

Aspects économiques de la propulsion nucléaire civile

par

S. RUEL

Ministère de l'Economie et des Finances, France

INTRODUCTION

Au cours du XIX^{ème} siècle, la machine à vapeur s'est développée et a progressivement supplanté la voile, s'imposant en premier lieu aux bâtiments de commerce, car les Marines Militaires l'estimaient trop dangereuse sur les navires de guerre de l'époque, construits en bois lors de son apparition.

Le XX^{ème} siècle a vu les hydrocarbures supplanter le charbon, la turbine éliminer la machine alternative, tandis que le moteur diesel, plus économe en combustible que l'ensemble chaudière-turbine, s'imposait pour les puissances faibles et moyennes.

L'apparition de l'énergie nucléaire dans la propulsion navale date de la mise en service, en septembre 1954, du sous-marin „Nautilus”.

Depuis, une certitude est acquise, celle de la faisabilité technique et de la fiabilité dont font foi plus de deux cents bâtiments militaires, qui à quelques exceptions près sont des sous-marins équipés d'un seul réacteur du type PWR, ils totalisent depuis 1954 plus de mille années/ réacteurs de fonctionnement sans incident grave lié au caractère nucléaire de la propulsion.

La première mise en oeuvre de cette nouvelle technologie dans le secteur non militaire ne tarda pas puisque, dès 1956, l'U.R.S.S. mettait en chantier le „Lénine”, brise-glace de 44 000 ch. auquel la propulsion nucléaire donnait une autonomie illimitée à l'échelle de l'hiver, ce qui lui conférait une efficacité compensant largement le surcroît d'investissement. Deux autres ont été mis en service: „L'Artika” et le „Sibir”, ce dernier le 23 février 1976. Trois autres réalisations civiles ont vu le jour. Il s'agit de petits navires expérimentaux de faible puissance: la „Savannah”, américain, de 22 000 ch mis sur cale en 1958; l'„Otto-Hahn”, allemand, de 10 000 ch., mis sur cale en 1963, et le „Mutsu”, japonais, de 10 000 ch., mis sur cale en 1968. Ces bâtiments sans prétention à la rentabilité sont l'équivalent du Prototype à Terre (P.a.t) que la Marine Nationale mit en place à Cadarache aux débuts du programme militaire français.

En permanence à l'ordre du jour depuis 1954, le développement de la propulsion nucléaire reste au point mort en ce qui concerne les flottes marchandes malgré son brillant succès dans le domaine des marines nationales.

Pourquoi ce retard?

Indépendamment des réticences à caractère psychologiques qui s'expriment devant la perspective d'une application de l'énergie nucléaire quelle qu'elle soit, les raisons en sont de deux ordres: En premier lieu, un accord mondial sur les aspects réglementaires et juridiques constitue un préalable obligé à toute exploitation commerciale régulière, tant en ce qui concerne les règlements de sûreté et les modalités d'autorisation d'accès dans les ports, que les limitations de responsabilité, notamment le seuil au-delà duquel l'Etat du pavillon couvre la responsabilité des opérateurs; La valeur de ce

seuil est un paramètre important du prix des assurances.

C'est sur ces aspects réglementaires et juridiques que se déploie actuellement la plus grande activité internationale; si un consensus général n'a pas encore été atteint, on peut raisonnablement escompter que le développement de la propulsion nucléaire, s'il en a souffert, n'en soit pas bloqué à terme dans la mesure où l'acceptation du fait nucléaire n'aura pas regressé dans l'opinion publique.

La seconde résidait dans la faiblesse du prix du pétrole; on sait que les transports maritimes consomment 7% de la production mondiale de pétrole. Aussi l'intérêt général s'est-il vivement animé, donnant naissance à de nombreux projets, devant les hausses de fin 1973 qui laissaient entrevoir un regain de compétitivité économique tout en épargnant les hydrocarbures.

Une conférence tenue à New York a fait le point en juin 1975. On peut en retenir pour l'essentiel:

- une rechute de l'enthousiasme suscité l'année précédente par la hausse du prix du pétrole,
- un consensus général sur la certitude, à long terme, du développement de la propulsion nucléaire sur certains types de navires,
- une certaine dispersion des estimations des valeurs des paramètres gouvernant la rentabilité de la propulsion nucléaire.

Depuis ce sursaut d'intérêt, en effet, l'évolution de la conjoncture dans le transport maritime, tout particulièrement pétrolier, et dans la construction navale vers une situation de crise aigue a calmé les esprits: malgré l'aspect positif de l'expérience des marines militaires et des brise-glace soviétiques, aucune réalisation n'est en cours. Seuls existent des programmes d'études, ou des projets sur lesquels aucune décision ne paraît encore avoir été prise, abstraction faite d'un projet canadien de brise glace qui a fait l'objet d'appels d'offre.

Les perspectives actuelles de développement de la propulsion nucléaire civile sont donc dépendantes de l'évolution de la construction navale et du marché de fret, et dans l'hypothèse où cette évolution serait satisfaisante, de sa rentabilité économique qui dépend des coûts et performances comparées des propulsions classique et nucléaire, en fonction notamment de l'évolution prévisible des prix de l'énergie.

C'est le sujet de la présente communication, consacrée aux aspects économiques du développement de la propulsion nucléaire.

GÉNÉRALITÉS

L'aspect économique que nous abordons maintenant est primordial puisque la rentabilité est une condition nécessaire à la substitution de la propulsion nucléaire à la propulsion classique. Cette rentabilité est gouvernée par de nombreux paramètres dont les principaux sont le prix des soutes, le prix du cycle du combustible fissile et le

supplément d'investissement propre à la propulsion nucléaire.¹

Nous examinerons ces paramètres en premier.

Ensuite, notre démarche sera la suivante:

— Considérant des navires aux caractéristiques identiques (puissance et vitesse notamment), nous examinerons à partir de quel niveau de puissance, compte tenu du coefficient de charge de l'appareil propulsif, l'économie réalisée sur les combustibles permet d'amortir le supplément d'investissement dû à la propulsion nucléaire.

