

# LA CONTRIBUTION DU CORPS DE L'ARMEMENT A LA MAITRISE FRANCAISE DE LA PROPULSION NUCLEAIRE DES NAVIRES

## 1 LA SITUATION DE LA PROPULSION NUCLEAIRE EN FRANCE EN 2018

### 1.1 L'ETAT DES LIEUX NATIONAL

Dans la France de 2018 la propulsion nucléaire est une technique acquise ; voire même souvent considérée comme banale, utilisable en comparaison/concurrence ou complément d'autres moyens pour apporter de l'énergie aux navires dont notamment aux sous marins.

- La conception système est complètement maîtrisée
- Les technologies nécessaires à la construction/exploitation des réacteurs et systèmes de conversion d'énergie correspondants sont entièrement disponibles dans le pays

Au bilan ;

- 20 réacteurs de 4 types différents ont été construits et exploités
- 8 réacteurs dont 2 réacteurs à terre sont à l'arrêt définitif à différents stades de démantèlement
- 12 réacteurs sont en exploitation sur 3 modèles de navires différents
- cette flotte représente au total près de 400 années réacteurs d'expérience acquise
- 3 réacteurs de 2 types différents sont en construction à différents stades d'avancement dont 2 à échéance de 1ère divergence proche (2019)
- .6 réacteurs de 2 types différents sont planifiés de construction pour 2 types de navires

Au-delà du nombre non évaluable d'erreurs ou des fausses pistes suivies inéluctables dans une entreprise de ce genre on doit ;

- relever quelques déboires sérieux
  - Rupture d'un tube de générateur de vapeur sur l'un des réacteurs à terre mettant en œuvre un matériau inadapté non utilisé sur les installations embarquées
  - Erreur de conception de l'alimentation en eau d'un générateur de vapeur constatée lors des essais à la mer du SNA RUBIS rapidement corrigée.
- déplorer un accident grave ayant malheureusement conduit au décès de 10 marins en patrouille sur le SNA EMERAUDE ; les équipements défectueux ayant conduit à l'accident ne font pas partie du périmètre du réacteur strictement dit.

### 1.2 LES EQUIPES D'INGENIERIE FRANCAISES

Les équipes françaises en charge de la conception réalisation des installations nouvelles et du soutien à la flotte en service sont à même de proposer des solutions crédibles et nationales à tout type de projet de navire.

Leurs mérites sont à souligner car par différence avec leur aînées évoquées dans la suite de cet article

- aucun droit à l'erreur ne leur est toléré par la communauté nationale,
- la réduction des coûts est un objectif permanent, ceci sans disposer d'un nombre suffisants de projets et de repères comparatifs qui permettraient de s'étalonner
- la sûreté réelle des installations doit progresser, elle doit tenir compte du retour d'expérience de l'intégralité des installations nucléaires toutes applications confondues dont notamment celui des installations électrogènes comme par exemple les renforcements de sûreté réels et les compléments d'analyse de sûreté menés en France suite aux accidents de Three Miles Island ou Fukushima
- la démonstration formelle et préalable de sûreté s'effectue dans des conditions toujours plus lourdes et contraignantes
- en dépit de ce contexte défavorable un devoir d'innovation s'impose à elles qui permet de relever l'ensemble des défis de la meilleure façon

### 1.3 COMPARAISON AVEC LES MARINES ET RANGÉES

Le club des marines «nucléaires» demeure d'accès restreint, puisque au-delà des membres fondateurs ou permanents que sont les marines russe et américaine ;

- les marines anglaise et chinoise sont dans une situation comparable à notre Marine française
- les marines indienne et brésilienne débutent ou sont sur le point d'accéder
- les autres marines en rêvent avec envie

## 2 HISTORIQUE RESUME DES PROJETS

### 2.1 LES PREMIERS TATONNEMENTS NATIONAUX - LE PROJET Q244

La France se lance dans l'aventure de la propulsion nucléaire des sous-marins au milieu des années 1950<sup>1</sup>. Un projet de sous-marin est rapidement dégagé avec une planification de réalisation tendue qui, l'enthousiasme aidant, ne prévoit pas de prototype pour la partie réacteur.

Malgré le fort tonnage –très supérieur à ceux de tous les sous-marins antérieurement réalisés en France<sup>2</sup> - les études et la réalisation à Cherbourg de la coque et de la partie classique du sous-marin se déroulent à peu près correctement.

## Le «Q 244», premier sous-marin atomique de la Marine Française, est en chantier

DANS le programme stratégique français figure la construction d'un sous-marin à propulsion atomique. Or, si l'on pouvait se dispenser jusqu'à présent et les Etats-Unis consentaient à aider à la construction de ce bâtiment, le coût n'est plus pour nous un problème. L'administration de Washington vient, en effet, de nous offrir un tel concours à cette aide.

Les travaux de construction de la coque du sous-marin en question sont déjà très avancés en France. Mais on prévoit à Washington que quatre à cinq ans s'écouleront avant qu'il soit en état de prendre la mer, si un accord bilatéral intervient l'an prochain entre Washington et Paris.

La Grande-Bretagne, ainsi, à part, a rejoint les Etats-Unis lorsqu'un réacteur atomique destiné à la propulsion de son premier sous-marin nucléaire, le France sera le premier pays de l'O.C.E.A.N. à bénéficier de l'offre américaine de fourniture de combustible de puissance pour un sous-marin de ce type.

Le premier sous-marin français à propulsion nucléaire est en construction à Cherbourg. Il s'agit du «Q-244», qui mesurera quatre mille tonnes, soit mille tonnes environ de plus que le «Nautilus», la première sous-marin nucléaire construit par les Etats-Unis.

Le Conseil Atlantique de l'Organisation des Nations Unies, en ce qui concerne plus particulièrement la France, elle fut renouée en juillet par M. Foster Dulles au général de Gaulle, au cours de la visite de ce dernier à Paris.

Au début de cette année, à l'occasion du débat au Congrès sur la communication des informations atomiques de caractère militaire, certains parlementaires ont émis des réserves quant à la coopération politique requise alors en France, mais, à la suite des conversations intervenues depuis cette époque, en ce qui concerne la coopération militaire en matière nucléaire, l'entente est devenue plus étroite.



### Un nouveau réacteur atomique près de Hambourg

Le plus important réacteur atomique construit jusqu'ici en République fédérale a été mis en service mardi à Genthofen, près de Hambourg.

Construit en un an et demi, le nouveau réacteur est du type «Thémis». Au cours des prochains mois, il doit être autorisé à produire progressivement une énergie de deux millions de watts. Il sera utilisé pour la production de tritium, ainsi que pour les expériences nécessaires à la mise au point d'un réacteur atomique conçu à un coût de vingt millions de dollars.

Côté réacteur on n'a pu suivre l'exemple américain du réacteur à eau sous pression du Nautilus faute de disposer d'uranium enrichi. La filière retenue par le CEA à uranium naturel modérateur eau lourde présente un bilan de réactivité serré impliquant une conception système complexe<sup>3</sup> et de grosses difficultés technologiques<sup>4</sup> non imaginées au départ du projet. Les retards s'accumulent. En 1957 il est clair que la construction du réacteur ne sera pas au rendez-vous de celle du reste du navire et le projet est abandonné.

De cet échec plusieurs conclusions sont tirées ;

- au plan technique le choix de la filière est erroné ; la filière à eau sous pression uranium enrichi<sup>5</sup> de conception système beaucoup plus simple que la filière à eau lourde s'impose

<sup>1</sup> Les essais à la mer du Nautilus ont lieu en janvier 1955 – Le «lâchage» américain au cours de la crise de Suez intervient en 1956

<sup>2</sup> Y compris le Surcouf

<sup>3</sup> Le circuit primaire d'eau lourde en cuve ménage deux sous circulations, l'une au contact direct du combustible extrait la puissance thermique, l'autre est maintenue plus froide via une réfrigération directe à la mer pour densifier le deutérium et augmenter la modulation. Ce système conduit à des cloisonnements complexes en cuve et à une perte importante en puissance thermique utilisable.

<sup>4</sup> Le réflecteur en glucine rendu nécessaire par le défaut de réactivité, prévu être implanté en périphérie du cœur se révèle très difficile de réalisation.

