

L'énergie nucléaire et son application à la propulsion des navires

Communication de M. Valère GOEMAERE,
Ingénieur, Chef de Service à la S.A. Cockerill-Ougrée à Hoboken

INTRODUCTION

En 1905 Einstein prouve dans sa théorie de la relativité généralisée la formule $E = m \times c^2$ et laisse ainsi percevoir pour la première fois la possibilité de réduire la matière (m) en énergie E .

Le fait que le rapport entre l'énergie et la masse est égal à c^2 ($c =$ vitesse de la lumière), montre quelles énormes quantités d'énergie on peut obtenir lorsqu'une petite masse disparaît.

Cette preuve théorique, ensemble avec les découvertes de Hohl et Strassman, Joliot-Curie, Fermi et beaucoup d'autres, ont conduit, en 1945, à la première explosion atomique à Hiroshima.

Moins de 10 années néanmoins après la destruction de Hiroshima, l'énergie nucléaire est entrée dans sa phase industrielle.

I. — STRUCTURE DE LA MATIERE

On sait que tous les corps composés peuvent être scindés en particules de plus en plus petites jusqu'à aboutir à la plus petite d'entre elles : la molécule. Après analyse, tous ces corps composés peuvent être réduits en corps simples, dont l'élément le plus petit est l'atome.

On connaît 92 éléments naturels et une dizaine d'éléments artificiels. Le diamètre des atomes est environ 10^{-8} cm.

Les atomes de tous les éléments sont composés d'un noyau (chargé positivement), entouré d'électrons négatifs. Le tout est électriquement neutre. Les électrons sont très légers (1840 fois plus légers que les constituants du noyau) et la masse de l'atome se situe donc presque entièrement dans le noyau.

Les électrons se trouvent autour du noyau à des niveaux énergétiques différents. Chaque niveau ne peut contenir qu'un nombre déterminé d'électrons.

Les électrons qui se trouvent dans un niveau saturé ne sont pas chimiquement influençables. Au contraire, les niveaux non saturés (en général les extrêmes) peuvent capter des électrons et produisent les combinaisons chimiques.

De ceci nous pouvons conclure que les réactions chimiques intéressent seulement les électrons, donc une très petite masse. Par conséquent, la relation d'Einstein montre que l'énergie dégagée par ces réactions sera faible.

Le noyau est de très petites dimensions par rapport à l'atome. Son rayon est environ $1/10.000^{\circ}$ de celui de l'atome. En d'autres mots, si le noyau était représenté par une sphère d'un rayon de 1 mm, le rayon de l'atome aurait 10 m.

Les dernières découvertes font supposer que les noyaux sont formés par deux éléments : protons, chargés positivement et neutrons, dont le poids est égal à peu près à celui des protons, mais qui sont électriquement neutres. Ces deux éléments sont appelés nucléons. Leur poids est égale à celui du noyau d'hydrogène, celui-ci ne contenant qu'un seul proton.

La charge positive du proton est égale à la charge négative de l'électron. De ce qui précède il ressort que, pour obtenir un ensemble stable pour le noyau, il doit exister nécessairement des forces d'attraction entre les nucléons. Différents essais ont montré que ces forces d'attraction ne sont valables qu'à très courte distance. On ne peut les comparer aux forces électrostatiques qui existent entre les particules chargées, car pour ces dernières les forces d'attraction sont sensibles même à grande distance.

Supposons deux atomes ayant le même nombre d'électrons, donc — et ceci est très important — ayant les mêmes caractéristiques chimiques et par conséquent aussi le même nom, dont les noyaux ont la même charge, mais où le nombre de nucléons diffère légèrement. Des atomes pareils sont appelés isotopes.

Des exemples feront mieux comprendre cette notion.

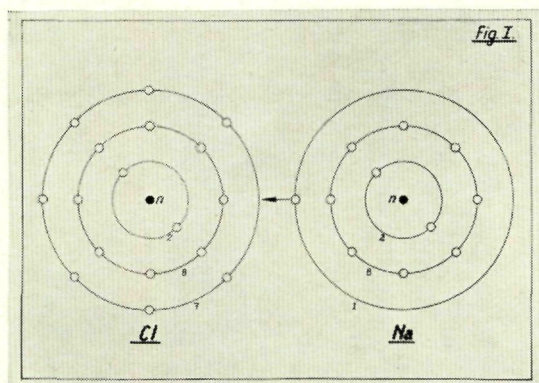
Prenons comme corps composé le sel de table. En chimie il est appelé chlorure de sodium et est représenté symboliquement par NaCl.

Lorsque le chimiste s'occupe de ce corps, il le décompose en deux simples

Na — sodium et Cl — chlore.

Examinons maintenant la composition de cette molécule Na Cl au point de vue physique. L'atome chlore se compose d'un noyau et de 17 électrons en 3 couches (2 + 8 + 7).

L'atome sodium a 11 électrons en trois couches (2 + 8 + 1). La couche extérieure du Cl n'est pas saturée. Le nombre de saturation est de fait 8. Par conséquent, il se formera un corps stable, lorsque chlore et sodium se lient comme suit :



Prenons maintenant quelques exemples de composition de noyaux.