— Considérant le système de transport constitué par le bâtiment, compte tenu de la ligne et des conditions d'exploitation, nous chercherons à minimiser le prix de revient de l'unité de charge transportée en faisant varier la vitesse de croisière, et donc la puissance, pour deux types de navires: un pétrolier de 550 000 tonnes de port en lourd, sur le trajet Golfe Persique - Le Havre (calcul du prix de revient à la tonne transportée (Prtt); un méthanier de 130 000 m³ sur différents trajets (calcul du prix de revient de la thermie transportée). Nous n'aborderons pas ici le cas du navire porte-conteneurs, dans lequel interviennent des considérations commerciales difficiles à quantifier, mais qui paraissent constituer en réalité le domaine d'élection de l'apparition de la propulsion nucléaire.

— Nous examinerons enfin quelles économies d'hydrocarbures seraient permises par le développement de la propulsion nucléaire, critère susceptible de présenter de l'intérêt pour le décideur.

Dans cette étude économique, les hypothèses économiques de base, en particulier sur les suppléments d'investissement, sont assez floues. Aussi l'intérêt réside-t-il essentiellement dans les ordres de grandeur, les classements, les sensibilités aux hypothèses, plutôt que dans les valeurs brutes des résultats.

LE PRIX DES SOUTES

Dans la gamme des puissances pour lesquelles nous verrons ci-dessous que la substitution de l'énergie nucléaire est rentable, ou du moins neutre sur le plan économique, les appareils propulsifs sont à vapeur, et consomment 220 grammes de fuel lourd parcheval-heure. L'évolution du prix des soutes est donc liée à celle du prix du pétrole brut et de la décote du fuel lourd par rapport au pétrole brut.

Le prix du pétrole brut

Indépendamment de toute réflexion politique, on peut s'interroger d'abord sur le sens du niveau actuel du prix du pétrole. Une étude récente², appuyée sur un modèle simple d'allocation des ressources, justifie l'existence d'une rente pétrolière: la minimisation du coût actualisé d'extraction implique d'épuiser les gisements dans l'ordre des coûts d'exploitation croissants tandis que le prix du pétrole doit différer du coût d'extraction d'une certaine quantité, de façon à expliciter l'anticipation de la croissance future du coût de production et à faire apparaître la nécessité d'éviter le gaspillage d'une ressource à coût croissant.

Un calcul simple, basé sur le coût d'extraction quasi nul des pétroles arabes, conduit à estimer la rente des producteurs à environ 3 dollars par baril, nettement inférieure à la rente existante, de l'ordre de la dizaine de dollars. Très théorique, cette approche ne permet pas de dégager un concept de prix optimal, car le prix réel résulte d'un jeu complexe.

Or son évolution à moyen terme constitue un élément important d'appréciation pour les décideurs qui envisagent des investissements destinés à développer de nouvelles ressources énergétiques ou à pro mouvoir des techniques génératrices d'économies. Ils calculent en effet la rentabilité de ces derniers en se fixant un prix

directeur de l'énergie qui est le reflet de l'idée qu'ils se font de l'évolution du prix du pétrole au cours de la durée de vie de leur investissement.

De nombreux scénarios d'évolution peuvent certes être imaginés:

— La forte rigidité de la demande des pays développés donne une marge de manoeuvre importante à l'OPEP; son volume d'exportations semble devoir conserver un rythme élevé.

— La croissance de la part des importations des USA, que vise à réduire le recent plan Carter, est un élément de tension sur les prix;

— A l'inverse, les degrés de liberté réels ou supposés dont ils disposent sont des éléments de détente susceptibles d'entamer la stabilité de la position de l'OPEP.

— La persistance de l'état déprimé des économies des pays développés crée une situation relativement fragile à court terme, de nature à inciter les pays de l'OPEP à mener une politique de prix modérée, notamment sous la pression de l'Arabie Saoudite, ainsi qu'il en est aujourd'hui.

Dans l'ensemble, l'hypothèse sur laquelle s'accordent les observateurs est celle d'un maintien jusque vers 1985 à un niveau relativement élevé, quoique peut-être inférieur à celui atteint en 1974, compris à l'intérieur d'une fourchette de onze à quatorze dollars le baril (valeur 1977).

A plus long terme, une évolution haussière apparaît comme justifiée:

— Les coûts d'extraction du pétrole iront croissants;

— La mise en oeuvre des énergies alternatives se révèle aujourd'hui moins aisée et plus coûteuse qu'on ne l'avait prévu il y a deux ou trois ans;

— Le prix actuel est insuffisant à assurer la rentabilité des énergies de substitution ou des techniques d'économies relativement capitalistiques, ainsi qu'à inciter les agents économiques à contenir leur consommation d'hydrocarbures en deça des capacités de production aujourd'hui prévisibles d'ici à quelques années.

Si l'on tient compte en outre du risque politique, la probabilité de fortes tensions sur les prix, dans la ligne de la revendication déjà exprimée par Sarkis d'un niveau de 20 dollars le baril - contre 13 actuellement -, apparaît donc comme élevée.

Le prix du fuel lourd

Le prix du fuel lourd bénéficie d'une décote par rapport à celui du pétrole brut. La valeur de cette décote est variable selon l'adéquation de la structure de la demande de produits pétroliers à celle du raffinage et de considérations commerciales.

La valeur actuelle de l'ordre de 150 F/T de la décote du fuel lourd sur le marché français paraît liée à des raisons commerciales et conjoncturelles.

Néanmoins, le maintien de la décote à un niveau notable, quoique inférieur, peut être justifié par l'évolution de la structure de la demande dans laquelle, au moins dans les pays industrialisés, et tout particulièrement en France, la part des produits blancs croît.

En France notamment, l'accélération du programme nucléaire justifiera prochainement la conversion de quantités notables de fuel lourd, et une décote notable.

On est donc conduit à retenir plusieurs valeurs possibles de la décote, en fonction du marché local.

Les diverses combinaisons possibles encadrent une plage moyenne de 300 à 350 F/Tonne qui constituera l'hypothèse centrale de prix des soutes dans notre étude.

LE PRIX DU COMBUSTIBLE FISSILE

L'ensemble des opérations d'extraction et de mise en oeuvre de l'uranium avant irradiation, de retraitement

après, constitue le „cycle combustible”, dont l'annexe O décrit et évalue les principales opérations.