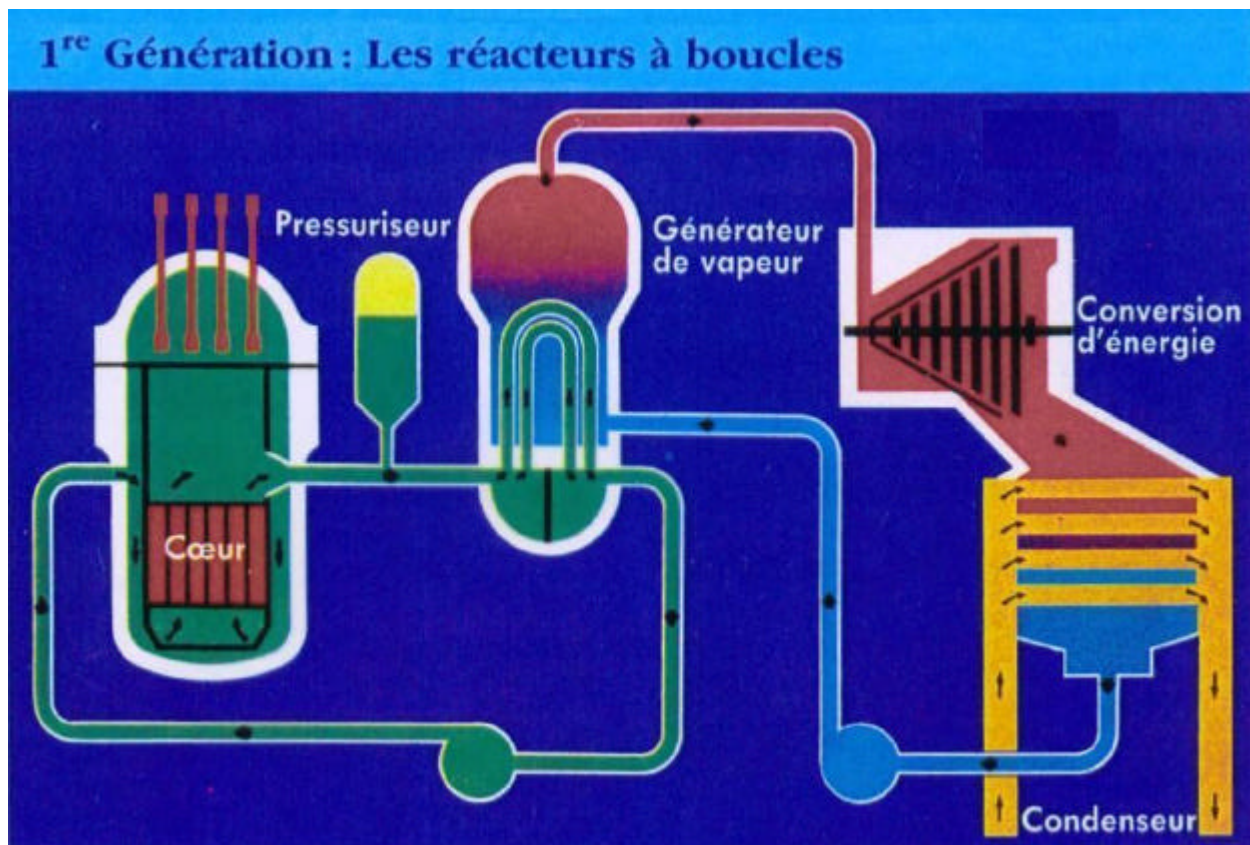
<sup>5</sup> La décision de réalisation de l'arme nucléaire impliquait nécessairement à terme la disponibilité d'uranium enrichi en national

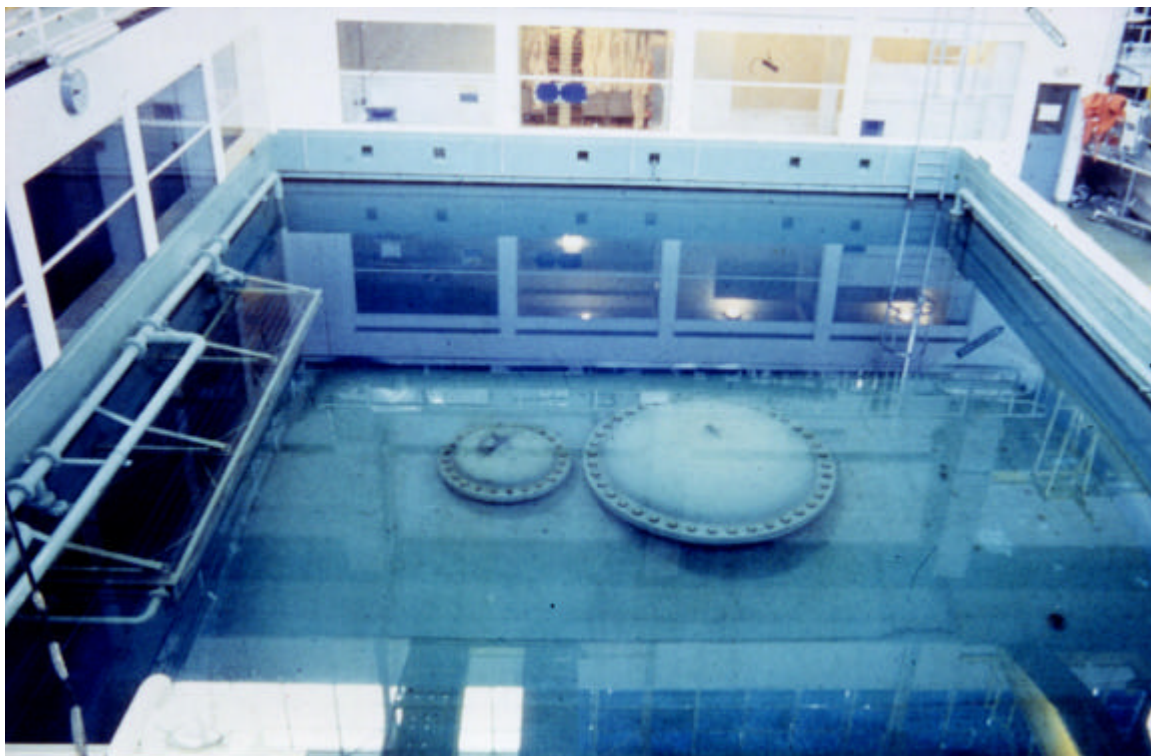
- au plan calendaire la non réalisation d'un prototype à terre de réacteur est illusoire eut égard aux difficultés du projet
- il importe de mettre en place une organisation mieux structurée, confiant au CEA la partie réacteur, associant étroitement les futurs exploitants et donnant la primauté aux ingénieurs des constructions navales

## 2.2 LA MAITRISE DE LA TECHNOLOGIE – LE PROTOTYPE A TERRE DE CADARACHE (PAT) – LES SNLE TYPE LE REDOUTABLE

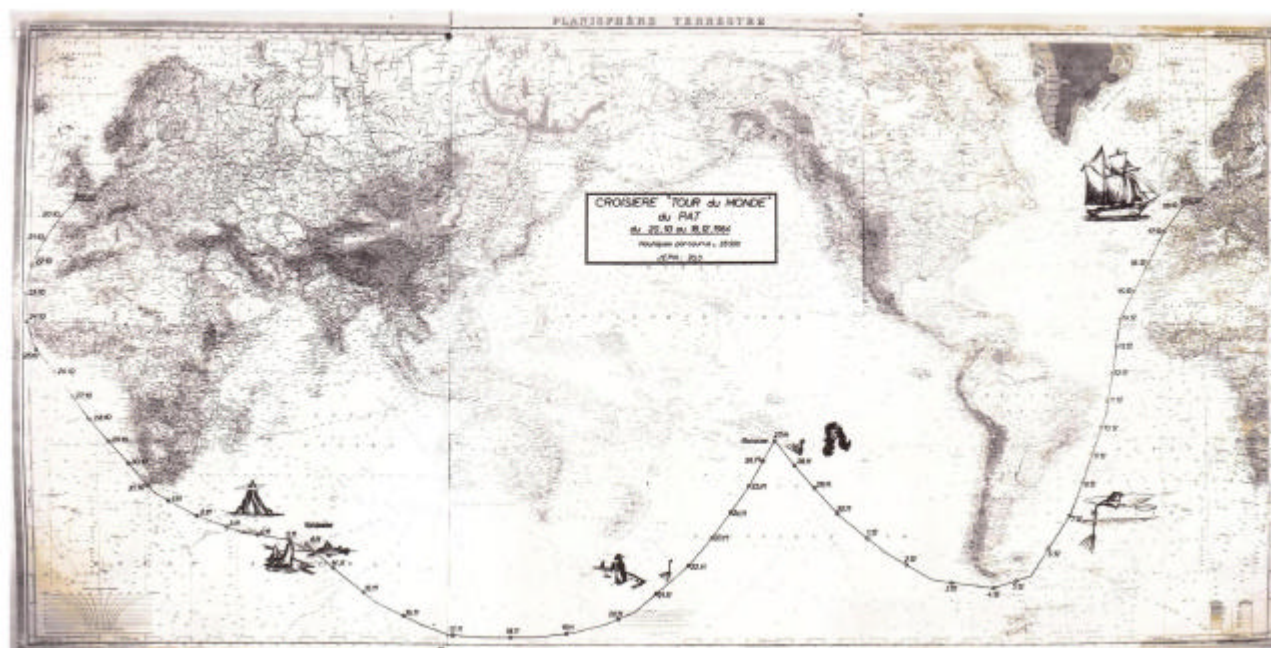
Sous la direction étroite de Jacques CHEVALLIER Ingénieur du Génie Maritime venant de l'établissement d' INDRET et de son adjoint Jean-Louis ANDRIEU, ancien commandant de sous-marin, la même équipe d'ingénieurs qui avait laborieusement étudié le réacteur à eau lourde et s'était trouvée confrontée à de multiples problèmes insolubles d'exploitation et des échecs technologiques répétés conduit avec célérité les études et développements d'un système intrinsèquement beaucoup plus simple. La fourniture par les USA en 1959 d'une charge en uranium enrichi utilisable sur un réacteur à terre permet au CEA sous les directives de Jacques DELAFOSSE de réaliser le combustible destiné au 1<sup>er</sup> cœur du prototype à terre de Cadarache. Les études neutroniques conduites par Roger DELAYRE autorisent la 1<sup>er</sup> divergence en août 1964. Dans la foulée, le PAT fait à l'image du Nautilus le «tour du monde» en deux mois de mi-octobre à mi-décembre 1964 avec escale technique aux Kerguelen et passage à Mururoa. Le chef d'installation à l'époque- dira à plusieurs visiteurs de marque : « Vous voyez, Amiral, cette machine est plus facile à conduire qu'une 2CV »