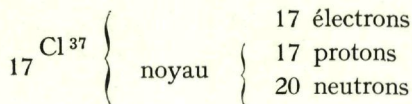
Reprenons notre atome chlore. Cet atome est naturellement électriquement neutre. Il a 17 électrons. Le noyau contient donc 17 protons. Mais le poids atomique (Hydrogène H = 1, donc considéré comme unité de poids) est 35.

Par conséquent, le noyau a encore $35 - 17 = 18$ neutrons et nous trouvons comme composition du noyau Cl

17 protons
18 neutrons.

Nous voyons donc qu'il suffit de connaître le nombre d'électrons et le poids atomique d'un atome pour déterminer sa composition. On écrira donc en physique nucléaire : ${}_{17}^{35}\text{Cl}$.

Mais il existe dans la nature encore un autre élément avec 17 électrons, mais d'un poids atomique de 37 :

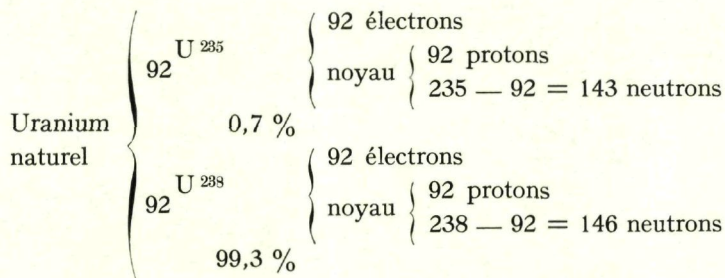


Ce corps possède le même nombre d'électrons, donc les mêmes caractéristiques chimiques. C'est donc également du chlore. C'est le « chlore 37 », un isotope du « chlore 35 » (1).

D'ailleurs, en réalité le Cl de notre sel de table est un mélange de ces deux isotopes.

Prenons un deuxième exemple.

L'Uranium naturel est un mélange de deux isotopes : U^{235} et U^{238} .



En réalité l'Uranium a 14 isotopes, actuellement connus. Ci-dessous on trouvera un tableau de ces isotopes avec leur poids atomique, la période (2) des isotopes instables (radioactifs et le % des isotopes stables.

U^{227}	U^{228}	U^{229}	U^{230}	U^{231}	U^{232}	U^{233}
1,3 min	9,3 m.	58 m	21 jours	4,3 j	70 ans	10,5 ans
U^{234}	U^{235}	U^{236}	U^{237}	U^{238}	U^{239}	U^{240}
10,5 ans	0,7 %	10^7 ans	6,7 j	99,3 %	23,5 m	14 heures

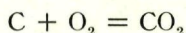
(1) On voit donc surgir les difficultés pour séparer les isotopes. Etant donné que leurs caractéristiques chimiques sont parfaitement identiques, il est impossible de les séparer par une réaction chimique. On doit alors employer les méthodes physiques très onéreuses et de longue durée, p. ex. le spectrographe de masse ou la différence des vitesses de diffusion des isotopes gazéifiés à travers des corps poreux.

(2) On appelle période d'un corps radioactif (se désintégrant donc sans intervention extérieure) le temps nécessaire pour que la moitié de ce corps soit transformée.

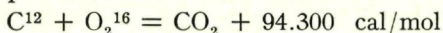
2. REACTIONS CHIMIQUES — REACTIONS NUCLEAIRES — REACTIONS EN CHAINE

Nous avons déjà expliqué ce que la théorie moderne entend par réaction chimique. Mais nous allons maintenant nous rapprocher de notre but par un exemple qui va nous faire saisir l'origine de la mystérieuse énergie nucléaire.

Lorsque dans une chaudière la combustion du charbon produit la molécule CO_2 ou anhydride carbonique, cette réaction s'écrit



Il y a production d'énergie sous forme de chaleur et cette réaction chimique s'écrit plus exactement



carbone + oxygène = anhydride carbonique + chaleur

Avec une balance de précision on pourrait constater que le poids du CO_2 produit ne correspond *pas exactement* au poids de C + le poids O_2 .

Le poids du CO_2 produit est en réalité très légèrement inférieur à la somme des poids de carbone et de l'oxygène mis en jeu, selon la formule d'Einstein :

$$E = mc^2 \quad \text{ou} \quad m = E/c^2 \quad (3)$$

La masse m de l'énergie produite — 94.300 cal explique cette différence de poids. Etant donné que le poids perdu dans cette réaction est très petit, l'énergie produite est également minime. Dans la pratique nous savons que 1 kg de charbon donne environ 6.000 calories.

Il en va tout autrement dans les *réactions nucléaires*. Prenons p. ex. la réaction nucléaire qui se produit lorsqu'un neutron indépendant pénètre dans le noyau de U^{235} et scinde celui-ci (4). Nous étudierons cette réaction, parce qu'elle est à la base de la plupart des réacteurs nucléaires.

(3) Les unités à employer dans cette formule sont :

pour m : gramme-masse ou $\frac{\text{gramme-poids}}{981}$,

pour c : 30.000.000.000 cm/sec ou 3×10^{10} cm/sec.

