

# LA TECHNOLOGIE DES REACTEURS DE PROPULSION NAVALE

par Charles FRIBOURG, Directeur Technique de *Technicatome*



FR0202124

7ND5-FR-1370

## 1. Aspects généraux

### 1.1 Genèse et fondement - Principe de la propulsion nucléaire navale

#### 1.1.1 Les fondements du développement de la propulsion navale nucléaire (Pourquoi y a-t-il des navires - des sous-marins principalement - à propulsion nucléaire ?)

La "fortune" de la propulsion nucléaire navale, première application véritable de l'énergie nucléaire contrôlée, tient à quelques éléments essentiels qui sont à la base de son développement et qui sont présentés ci-après :

- il s'agit d'une source d'énergie **anaérobie** (on pourra même dire que c'est la seule source capable de fournir une énergie significative en absence de comburant en l'état actuel des techniques),
- elle procure une **autonomie très très grande**, pratiquement infinie en comparaison des besoins des navires,
- elle confère à son propriétaire une totale **indépendance**, aspect majeur du point de vue politique et militaire.

Tableau I - Comparaison des performances de différents modes de propulsion pour sous marins (\*)

MODE DE PROPULSION	ENERGIE	AUTONOMIE	COMMENTAIRE
NUCLÉAIRE	$> 10^8$ kWh	$> 3$ ans à 20 nœuds	Engagement stratégique important et pérenne
DIESEL + BATTERIES	$10^4$ kWh	72 heures à 5 nœuds	Rechargeable en surface assez commodément
AIP (*) "STANDARD"	$5.10^4$ kWh	10 jours à 6 nœuds	Stock d'O <sub>2</sub> liquide Non rechargeable à la mer
AIP "MAXI"	$3.10^5$ kWh	60 jours à 6 nœuds	Stock d'O <sub>2</sub> liquide Non rechargeable à la mer

(\*) AIP Air Independent Propulsion. Il s'agit de systèmes de différents types équipant les sous-marins les plus modernes (piles à combustibles, moteurs Stirling, moteurs diesel "en circuit fermé", moteur thermodynamique, etc.). Ces systèmes ont cependant tous comme mode commun d'utiliser l'oxygène comme comburant stocké sous forme liquide dans des réservoirs de volume variable. L'autonomie en plongée du sous-marin est alors fixée au 1er ordre par le volume des réservoirs qui ne sont pas - en l'état actuel des techniques - rechargeables à la mer.

On pourra également remarquer que le mode de propulsion nucléaire est de très loin le moins cher si on rapporte le coût de possession du système d'armes au nombre de nautiques parcouru en opération (c'est-à-dire, en plongée pour un sous-marin, système d'armes dont la défense principale est la discrétion)<sup>1</sup>.

**Le sous-marin nucléaire est, et reste aujourd'hui encore, le premier et le seul véritable «SOUS-MARIN TOTAL».**

Ceux-ci se regroupent, de façon conventionnelle, en deux types :

- les SNLE : (Sous-marins Nucléaires Lances Engins), SSBN suivant la terminologie anglo-saxonne : il s'agit de "bases de lancement de missiles stratégiques balistiques" sous-marines discrètes et mobiles, indétectables en pratique, généralement de fort tonnage - 8.000 à 16.000 tonnes typiquement - du fait principalement de l'encombrement des missiles,
- les SNA (Sous-marins Nucléaires d'Attaque) : SSN suivant la terminologie anglo-saxonne : il s'agit alors de sous-marins dont la vocation rejoint celle des sous-marins classiques. Ces sous-marins sont généralement de moyen tonnage, supérieur à celui des sous-marins classiques océaniques - 2500 à 6000 tonnes - avec une tendance récente à l'accroissement liée à l'emport d'armes de plus en plus performantes et à la recherche de la discrétion acoustique.

#### 1.1.2 Le principe de la propulsion nucléaire des sous-marins

##### Principe général

Le principe général de la propulsion d'un sous-marin nucléaire est le suivant :

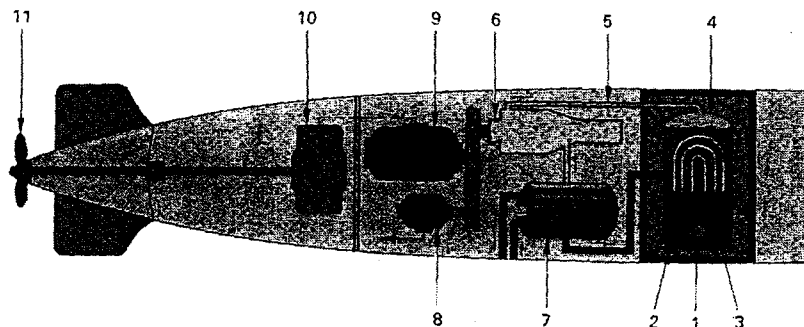
- un réacteur nucléaire (généralement du type à eau sous-pression) alimente en vapeur une turbine ;

<sup>1</sup> Ces propos ne retirent rien à la nécessité qu'il y a, pour tous les acteurs de la propulsion nucléaire -en France notamment- d'en réduire le coût de possession par tous les moyens possibles.

- l'énergie mécanique de la turbine est utilisée pour faire tourner l'arbre d'hélice du sous-marin :
  - soit de façon directe par l'intermédiaire d'un réducteur ; on parle de propulsion turbo-mécanique,
  - soit en passant par l'intermédiaire de l'électricité ; on parle alors de propulsion turbo-électrique (voir fig.1),
- en complément, la vapeur produite par le réacteur fournit l'électricité et l'eau douce du bord.

Comme on peut le voir, c'est très simple et c'est d'ailleurs pour cette raison que cela marche si bien.

**Fig. 1 : Principe d'une propulsion turbo-électrique**



Le combustible nucléaire (1) contenu dans la cuve du réacteur (2) chauffe l'eau primaire (3). Cette eau passe par circulation naturelle dans le générateur de vapeur (4) et permet une vaporisation de l'eau secondaire (5) pour alimenter les turbines (6). L'eau secondaire est refroidie dans le condenseur (7) avant d'être renvoyée dans le générateur de vapeur. Chaque turbine entraîne deux alternateurs (8) et (9). Les alternateurs de propulsion (9) produisent l'électricité nécessaire au moteur électrique principal (10) qui entraîne directement l'hélice (11) - Les alternateurs de force (8) fournissent l'électricité nécessaire aux installations du bord.

La chaufferie nucléaire est confinée dans un compartiment indépendant strictement surveillé et protégé.

## 2. Les programmes français actuels

On présente succinctement dans ce chapitre les programmes de navires à propulsion nucléaire existant actuellement en France. On s'efforcera de faire ressortir pour chaque programme l'enjeu principal qu'il a historiquement représenté pour notre pays tant du point de vue stratégique que du point de vue technique.

### 2.1 Le réacteur à terre CAP (Chaufferie Avancée Prototype), réacteur compact à architecture intégrée

#### 2.1.1 Le contexte de l'époque du lancement du projet

Dès 1966, une réflexion est conduite sur la base de la réussite du PAT (Prototype à Terre - cf exposé « Les RPMP pour la propulsion navale ») avec l'objectif de définir des architectures de réacteurs optimisées pour l'application propulsion navale. Bon nombre d'esquisses papiers sont donc réalisées et comparées, qui tiennent notamment compte de réalisations étrangères comme par exemple le Otto HAHN allemand. Deux architectures générales sont dégagées :

- L'une est plutôt dévolue aux sous-marins ; elle s'appellera "CAP" (Chaufferie Avancée Prototype). Cette architecture générale (l'architecture K), revue et corrigée à plusieurs reprises sur divers points de deuxième rang de conception, a été mise en oeuvre sur toutes les réalisations ultérieures;
- L'autre est plutôt dévolue aux navires de surface ; elle s'appellera "CAS" (Chaufferie Avancée de Série). Proposée à plusieurs reprises pour l'équipement de différents types de navires (Porte-Hélicoptères dit PH75, Corvette nucléaire C75, Brise-Glaces destiné aux garde-côtes canadiens, etc.), cette architecture n'a jamais fait l'objet d'une réalisation.