A l'issue de ce succès la technologie de base du réacteur à eau sous-pression destiné à la propulsion navale est globalement maîtrisée en France.





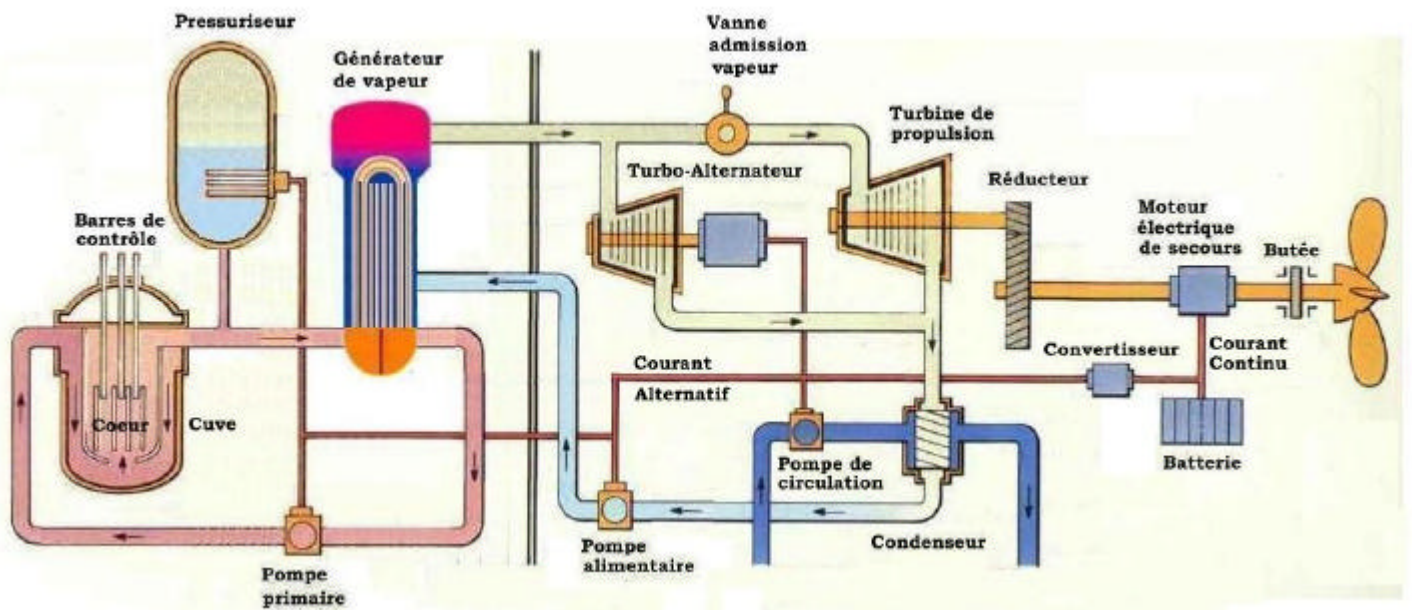
Le réalisme poussé voulu pour le PAT a conduit à l'installer dans un tronçon de coque immergé dans une piscine.



La navigation circum-terrestre du PAT fin 1964

La construction des six sous-marins lance engins (SNLE) type LE REDOUTABLE se déroule à Cherbourg sur une quinzaine d'années. Maurice GRIMAL anime avec autorité l'achèvement du montage et les essais des réacteurs à Cherbourg. A l'île Longue, André MATHE aide l'arsenal de Brest au maintien opérationnel de la flotte de SNLE naissante pour la partie réacteur.

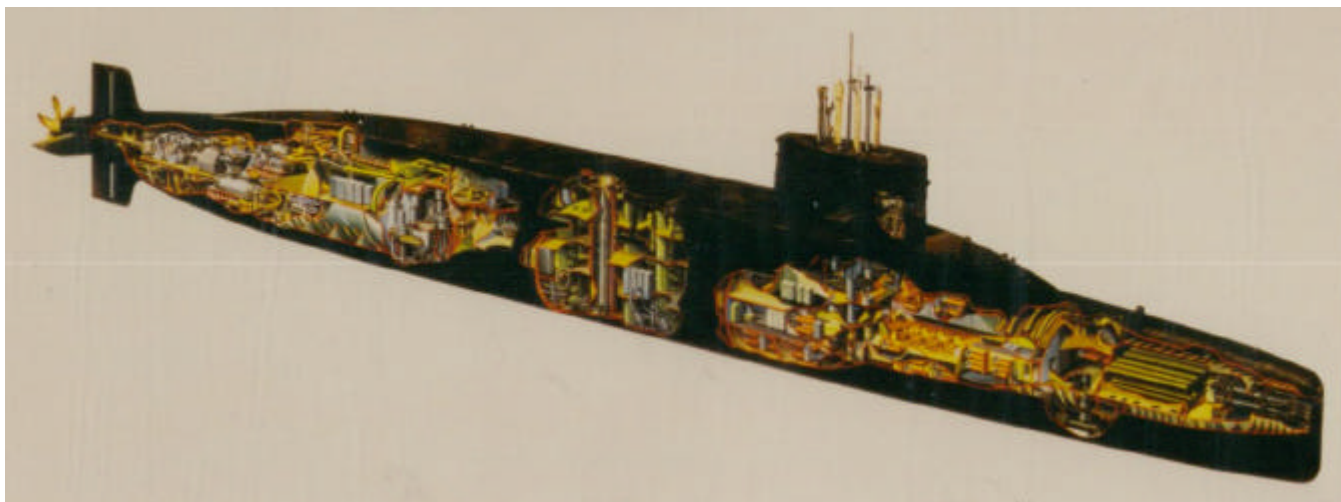
Au cours du programme les cœurs initiaux sont progressivement remplacés par des cœurs à longue durée de vie utilisant un combustible plus robuste



Le principe de la propulsion turbo-mécanique des SNLE type LE REDOUTABLE



La cuve des SNLE type LE REDOUTABLE est embarquée avant le lancement du navire incliné sur ligne de tins



« Ecorché » du SNLE type LE REDOUTABLE



Le tronçon de coque contenant la chaudière du REDOUTABLE est transporté sur son site d'entreposage dans l'arsenal de CHERBOURG en vue de son démantèlement