Le coût du cheval-heure s'établit dans une fourchette de 2,0 à 2,8 centimes; les hypothèses de base étant les suivantes:

Uranium: 200 à 250 F/Kg.;

UTS: 350 à 410 F/Kg.;

Fabrication: 1000 à 1500 F/Kg.;

Retraitement: 600 à 800 F/Kg.;

Plutonium: 40 à 50 F/g;

Taux d'irradiation: 30 000 MWj/t;

Outre ces facteurs, la taille du coeur, la durée et le taux d'irradiation, la fréquence et les modalités des renouvellements, constituent à puissance donnée des paramètres plus ou moins influents du coût du cycle qui ont un effet sur la fréquence optimale des rechargements, de l'ordre de un à quatre ans, tandis que sur les bâtiments militaires, les contraintes opérationnelles conduisent à une durée du cycle du combustible de l'ordre de 10 à 15 ans qui n'est pas économiquement optimale. Les résultats obtenus sont compris dans une fourchette de l'ordre de 2,0 à 2,8 c/ch.h., sans que les calculs qui précèdent reposent sur des hypothèses parfaitement fermes.

En effet, les valeurs numériques restent sujettes à caution. Ainsi, de même que le pétrole, l'uranium est une ressource naturelle, à coût d'extraction croissant, dont il existe des millions de tonnes disponibles à moins de 200 francs le kilo, mais dont les réserves, à l'inverse du pétrole, sont dispersées à travers le monde. Si la constitution d'un cartel de producteurs apparaît improbable, l'évolution de la situation pétrolière a permis la prise de rentes, puisque le prix de la livre d'oxyde U_3O_8 est rapidement passé, pour des contrats à long terme d'à peine 15 à une trentaine de dollars.

Il semble donc que le prix de l'uranium doive évoluer de façon semblable à celui du pétrole, quelques pointes près sur le marché spot; le fait que des réserves importantes soient détenues par des pays développés en voie de disposer d'équipements nucléaires notables constitue a priori un élément de modération.

Le service d'enrichissement de l'uranium tend également à la hausse: cotée en 1975 à 350 francs, l'UTS est évaluée à 450 vers 1985.

Un élément incertain est le coût du retraitement, dont l'évaluation croît continuellement; son impact est à vrai dire mineur puisque viennent en déduction les crédits corrélatifs d'enrichissement et de plutonium; il est d'autant plus incertain que l'on n'est pas sûr qu'existent dans l'avenir des capacités de retraitement suffisantes. Peut-être donc ne sera-t-il pas réalisé.

Les coûts de fabrication du combustible, enfin, peuvent varier dans des fourchettes relativement larges et constituer l'élément essentiel d'incertitude dans une comparaison, tous prix précédents égaux, du coût du cheval-heure de propulsion nucléaire avec celui du Kwh produit par les centrales qu'E.D.F. construit actuellement, seule référence disponible à ce jour. En effet, bien que constitué d'oxyde d'uranium enrichi à un taux comparable ou légèrement supérieur à celui du combustible des centrales électrogènes, le combustible de propulsion navale civile ferait l'objet d'une fabrication particulière, en relativement petites séries, qu'il s'agisse d'éléments à crayons, adaptés du combustible des centrales terrestres, ou à plaques, dérivés de celui des sous-marins préconisé en France par Technicatome pour des raisons tenant essentiellement à l'accroissement de la sûreté de fonctionnement. De plus, les perspectives d'évolution du marché sont mal prévisibles. On pourrait s'attendre que sur un marché stabilisé, la différence de prix reste au moins de 30%.

SUPPLEMENT D'INVESTISSEMENT PROPRE A LA PROPULSION NUCLEAIRE

L'évaluation du supplément d'investissement propre à la propulsion nucléaire est délicate actuellement, car il n'existe pas de réalisation récente de référence. Ce supplément résulte de plusieurs éléments, tels que la substitution de la chaufferie nucléaire à la chaufferie classique, les renforcements de structure au droit de la chaufferie, les modifications éventuelles liées à des règlements de sécurité, les modifications de formes dues à l'augmentation éventuelle de la vitesse et, en sens inverse, la suppression des soutes à mazout, etc.

Ne pouvant faire une étude précise, nous signalerons que des évaluations approchées ont été tentées par divers auteurs; ceux-ci ont observé dans les centrales terrestres une élasticité du coût à la puissance de l'ordre de 0,45. Le supplément d'investissement correspondant à l'installation d'un appareil propulsif nucléaire est peu différent du coût propre de ce dernier.

On peut donc considérer comme vraisemblable l'évaluation suivante proposée par une étude relativement récente donnant une élasticité de 0,5, et aboutissant à la formule:

$\Delta = 0,3 P^{1/2}$ en millions de francs 1972, intérêts intercalaires compris, dans laquelle Δ représente le surcoût d'investissement, et P la puissance de l'appareil propulsif.

Une estimation française plus récente prise comme hypothèse de travail dans une étude non publiée, atteignait 120 MF 74 pour 80 000/100 000 ch.

Sans doute les études américaines citées au cours de la conférence de New York font-elles état de montants supérieurs: 60 M\$ par exemple pour un méthancier de 120 000 ch. par rapport au navire conventionnel de 105 000 ch., dont 34,5 M\$ pour le générateur de vapeur; mais on doit rappeler que les évaluations américaines des coûts des centrales terrestres sont souvent de l'ordre du double de celles d'E.D.F.; car elles incluent le prix de la première charge et sont exprimées en dollars courants, alors que les évaluations françaises, exprimées en monnaie constante, excluent la première charge.

Dans l'intervalle 60 000/150 000 ch., et dans le cas d'une fabrication en série par l'industrie française, première charge exclue, il nous est apparu raisonnable de tabler comme hypothèse de calcul sur

$\Delta = 0,5 \sqrt{P}$ MF

Dans ces conditions, le surcoût annuel par cheval peut être évalué à $\frac{77\ 000}{\sqrt{P}}$ F avec un amortissement à 10% sur quinze ans et un coût d'assurance de 2,3% (valeur moyenne). La figure 1 donne l'allure de la courbe représentative de ce surcoût par cheval.

PREMIERE APPROCHE DE LA COMPETITIVITE DE LA PROPULSION NUCLEAIRE

En fonctionnement continu, un appareil propulsif marin à vapeur consomme environ 220 g de fuel lourd par cheval.heure, soit près de 2 tonnes/an/cheval.