Ces architectures séduisantes sont suffisamment révolutionnaires pour nécessiter la réalisation d'un réacteur prototype afin de valider les concepts proposés.

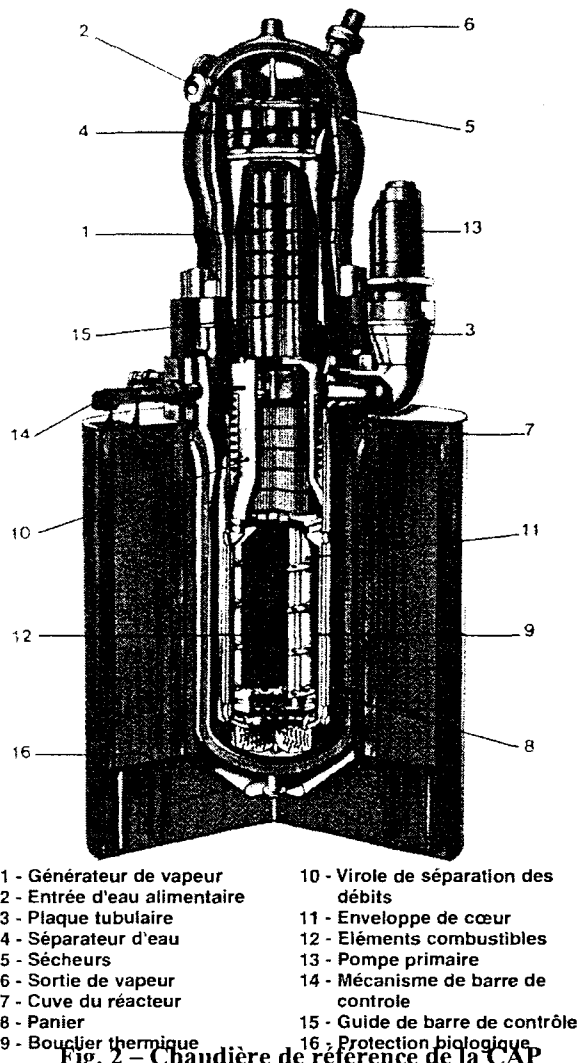


Fig. 2 - Chaudière de référence de la CAP

## Les objectifs majeurs du projet CAP (fig. 2)

Il s'agit principalement de démontrer la maîtrise de l'architecture intégrée et d'en confirmer les avantages attendus :

- réduction importante de la masse de protection,
- capacité de fonctionnement en circulation naturelle du fluide primaire jusqu'à une puissance significative,
- amélioration du rythme de construction et de la qualité de la réalisation du circuit primaire qui ne comporte plus de soudure importante réalisée sur site.

### 2.1.2 Les principales avancées technologiques de la CAP

La conception de la CAP est marquée par une très forte évolution technologique par rapport au PAT :

- la démonstration de la capacité de fonctionnement en circulation naturelle du fluide primaire jusqu'à une puissance significative du fait du dessin général,
- corrélativement, la mise au point d'un système d'alimentation électrique des pompes primaires qui leur confère une inertie au démarrage et en ralentissement,
- un gain très sensible en matière de protection secondaire par rapport au concept à boucles puisque les écrans vis-à-vis de l'azote 16 se trouvent ipso facto confondus avec les parois épaisses de la cuve et du générateur de vapeur,
- un "plus" au plan sûreté que représente la suppression des boucles puisque leur rupture n'est plus à considérer dans l'analyse à faire,
- la conception du générateur de vapeur est complètement revue. L'encombrement en hauteur est réduit au minimum,
- la conception des internes cuves est nettement plus complexe que dans le cas du concept à boucles. Ceci concerne, entre autres, les mécanismes de manœuvre des absorbants qui se révèlent de conception assez laborieuse,
- le contrôle commande fait l'objet d'une refonte complète,

- l'enceinte de pression du réacteur est du type à suppression de pression" par barbotage forcé de la vapeur chaude issue du GV ou de la cuve dans une réserve d'eau froide.
- Au bilan, la CAP aura été un préalable absolument indispensable dans le développement de la filière des réacteurs compacts à architecture intégrée. A l'issue de quelques mois de fonctionnement, la conviction du bien-fondé des principaux choix faits en matière de concept général est acquise.

## 2.2 Le programme SNA type RUBIS / AMÉTHYSTE (fig. 3)

### 2.2.1 Le contexte de l'époque du lancement du programme

Au moment du lancement du programme, vers 1970, la Marine Nationale envisage de remplacer une vingtaine de ses sous-marins classiques vieillissants de type NARVAL et ARETHUSE. Les tenants de la propulsion nucléaire font alors valoir que pour un coût très inférieur à ce programme on peut équiper la France d'une flotte de 6 sous-marins à propulsion nucléaire aux performances opérationnelles incomparablement supérieures.

Au bilan, les capacités opérationnelles des SNA type RUBIS peuvent largement se comparer à celles des sous-marins nucléaires d'attaque anglais, russes et américains d'un tonnage de 2 à 3 fois supérieur. Les missions qu'on peut leur confier sont de même nature, alors que ces missions sont complètement hors de portée d'un sous-marin à propulsion classique. La Marine Nationale fait désormais "partie du club" des marines disposant du capital ship": le sous-marin d'attaque à propulsion nucléaire ».

### 2.2.2 Les objectifs majeurs du programme RUBIS / AMETHYSTE et le déroulement

L'objectif majeur est de donner à des sous-marins de faible tonnage (donc de coût modéré) les capacités de supériorité opérationnelle que procure la propulsion nucléaire<sup>2</sup>.

### 2.2.3 Les principales avancées technologiques du programme RUBIS / AMETHYSTE

Le programme de chaufferie est marqué par une très forte évolution technologique par rapport aux réalisations antérieures qui, associée à l'exiguïté du compartiment chaufferie, représente un joli tour de force. Le réacteur est d'une simplicité remarquable, sans égale à ce jour. Ce qui entre autres rend son exploitation très aisée.

L'architecture intégrée procure :

<sup>2</sup> Les SNA Français sont aujourd'hui encore, plus de 20 ans après leur conception, les plus petits SM océaniques à propulsion nucléaire (et donc les moins chers).

- la capacité d'intégration dans un diamètre de coque réduit,
- une facilité de construction sur site comparativement à l'architecture à boucles,
- un gain de masse de protection très important,
- la capacité de fonctionnement en circulation naturelle jusqu'à bonne allure.

L'organisation du confinement originale concilie judicieusement les préoccupations de sécurité plongée avec les exigences de la sûreté nucléaire.

La propulsion turbo-électrique préfigure les solutions d'avenir.