## 2.3 UNE NOUVELLE GENERATION DE REACTEURS – LES SOUS-MARINS D'ATTAQUE TYPE RUBIS

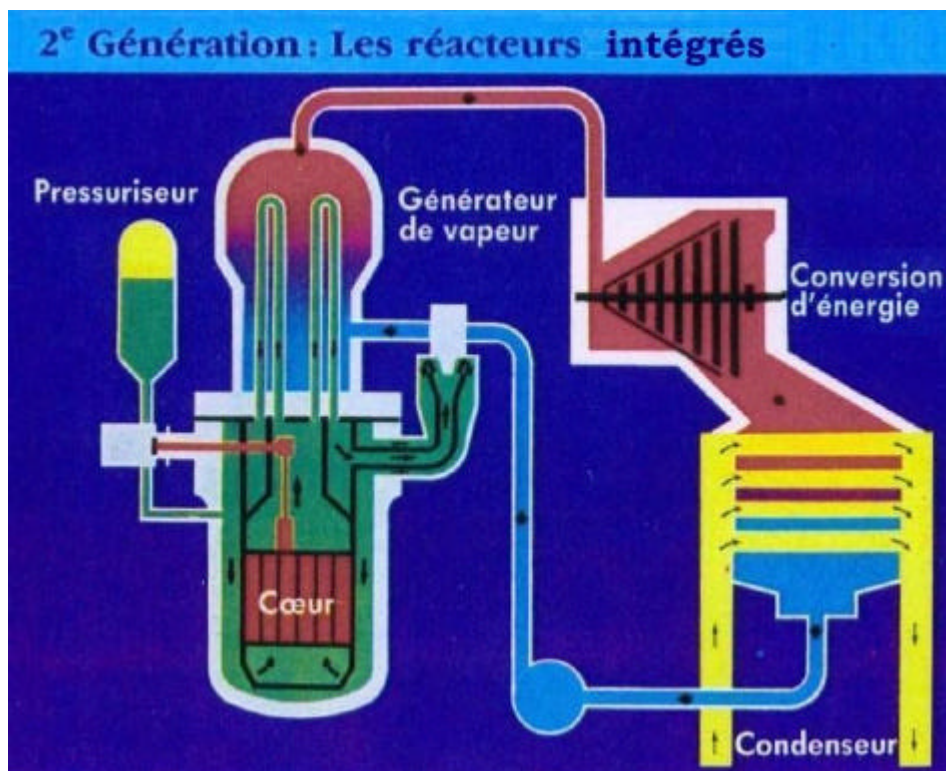
La technologie maîtrisée permet au CEA et à Technicatome sous l'impulsion d'Yves BONNET d'entreprendre une revue importante de la conception des réacteurs de la première génération. Un prototype à terre est réalisé – La Chaufferie Avancée Prototype – CAP que Roger FERRY et Nicolas GAUDITZ s'emploieront à diverger sans retard.

Le nouveau concept, marqué par une volonté constante et délibérée de simplicité maximale ;

- s'aménage dans une coque de diamètre réduit tout en autorisant le passage des personnes
- réduit fortement la masse des protections plombées (rayonnement gamma de l' azote 16)
- divise d'un facteur d'échelle la puissance électrique nécessaire aux pompes primaires<sup>6</sup>
- autorise le fonctionnement en circulation naturelle de l'eau primaire (mue par thermosiphon) jusqu'à un niveau de puissance significatif conférant au navire un bonne manoeuvrabilité<sup>7</sup>

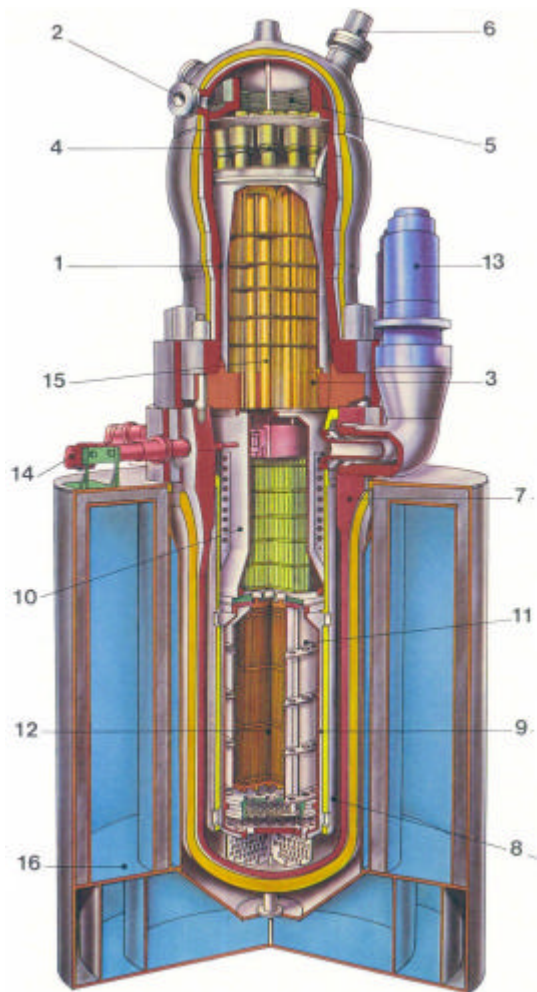
Par ailleurs, grâce aux efforts d'André MOCQUARD et d' Yves BEZARD-FALGAS le personnel de conduite est réduit.

Enfin, le contrôle des cœurs est amélioré via la mise en œuvre d'un nouveau poison consommable



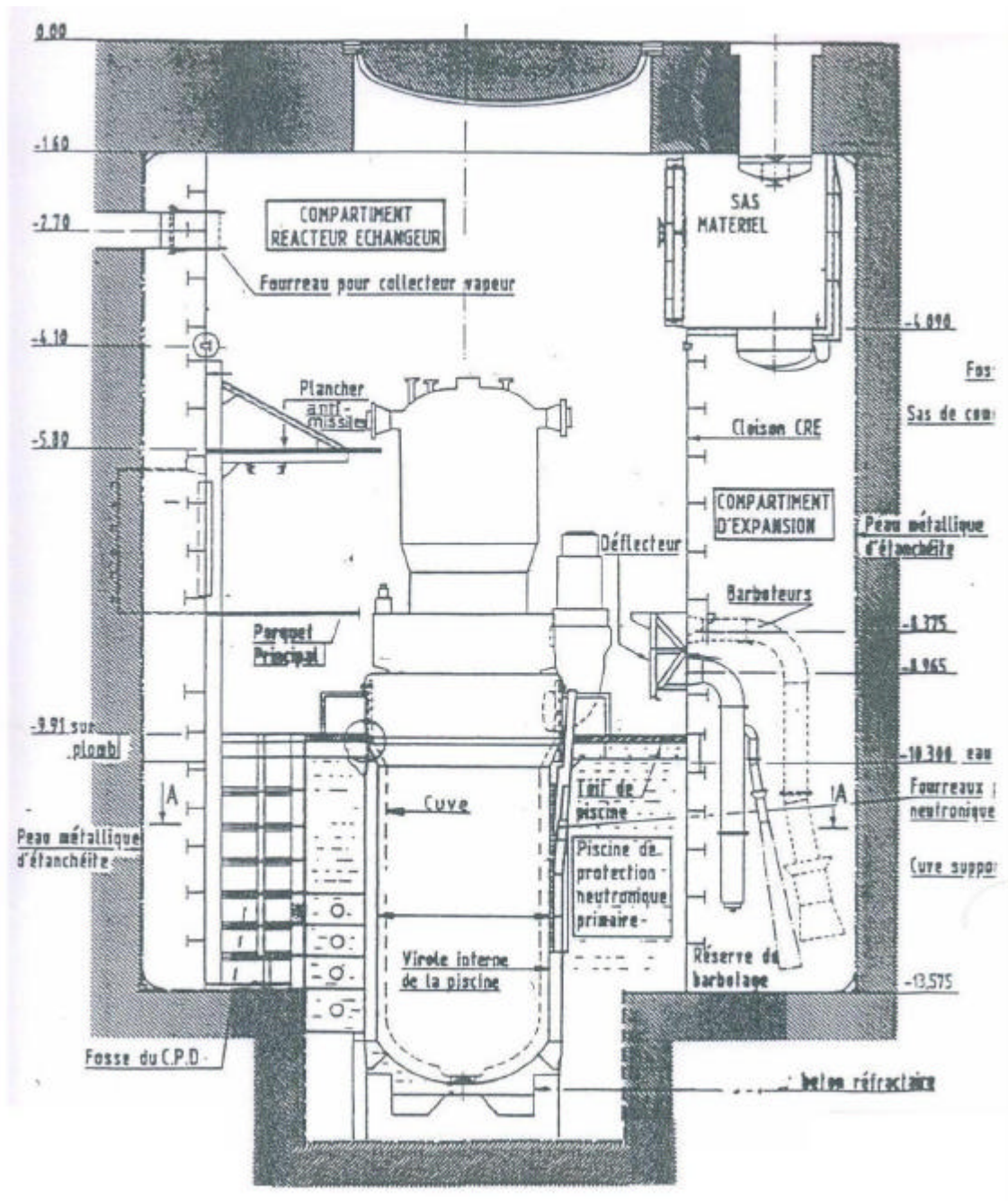
<sup>6</sup> Dans le réacteur à eau sous pression à boucles pour sous-marin, la fixation des grosses capacités que sont la cuve et les générateurs de vapeur ne peuvent aisément comporter de dispositifs tolérants les dilations. Les débouchés sur capacités sont de diamètre modéré. Les boucles sont de faible diamètre et de tracé procurant de la souplesse. La vitesse de l'eau circulante est maximale dans les boucles où se situe la majeure partie de la perte de charge du circuit. L'épaisseur d'acier protégeant du rayonnement gamma émis par l'eau primaire des boucles est réduite.