Si les coûts de combustible sont désignés par:

— π francs la tonne de fuel lourd

— γ francs le cheval.heure nucléaire et si λ est le coefficient d'utilisation annuelle de l'appareil propulsif, l'économie annuelle par cheval de puissance installée résultant de la substitution du combustible nucléaire au fuel lourd est égale à $8\ 760 \lambda [0,220\ 10^{-3} \pi - \gamma]$

Une variation de 50 F du prix de la tonne de fuel lourd équivaut à une variation de 1,1 cF du coût du combustible nucléaire. La figure 2 présente de façon graphique cette économie annuelle par cheval en fonction de λ pour $\gamma = 2,2$ cF/ch.h. et pour π variant par 50 F de 150 F à 400 F/tonne.

Economie annuelle par cv de puissance installée

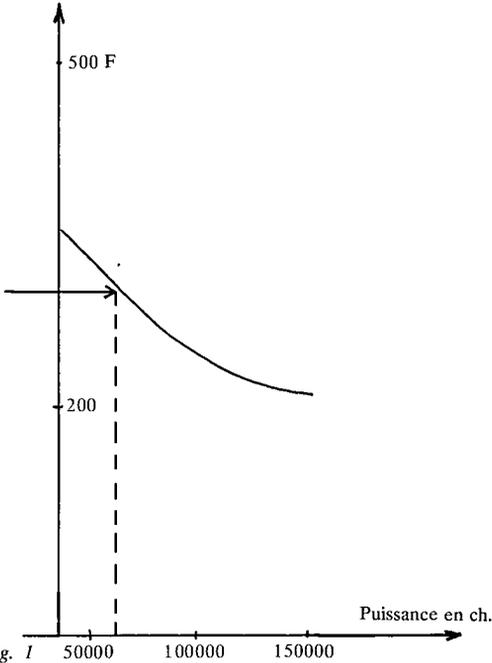


Fig. 1 50000 100000 150000

Surcoût annuel d'amortissement et d'assurance par cheval dû à la propulsion nucléaire:

- Amortissement: 10% sur 15 ans
- Assurance: 2,3% par an

A partir des figures 1 et 2, on peut construire les courbes d'indifférence de la figure 3, qui pour un couple de valeurs du prix des soutes et du coût du cycle du combustible, donne en fonction du coefficient d'utilisation de la puissance propulsive le seuil de puissance pour lequel l'économie résultant de la substitution du combustible nucléaire au combustible fossile suffit à l'amortissement du surinvestissement lié à la propulsion nucléaire.

La figure 3 peut se lire de deux façons: à prix constant du combustible nucléaire (2,2 cF/ch.h) et prix des soutes variable de 250 à 400 F/T; à prix constant des soutes (350 F/T) et prix du combustible nucléaire variable de 1,1 à 4,4 c/ch.h. D'après cette figure, la compétitivité de l'énergie nucléaire apparaîtrait par exemple pour une utilisation annuelle supérieure à 62% d'une puissance de 70 000 ch lorsque les prix de l'énergie sont 350 F/T de fuel lourd et 2,2 c/ch.h nucléaire.

Pour ces niveaux de prix, une puissance de 100 000 ch est rentable à partir de 52% d'utilisation, mais une puissance de 50 000 ch à partir de 72% seulement. Une baisse du prix du fuel lourd de 50 F/T déplace ces seuils à 77% pour 70 000 ch, 64% pour 100 000 ch, mais 95% pour 50 000 ch; une hausse du combustible nucléaire de 1,1 cF pour 350 F/T a le même effet.

La compétitivité de la propulsion nucléaire apparaît ici plus sensible aux variations en valeur relative du prix du fuel lourd que du combustible nucléaire, mais plus encore à celle du coefficient de charge.

En prenant un coefficient de charge de 66%, un prix des soutes de 300 F et un prix de combustible de 3,3 cF/ch.h, la compétitivité de la propulsion nucléaire apparaîtrait au niveau de 90.000 ch.

Si les hypothèses précédentes ne sont pas optimistes, on peut cependant retenir cette valeur comme ordre de grandeur raisonnable de la puissance de base du navire nucléaire.

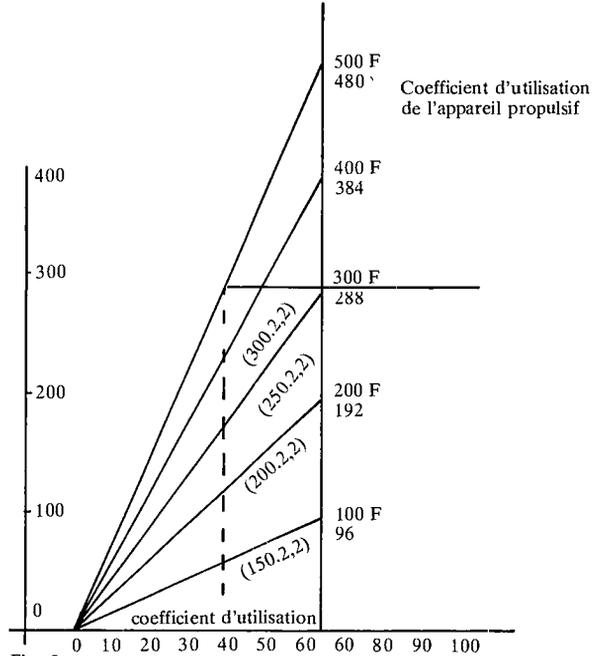


Fig. 2

Economie annuelle résultant de la substitution de combustible nucléaire au fuel lourd par cheval de puissance installée pour différents couples de valeurs:

- prix du fuel en francs/tonne;
- prix du combustible nucléaire en centimes/ch.ch

On peut utiliser l'ensemble des figures 1 et 2 en abaque pour estimer la compétitivité de la propulsion nucléaire en fonction des divers paramètres. (figure 3)

Labaque se lit:

- en A: à prix constant du combustible finile (2,2c/ch.h) et prix des soutes variable (250 à 400 F/T)
- en B: à prix constant des soutes (350 F/T) et prix du combustible fissile variable: (1,1 à 4,4 c/ch.h)