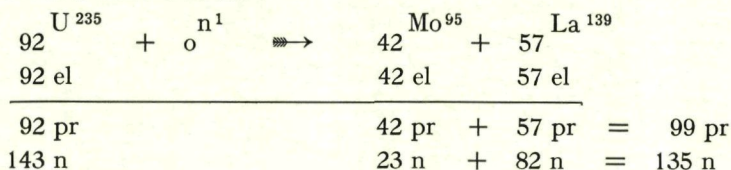
On obtient alors E en erg;

$$1 \text{ erg} = \frac{2,32}{10.000.000} \text{ cal} \text{ ou } 2,32 \times 10^{-7} \text{ cal.}$$

(4) Les neutrons n'ont pas de charge, il ne se produit donc pas de force électrostatique lorsqu'ils entrent dans l'atome. De là leur emploi facile dans les réactions nucléaires.

Expérimentalement il a été constaté que l'on produit ainsi un ensemble instable, qui se transforme immédiatement en molybdène et lantane.

Notons donc d'abord :



A l'aide des poids atomiques, nous avons indiqué la composition des atomes en dessous de la formule de la réaction. Remarquons en premier lieu que les électrons, vu leur poids minime par rapport au noyau, peuvent être négligés.

Que remarquons-nous maintenant dans les noyaux, en faisant le bilan des protons et neutrons ?

Faisons d'abord le bilan des protons : nous avons dans U^{235} , 92 pr et nous trouvons dans les produits de la réaction $42 + 57 = 99$ pr.

Nous avons d'autre part 143n dans $\text{U}^{235} + 1\text{n}$ ajouté = 144n .

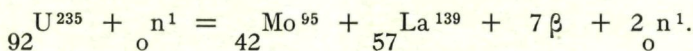
Nous trouvons $53 + 82 = 153$ neutrons.

Donc, perte en neutrons : $144 - 135 = 9$ neutrons.

Nous en concluons que 7 protons ont été formés de 7 de ces 9 neutrons par perte de charge électrique positive. Et en fait on constate que 7 unités de rayons β se produisent dans cette réaction.

En ce qui concerne maintenant les deux neutrons restants, ceux-ci n'ont pas disparu, mais on les retrouve, libres, à côté du Mo et du La.

La réaction doit donc être complétée comme suit :



Faisons maintenant le bilan des poids avant et après la réaction :

Avant la réaction : $\text{U} + \text{n}$

$$235,124 + 1,00897 = 236,133$$

Après la réaction : $\text{Mo} + \text{La} + 7\beta = 2\text{n}$

$$94,945 + 138,955 + 0 + 2 \times 1,00897 = 235,918$$

Et le bilan des poids nus donne :

poids perdu dans la réaction :

$$236,133 - 235,918 = 0,215.$$

Lorsque nous transformons ce poids en calories par la formule d'Einstein, nous trouvons

$$48.600 \times 10^8 \text{ cal/mol.}$$

Si nous comparons cette production de chaleur avec celle engendrée par la combustion du carbone 94.300 cal/mol, nous arrivons à la conclusion que, par molécule, la réaction nucléaire produit $\frac{48.600 \times 10^8}{94.300}$ ou environ $0,5 \times 10^8$, ou encore 50.000.000 fois plus de calories.

Etant donné que la molécule de carbone pèse $\frac{92}{6}$, soit environ 15 fois moins que la molécule U^{235} , nous produirons donc, par kilogramme U^{235} , $\frac{50.000.000}{15}$ ou environ 3.000.000 de fois plus de chaleur. Ou bien, en d'autres mots, 1 kg U^{235} correspond théoriquement à 3.000.000 kg de charbon.

Mais il y a plus. Nous avons vu que la fission de U^{235} exige la présence de 1 neutron et que la réaction non seulement produit une quantité considérable de chaleur, mais aussi 2 nouveaux neutrons.

Ceux-ci peuvent à leur tour, du moins théoriquement, scinder 2 nouvelles molécules U^{235} , ce qui donne alors 4 nouveaux neutrons, etc., et voilà l'origine d'une réaction en chaîne.

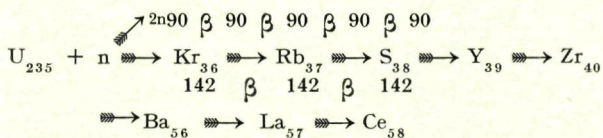
Heureusement cette réaction en chaîne ne se produit pas instantanément. Dans la pratique des phénomènes ralentissants modèrent la réaction, et l'on peut compter en pratique que tous les neutrons ne sont libérés qu'après quelques minutes.

On a donc, dans le réacteur nucléaire, le temps d'intervenir pour absorber par ex. une partie des neutrons et de stabiliser la réaction de cette manière.

Dans la bombe atomique, par contre, on fait tout pour que la réaction se produise aussi vite que possible.

La réaction que nous avons étudiée ci-dessus est seulement un exemple.

En réalité le fonctionnement du réacteur nucléaire est bien plus compliqué. D'autres corps sont produits par fission, avec une préférence pourtant pour ceux dont le poids moléculaire se trouve aux environs de 98 (Rhodium, Molybdène, Krypton) et aux environs de 140 (Cerium, Lantane, Barium, Perium, Xenon) (5).



(5) Autre exemple de réaction.

Il nous reste encore un point à examiner. La réaction nucléaire est-elle aussi facile à réaliser que la théorie de la fission le fait supposer ?

Une première difficulté apparaît, lorsque nous nous posons la question : quels corps sont fissibles et où les trouve-t-on ?