<sup>7</sup> La puissance résiduelle du cœur post arrêt du réacteur est ainsi évacuable sans le concours des pompes primaires.

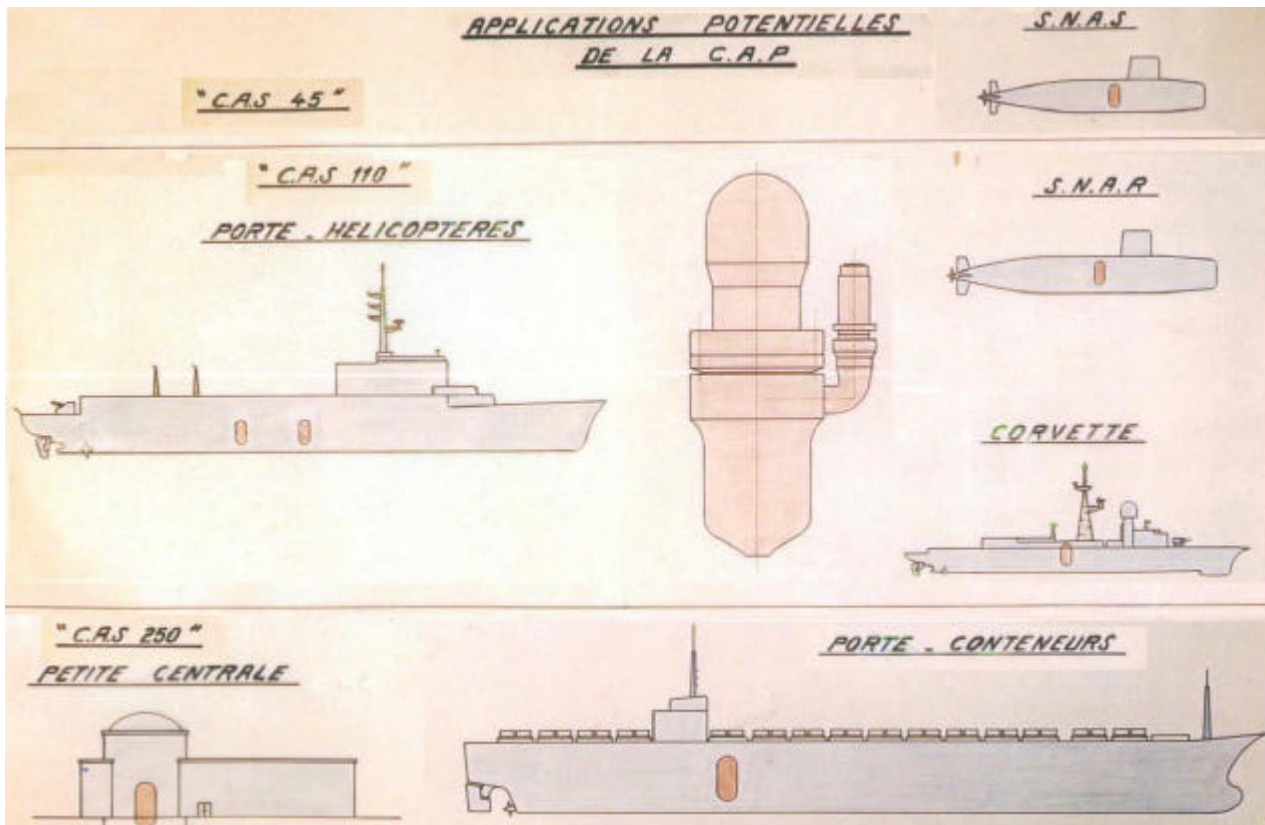


1. Générateur de vapeur.
2. Entrée d'eau alimentaire.
3. Plaque tubulaire.
4. Séparateur d'eau.
5. Sécheurs.
6. Sortie de vapeur.
7. Cuve du réacteur.
8. Panier.
9. Bouclier thermique.
10. Virole de séparation des débits.
11. Enveloppe du cœur.
12. Éléments combustibles.
13. Pompe primaire.
14. Mécanisme de barre de contrôle.
15. Guide de barre de contrôle.
16. Protection biologique.

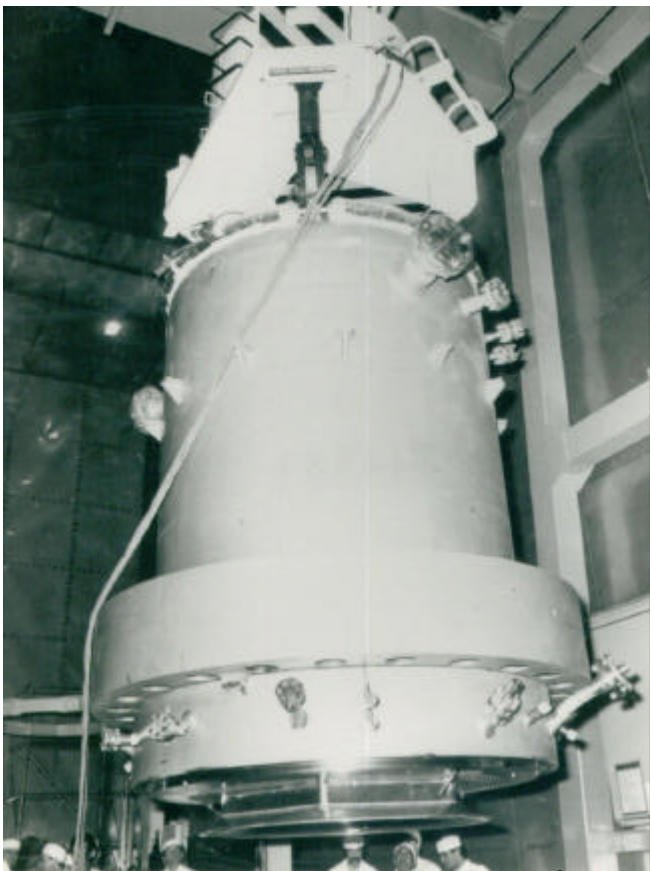




La CAP est implantée dans une enceinte en béton précontraint enterrée. Elle comporte un système de suppression de pression par barbotage de la vapeur et d'un cendrier récupérateur de corium rudimentaire en béton réfractaire



Les applications potentielles de la CAP telles qu'imaginées au début des années 1970

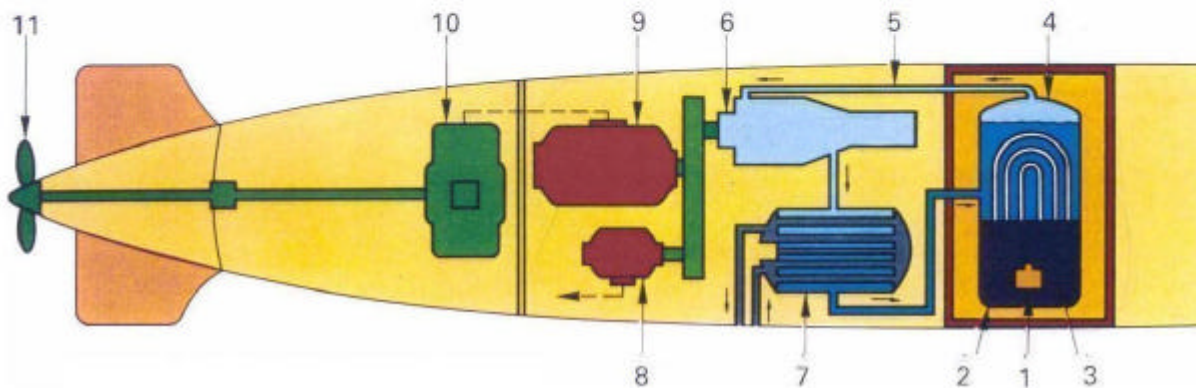


Le générateur de vapeur des SNA type RUBIS<sup>8</sup>.

