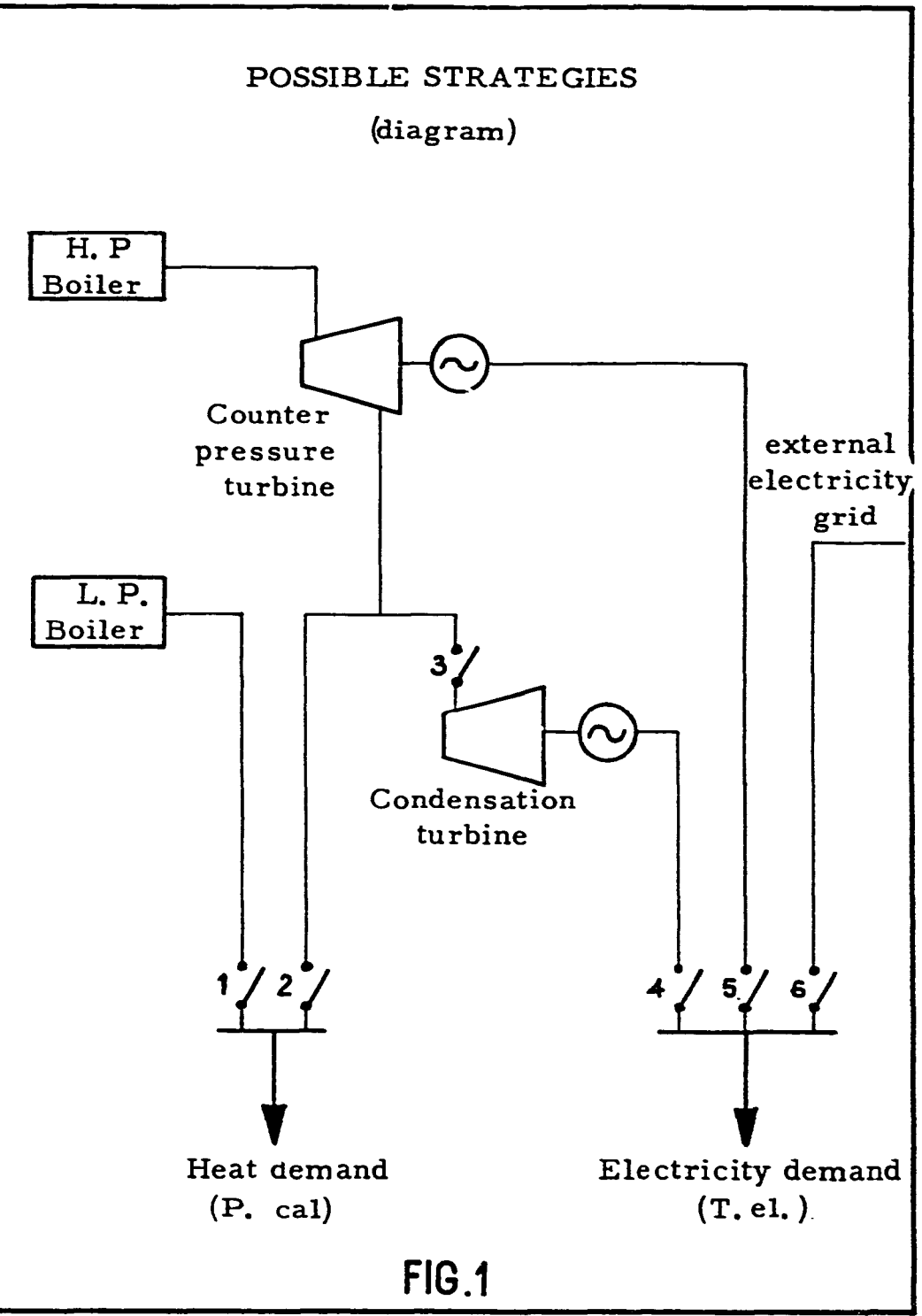
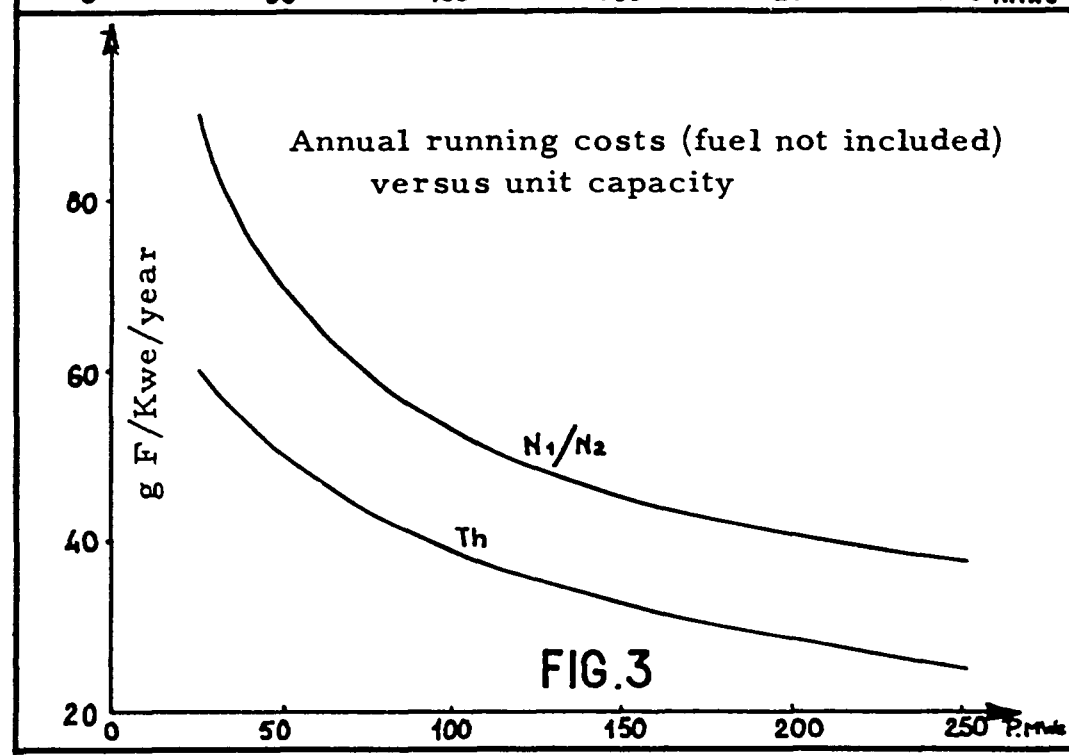