## **2.3 Le programme K15 un réacteur de technologie commune au SNLE type LE TRIOMPHANT et aux portes avions type CHARLES DE GAULLE**

### **2.3.1 Le contexte de l'époque du lancement des programmes LE TRIOMPHANT et CHARLES DE GAULLE**

Au moment du lancement des programmes, au début des années 1980, la Marine Nationale envisage :

- d'une part le remplacement des SNLE de la première génération dont les performances en termes de discrétion acoustique demandent à être améliorées,
- d'autre part le remplacement de ses porte-avions FOCH et CLEMENCEAU qui datent de la fin des années 1950.

L'occasion est bien sûr tentante de "faire d'une pierre deux coups" et Technicatome propose donc le concept de réacteur dit "K15". Il s'agit d'une chaufferie extrapolée des réussites antérieures :

- comportant de nombreuses améliorations,
- capable d'équiper à la fois les SNLE type LE TRIOMPHANT et le PA "Charles de GAULLE",
- avec la recherche de l'identité maximale entre les deux applications qui sont pourtant de nature très différente.

### **2.3.2 Les objectifs majeurs du programme LE TRIOMPHANT et le déroulement**

Les objectifs majeurs du programme Le Triomphant sont liés au maintien de la crédibilité de la force océanique stratégique qui suppose :

- la réalisation de sous-marins extrêmement silencieux capables de rester indétectables malgré les progrès de la détection acoustique sous-marine; idéalement les futurs sous-marins doivent "se confondre dans le bruit propre de la mer",
- la capacité de ces sous-marins à mettre en oeuvre des missiles mer-sol balistiques stratégiques capables de pénétrer les défenses terminales de l'adversaire potentiel, malgré les progrès escomptés de ces défenses,
- en complément l'augmentation de la portée de missiles autorise une extension des zones de patrouille renforçant l'indétectabilité des sous-marins.

Au bilan, le Triomphant a atteint les objectifs assignés au début du programme. Le Téméraire est actuellement en essais. Le Vigilant est en construction. Un quatrième sous-marin est planifié.

### **2.3.3 Les avancées technologiques du programme LE TRIOMPHANT**

**Les niveaux visés en termes de discrétion acoustique (vibrations) sont extrêmement élevés.**

La contrainte discrétion acoustique a ainsi conduit par exemple :

- au développement d'auxiliaires tournants extrêmement silencieux (sans rapport avec aucune des machines analogues jamais construites en France),
- à la définition de circuits fluides dans lesquels les vitesses d'écoulement sont réduites d'un facteur pouvant aller jusqu'à 10,
- à définir une alimentation électrique pour la chaufferie nucléaire à partir d'un réseau de base en courant continu, sachant que la plupart des actionneurs chaufferie sont nécessairement alimentés en courant alternatif,
- à la définition de suspensions performantes pour la quasi-totalité des sources de vibrations venant du réacteur,
- à la mise en oeuvre de flexibles élastomères sur la plupart des circuits de la chaufferie.

**La méthodologie de l'analyse et de la démonstration de sûreté a été complètement remise à plat.**

Les importants progrès réalisés en France dans le courant des années 1980 relativement à la méthodologie de l'analyse de sûreté à l'occasion du développement des réacteurs électrogènes ont été appliqués au programme Le Triomphant (Ils ne pouvaient matériellement l'être sur les programmes antérieurs de conception plus ancienne). La démarche d'analyse de sûreté menée pour les réacteurs de propulsion navale est en tous points identique à celle en usage dans le domaine de l'électrogène.

### **2.3.4 Les objectifs majeurs du programme PA CdG et le déroulement du programme (fig.4)**

Faire bénéficier, au moindre coût (du fait de l'identité avec le réacteur des SNLE NG), les porte-avions de l'avantage opérationnel très important que procure la propulsion nucléaire, tel est l'enjeu majeur du programme PACdG. Par comparaison avec les avions conventionnels, on trouve notamment une amélioration très significative de :

- l'autonomie de la propulsion et de la fourniture d'énergie électrique, pratiquement illimitée, sans rapport avec une propulsion classique
- la compacité, avec notamment l'absence de cheminées qui sont encombrantes, complique la conception du pont d'envol, et rend dangereuses les manœuvres d'apportage des avions,
- la masse, considérablement inférieure à celle d'une propulsion classique (8000 tonnes de fioul). La masse et le volume ainsi dégagés sont mis à profit pour augmenter le volume de carburacteur embarqué et permettre au PACdG de ravitailler son escorte;
- la souplesse de manœuvre;
- la fiabilité.

Le PA CHARLES DE GAULLE est actuellement en essais à la mer. Ces essais vont être l'occasion pour la Marine d'évaluer l'outil et d'apprécier ses performances. Prenons le risque de vendre la peau de l'ours avant de l'avoir tué et affirmons à l'avance qu'après une phase de déverminage, pour ce qui concerne la propulsion et la fourniture d'énergie, ces essais seront une réussite ; à savoir que non seulement la source d'énergie nucléaire se révélera commode et fiable, mais elle saura "se faire complètement oublier" pour ne représenter pour le commandement du navire aucune préoccupation de nature à gêner sa mission principale, à savoir la mise en oeuvre d'une aviation de combat dans des contextes opérationnels variés et imprévisibles.

### 2.3.5 Les principales avancées et les enjeux technologiques du programme PACdG

Premier navire de surface à propulsion nucléaire jamais construit en France, le PA CdG a été l'occasion de nombreuses avancées technologiques :

- en matière d'aménagement, contrairement à ce que l'intuition pourrait laisser penser, le porte-avions est plus contraignant que le sous-marin. L'encombrement en hauteur disponible notamment est plus réduit que sur le sous-marin
- alors même que sur le sous-marin, une fois la coque ouverte, l'accès au réacteur est direct, il a fallu pour le porte-avions imaginer un concept de rechargement du combustible entièrement nouveau qui s'effectue pour l'essentiel à l'intérieur du navire,
- l'alimentation en vapeur des catapultes qui s'effectue à partir de la chaudière nucléaire a représenté pour le concepteur du réacteur une contrainte nouvelle, tant du point de vue des caractéristiques de la vapeur (définie pour le service des catapultes) que des sollicitations périodiques d'appel de charge auxquelles est soumis le réacteur nucléaire.

En matière de risque et d'agressions potentielles à considérer, le porte-avions diffère singulièrement du sous-marin :

- emport d'armes et artifices, y compris des armes préstratégiques,
- volume important de carburacteur inflammable,
- vulnérabilité militaire -apparente- d'un bâtiment de très grande taille,
- impact médiatique du déploiement d'un navire « amiral » à propulsion nucléaire.

Le mode d'exploitation d'un porte-avions est singulièrement différent de celui d'un sous-marin et il a fallu s'y adapter :

- le PA CdG est un aéroport flottant avec 2000 personnes à bord dont la plus grande partie est considérée comme "personne du public" au regard de la réglementation sur la radioprotection, alors qu'il y a environ 100 personnes sur un sous-marin, toutes considérées comme "directement affectées aux travaux sous rayonnements" au sens de la réglementation,
- à la différence d'un sous-marin lance engins qui n'a qu'un seul port base et ne fait, sauf exceptions, pas d'escales, le PA CdG peut être déployé loin de son port base durant de très longues périodes de temps. Un déploiement lointain, ou un prépositionnement, de 1 an voire davantage est parfaitement possible.

### 2.4 Le réacteur d'essais à terre "RES"

La pérennité du maintien de la maîtrise de la technologie de la propulsion nucléaire navale suppose l'existence et l'exploitation d'installations à terre représentatives des installations embarquées. C'est la raison pour laquelle a été entreprise une rénovation d'ensemble de ces installations.