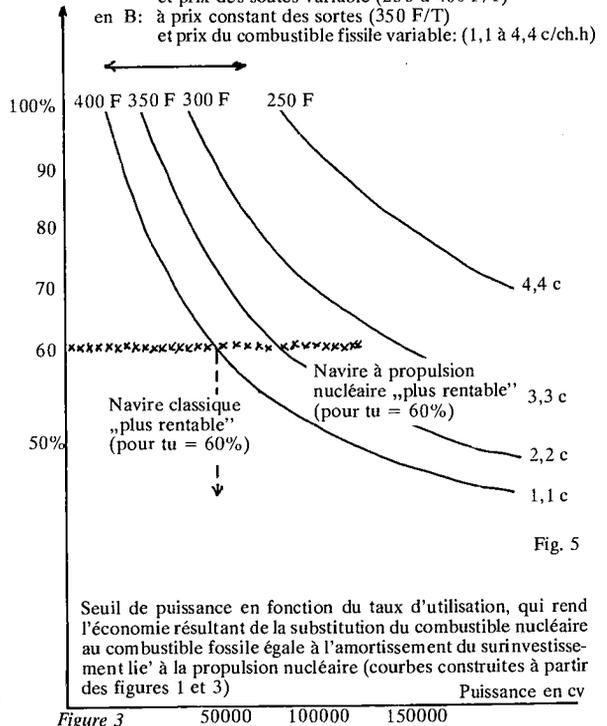


Fig. 5

Seuil de puissance en fonction du taux d'utilisation, qui rend l'économie résultant de la substitution du combustible nucléaire au combustible fossile égale à l'amortissement du surinvestissement lié à la propulsion nucléaire (courbes construites à partir des figures 1 et 2)

Figure 3

COMPARAISON DES COÛTS À L'UNITÉ DE CHARGE TRANSPORTÉE

Quoique relativement sommaire, le raisonnement précédent a le mérite d'illustrer simplement les conditions de compétitivité économique de la propulsion nucléaire en fonction de quatre paramètres essentiels: le surcoût de la propulsion nucléaire, les prix des combustibles fossile et fissile, le coefficient de charge de l'appareil propulsif; il nous a permis d'obtenir une évaluation de la puissance raisonnable d'un navire nucléaire, soit 90 000 ch.

Une approche plus globale, qui se prête à une étude de sensibilité, consiste à considérer l'économie globale du système de transport et à rechercher la minimisation du prix de revient à l'unité de fret transportée, tonne de pétrole ou thermie de gaz (Prtt), compte tenu des paramètres économiques et de la vitesse de croisière du bâtiment, le navire étant optimisé en fonction de cette dernière. Le lecteur trouvera en annexe les grandes lignes du calcul de Prtt pour un pétrolier de 550 000 tonnes de port en lourd sur le trajet Le Havre-Golfe Persique (11 200 milles nautiques) et les résultats obtenus pour un transporteur de gaz naturel liquéfié (méthanier) de 130 000 m³ sur différents trajets.

Dans le cas du pétrolier, la figure 4 illustre les résultats sous la forme de courbes représentant les variations de l'indice du Prtt en fonction de la vitesse dans les deux hypothèses: propulsion classique et propulsion nucléaire, pour deux valeurs du prix du combustible dans chaque hypothèse. Le caractère très plat de l'optimum du Prtt du bâtiment à propulsion nucléaire, situé entre 20 et 25 noeuds, ne justifie pas d'envisager de relever la vitesse au-delà des 19 à 20 noeuds qui paraissent constituer la limite technologique imposée à moyen terme par les hélices pour des bâtiments de cette taille à deux lignes d'arbres à rotation lente. On observe que le Prtt, pris égal à 100 pour le bâtiment conventionnel navigant à 16 noeuds (1) s'abaisse vers 92 à 98 pour le bâtiment à propulsion nucléaire navigant entre 19 et 20 noeuds.

vent être posées sur les perspectives de compétitivité économique de la propulsion nucléaire.

Ainsi, on a obtenu quelques évaluations de l'élasticité du Prtt:

- dans le cas du navire conventionnel, à l'optimum (vers 16 noeuds):

- 0,3 au prix du combustible;

- 0,6 au prix de la coque.

- dans le cas du navire à propulsion nucléaire (vers 19/20 noeuds):

- 0,6 à 0,7 au coefficient „amortissement + assurances;

- 0,11 au coût du combustible nucléaire;

- 0,10 au surcoût propre au caractère nucléaire de la propulsion.

Dans les deux cas, l'élasticité au prix de la coque est de l'ordre de 0,6.

Ainsi le Prtt est-il trois fois moins sensible à l'évolution du combustible nucléaire qu'à celle du combustible fossile. De plus, l'incidence de l'évolution des composants du coût du cycle combustible nucléaire est très modérée: le doublement du prix de l'uranium n'augmenterait le Prtt que de 3,5% environ, celui de l'UTS de 4%, celui du coût de fabrication de 4% environ. Dans les hypothèses de coût de retraitement choisies, soit 600 à 800 francs par Kilogramme, et pour un prix du plutonium de 40 à 50 F/g, l'exécution du retraitement diminuerait le Prtt de 1%; le doublement de son prix en annulerait le crédit, laissant ainsi le coût du cycle, et donc le Prtt inchangés.

De la même façon, l'incidence du surcoût d'investissement proprement nucléaire apparaît limité; en définitive, les facteurs les plus influents sont le prix de la coque elle-même, et les conditions d'amortissement et d'assurance.

Dans le cas d'un méthanier de 130 000 m³, sur un trajet court du type Algérie - Manche/Mer du Nord, les prix de revient à la thermie transportée sont équivalents, tandis que sur un trajet long, du type Iran - U.S.A., la propulsion nucléaire peut apporter un gain de l'ordre de 15% sur un bâtiment plus rapide (27 à 28 noeuds).

ECONOMIE D'HYDROCARBURES LIÉE À LA PROPULSION NUCLÉAIRE

Un facteur peut-être mieux susceptible d'emporter la décision de certains responsables en faveur de la propulsion nucléaire est celui de l'économie d'hydrocarbures. On sait en effet qu'un navire de 280 000 tonnes de port en lourd (TPL) consomme sur le trajet précité 40 kg de fuel par tonne de pétrole transportée et par rotation, soit 4% de sa cargaison. Plus économe, un navire de 550 000 tonnes optimisé pour seize noeuds se contente de 30 kg par tonne.

On observe ainsi que si la moitié de la flotte assurant l'acheminement de l'approvisionnement français était nucléaire, l'économie de soutes réalisée se chiffrerait à près de 2,5 millions de tonnes, soit un milliard de devises.