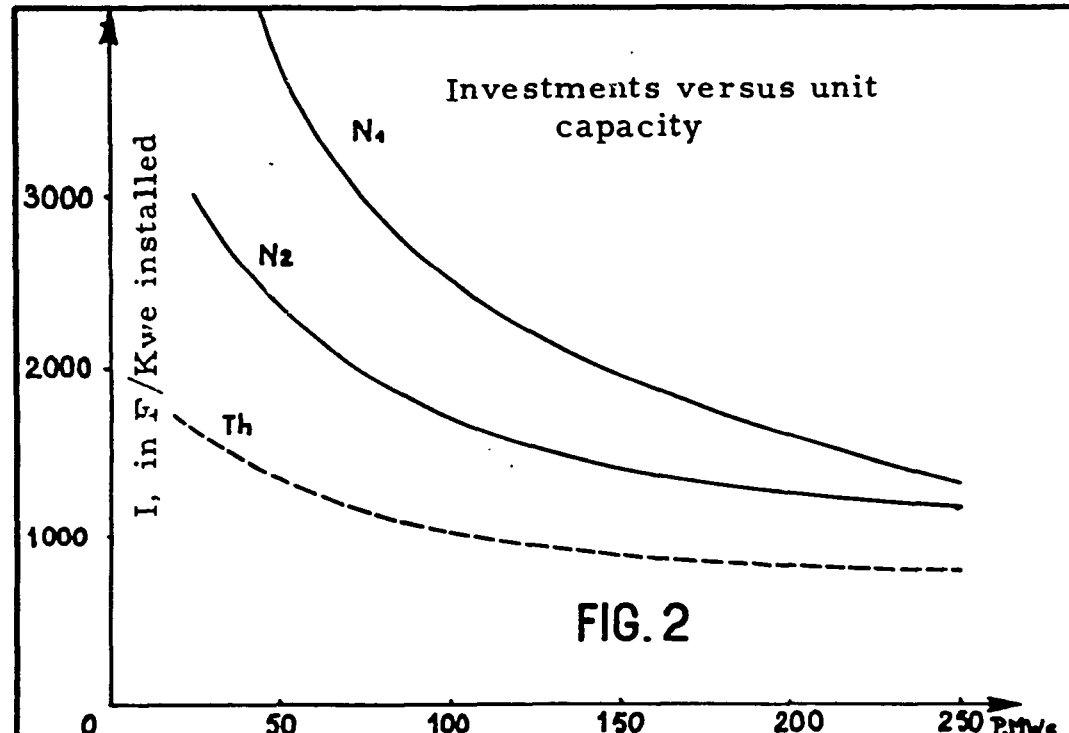
6° - CONCLUSIONS.