#### 2.4.1 Les objectifs majeurs du projet RES

Les objectifs majeurs du projet sont les suivants :

- construire un réacteur d'essais capable de remplir les fonctions ci-après
- disposer d'une piscine de grande capacité, capable de recevoir les combustibles usés déchargés des sous-marins,
- disposer d'une pile d'expériences critiques, permettant la vérification et le recalage des outils de calcul neutronique.

#### Missions du réacteur d'essais:

Irradiation et qualification à terre du combustible : Sur ce point il est important de voir qu'il n'est pas matériellement possible de qualifier le combustible utilisé pour la propulsion navale, en anticipation sur l'usure des cœurs à bord des bâtiments, sauf à disposer d'un réacteur capable de le brûler.

Formation des équipages de conduite des installations embarquées.

Expérimentation de concepts innovants : Sur ce point, outre un assez grand nombre d'amélioration techniques diverses qui ne peuvent trouver leur place dans le présent article, on peut noter la volonté de proposer pour les RES des systèmes d'ultime

secours capables, en situation de perte complète de l'ensemble des moyens normaux et de sécurité dévolus à cette fin, de prévenir l'accident dit "de fusion cœur en pression", et de garantir le non percement de la cuve en cas de formation d'un corium.

La réservation de capacités d'évolution et d'adaptation pour d'éventuels prototypages ainsi que pour d'autres applications ce qui n'est pas le plus facile à réaliser.

#### **2.4.2 Situation actuelle du projet RES**

Les choix principaux actuellement entérinés pour ce projet sont les suivants :

- réacteur à eau sous-pression de conception assez directement dérivée de ceux équipant le PACdG,
- enceinte métallique partiellement immergée dans une piscine de grande taille procurant ainsi une très grande inertie thermique en cas de montée de température et pression dans l'enceinte.

L'échéance calendaire est celle d'une divergence mi-2007, en avance de phase par rapport au programme BARRACUDA que le RES doit préparer.

### **2.5 Le programme "BARRACUDA", sous-marin d'attaque futur**

#### **2.5.1 Les objectifs majeurs du programme BARRACUDA**

Les objectifs majeurs du programme BARRACUDA tels qu'actuellement présentés par la Marine sont les suivants :

Ils'agit de disposer d'une plate-forme sous-marine destinée à remplacer à terme (2010) les actuels SNA type RUBIS/AMETHYSTE. Cette plate-forme doit être polyvalente et aisément configurable et elle doit être au niveau des exigences opérationnelles des années 2020.

En conséquence, les performances de discrétion acoustique des actuels SNA type RUBIS doivent être augmentées et amenées au niveau de celles du Triomphant compte tenu des missions qui sont assez différentes.

Enfin, deux aspects prépondérants concernent la chaufferie nucléaire : le taux de disponibilité global du sous-marin doit être augmenté et le coût doit être réduit (coût de possession, mais aussi coût d'acquisition, ce qui est souvent contradictoire...).

Compte tenu des éléments ci-dessus le futur sous-marin pourrait avoir l'allure suivante :

- tonnage dans la gamme 3000 à 4000 tonnes (rappels: SNA 2300 tonnes, SNLE 9000 tonnes, SNLE NG 14000 tonnes),
- diamètre extérieur de la coque : environ 8,8 m; autorisant un aménagement intérieur optimisé à 3 niveaux,
- vitesse maxi voisine de celle du RUBIS/AMETHYSTE et vitesse tactique (ultra silencieuse) augmentée.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement la chaufferie nucléaire, un bon nombre d'améliorations issues du retour d'expérience de conception réalisation exploitation sont proposées qui :

- procurent des économies réelles et durables en termes de coût de possession et de construction,
- augmentent la disponibilité,
- et améliorent la sûreté.

#### **2.5.2 Choix techniques principaux pour la conception de la chaufferie du BARRACUDA**

##### **2.5.2.1 Options techniques résultant directement du besoin navire**

- Puissance thermique dans la gamme couverte par les programmes antérieurs.
- Discrétion acoustique au niveau requis (capacité de fonctionnement en Circulation Naturelle).
- Consommation prévisionnelle d'énergie sensiblement augmentée par rapport au sous-marin du type RUBIS/AMETHYSTE.

##### **2.5.2.2 Options techniques générales propre à la chaufferie**

- Reconduction du concept de réacteur compact à architecture intégrée.
- Augmentation de l'énergie extractible des cœurs. L'objectif est de parvenir à 10 années d'activité opérationnelle entre rechargements et si possible de rendre l'énergie du cœur dans une certaine mesure "adaptable à la demande".
- Limitation de l'utilisation d'uranium enrichi à teneur élevée ; de façon à réduire les coûts,
- Réduction du délai nécessaire pour le rechargement du combustible (3 mois contre 5 actuellement).
- Organiser une gestion du parc des éléments combustibles incomplètement usés. Le mode de gestion des cœurs de propulsion navale implique de facto une usure incomplète des cœurs en fin de vie puisque le déchargement doit nécessairement intervenir assez longtemps avant la fin de vie du cœur sauf à rendre le navire inapte à remplir une mission décidée inopinément. .
- Amélioration et rationalisation de l'interface homme/machine. Il s'agit d'un thème en pleine évolution dans l'ensemble des techniques. La propulsion nucléaire navale est d'ailleurs relativement en avance sur ce thème puisque le programme K1 5 a été l'occasion de nombreuses avancées dans ce domaine.

##### **2.5.2.3 Options techniques générales relatives à l'amélioration de la sûreté**

On donne ci-après quelques axes de progrès relatifs à la sûreté des installations :

- Prise en compte du retour d'expérience de l'accident de l'EMERAUDE (cf. chap. 3.5.3) ; ceci concerne :

- la technologie des circuits d'eau de mer,
  - le risque vapeur à prendre pleinement en compte (dessin des condenseurs),
  - l'examen systématique des conséquences des isolements des circuits d'eau de mer (isollements intempestifs notamment),
  - la gestion rigoureuse des accès aux locaux à risques.
- Examen des conditions de prise en compte d'un accident grave de fusion cœur au port :
- meilleure gestion de la puissance résiduelle au retour du sous-marin au port,
  - définition de moyens de parade éventuels vis-à-vis d'un accident grave survenant au port.
- Renforcement de la fiabilité de l'alimentation électrique de la chaufferie.
- Définition d'un moyen simple et sûr de réfrigération de l'enceinte post-accident.
- Amélioration de la prévention vis-à-vis des "Corps Migrants".
- Rationalisation de la démonstration de sûreté (réduction du coût de la démonstration).
- Achèvement de l'alignement complet sur les applications électrogènes (pour mémoire car déjà pratiquement réalisé).

### **3. Quelques-uns des problèmes de l'ingénieur concepteur**

On présente ici certains des principaux problèmes techniques à résoudre et les solutions retenues à ce jour en France. Il est cependant parfaitement clair, d'une part que cette présentation est fortement et arbitrairement réductrice du sujet dont l'ampleur est considérable, et d'autre part qu'elle ne donne qu'une vision possible des choses parmi une infinité.

#### **3.1 Les caractères et contraintes spécifiques de la propulsion navale**

Tous les aspects de la conception du réacteur de propulsion navale sont profondément marqués par la spécificité de l'application. On se propose dans ce paragraphe de les rassembler en les positionnant vis-à-vis du réacteur électrogène qui présente des points communs (il s'agit dans les deux cas de réacteurs de puissance) et qui est relativement mieux connu.