L'investissement par tonne de capacité annuelle du système de transport est de l'ordre de 160 francs dans le cas du navire classique, et supérieur de moins de 10% dans le cas du navire nucléaire. A supposer que l'on considère que le surinvestissement lié à la propulsion nucléaire comme exclusivement affecté à la réalisation de l'économie d'hydrocarbures, il s'avère que par tonne d'équivalent pétrole économisée annuellement il reste inférieur à 500 F. On peut porter une appréciation sur la valeur de ce montant en notant que les industriels ont en France tendance à réaliser spontanément, c'est à dire sans subvention; des investissements économisant l'énergie dont le coût est de cet ordre; on considère par ailleurs qu'un coût inférieur à 2000 F est acceptable par la collectivité. Enfin, le coût correspondant pour des opérations de géothermie atteint 5000 F par tonne éco-

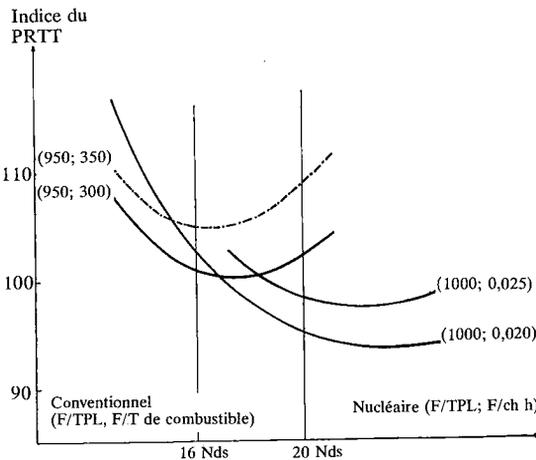


Figure 4 - Variations du Prtt

La valeur intrinsèque de ces résultats bruts n'est autre que celle des hypothèses faites; aussi l'attention ne doit-elle pas se porter sur ces valeurs numériques, mais sur la sensibilité des valeurs du Prtt et des vitesses optimales aux variations des paramètres économiques, résultat qui nous semble de prime abord le plus intéressant, susceptible de faciliter la réponse aux questions qui peu-

nomisée; il évolue de 5000 à 25000 F dans les opérations portant sur l'énergie solaire.

CONCLUSION

L'exploitation de navires marchands à propulsion nucléaire semble recevoir, pour une partie non négligeable du transport maritime, une justification économique, qui est plus évidente si elle est appréciée du point de vue collectif que du point de vue de l'armateur.

Certes, les évaluations sont sujettes à un certain nombre d'aléas, qui affectent les coûts d'investissement, d'exploitation d'assurance, de prix du combustible, et qui tiennent à l'absence de toute réalisation de référence. Le maintien du prix du pétrole à un niveau élevé constitue par ailleurs une condition nécessaire de compétitivité de la propulsion nucléaire, tandis que le prix de l'uranium naturel et celui de l'UTS sont également des paramètres non dénués d'influence sur le prix du combustible nucléaire.

Trois types de bâtiments sont susceptibles de remplir les conditions de rentabilité de l'exploitation d'un navire marchand à propulsion nucléaire:

- puissance importante et vitesse élevée, de façon que l'économie réalisée sur le combustible soit sensible;
- coût élevé d'investissement du bâtiment conventionnel, de façon que le surcoût nucléaire soit faible en valeur relative;
- coefficient d'utilisation de la puissance propulsive élevé, comme dans le cas de tout équipement;
- valeur de la cargaison élevée, de façon que les frais d'immobilisation de la cargaison, plus faibles si le navire est plus rapide, puissent intervenir.

Ces bâtiments sont:

- les transporteurs de gaz liquéfiés,
- les porte-conteneurs,
- les pétroliers géants.

Dans le cas des transporteurs de gaz liquéfiés, la conclusion n'est pas encore apparue très positive à la conférence de New York. Les résultats que nous avons obtenus, quoique approximatifs, recoupent ceux avancés à cette conférence: un avantage n'apparaît que pour de longues distances, supérieures à celles que parcourent les méthaniers concourant à l'approvisionnement de la France. On ne doit donc pas escompter voir un armateur français envisager de se doter de transporteurs de gaz liquéfié à propulsion nucléaire pour le service de l'approvisionnement français; inversement, le marché étranger (très étendu puisque l'O.C.D.E. envisage une capacité totale de transport de l'ordre de 7.10^6 m³ en 1980, et près du double en 1985, dont l'essentiel en service sur des liaisons à très long cours) pourrait être largement ouvert à la propulsion nucléaire, d'autant que, dans ce cas, la valorisation de l'économie d'hydrocarbures est supérieure, puisque le gaz qui s'évapore chaque jour est reliquéfié au lieu d'être brûlé par les chaudières, ce qui, de plus, augmente ipso facto la capacité de transport du navire. En raison de la forte position de certains chantiers français sur le marché de ce type de bâtiments, le développement de la propulsion nucléaire serait de nature à consolider leur situation qui constitue un sujet de préoccupation à moyen terme.

Dans le cas des porte-conteneurs, l'équivalence économique pour un bâtiment de 120 000 ch à 30 nds se situerait vers 7 \$ le baril pour un combustible à 2,5 mills/ch.h³ (conférence de New York); l'hypothèse de 2,5 mills paraît très optimiste. A notre avis, il faut compter 4 à 5 mills/ch.h, ce qui remonte le prix d'équivalence du pétrole vers 8,5 à 9 \$/baril, valeur nettement inférieure au prix actuellement pratiqué. Nous n'avons pas fait d'étude précise dans ce cas, compte tenu du caractère, très délicat de la prise en compte de certains aspects commerciaux. Il semblerait que ce soit sur des bâtiments

de ce type, qui est celui exploité par le Consortium Soa Land, que la propulsion nucléaire civile puisse le plus facilement percer.

Enfin, dans le cas des pétroliers géants, la propulsion nucléaire se présente différemment selon que l'on se place du point de vue de l'armateur ou de celui de la collectivité française. Du point de vue de l'armateur, le recours à la propulsion nucléaire apparaît en effet sans intérêt majeur puisque, si l'investissement à consentir pour une même capacité de transport n'est que peu supérieur, il ne procure qu'une faible économie sur le Prtt, le bilan actualisé à la tonne restant peu sensible au mode de propulsion. Par contre, du point de vue de la collectivité nationale ce recours présente un intérêt certain au plan des échanges extérieurs. En résumé, le navire porte-conteneurs apparaîtrait comme le mieux placé, dans la mesure où les U.S.A. concrétiseront leurs projets sur ce type de bâtiments, tandis que la compétitivité des transporteurs de gaz liquéfiés ne se dégagerait que pour des liaisons du type Iran-Côte Ouest des U.S.A. et qu'à capacité de transport donnée, le bilan actualisé des coûts d'investissement et d'exploitation d'une flotte pétrolière de navires semblerait peu sensible au mode de propulsion.