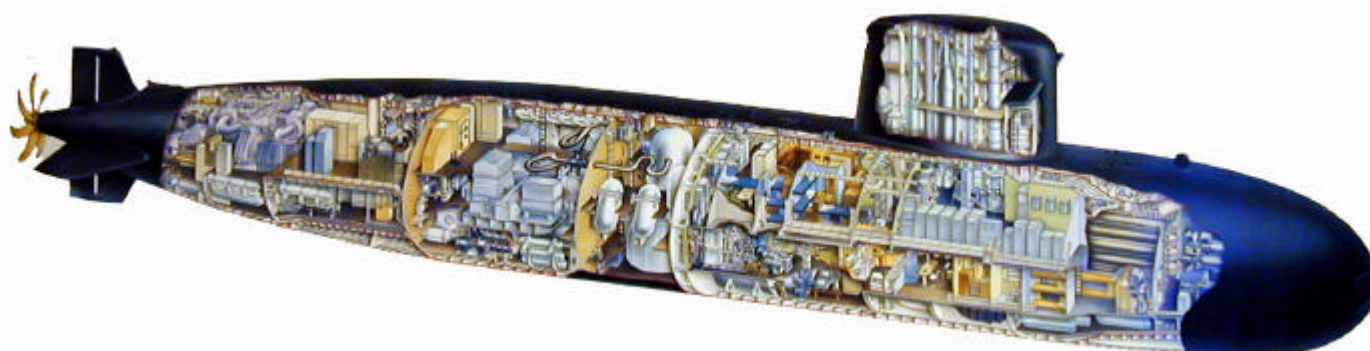
<sup>8</sup>Le retour d'expérience d'exploitation a confirmé l'intuition initiale suivant laquelle le soin mis à la fabrication initiale et la commodité d'inspection compensent la pénalité hypothétique liée à l'unicité du générateur de vapeur. Avec un réacteur à plusieurs GV, le fonctionnement en plongée

Le combustible nucléaire ① contenu dans la cuve du réacteur ② chauffe l'eau primaire ③. Cette eau passe dans le générateur de vapeur ④ et provoque la vaporisation de l'eau secondaire ⑤. La vapeur entraîne les turbines ⑥ en se détendant vers le condenseur ⑦ refroidi par la mer. La vapeur condensée en eau est renvoyée dans le générateur de vapeur. Chaque turbine entraîne deux alter-

nateurs 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.

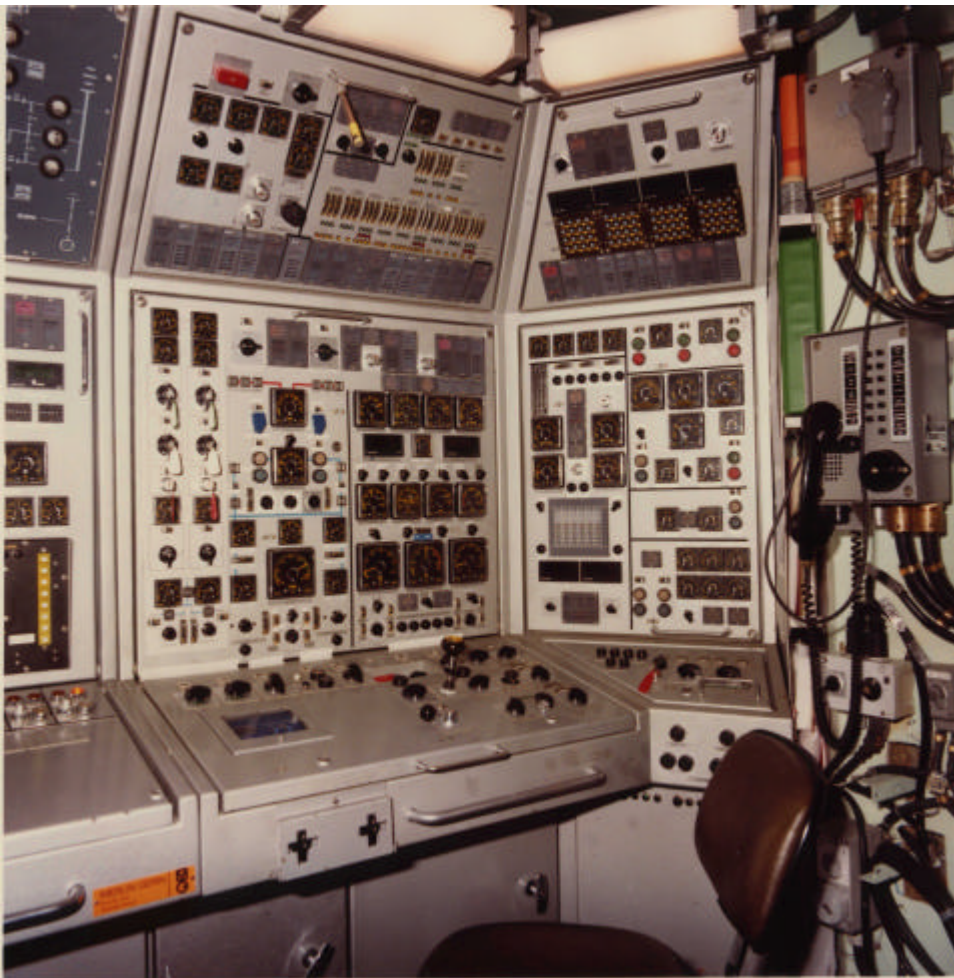


Le principe de la propulsion turbo-électrique des SNA type RUBIS



« Ecorché » des SNA type RUBIS-AMETHYSTE

demeure possible à puissance réduite si un échangeur s'avère fuyard, mais il est inconfortable. Il permet de rallier un port en plongée à allure modérée ; la poursuite jusqu'à son terme de la patrouille reste envisageable en cas de nécessité opérationnelle majeure.



Le pupitre Kr (réacteur) des SNA type RUBIS –signé André MOCQUARD & Yves BEZARD-FALGAS- remarquable de compacité et d'ergonomie

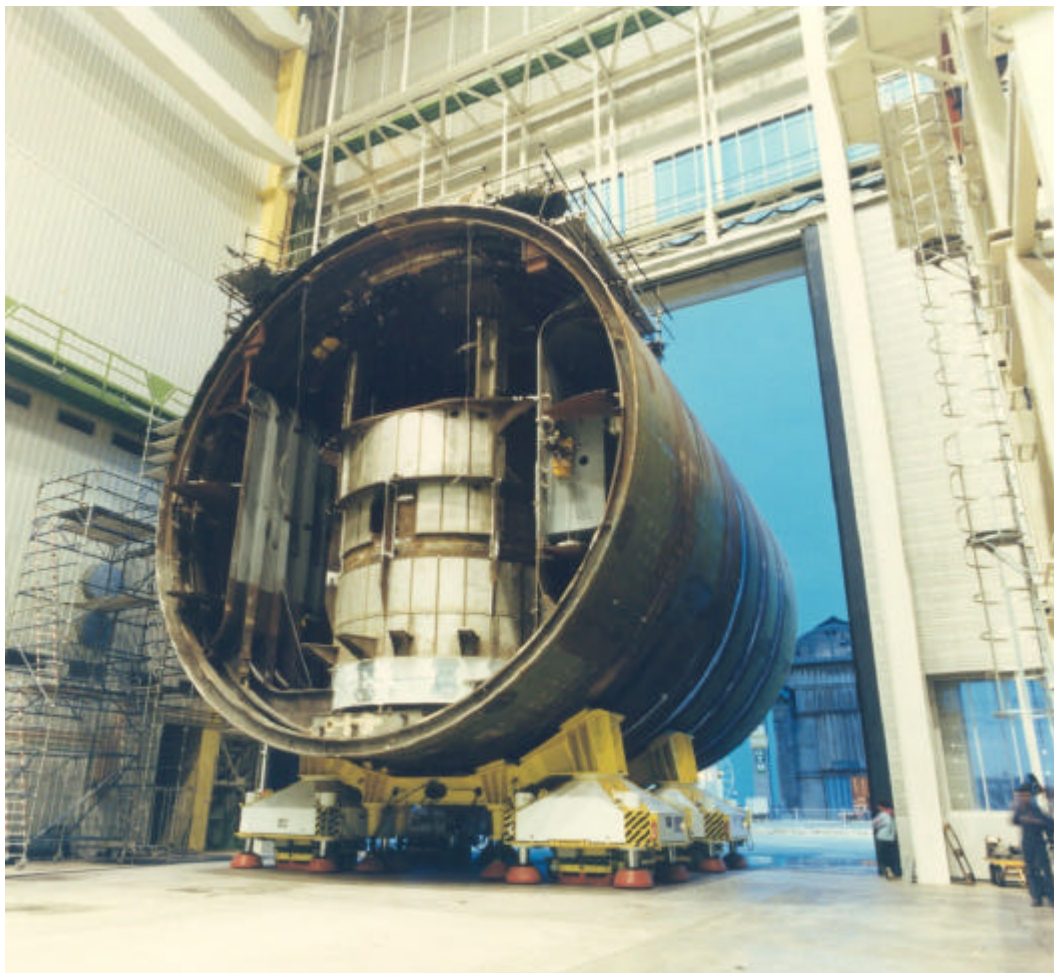
La série de six sous-marins type RUBIS est construite à Cherbourg en une quinzaine d'années. Les SNA type RUBIS sont les plus petits sous-marins nucléaires océaniques du Monde et donc les moins chers<sup>9</sup>. (petits ⇔ pas chers ⇔ français).