##### **3.1.1 L'intégration, l'adaptation et l'imbrication avec le navire**

Par différence avec le réacteur électrogène, qui constitue une entité relativement autonome, le réacteur de propulsion navale n'est qu'un composant d'un ensemble plus vaste, le navire, dont la finalité ne dépend nullement du mode de propulsion choisi.

Le réacteur et ses installations auxiliaires se trouvent intimement mêlés au reste des installations du navire. Ce point se trouve fortement accentué dans le cas des sous-marins où l'économie de moyens et l'exiguïté obligent à confondre de nombreuses installations auxiliaires du navire et du réacteur. Entre autres exemples assez typiques :

- les structures du sous-marin coque et cloisons résistantes à la pression de la mer sont confondues avec les cloisons résistantes nécessaires au confinement du réacteur,
- les équipements du navire susceptibles de constituer des écrans de protection contre les rayonnements vont être mis à profit pour réaliser les protections biologiques (réserves d'eau ou de carburant, blindages, grosses capacités, etc.),
- les réserves d'eau douce du navire dévolues à d'autres usages sont utilisées pour le renoyage du cœur en cas d'accident,
- sur le porte-avions les moyens de lutte incendie du navire sont utilisés pour la réfrigération à long terme de l'enceinte ,
- le hangar d'aviation du porte avion sert également de hall de déchargement rechargement du combustible.

L'architecture du réacteur, son fonctionnement, son mode d'exploitation sont très largement gouvernés par l'intégration et l'adaptation au navire. Les aspects les plus évidents concernent bien sûr l'encombrement et la masse du système, surtout dans le cas des sous-marins, mais ils ne sont pas les seuls. Plus généralement "l'environnement navire" représente une contrainte importante à prendre en compte pour le réacteur qui conduit souvent à des dispositions originales :

- inclinaisons de plate-forme, roulis, tangage,
- accélérations chocs (cas des navires brise-glaces par exemple),
- ambiance marine corrosive,
- agressions de nature variées (explosion d'armes et artifices).

##### **3.1.2 La manœuvrabilité**

Le navire doit pouvoir évoluer de façon suffisamment rapide pour éviter des obstacles ou échapper à une menace. Les ordres de grandeurs sont typiquement les suivants : de 10% à 100% de puissance en 30 secondes à 1 minute.

Dans le cas du PA Charles de GAULLE le catapultage conduit lui aussi à solliciter sévèrement les installations.

Le réacteur doit répondre de façon fiable et sûre à tous ces transitoires de variation de charge.

##### **3.1.3 La disponibilité**

Pour un sous-marin, la perte de la propulsion peut constituer un événement très grave. Dans le cas du porte-avions la récupération des avions nécessite la propulsion.

D'une façon générale on s'attache à faire en sorte qu'une avarie inopinée unique affectant le réacteur et la conversion d'énergie

ne conduise pas à la perte complète de la propulsion. Parmi le grand nombre d'événements à considérer, on peut citer les suivants qui sont assez typiques et très dimensionnants :

- les avaries inopinées du pompage primaire qui ne doivent pas conduire à l'arrêt complet du réacteur,
- la redivergence suite à un arrêt d'urgence survenant inopinément à la mer qui doit être possible à tout moment suivant l'arrêt de réacteur, donc notamment au moment du "pic xénon".

### 3.1.4 Les aspects sûreté

Les aspects sûreté présentent des différences assez importantes avec le réacteur électrogène :

- le terme source du réacteur de propulsion navale est sensiblement plus faible en activité des PF (rapport ~100),
- lorsqu'il est au voisinage des populations le réacteur de propulsion navale est à l'arrêt ou éventuellement en marche à faible puissance. Dans une certaine mesure, il est même possible de l'éloigner délibérément en cas de nécessité.
- la sûreté des installations doit pouvoir être assurée avec les seuls moyens du bord durant un laps de temps suffisant pour qu'on puisse attendre un secours (une durée de 15 jours est généralement admise).

Navire à quai, on peut prévoir un secours complémentaire aux installations embarquées.

Du fait de la contrainte de disponibilité, celle de la sûreté s'exprime de façon assez différente que dans le cas des autres types de réacteurs. Ce qui compte c'est la sûreté de l'ensemble réacteur + navire et non pas celle du seul réacteur nucléaire. La définition du meilleur compromis entre disponibilité et sûreté est l'un de problèmes les plus difficiles à résoudre de la conception du réacteur. Parmi le très grand nombre de compromis à résoudre on peut mentionner les suivants :

- la nécessité de définir une situation "de repli" pour le réacteur autorisant le fonctionnement à puissance éventuellement réduite en cas d'indisponibilité fortuite constatée d'un équipement de sécurité (y compris un absorbant de contrôle),
- la latitude laissée ou non ? à l'équipage d'inhiber certains actions de sécurité lors de situations extrêmes.

### 3.1.5 L'exploitation : conduite et maintenance

#### 3.1.5.1 La conduite

La conduite est nécessairement réalisée par un faible nombre de personnes qu'il n'est matériellement pas possible de remplacer ou de renforcer à court terme si nécessaire. Typiquement, un seul opérateur est dévolu à la conduite du réacteur.

#### 3.1.5.2 La maintenance, l'entretien

La maintenance du réacteur de propulsion navale est largement gouvernée par la maintenance du navire qui impose son cycle d'entretien et son environnement. Le rechargement du combustible représentant pour le bateau une indisponibilité assez longue, il est indispensable que cette opération soit très peu fréquente et la plus rapide et commode possible.

L'exiguïté du compartiment rend plus ardue la résolution des problèmes de maintenance des petits équipement.

Avec le recul que donnent maintenant les 40 années d'existence de la propulsion nucléaire, on peut affirmer que bien avant d'autres préoccupations en termes de performances ou autres, ce sont en fait les problèmes d'exploitation (facilité de conduite, facilité d'entretien, disponibilité moyenne calendaire) qui déterminent le succès ou l'échec d'une conception.

## 3.2 Le choix de la filière les raisons principales du choix de la filière à eau sous pression

Le premier problème historiquement posé au concepteur du réacteur est celui du choix de la filière. Il s'agit là d'un choix fondamental qui a bien sûr largement perdu de son actualité depuis l'adoption quasi-universelle de la filière à eau sous-pression, mais dont il convient de ne pas perdre la justification si on souhaite maîtriser le concept et le faire progresser dans un sens favorable en fonction de l'évolution des exigences du client final. Rappelons donc succinctement quels sont les mérites comparés de la filière à eau sous-pression par rapport aux autres filières envisageables.

### 3.2.1 Le cycle thermodynamique associé à la filière à eau sous-pression

La source froide du cycle est la mer dont la température varie (en pratique) de 4 à 20°C - 12°C en moyenne soit 285°K environ.

Pour une température maximale de 325°C, le rendement est plafonné à  $\cong 50$  %.

Dans l'hypothèse d'une autre filière la source chaude du cycle peut atteindre une valeur plus élevée: 1000 °K voire davantage. Le rendement de CARNOT s'en trouve amélioré.

Toutefois, s'agissant de l'application "propulsion navale", le moindre rendement thermique n'est pas véritablement gênant. En effet :

- le fait que l'énergie primaire (issue des fissions de l'U5) ne soit pas très bien utilisée n'a pas d'importance pratique car de toute façon l'énergie du cœur est très largement supérieure au strict besoin d'autonomie du navire,
- la comparaison à faire ne porte pas uniquement sur le rapport des puissances mécanique/thermique ; il faut également considérer d'autres éléments tels que la masse, l'encombrement ainsi que le coût.