Il existe actuellement seulement trois matières fissibles connues dans la réaction en chaîne avec neutrons :

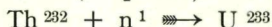
Uranium 235, Uranium 233 et Plutonium 239.

De ces trois corps un seul existe seulement sur terre comme minéral, c'est U^{235} et encore mélangé avec U^{238} dans la proportion :

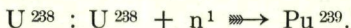
$$0,7 \% U^{235}, \quad 99,3 \% U^{238}.$$

Les deux autres matières fissibles doivent être produites artificiellement comme suit :

U^{233} est obtenu par bombardement de Thorium 232 par des neutrons, par réaction nucléaire (simplifiée).



Le plutonium est obtenu en faisant absorber des neutrons par



Cette réaction s'effectue dans des réacteurs spéciaux, qui ont seulement pour but de produire des matières fissibles, en partant de matières non fissibles. Ces réacteurs sont appelés « breeders ».

3. REACTEURS

Nous connaissons maintenant le combustible. Comment allons nous l'employer ?

L'expérience a montré qu'il faut apporter beaucoup de soins à l'étude de la chaudière nucléaire, c.-à-d. qu'il faut être très économe avec les neutrons dans les réacteurs.

Nous allons maintenant exposer une comparaison qui nous fera comprendre la constitution d'un réacteur.

Supposons que nous nous trouvons dans un immense champ de tir couvert de cibles, cibles assez spéciales puisqu'elles ne sont pas plates mais sphériques avec une paroi assez épaisse. A défaut d'une meilleure dénomination, nous continuerons à les appeler « cibles ». Les unes sont en verre, les autres en verre plastique très élastique. Nous avons choisi nos « cibles » de ces deux matières de telle manière, que sur 1000 pièces il y en a 7 en verre et 993 en verre plastique.

Une autre série est en caoutchouc, encore d'autres en bois, d'autres en plomb, etc. Toutes ces cibles sont entremêlées et dispersées sur tout le champ.

Toutes les cibles en verre ont p. ex. 50 cm Ø, celles en bois 30 cm Ø, celles en plomb 2 cm Ø, etc.

En dessous de chaque cible en verre se trouve un tireur, les yeux bandés et armé d'une mitrailleuse. Chaque homme peut tirer un nombre déterminé (par ex. 20) de coups, mais seulement lorsqu'il entend se briser la cible sous laquelle il se trouve. Le but de l'ensemble est maintenant de casser le plus grand nombre possible de cibles en verre.

D'abord une remarque. Il ne faut pas se trouver trop près des cibles en verre, car, comme vous le savez, le projectile va trop vite, fait un trou dans le verre et nous n'avons pas atteint notre but.

Nous devons donc nous arranger pour que les projectiles soient d'abord ralentis par le choc des molécules d'air qu'ils rencontrent sur leur passage. Nous pouvons toutefois supposer que les projectiles trop lents ne casseront pas non plus le sphère en verre, mais enlèveront seulement quelques morceaux pour se fixer dans l'épaisseur du matériau.

A un moment donné le directeur du tir donne l'autorisation au premier tireur de lâcher ses 20 coups.

Pour avoir le plus de chances il fera bien de pirouettes dans toutes les directions pendant son tir. Une grande partie des balles sera absorbée par des cibles en plexiglas, bois et plomb, mais supposons qu'il arrive à casser deux « cibles » en verre. Il en suivra, selon les règles de notre jeu, 40 coups qui à leur tour atteindront peut-être 4 cibles en verre, etc.

Mais de cette manière le tir deviendrait trop violent. Pour cette raison on pend à un fil, à quelques mètres du sol, et à intervalles réguliers sur le terrain, une série de grosses planches de contrôle. Si les planches sont au-dessus de la zone de tir, elles n'arrêteront aucune balle; si elles sont descendues en pleine zone de tir, elles absorberont presque tout et le tir s'éteindra. Quelque part à mi-hauteur on peut arriver ainsi à obtenir que le feu devienne stable.

Et maintenant nous allons comparer cette magnifique installation avec notre réacteur nucléaire.

Les cibles en verre sont remplacées dans la réacteur par du matériel fissible, en forme de barres, par ex. U^{235} . Les sphères en verre plastique représentent le U^{238} dans la proportion 7/1000. Les deux s'appellent « verre ». Ce sont en effet des isotopes.

Les cibles absorbantes sont par ex. des impuretés dans le métal, ou bien encore les canaux par lesquels l'élément de refroidissement coule qui élimine les calories produites, ou encore ce liquide même. Les balles sont naturellement des neutrons.

Nous avons donné dans notre comparaison un diamètre déterminé à chaque sorte de cible. En réalité il en est de même pour les neutrons. Ci-dessous on trouvera une liste donnant les diamètres relatifs ⁽⁶⁾ des noyaux de certains matériaux, indiquant donc leurs chances d'être atteints (d'absorber) les neutrons.

		pour fission		pour absorption
H	0,32			
Be	0,009	U ²³⁵	549	101
C	0,004	U ²³⁸	0	2,8
O	0,0009	U (naturel)	3,92	3,5
N	1,5			
Al	0,22	Pu ²³⁹	664	361
Ni	4,5	pour neutrons de résonance :		
Cd	3,500	Energie des neutrons		
Bi	0,01	U ²³⁸ :	10.000	11 eV ⁽⁷⁾
B	718	Cd :	7.200	0,18 eV
Fe	2,5	In :	20.000	1,44 eV
Zr	0,4			
D ₂ O	0,00092	(eau lourde)		
Na	0,46			

De ceci nous pouvons déjà conclure que les parties structurales du réacteur qui se trouvent sur le trajet des neutrons doivent être construites en matériaux ayant un diamètre effectif réduit. On prend en général Al (0,22) ou Zr (0,4).