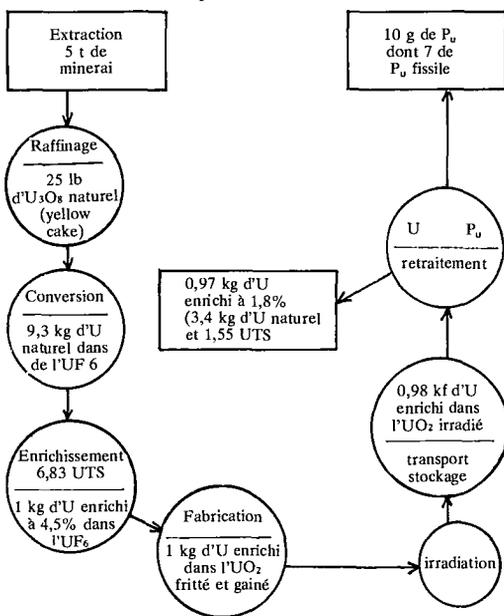
Si diverses estimations évaluent à près d'une cinquantaine le nombre de navires nucléarisables dans la production annuelle durant décennie 1980-1990, il faut noter

Annexe 0

LE PRIX DU COMBUSTIBLE FISSILE

L'ensemble des opérations d'extraction et de mise en oeuvre de l'uranium, avant irradiation, de retraitement après, constitue le cycle combustible, dont le schéma ci-dessous décrit les opérations essentielles.

Ce schéma retrace les flux de matières combustibles, rapportés à un kilogramme d'uranium mis en pile, dans le cas d'un enrichissement à 4,5% en isotope U 235.



Le tableau 1 donne les principaux éléments de son coût avec des hypothèses moyennes sur le prix de l'uranium, de l'enrichissement, de la fabrication des éléments combustibles et du retraitement.

Le Tableau 2 donne les valeurs extrêmes du coût de cycle déduites des coûts unitaires précédents. Taux d'irradiation: 30 000 MW/tonne. Rendement thermodynamique de l'appareil propulsif: 30%. Charges financières: 20%.

qu'en raison des délais de réalisateur, la mise en service du premier navire à propulsion ne saurait être envisagée pour une date antérieure à 1982; ceci permet d'escompter que d'ici là les problèmes juridiques et réglementaires aient trouvé des solutions et que le niveau de la demande de transport maritimes soit redevenu suffisant pour assurer des conditions d'exploitation commerciale satisfaisantes. Mais l'incertitude conjoncturelle au moyen terme hypothèque le démarrage: Indépendamment des aspects juridiques, réglementaires, écologiques et psychologiques, le creux de la construction navale qui se profile pour le courant du VII^e Plan n'est pas de nature à inciter les chantiers à investir dans son développement, à moins que ceux-ci n'y voient un axe privilégié d'extension de leur activité, et que la longueur du délai de réalisation des chaufferies nucléaires, de l'ordre de quatre à cinq ans, est nettement supérieure à celle de la construction des navires conventionnels, peut dissuader un armateur à se lancer aujourd'hui dans cette innovation.

Tableau 2

	Coût du cycle pour 1 kg (F) Coût du cheval-heure (cF)	
	Min	Max
Avec retraitement	4 970	6 495
Sans retraitement	5 390	6 795
	Min	Max
	2,03	2,65
	2,20	2,78

* Ces coûts, exprimés en fleues 1 p + 5, sont ceux de repouque.

Annexe 1

EXEMPLE DE CALCUL DU PRIX DE REVIENT COMPARE DE LA TONNE TRANSPORTEE PAR PETROLIERS DE 550 000 TPL A PROPULSION CONVENTIONNELLE OU NUCLEAIRE

Notations:

Puissance P en chevaux;
Vitesse de croisière V en noeuds;
Prix du bâtiment par tonne de port en lourd: pN en francs;
Amortissement + assurances: fraction λ du total de l'investissement;

Prix des soutes: π francs la tonne;
Prix du combustible fissile: γ centimes le cheval-heure.
Les principaux paramètres économiques du Prrt sont le prix de base du navire par tonne de port en lourd, le surcoût d'investissement du navire nucléaire, l'hypothèse d'amortissement, le coût du combustible nucléaire, celui du combustible fossile.

Surcoût d'investissement lié à la propulsion nucléaire:
La puissance propulsive croît comme le cube de la vitesse; pour le pétrolier de 550 000 TPL P et V sont liés par la relation $P = 13,7 V^3$.
Le bâtiment est supposé optimisé pour chaque vitesse de croisière. Ses formes, et donc pN, en dépendent donc. On admet les valeurs suivantes dans le calcul de base:
pN = 950 F pour le bâtiment conventionnel (16 noeuds);
pN = 1 000 F pour le bâtiment nucléaire navigant vers 19/20 noeuds, hors le surcoût purement nucléaire évalué à $0,5 \sqrt{P}$, soit $1,85 10^6 V^{3/2}$

L'exactitude de ces coûts de construction par TPL ne présente que peu d'importance pour l'interprétation des calculs effectués, dont l'intérêt est surtout d'évaluer un ordre de grandeur et une sensibilité à l'incertitude sur les dits coûts, ainsi qu'à classer les résultats du navire nucléaire par rapport au navire conventionnel.