La limitation en rendement thermique représente en fait la seule réelle pénalité de la filière à eau sous-pression par comparaison avec les autres filières envisageables.



### 3.2.2 La souplesse de fonctionnement

Dans le réacteur à eau sous-pression, l'eau présente un assez fort coefficient de dilatation au voisinage des conditions d'emploi. En outre elle est à la fois le caloporteur et le modérateur des neutrons rapides issus des fissions. Dès lors le choix d'une configuration géométrique sous-modérée permet d'obtenir un réacteur auto-stable en fonctionnement vis-à-vis d'une variation de la température de l'eau.

Cette caractéristique fondamentale du réacteur à eau sous-pression est particulièrement intéressante dans le cas de l'application propulsion navale étant donné les variations d'allure importantes et rapides auxquelles va devoir faire face le réacteur. Il s'agit là d'un avantage considérable de la filière qui est à l'origine d'un grand nombre de simplifications de l'installation.

### 3.2.3 La simplicité

C'est probablement l'atout maître de la filière dont la conception est d'une simplicité sans égale :

- les principaux matériaux constitutifs de la chaudière sont bien connus et ne présentent guère de caractéristiques physiques ou chimiques dangereuses aux conditions ordinaires ou d'utilisation (eau, zirconium, oxyde d'uranium, acier, plomb...),
- l'eau est à la fois le réfrigérant et le modérateur du cœur ; l'eau est également le fluide de travail secondaire ; une fuite aux échangeurs n'a donc au 1er ordre que des conséquences modérées,
- l'eau peut être assez aisément produite en quantité à bord d'un navire,
- l'architecture générale du réacteur est également très simple ; le nombre des installations de servitude est limité.

Des éléments de complexité existent bien sûr, ils proviennent pour l'essentiel des points suivants :

- la présence d'enceinte sous forte pression,
- le système de pressurisation qui n'est pas très simple car il doit absorber de grandes variations de volume de l'eau primaire circulante,
- le système de contrôle du cœur est assez compliqué.

### 3.2.4 La radioprotection (donc en fait la masse du système)

Les aspects radioprotection sont évidemment prépondérants pour la propulsion navale. Une protection insuffisante risque de rendre le navire carrément inexploitable. A contrario un excès en sens contraire pénalise le devis de masse du sous-marin.

Sur le sous-marin le problème est aggravé :

- par la durée assez longue des patrouilles durant lesquelles l'équipage est confiné à bord,
- par l'exiguïté du navire,
- par le confinement de l'atmosphère du bord, non aisément renouvelable sauf à faire surface,
- par la nécessité de disposer d'un passage longitudinal avant-arrière praticable en toutes circonstances,
- par l'intérêt que présente la possibilité de pouvoir en cas de nécessité pénétrer dans le compartiment réacteur en marche à faible puissance (le sous-marinier n'aime pas les compartiments inaccessibles en plongée),
- par la nécessité de pouvoir commodément accéder au compartiment réacteur dès lors que le sous-marin est à quai.

Vis-à-vis de ces problèmes, le réacteur à eau sous-pression présente par nature un certain nombre d'avantages ; en effet :

- en marche en puissance à la mer :
  - réacteur modéré thermique, les émissions de neutrons de forte énergie à l'extérieur de la cuve sont limitées. En outre, la nécessité de protéger la cuve contre le flux rapide pousse le concepteur à prévoir un épais bouclier d'acier et une forte épaisseur d'eau entourant le cœur,
  - à la traversée du cœur l'irradiation neutronique de l'oxygène provoque la formation d'azote 16 émetteur d'un gamma très énergétique. Toutefois la période de l'azote 16 est courte (7 s) et il est très possible sans trop déranger l'architecture générale du système de ménager en sortie du cœur une "ligne à retard" provoquant la désintégration partielle de l'azote 16 à l'intérieur même de la cuve soit donc derrière une forte épaisseur d'acier,
  - à l'arrêt, l'essentiel du rayonnement en provenance du réacteur a disparu en moins de 5 minutes.

### 3.2.5 La facilité de conduite et de maintenance

Du fait essentiellement de son caractère autorégulé et de sa simplicité le réacteur à eau sous-pression se trouve très simple à conduire et à entretenir. Il s'agit là aussi d'un élément déterminant.

### 3.2.6 La sûreté

Le domaine de la sûreté se prête mal aux évaluations comparatives ; par exemple les comparaisons économiques n'ont pas sens dans ce domaine. Chaque filière présente des avantages et des inconvénients. Dans le cas du réacteur à eau sous-pression la principale pénalité vient de la présence d'enceintes sous forte pression contenant un fluide fortement énergétique. On peut ajouter que dès lors qu'une bonne partie des réacteurs électrogènes sont de même type, un renforcement de la réflexion sûreté se trouve ainsi "gratuitement" effectué.

### 3.2.7 Les autres filières potentiellement envisageables

#### 3.2.7.1 Remarques préliminaires sur le changement de filière

En l'état actuel du développement de la propulsion nucléaire navale, le changement de filière se pose dans des termes très différents de celui posé à l'origine. En effet :

- à quelques exceptions près le réacteur à eau sous-pression s'est imposé et il comporte lui-même une bonne marge de progrès possible sur de nombreux points,
- la seule motivation pour l'adoption d'une filière autre que l'eau sous-pression de la filière pourrait venir d'une demande d'augmentation considérable des performances en termes de rapports puissance/masse ou puissance/volume,
- un certain nombre de tentatives ont été faites à l'origine par les Américains et plus récemment par les Russes qui permettent de se faire une opinion sur l'intérêt potentiel des filières explorées.

### 3.2.7.2 Les expériences d'emploi d'autres filières (ce qu'on en sait)

**Aux Etats-Unis :** Développé en concurrence avec le NAUTILUS, le SEAWOLF était équipé d'un réacteur refroidi au sodium liquide. Le SEAWOLF a effectivement navigué peu de temps après le NAUTILUS mais il semble que des problèmes soient apparus pour faire fonctionner correctement les surchauffeurs de vapeur. En outre de nombreuses difficultés se sont révélées en entretien. Compte tenu du succès du NAUTILUS la filière a été abandonnée et le SEAWOLF refondu pour être équipé d'un réacteur à eau sous-pression.

**En Russie :** Les Russes ont fait fonctionner avec succès une flotte de 7 sous-marins de la classe ALPHA aux performances impressionnantes. Instruits sans doute par les déboires du SEAWOLF et recherchant la performance, ils ont équipé ces sous-marins d'un réacteur épithermique réfrigéré par l'eutectique Bismuth/Plomb.

L'utilisation d'un métal liquide, dont les performances en termes d'échange thermique sont excellentes, permet de produire une vapeur à une température très élevée, sans nécessiter d'enceinte primaire sous forte pression. L'eutectique Bismuth/Plomb présente par rapport à d'autres métaux liquides les avantages suivants :

- il ne réagit pas chimiquement violemment avec l'eau et l'air (simple formation d'oxydes de Pb et de Bi),
- par rapport au Plomb dont la température de fusion est assez élevée (327,5°C), il est liquide à 125°C,
- le Plomb ne s'active pratiquement pas sous rayonnement.

Compte tenu de leurs performances remarquables en vitesse, en immersion et de leur taille réduite, ces sous-marins sont certainement les plus performants jamais construits. Toutefois un bon nombre de difficultés sont apparues, notamment en entretien<sup>3</sup>.