Nous avons vu que nos balles ne peuvent aller trop rapidement. Ceci est rendu encore plus nécessaire — et ici notre comparaison n'est pas tout à fait réelle — parce que certains phénomènes de résonance auxiliaires rendent les neutrons, ayant une énergie déterminée (11 eV pour U²³⁸), très facilement absorbables (voir tableau).

Telle est la raison pour laquelle on ralentit les neutrons sous cette limite d'absorption dangereuse.

C'est le rôle du *modérateur*.

Comme là tantôt, nos cibles dans l'air, les barres d'uranium seront placées à des distances déterminées dans la masse du modérateur.

(6) L'unité est le « barn », équivalent à 10^{-24} cm.

(7) Le eV est l'unité énergétique la plus employée dans la physique nucléaire.
 $1 \text{ eV} = 1,59 \times 10^{-12} \text{ erg}$.

Le modérateur doit donc être un élément ralentissant et non absorbant. (Comparez avec de l'air qui serait assez dense pour retenir la moitié des balles).

Du tableau des diamètres effectifs il ressort que le carbone, le Beryllium et l'eau lourde sont très indiqués. L'eau est moins indiquée, parce que l'hydrogène de l'eau a tendance à former du deuterium par l'absorption des neutrons.

On pourra donc seulement employer l'eau avec des matériaux fissiles très riches — U 235 pur ou 233, ou l'Uranium naturel enrichi en U 235.

L'élément refroidisseur doit être fluide et peu absorbant — on peut donc employer de l'air (voir tableau) — ce qui est peu indiqué pour l'utilisation des calories produites; on peut aussi employer le Sodium fondu ou l'eau lourde.

Nous n'avons pas encore parlé de nos planches régulatrices. Celles-ci se retrouvent dans le réacteur, sous forme de barres de réglage en matériaux très absorbants qui seront glissées plus ou moins profondément dans le réacteur. On emploie par ex. des barres en Cadmium ou en Bore. Finalement on pourrait encore améliorer quelque chose à notre installation de « cibles ».

Si nous entourons le tout par un mur en acier, il y aurait des chances que les balles perdues heurteraient cette clôture, reviendraient et par ricochet atteindraient les buts. Tel est le rôle du réflecteur qui entoure le réacteur tout entier.

Parfois le *réflecteur* est construit en matériaux absorbant les neutrons, mais de telle façon que l'absorption produise une nouvelle matière fissile. Tel est le cas par ex. d'un réflecteur en Thorium. Comme nous l'avons vu, le Thorium produit de l'U 233, par absorption de neutrons. Chaudière remarquable où les pertes engendrent du combustible !

Mais nous pourrions encore changer quelque chose à l'installation. Ei nous ne plaçons pas 7 sphères en verre sur 1.000, mais 20 ou 30 ou 100, alors les chances seront beaucoup plus grandes.

Ceci est obtenu dans le réacteur par l'emploi de l'Uranium naturel enrichi, ou encore mieux de U 235. Dans ce cas il n'y a plus de plexiglas sur le champ de tir.

Dans notre comparaison, la tôle placée autour du champ, était suffisante pour retenir les balles perdues. Ceci n'est pas le cas dans le réacteur et les rayonnements très dangereux doivent être retenus par

un écran très lourd. Il est en béton d'une épaisseur de 2 à 3 m ou en plomb. Dans ce dernier cas une épaisseur de 60 à 70 cm suffit.

Pour finir encore un fait très important.

Nous avons vu que la fission du combustible produit différents nouveaux corps (Rhodium, Molybdène, Barium, etc.). Certains de ces corps sont des absorbants de neutrons. Par suite les barres d'Uranium seront « contaminées » après un certain temps d'emploi et devront alors être « régénérées » (8).

A la lumière de l'exemple ci-dessus, nous allons maintenant examiner rapidement les multiples variantes possibles dans la construction d'un réacteur.

A. Commençons par le réacteur même. Nous pouvons distinguer :

1. *Réacteurs expérimentaux* : Ceux-ci sont destinés aux essais, par ex. examen des matériaux sous rayonnement de neutrons.
2. *Transformateurs* : Ceux-ci sont destinés par ex. à la production des matières radioactives artificielles ou à la production de Pu ou U 233. Les « breeders » font partie de cette catégorie.
3. *Réacteurs de production*, dont la puissance peut être employée pour la production de l'électricité, ou la propulsion des locomotives et des navires. Signalons en passant que des réacteurs de 50.000 KW sont effectivement en service et que le programme anglais par ex. prévoit la construction de centrales atomiques de 100.000 à 1.000.000 KW. En 1965 la puissance atomique installée sera de l'ordre de 8.000.000 KW.