---

<sup>9</sup> Dans la compétition pour l'équipement de la Marine canadienne vers 1984 c'est grâce à son moindre tonnage que la SNA français l' avait emporté sur son concurrent anglais avant que les pressions américaines poussent le gouvernement canadien à renoncer.

## 2.4 LES SOUS-MARINS LANCE ENGIN TYPE LE TRIOMPHANT ET LE PORTE AVIONS CHARLES DE GAULLE

Au début des années 1980 la concomitance des programmes de sous-marins lance engins de nouvelle génération et du remplaçant des porte-avions en fin de vie FOCH & CLEMENCEAU permet de faire bénéficier au moindre coût les porte-avions de l'avantage opérationnel de la propulsion nucléaire.

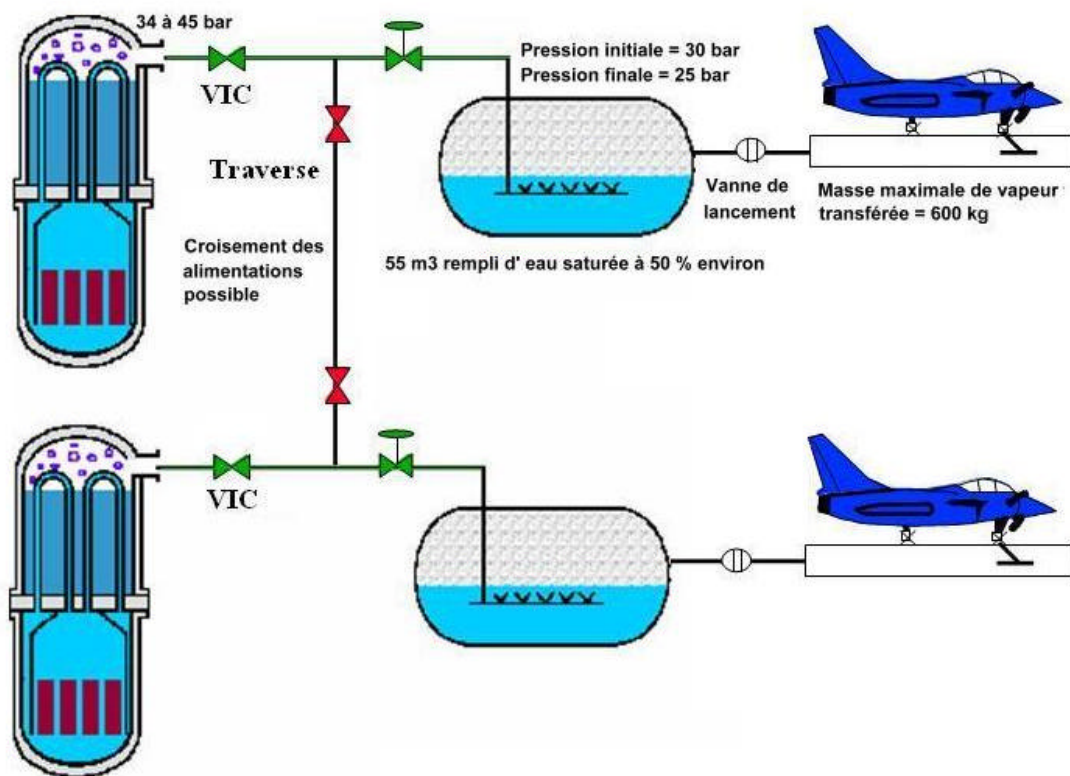


Le tronçon de coque contenant la chaudière du Téméraire est déplacé dans le hall d'assemblage des sous-marins à CHERBOURG

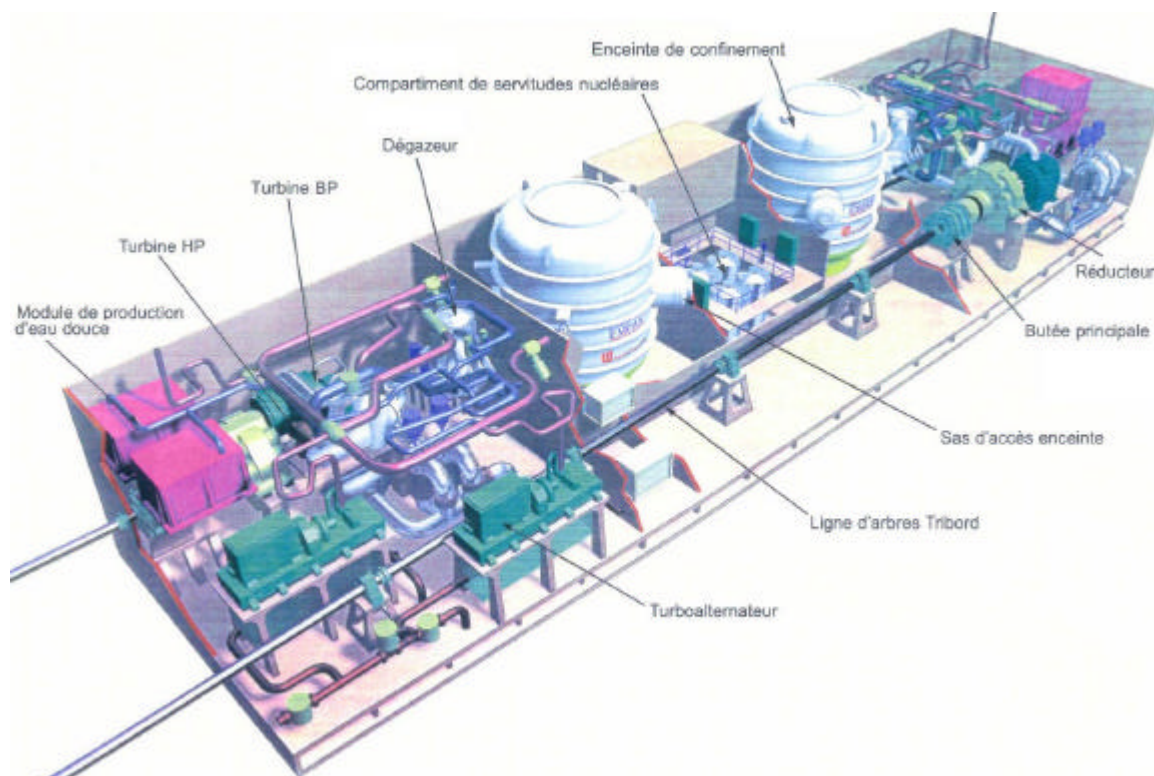
Ainsi, les deux<sup>10</sup> réacteurs (dits K15) du PA Charles DE GAULLE sont quasiment identiques aux quatre réacteurs de la série des sous-marins type LE TRIOMPHANT. Ceci en dépit des différences importantes entre les deux applications telles que par exemple la fourniture de vapeur aux catapultes

---

<sup>10</sup> Exception faite de l'Entreprise (8 réacteurs de sous -marin) , tous les PA nucléaires US ont deux réacteurs.



PACdG - Remplissage en vapeur d'origine nucléaire des réservoirs de catapultage – Schéma de principe



L'appareil propulsif du Porte-Avions Charles DE GAULLE



Les enceintes de confinement des réacteurs , construites à INDRET, sont transportées à BREST sur une barge et mise en place dans le navire en achèvement à flot

La conception du réacteur K15 prend en compte le retour d'expérience de l'accident de THREE MILES ISLAND. A l'instigation de Maurice FAJEAU la démarche d'analyse de sûreté est rationalisée et systématisée.