### 3.2.7.3 Quelles filières pour l'avenir à long terme?

**Les filières métaux liquides :** Avec les sous-marins de la classe ALPHA, les Russes ont montré la voie pour ce type de filière. En tous les cas, les autres métaux liquides qui réagissent violemment avec l'eau et l'air semblent très difficilement praticables à bord d'un navire.

**Les filières à gaz :** Tant pour l'électrogène que pour la propulsion navale, les filières à gaz n'ont pas connu le développement qu'on pouvait théoriquement présager il y a quelques années pour les HTR. On peut penser qu'à long terme il en ira différemment car :

- un gaz est par nature beaucoup plus stable et chimiquement inerte qu'un liquide,
- l'atteinte des hautes températures n'est pas réellement un problème,
- la possibilité d'un cycle direct existe dès lors qu'un combustible parfaitement étanche a été mis au point.

**La filière bouillante :** Quelquefois évoquée, la filière bouillante à cycle direct ne semble pas, de prime abord, très bien adaptée à la propulsion navale du fait d'une instabilité neutronique accentuée par les mouvements de plateforme ; en outre elle n'apporte pas d'avantage déterminant en termes de rendement thermique.

## 3.3 Les choix d'architecture d'ensemble : "à boucles - compactes - intégrées"

### 3.3.1 Présentation

La filière à eau sous-pression étant retenue, se pose pour l'ingénieur concepteur le problème important de l'architecture générale du système.

Un réacteur à eau sous-pression de propulsion navale comprend classiquement :

- une cuve qui contient le cœur nucléaire,
- un système de manœuvre des absorbants de contrôle de la réactivité du cœur,
- un pressuriseur qui peut être à vapeur ou à gaz (il peut cependant se faire que le réacteur soit de type autoprésurisé),
- un ou plusieurs échangeurs/générateurs de vapeur,
- une ou généralement plusieurs pompes primaires,
- une structure de fixation à bord supportage,
- un ensemble d'écrans de protection radiologique,
- un compartiment dans lequel se trouve placé l'ensemble des circuits et constituant l'enceinte de confinement,
- un ensemble de circuits auxiliaires et de servitudes,
- un système de conduite et contrôle commande.

<sup>3</sup> Il est préférable en exploitation de maintenir liquide l'eutectique Bi/Pb, ceci implique une sujétion importante lors du retour à quai des sous-marins de façon à prévenir le gel intempestif de l'eutectique (maintien critique du réacteur ?? ou chauffage d'appoint ??)

Définir l'architecture générale du système consiste à dégager un arrangement général de l'ensemble des constituants ci-dessus. Cet arrangement doit être optimisé pour l'application envisagée et, par exemple, on peut comprendre qu'il diffère suivant qu'il s'agit d'équiper un sous-marin ou un navire brise-glace.

### 3.3.2 Les trois architectures

L'imagination aidant, de nombreux dessins d'architecture possible pour le réacteur de propulsion navale ont historiquement été proposés, et réalisés pour quelques-uns. De façon un peu conventionnelle, il est possible de regrouper ces différentes architectures en trois familles.

#### 3.3.2.1 Les architectures "à boucles"

Dans cette architecture les capacités principales sont mécaniquement indépendantes et fixées rigidement sur la structure support. Elles sont reliées entre elles par des tuyauteries souples (donc relativement minces) qui absorbent les dilatations et qui supportent les pompes primaires. Le pressuriseur est une capacité indépendante reliée à la boucle chaude.

Les mécanismes de manœuvre de contrôle de la réactivité du cœur sont généralement solidaires du couvercle de la cuve.

La plupart des marines ont commencé avec cette architecture qui est celle qui minimise a priori les risques de conception puisque chacun des composants principaux est optimisé de façon indépendante des autres.

Plusieurs inconvénients de l'architecture à boucles ont été cités, parmi lesquels :

- un encombrement conséquent,
- un problème radioprotection important dû notamment à l'azote 16,
- un risque potentiel de rupture des boucles primaires dont la section est grande, dont les soudures résistantes sont réalisées sur site dans des conditions de moindre confort qu'en atelier,
- une résistance hydraulique du circuit assez élevée due à la forte vitesse d'écoulement du fluide dans les boucles.

#### 3.3.2.2 Les architectures "compactes"

Dans ces architectures "compactes" les boucles sont supprimées en tant que telles, ce qui diminue considérablement le poids de la protection radiologique. Des liaisons concentriques rigides relient la cuve aux générateurs de vapeur. La cuve étant fixe, le supportage doit tolérer les déplacements dus aux dilatations.

Les pompes peuvent être implantées "en corne" sur la cuve ou sous les générateurs de vapeur de type à tubes en U, voire éventuellement sur le couvercle de cuve ou le couvercle de GV dans le cas des GV simple-passe.

Le pressuriseur est une capacité indépendante reliée à la cuve en partie chaude (si la pressurisation est à vapeur).

Plusieurs modèles de ce genre ont été étudiés et réalisés, comme par exemple les brise-glaces russes à partir de l'ARTIKA.

En France, on peut signaler les études menées pour le porte-hélicoptères dit PH75 qui était prévu être équipé d'un réacteur unique de cette famille et celles faites à deux reprises successives pour le compte des Canadiens qui avaient lancé une consultation pour un navire brise-glaces à propulsion nucléaire.

#### 3.3.2.3 Les architectures "intégrées"

Dans les architectures intégrées, la cuve, le(s) générateur(s) de vapeur se trouvent rassemblés en un ensemble unique: le "bloc chaudière".

Les pompes primaires peuvent être implantées "en corne" (comme sur le Otto HAHN) ou directement sur la cuve.

Les mécanismes de manœuvre des absorbants de contrôle de la réactivité peuvent être, suivant le type de générateur de vapeur retenu, implantés sur le couvercle de la cuve ou disposés sur la périphérie de la cuve (c'est la conception retenue en France en l'état actuel des choses).

Le pressuriseur est une capacité indépendante reliée au bloc chaudière en partie chaude (si la pressurisation est à vapeur). Toutefois l'architecture intégrée se prête bien au concept de réacteur "auto-pressurisé" dans lequel un simple matelas de vapeur est maintenu à la température chaude du circuit en partie supérieure.

L'architecture intégrée :

- limite le développement du système et réduit ainsi le poids de protection,
- favorise le fonctionnement en circulation naturelle.

Le bloc chaudière peut être entièrement réalisé en atelier et transporté "achevé" pour mise en place sur site de montage final.

Bon nombre de réacteurs de ce genre ont été étudiés ou réalisés :

- Otto HAHN allemand,
- MUTSU japonais,
- Réacteur des OHIO américains.

En France, après un assez grand nombre d'études comparatives – et un nombre au moins égal de tergiversations... – on a conclu à la bonne adaptation du concept intégré à un sous-marin de faible tonnage et a priori cette architecture sera reconduite pour les futurs projets, en s'efforçant malgré la faible latitude apparente laissée par la conception générale ainsi figée, d'y incorporer le maximum d'innovations « de 2ème rang » comme il a été dit plus haut dans le but de réduire le coût de possession.

### 3.4 La sûreté

L'amélioration de la fiabilité et de la sûreté d'un système complexe s'obtient par :

- les simplifications dans la conception du système ou des sous-systèmes (faire SIMPLE SIMPLE et encore plus SIMPLE),
- la prise de marges,
- les redondances et la variété des conceptions,
- la recherche de la sûreté intrinsèque et/ou passive,
- quand ce n'est pas possible, la prise en compte de la défaillance des systèmes actifs de parade aux accidents,
- la surveillance de la disponibilité des systèmes actifs de parade aux accidents,
- la capacité des systèmes au test (au cours du fonctionnement) ou (mieux encore) à l'autotest,
- l'élimination des modes communs.