B. Passons maintenant au combustible.

Celui-ci peut être :

1. U 233 — aucun réacteur ne travaille à ma connaissance avec cette matière.
2. Plutonium.
3. Uranium — c'est la matière la plus employée et bien sous les trois formes connues :
 - a) Uranium naturel;
 - b) Uranium naturel enrichi;
 - c) U 235 pur.

(8) Le temps de contamination est relativement court comparé à la consommation du combustible. Une marche continue de un à deux ans est actuellement réalisable sans régénération. Elle correspond à la fission d'un très faible pourcentage du combustible (parfois 10 à 20 % seulement).

C. *Répartition du combustible* : Celui-ci peut être employé sous forme de barres; on parle alors d'un réacteur hétérogène. C'est celui que nous avons décrit dans notre exemple.

Le combustible peut aussi être mélangé avec le modérateur et on a alors un réacteur homogène.

D. *Utilisation des neutrons* : Lorsque les neutrons sont ralentis comme décrit ci-dessus, on a un réacteur à « neutrons thermiques ». (Leur énergie est presque égale à leur énergie thermique). Au cas où leur vitesse, au moment de la fission, dépasse cette limite (neutrons non ralentis) on a un réacteur à « neutrons rapides ».

E. *Le modérateur* permet différentes solutions. Il peut être fluide (par ex. lourde) ou bien un corps solide, par ex. graphite ou beryllium.

La combinaison la moins chère : eau + uranium naturel s'avère impossible, parce que nous avons déjà mentionné que l'eau absorbe trop de neutrons.

F. *Le refroidissement* peut se faire à l'aide d'air ou de gaz ou bien encore à l'aide d'eau ou d'eau lourde ou également d'un métal fondu, sodium par ex.

En général, si on veut utiliser la chaleur, le refroidissement se fait par un fluide; celui-ci est repris par un échangeur de température, qu'il traverse. Cette chaleur est absorbée par de l'eau, qui produit ainsi la vapeur, nécessaire au fonctionnement des turbines.

On a également déjà essayé d'obtenir une évaporation directe dans le réacteur. Ceci a réussi; seulement la vapeur devient légèrement radioactive, donc les turbines également, et il faut donc prendre des mesures spéciales de protection (écrans) et de conduction (le rayonnement détériorant assez rapidement certains matériaux).

G. Comme déjà expliqué, *le réglage* peut se faire par des barres à forte absorption. Dans un réacteur à modérateur liquide le niveau de liquide peut également servir de réglage.

En tout cas le réglage doit se faire de telle manière que, lors d'une panne éventuelle, le réacteur s'arrête automatiquement. Souvent on emploie une deuxième série de barres à cet effet, qui alors pénètrent immédiatement dans le réacteur et arrêtent son fonctionnement.

Même si le réacteur, par suite de circonstances imprévues, échappait au contrôle, il n'éclaterait pas encore, car la hausse de la température fonctionne comme frein. Ceci est arrivé il y a quelques mois au Canada. Le réacteur fut seulement très endommagé. Des expériences ultérieures ont confirmé ceci.

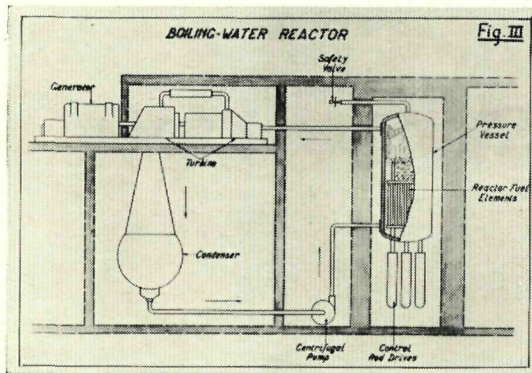
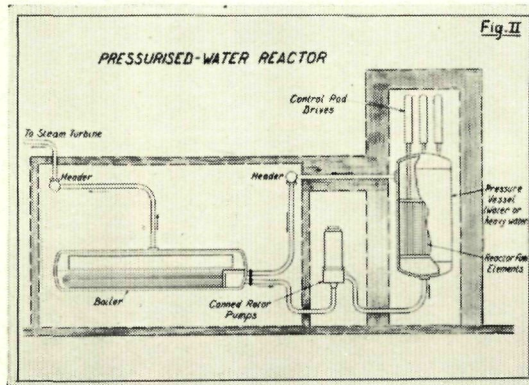
Les fig. 2 - 3 - 4 - 5 - 6 (reprises d'« Engineering ») montrent quelques exemples de réacteurs.