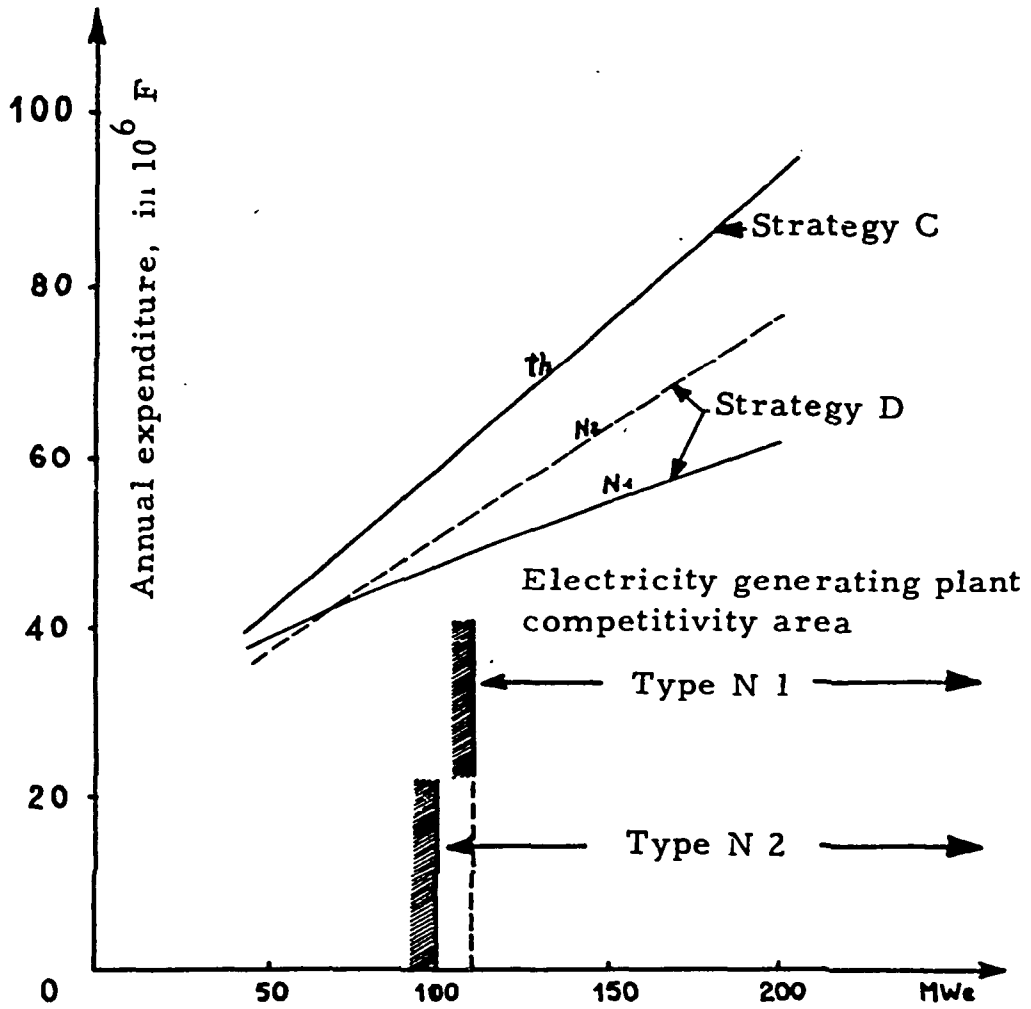
We have attempted to show that for medium-power reactors the combined generation of heat and electricity is a better use of nuclear energy than the production of electrical energy alone, and that the reactors best adapted to this production alone are not necessarily the best when used for dual purposes.