Tableau 1

Opérations	Coûts * unitaires	Application des prix aux quantités	Remarques
Obtention de 9,3 kg d'U nat.	200 à 250 F/kg	1 860 à 2 325 F	—
Fluorisation	15 à 18 F	140 à 170 F	—
Enrichissement: 6,83 UTS à	350 à 410 F	2 390 à 2 800 F	—
Fabrication de 1 kg de combustible	1000 à 1 500 F	1 000 à 1 500 F	—
Ratraitement	600 à 800 F	600 à 800 F	valeurs actualisées à 5 ans: 370 à 500 F
Crédits:			
0,97 kg d'U à 1,8% équivalent à:			valeurs actualisées à 5 ans:
3,4 kg d'U naturel	200 F à 250 F	680 à 850 F	420 à 530 F
1,55 UTS	350 à 410 F	540 à 635 F	335 à 395 F
7 g Pu fissile	40 à 50 F	280 à 350 F	175 à 220 F

Coûts de combustible:

	Immobilisation pour carenage	Séjours au port et au mouillage	Consommations de fuel	Coûts de combustible γ le ch.h nucléaire π F la tonne de fuel
Conventionnel...	15 j	30 j	220 g fuel/ch.h	$24,66 \pi V^3$
Nucléaire...	20 j	40 j	—	$109 200 V^3 \gamma$

Nombre de rotations annuelles:

	Nucléaire	Conventionnel (ou 350)
Le nombre annuel de rotations sur le trajet Le Havre-Golfe Persique (11 200 milles). est de	$\frac{11 200}{12 V}$	+ 6

En prenant les frais fixes d'exploitation égaux à 10 MF/an dans les deux cas, le prix de revient de la tonne transportée s'établit comme suit:

$$Prrt_{con v} = \frac{550 000 pN \cdot \lambda + 24,66 V^3 \pi + 10^7}{550 000 \frac{350 V}{933 + 6 V}}$$

$$Prrt_{nucl} = \frac{(550 000 pN + 1,85 \cdot 10^6 V^{3/2}) \gamma + 109 200 V^3 \gamma + 10^7}{550 000 \frac{345 V}{933 + 6 V}}$$

Annexe 2

EXEMPLES DE CALCUL DES COÛTS COMPARES DU TRANSPORT DE GAZ NATUREL PAR METHANIERS DE 130 000 M3 A PROPULSION CONVENTIONNELLE OU NUCLEAIRE

Les caractéristiques principales des navires en cause sont les suivantes:

- volume des cuves de cargaison: 130 000 m³;
 - port en lourd en service: 64 340 T;
 - vitesse aux essais: 20 noeuds;
 - puissance correspondante: 38 000 ch;
 - P max continue de l'appareil propulsif: 45 000 ch;
 - volume de fuel-oil des soutes: 4 400 m³;
 - la relation entre P et V est: P = 4,75 V³.
- Le coût actuel d'investissement de ces navires est de l'ordre de 5 000 F/m³ de Gnl. Un mètre cube de Gnl représente environ 600 m³ de gaz aux conditions normales de température et de

pression. Le méthanier de 130 000 m³, chargé à 98%, transporte environ 77 10⁶ m³ de gaz, soit environ 700 millions de thermies, ou l'équivalent de 70 000 Tep.

L'isolation thermique des cuves est assez poussée pour réduire l'évaporation à environ 0,25% par jour, soit 320 m³ et l'équivalent de 175 Tep. Le Gnl évaporé est consommé dans les chaudières, mélangé à 10% au moins de fuel-oil et permet donc d'alimenter l'appareil propulsif développant quelque 36 000 ch, soit une puissance proche de celle qui correspond à la vitesse de 20 noeuds. Ainsi donc, la chaufferie consomme le Gnl évaporé et un appoint de fuel relativement faible; lorsque le navire navigue à vide (sur ballasts), il consomme uniquement du fuel dont ses soutes contiennent 4 400 m³.

La propulsion nucléaire permet d'augmenter la charge utile en rendant disponible l'espace occupé par les cuves à mazout et en facilitant la reliquéfaction du boil-off. On peut donc admettre que la capacité de transport effective du navire doit augmenter d'environ 10 000 m³, toutes choses étant égales par ailleurs, sur des liaisons longues (trois semaines), sans augmentation sensible du coût total du navire, abstraction faite du surcoût propre à la chaufferie nucléaire ⁴.

Bien que le navire consomme une quantité notable de gaz comme combustible, on ne tient pas compte du prix de départ de celui-ci dans le calcul comparé des prix de revient du transport de la thermie, car il faut considérer que toute thermie de gaz consommée au cours du transport doit être compensée par une thermie de pétrole. Les coûts de combustible fossile devraient donc être pris égaux au coût de la thermie de pétrole.

On admet que les délais d'escale sont de deux jours par rotation, les opérations de manutention du gaz pouvant s'effectuer en 12 heures environ, que les délais annuels de carénage sont de 15 jours, que la fraction „amortissement + assurances” est de 13,5% ⁵ et que les frais d'exploitation sont de 10 millions par an.

Deux trajets-types ont été retenus:

Le trajet A est soit Rotterdam-Golfe Persique, soit Golfe

Persique-Los Angeles (de l'ordre de 11 500 milles parcourus à 20 noeuds).

Le trajet B est Algérie-Mancher/Mer du Nord (2 600 milles).

Pour chaque trajet, on a considéré les trois hypothèses suivantes:

- bâtiment conventionnel navigant à 20 noeuds;
- bâtiment nucléaire navigant à 20 noeuds (surcoût nucléaire de 150 MF);
- bâtiment nucléaire navigant à 27,5 noeuds (surcoût nucléaire de 200 MF).

Il est en effet intuitif que la vitesse économique du méthanier nucléaire est nettement supérieure à 20 noeuds. Un calcul approché indique que cette vitesse est de l'ordre de 35 à 40 noeuds, valeur déraisonnable sur le plan technique, compte tenu notamment de la platitude de l'optimum et de la valeur élevée de la puissance correspondante, de l'ordre de 250 000 chevaux.

On a donc recherché le Prrt pour un navire à deux lignes d'arbres transmettant chacune 50 000 ch à la vitesse de croisière; celle-ci est de l'ordre de 27,5 noeuds.

Les résultats sont les suivants (cF/th):

	Trajet A (long)	Trajet B (court)
Conventionnel . . .	2,60	0,57
Nucléaire à 20 noeuds	2,51	0,60
Nucléaire à 27,5 noeuds	2,27	0,56

NOTES EN BAS DE PAGES

1. Sauf mention contraire: évaluations en francs 1975
2. Nota: Hausse du prix du pétrole et choix économique. Statistiques études financières, 1976 21
3. mill: millième de dollar U.S.
4. Dans la réalité, le navire de 130 000 m³ à propulsion nucléaire aurait un port en lourd inférieur d'environ 3 500 tonnes et serait plus fin.
5. Amortissement à 10% sur 20 ans + 1,8% d'assurances.