### 3.5 Les avatars et les accidents

Ces accidents nous rappellent que, quelles que puissent être les précautions prises, le sous-marin demeure un système dangereux et le nucléaire une technologie non-pardonnante.

#### 3.5.1 Aux États-Unis

Deux sous-marins à propulsion nucléaire ont été perdus :

- le SNA Thresher en 1963 au cours de ses essais à la suite d'une voie d'eau ayant provoqué l'éclaboussement de tableaux électriques. Le développement assez important des circuits d'eau de mer de réfrigération à bord de ce type de sous-marin au lieu de la mise en oeuvre de circuits d'eau douce basse pression ainsi que la qualité de la réalisation furent mis en cause par la commission d'enquête qui suivit l'accident,
- le SNA Scorpion en 1968 disparaît en Atlantique au large des Açores ; la cause de la perte du sous-marin n'est pas établie de façon certaine mais différents indices font penser à l'explosion intempestive d'une torpille au tube.

#### 3.5.2 En URSS

Quatre pertes de sous-marins sont connues :

- en 1968, le "K 129" équipé d'armes nucléaires coule dans le Pacifique au large de l'île de GUAM, il a été (partiellement ???) renfloué en 1974 par le Glomar Challenger américain,
- en 1986, le "K 21 9" subit une explosion dans un tube de lancement. Le sous-marin parvient à faire surface, une grande partie de l'équipage peut se sauver et être récupéré par un navire américain. Le sous-marin en perdition coule peu de temps après,
- en 1988, un incendie se déclare à bord du "K 278" et se propage à bord. Le sous-marin fait surface permettant à 8 hommes de sortir avant qu'il ne sombre. Deux seulement d'entre eux seront récupérés par les Norvégiens,
- plus récemment, naufrage du KOURSK suite, vraisemblablement, à l'explosion d'une torpille en tube.

Plusieurs incendies se sont déclarés sur différents navires sans conduire à leur perte. Des dizaines de marins y ont cependant laissé leur vie. En outre, plusieurs accidents à caractère nucléaire se sont produits ayant conduit à un endommagement du cœur :

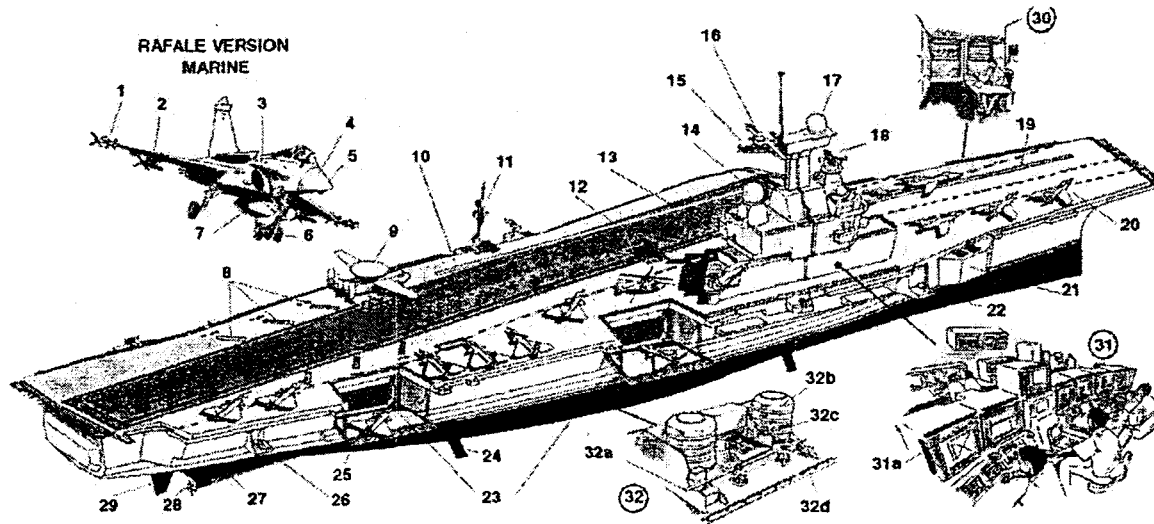
- au moins trois accidents de criticité dont l'un à l'occasion d'un rechargement de combustible,
- deux défauts de réfrigération du cœur en marche en puissance conduisant à un endommagement grave du combustible,
- au moins deux ruptures de canalisations primaires ayant conduit à dénoyage du cœur et à sa destruction partielle.

Aucun des navires en cause n'a été réparé, semble-t-il. Il faut dire cependant que les Russes en possédaient un grand nombre.

#### 3.5.3 En France

En 1994, sur le SNA EMERAUDE en navigation en plongée profonde, une petite entrée d'eau de mer sur le circuit de réfrigération des condenseurs a déclenché une suite d'événements provoquant l'envahissement du compartiment des turbo-alternateurs par la vapeur. Dix personnes présentes dans ce compartiment, normalement inoccupé ont péri.

## Le Porte Avions Nucléaire CHARLES de GAULLE



- |   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| <p>1 - Missile MAGIC-2<br/>                 2 - Missile Mica air-air<br/>                 3 - Empennage "canard"<br/>                 4 - Nez du fuselage contenant l'électronique embarquée<br/>                 5 - Radar à balayage RBE2<br/>                 6 - Roulette avant renforcée<br/>                 7 - Réservoir supplémentaire<br/>                 8 - Brins d'arrêt pour appontage<br/>                 9 - Avion de guet Hawkeye E-2C<br/>                 10 - Catapulte<br/>                 11 - Missile ASTER-15<br/>                 12 - Défecteur de jet<br/>                 13 - Radar de navigation DECCA</p> | <p>14 - Radar tridimensionnel DRBJ 11 B (calcule l'altitude des avions)<br/>                 15 - Détecteur infrarouge DIBV Vampire<br/>                 16 - Radar de veille aérienne et maritime DRBV 15C<br/>                 17 - Radar Arabel (système anti-missile)<br/>                 18 - Radar de veille longue portée DRBV 26-D<br/>                 19 - Catapulte<br/>                 20 - Super-Etendard<br/>                 21 - Silo SAAM<br/>                 2x8 missiles ASTER-15</p> | <p>22 - Système de leurre SAGAIE<br/>                 23 - Hangars aviation (45 000 m<sup>2</sup>)<br/>                 24 - Aileron stabilisateur<br/>                 25 - Ascenseur de 36 t<br/>                 26 - Système de leurre SAGAIE<br/>                 27 - Ligne d'arbre<br/>                 28 - Hélice<br/>                 29 - Safran<br/>                 30 - CHAMBRE TYPE<br/>                 Chaque poste d'équipage comprend neuf "bannettes" (couchettes), une télévision, neuf armoires et un local de toilettes</p> | <p>31 - SALLE DE CONTROLE DU SYSTEME D'ARMES<br/>                 90 personnes<br/>                 17 consoles<br/>                 31a - Console SENIT-8<br/>                 32 - BLOC CHAUDIERE<br/>                 32a - Ligne d'arbre tribord<br/>                 32b - Enceinte de confinement du réacteur (diamètre, 10 m, hauteur 10 m)<br/>                 32c - Stockage de sécurité du matériel faiblement irradié<br/>                 32d - Caisson de protection renforcée contre les missiles</p> |
|---|---|--|--|

## Sous marin nucléaire d'attaque type RUBIS