Unlike the electricity market, for which the conditions of competition and development are well defined, the market for heat or combined heat and electricity generation is developing. Ever larger units will be called for and it has been seen to what extent the characteristics of demand can influence the choice to be made (strategies and high-pressure steam generation systems). There is no doubt that research and development studies will be necessary to adapt reactors already tested for electricity generation to these new uses, and even more that reactors still in the experimental stage will have to be developed and completed on this basis.

In addition, in the case of desalination the processes of ^{demineralisation} associated with the production of energy are at the height of development.

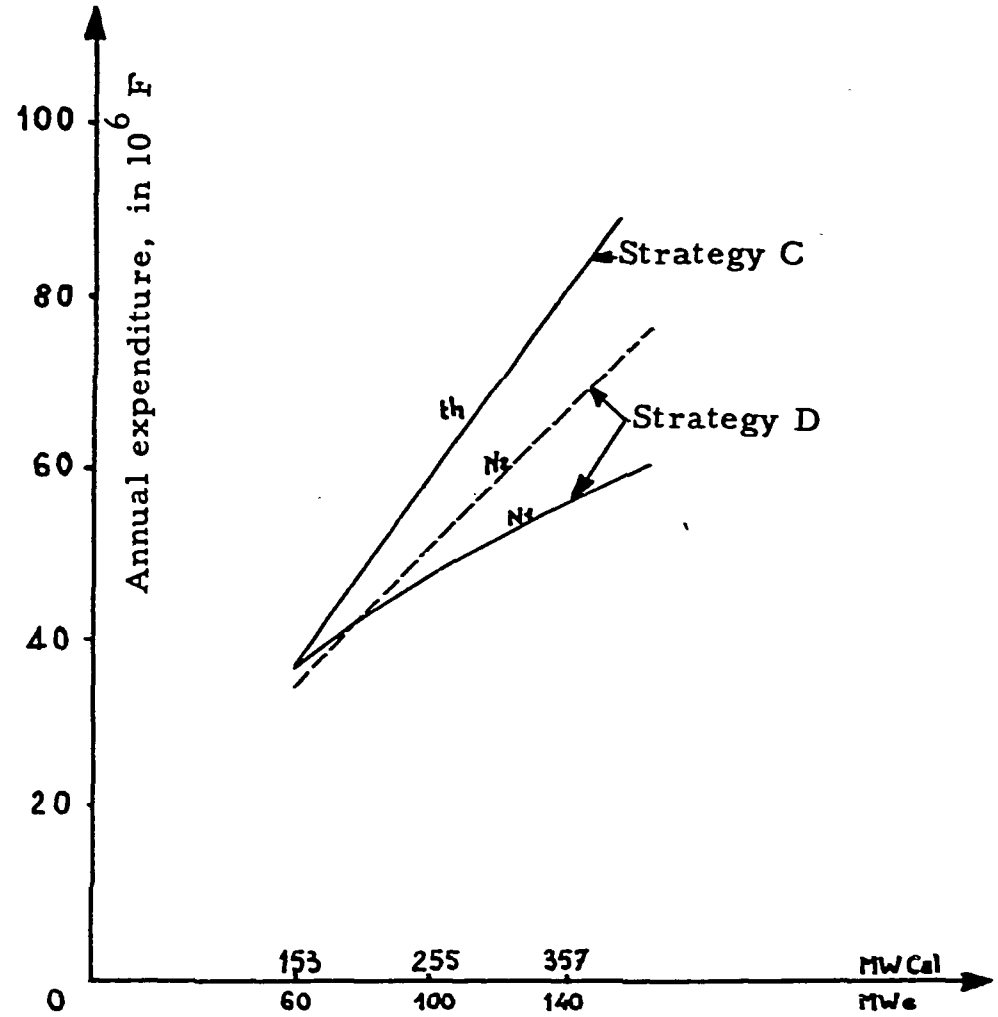
We can therefore take advantage of this time-lag to make a permanent comparison of supply and demand leading to a real market. We have attempted to show that this comparison is not a simple one and that it is important to make use of a tried method in order to avoid errors of orientation and economic losses.





Minimum expenditure for the three HP steam generating systems versus electricity demand (constant heat demand)

FIG. 4



Minimum expenditure for the three HP steam generating systems versus heat and electricity demands, their ratio remaining constant.

FIG. 5

FIN