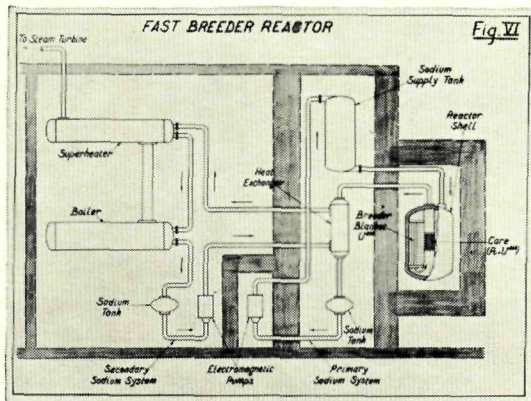
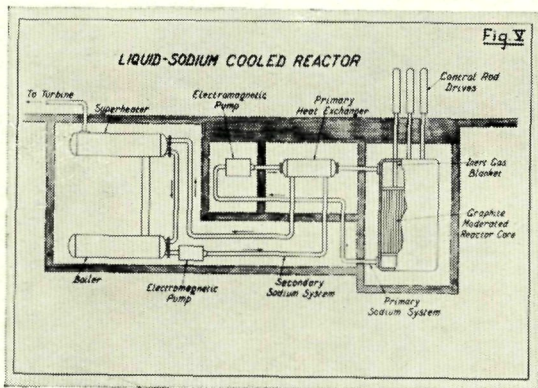
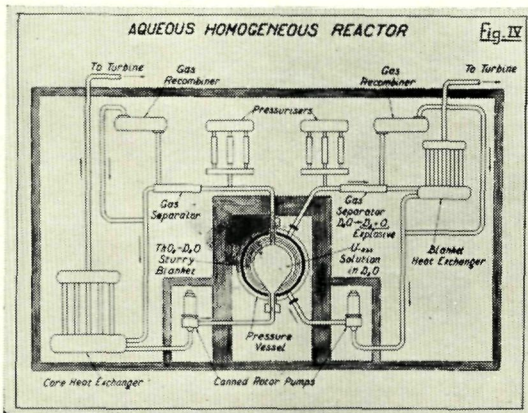
Pour finir cette description, nous voulons encore dire quelques mots sur le premier réacteur belge. Il est construit à Mol.

Il est du type expérimental, avec une puissance de 2 à 3.000 KW. Le combustible est l'Uranium naturel. Le modérateur est du graphite très pur, en forme de briques de construction embriquées, parmi lesquelles on laisse des canaux pour l'Uranium et le Cadmium.

Le réglage se fait par deux séries de tiges de Cadmium. Le refroidissement se fait par l'air, étant donné que la chaleur produite n'est pas utilisée. Après usage, cet air est radioactif. C'est pourquoi il est filtré et mélangé d'air frais avant d'être évacué par les cheminées.

L'écran est en béton de 2,10 m d'épaisseur.





Les ouvertures pour le remplacement des différentes tiges sont fermées normalement par des bouchons en béton.

4. APPLICATION DE L'ENERGIE NUCLEAIRE A LA PROPULSION DES NAVIRES

La première application a été faite sur le sousmarin américain *Nautilus*. D'abord quelques indications relatives à ce navire : Longueur : 97,5 m; Creux : 7 m (estimé); Déplacement : 2.500 tonnes en surface; 3.180 tonnes en plongée; Vitesse : 20 nœuds sous eau; Puissance : 25 à 30.000 CVE (estimée); Poids du réacteur : 300 à 350 tonnes (estimé) dans l'hypothèse d'un écran en plomb; Prix : 2.000.000.000 Fr.b.; Prix de l'installation des machines : 1.250.000.000 Fr.b.

Arrêtons-nous un moment à ces indications.

La Atomic Energy Corporation a fait l'étude de la propulsion nucléaire pour un cargo type C4 (19.250 CV - 20 nœuds).

Le tableau ci-dessous donne quelques-unes des propositions (d'après Ricart) « Journal de la Marine Marchande ».

Firme	Combustible	Modérateur	Refroidissement	Température de refroidissement		Réacteur		T° vapeur
				entrée	sortie	Ø	H	
Commonwealth	U nat.	D ₂ O	D ₂ O	200°	226°	6 m sous-pression 56 kg/cm ²	6 m	188°
Edison, Public Service	U enrichi	D ₂ O	H ₂ O	187°	226°	3 m 66	12 m	187°
Pacific Gas & Electric C°	U nat.	D ₂ O	H ₂ O	195°	260°	?	?	192°
Monsarto Electric C°	U enrichi »	C »	Na »	150° 150°	345° 482°	10 m 65 »	6 m 10 »	182° 396°
Pacific Gas & Electric C°	U très riche	—	Na	315°	482°	0,92	0,92	399°

Le prix prévu s'élève à 300.000.000 Fr.b. dans son exécution la plus simple. Le prix d'une installation normale de production de vapeur pour un navire identique serait approximativement 20.000.000 Fr.b.

Aux *Etats-Unis* le Congrès vient d'autoriser la mise en étude et en fabrication d'un cargo mixte de propulsion nucléaire. Le navire aura un DW de 12.000 T et prendra en outre 100 passagers. La puissance est de 22.000 CV à 21 nœuds. Les frais d'études, d'essais et de fabrication du réacteur sont estimés à 1.250.000.000 Fr.b. Le navire serait achevé vers 1960.

En *Norvège* l'étude d'un pétrolier de 32.000 TDW, 18 nœuds, a été faite. Le rapport conclut à la possibilité de concurrencer les moyens de propulsion classique dans certaines circonstances.

Une étude *allemande*, publiée dans le « Jahrbuch der Schiffbau-technischen Gesellschaft », tire les conclusions suivantes pour un pétrolier de 22.000 TDW, 10.000 CV :

- a) le rendement d'une installation complète est 0,221 contre 0,253 pour une installation à vapeur classique;
- b) une installation normale (combustible compris) pèse environ 1.300 tonnes de plus que l'installation nucléaire;
- c) l'encombrement tourne légèrement à l'avantage des installations classiques (soutes à huile non comprises);
- d) espace de temps entre deux renouvellements de la charge d'Uranium : 2 à 3 ans.

L'*U.R.S.S.* a entamé la construction d'un brise glace de 16.000 tonnes de déplacement, 40.000 CV, 18 nœuds. Le réacteur aurait une puissance de 200 MW, dont 60 MW pour la propulsion et le restant pour la production de vapeur de fusion des glaces. Environ 80 kg (?) d'Uranium très enrichi lui permettraient de naviguer pendant un an sans réapprovisionnement.

Toutes ces études se limitent à la théorie; l'expérience décidera si les dangers et les difficultés comme : encombrement plus élevé — danger des rayonnements — danger en cas de collision et celui d'un navire coulant dans un port — difficultés et dangers de réparation en cas de fuite au circuit primaire — procédés compliqués de renouvellement de la charge d'Uranium — prix coûtant élevé, vaudront les avantages principaux : restriction de volume et de poids du combustible — rayon d'action quasi illimité — assiette fixe, donc suppression des transferts du ballast d'eau de mer — suppression du chargement des soutes — possibilité de plus grandes puissances et donc vitesses.

Il apparaît que bien de changements devront encore avoir lieu avant qu'il soit possible d'employer l'énergie nucléaire économiquement et sans danger sur les navires marchands.

5. RESERVE MONDIALE EN ENERGIE MINERALE

Les hommes disposent de différentes sources naturelles d'énergie : chaleur solaire, vent, marées, chutes d'eau, différence de températures dans les océans et dans l'écorce terrestre et éventuellement l'électricité statique de l'éclair. Celles-ci existeront probablement aussi longtemps que les hommes mêmes. Notre civilisation pourtant n'a pas généralisé l'emploi de ces sources exception faite peut-être des chutes d'eau.

Elle s'est jetée sur les sources d'énergie souterraines qui se trouvent dans les différents minerais combustibles (charbon, pétrole, gaz souterrains, en d'autres mots, chaleur solaire emmagasinée). La cause se trouve dans le fait que ces sources d'énergie sont faciles à transporter et qu'elles se présentent sous une forme concentrée.

Posons la question : quels appareils exigent une source d'énergie complètement indépendante ? La conclusion est facile : seulement les navires et les avions. On ne voit en effet pas bien comment un de ces engins pourrait être alimenté en électricité au moyen d'un fil.

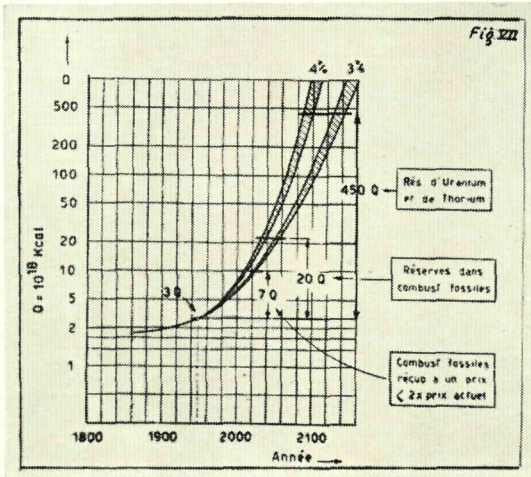
Nous verrons tout de suite que cette dernière catégorie de sources d'énergie, donc les combustibles, est près d'être épuisée.

Par conséquent, et vue à longue échéance, l'utilisation du combustible nucléaire dans des réacteurs destinés aux centrales électriques constitue un gaspillage que nos arrières petits-enfants nous reprocheront peut-être. Mieux vaut ne pas parler de l'utilisation de ces précieux combustibles à des fins guerrières.

Depuis 1860 on possède suffisamment de statistiques sur l'accroissement de la population mondiale et l'augmentation annuelle de la consommation d'énergie mondiale. Ces statistiques permettent de tirer les conclusions suivantes :

Population actuelle : 2.500 millions. Population en 2050 : 5.000 millions.

Augmentation annuelle de la consommation d'énergie : 3 % à 4 %.
Dans ce cas les minerais actuels seraient consommés dans environ 100 années. Les réserves qui devront être employées longtemps avant cette date (exploitation trop onéreuse lorsque la source est près de l'épuisement) reporteront un peu cette date.



L'énergie nucléaire, dont les réserves actuelles sont estimés à 50 fois celles des autres minerais, serait épuisée aux environs des années 2.100 à 2.200, dans la supposition qu'elle serait employée 100 % pour des buts pacifiques.

En ce qui concerne l'avenir de l'humanité, ceci donne à réfléchir. Mais n'oublions pas qu'il existe encore des possibilités énormes dans d'autres sources que celles que nous avons énumérées. D'un autre côté on découvrira certainement de nouvelles réactions avec d'autres corps ou méthodes.

Indiquons seulement l'énergie non maîtrisée jusqu'à présent, des milliers de fois plus grande que celle dont nous nous entretenons ci-dessus et qui naît dans les réactions thermonucléaires dans la synthèse des éléments légers (eau lourde — deuterium, lithium, etc.) en éléments plus lourds, énergie utilisée jusqu'à présent seulement dans la bombe à hydrogène et qui pourra elle aussi, espérons-le, être, comme celle d'Hiroshima, utilisée un jour au bien-être de l'humanité.