Une revue de conception du combustible utilisé dans les réacteurs K15 abouti à une solution plus industrielle que sur les programmes antérieurs. Le dessin des cœurs et du combustible est simplifié. Les matières de base sont également industrielles, générant une économie importante et durable.

## 2.5 LES SOUS-MARINS D'ATTAQUE TYPE SUFFREN ET LES SNLE DE 3EME GENERATION

Les sous-marins du programme BARRACUDA, marqué par le souci de la maîtrise des coûts, bénéficiant du retour d'expérience des SNA type RUBIS sont d'un tonnage nettement inférieur aux SNA américains et anglais<sup>11</sup>. Les chaufferies nucléaires dont la technologie dérive des chaufferies K15 comportent un grand nombre d'innovations. Entre autres, le contrôle du cœur optimisé permet l'augmentation des durées d'exploitation entre périodes d'entretien majeur; les redondances relatives aux circuits auxiliaires et de sécurité sont renforcées et plus homogènes que sur les chaufferies antérieures

La réfrigération d'arrêt des réacteurs des sous-marins lance-engins de 3<sup>ème</sup> génération inspirée d'un système passif existant sur le PAT tient compte des enseignements tirés de l'accident de Fukushima<sup>12</sup>. Ce concept applicable aux réacteurs électrogènes terrestres d'architecture intégrée tel que le projet SMR de Technicatome assure l'évacuation

<sup>11</sup> Ce tonnage moindre a permis à DCNS devenu Naval Group de se trouver spécialement bien placé dans la compétition pour l'équipement de la Marine australienne

<sup>12</sup> La ruine des réacteurs de Fukushima vient de puissance résiduelle des cœurs

passive<sup>13</sup> de la puissance résiduelle du cœur en la transférant vers une réserve d'eau (le lac d'enceinte) similaire à la piscine du PAT

## **2.6 LA BASE ARRIERE – LES INSTALLATIONS ET LES REACTEURS D'ESSAIS A TERRE**

### **2.6.1 Liminaire-Précaution**

Le recensé des installations à terre de Cadarache qui ont permis le développement de la technologie française des réacteurs de la propulsion navale et le soutien des réacteurs en exploitation<sup>14</sup> ne peut trouver sa place dans le présent article. Seuls les réacteurs d'essais ou prototypes (les jalons historiques principaux) sont évoqués.

### **2.6.2 La pile d'expérience critique AZUR (Alliage Zirconium URanium)**

Exemple type de conception adaptable et souple d'utilisation, la pile d'expériences critiques AZUR divergée pour la première fois en avril 1962 a été maintenue à niveau des évolutions de la réflexion de sûreté<sup>15</sup> durant plus de 50 ans. Elle aura permis

- de diverger et mesurer neutroniquement plus de 500 configurations de cœurs différentes
- de vérifier la réactivité réelle préalablement au chargement en réacteur<sup>16</sup> de tous les cœurs de la propulsion nucléaire française complètement assemblés à l'identique de la configuration bord sécurisant ainsi grandement les opérations sur site.
- de valider le dessin des protections neutroniques rapprochées des réacteurs embarqués<sup>17</sup>

### **2.6.3 Le Prototype A Terre des réacteurs des SNLE type LE REDOUTABLE (Le PAT)**

Le PAT rapidement construit a conduit au succès de la série des SNLE type LE REDOUTABLE en permettant notamment, le test en conditions réelles de différents types de combustibles

### **2.6.4 La Chaufferie Avancée Prototype (La CAP)**

La CAP a validé le concept révolutionnaire de l'architecture intégrée ; le bloc chaudière des SNA type RUBIS a pu testé en réel dans la CAP aux termes de l'opération « SNA dans CAP » ; la rénovation RNG (Réacteur de Nouvelle Génération) a permis de valider tous les composants critiques des chaufferies K15. Plusieurs cœurs de technologie électrogène commerciale ont été testés dans la CAP. En trente ans d'exploitation, la CAP a démontré une grande capacité d'adaptation.

### **2.6.5 La formation des exploitants sur réacteur réel**

Les réacteurs de Cadarache auront concourus depuis l'origine à la formation de plus de 3000 opérateurs Marine en leur donnant l'occasion d'être confrontés en complément de leur formation théorique et sur simulateurs à une installation nucléaire réelle. Les progrès très importants des simulateurs faits ces récentes années devenus notamment capables de modéliser les situations accidentelles rendent ces formations théoriques notoirement plus efficaces sans diminuer l'intérêt de la formation sur réacteur réel.

---

<sup>13</sup> Le système peut assurer la non détérioration du combustible durant près d'une semaine post accident sans aucune alimentation électrique

<sup>14</sup> Comme par exemple les halls d'essais de boucles aux conditions thermodynamiques ou les installations de fabrication des combustibles neufs et entreposage des combustibles usés

<sup>15</sup> Le système de vidange gravitaire rapide de la cuve d'Azur simple et robuste, assure une redondance efficace des autres systèmes de chute en sécurité des absorbants de contrôle de la réactivité.

<sup>16</sup> Au-delà d'une énergie extraite de quelques dizaines de kWh seulement le combustible implanté en cuve n'est plus manipulable par des opérateurs à proximité ; le chargement en cuve comporte ainsi une part d'irréversibilité.

<sup>17</sup> Quasiment tous les 1er types de réacteurs de la propulsion navale ont été le siège de fuites neutroniques dans les pourtours rapprochés du réacteurs constatées lors des premiers démarrages ; en dépit de modélisations initiales très sérieusement conduites le navire japonais Mutsu n'y a pas échappé.



## 2.6.6 Le Réacteur d'Essais à terre (Le RES)

Toute innovation ou évolution importante en matière de propulsion nucléaire navale doit être validée de conception et testée en endurance pendant une durée minimale de deux ans sur réacteur à terre sauf à faire courir un risque intolérable de retard important à l'ensemble du programme de navire.

Il ne paraît pas raisonnable d'utiliser sur un navire en exploitation un combustible dont le taux de combustion n'aurait pas été atteint sur antérieurement sur réacteur à terre avec constat positif de l'état de santé dudit combustible fortement irradié. L'irradiation du combustible jusqu'aux taux de combustion maximaux ne peut être effectuée qu'en réacteur dédié.

La non disponibilité durable d'un réacteur d'essais à terre signera ;

- la fin à moyen terme de l'innovation positive en matière de propulsion navale nucléaire en France
- la prise d'un risque accru en matière de conception/réalisation/exploitation des cœurs des réacteurs en service



Vue générale du RES en cours d'étude

Après bon nombre de tergiversations et retards divers le Réacteur d'Essais (Le RES) est prévu diverger en 2019. Sa technologie de base dérive assez directement des réacteurs K15 du PACdG<sup>18</sup>. Cependant ;

- des réservations ont été faites pour permettre le test de composants majeurs susceptibles d'évolutions
- des dispositions ont été prises permettant d'améliorer grandement les mesures neutroniques des cœurs en évolutions dont notamment les taux de combustion locaux
- des combustibles de tous types sont installables en cuve qui peuvent concourir à la production de radioéléments
- la conception/réalisation/exploitation du RES prend en compte l'ensemble des règles et normes de sûreté et environnementales lesquelles se considérablement renforcées structurées et rationalisées depuis les années 1970 et 1960 a fortiori

<sup>18</sup> Le retour d'expérience de conception réalisation et exploitation du PACdG, n' pas fait apparaître de pénalité majeure à la mise en œuvre de l'architecture intégrée pour application sur les grands navires de surface potentiellement équipables à horizon calendaire réaliste.



La cuve du RES lors de sa mise en place dans l'enceinte de confinement

En complément on doit noter :

- que la construction du RES a été l'occasion d'une importante extension du site dévolu à la propulsion nucléaire<sup>19</sup> et d'une rénovation de plusieurs installations du site de Cadarache construites pour la plupart dans les années 1960
- que toute modélisation conceptuelle ou mathématique contient toujours une part d'incertitude et que rien ne remplace une expérimentation sur réacteur réel notamment en endurance. Le RES est bien et doit rester un «réacteur d'essais». Si un essai sur réacteur est décidé c'est parce que son résultat n'est pas prédictible et que dès lors une part d'incertitude demeure dans le cours de l'essai lequel doit être conduit avec prudence et par étapes réfléchies. Ce point doit être admis par l'ensemble des parties prenantes y compris les autorités de sûreté en charge de délivrer les autorisations d'exploitation nécessaires<sup>20</sup>.

---

<sup>19</sup> Une nouvelle piscine d'entreposage des combustibles déchargés des navires en exploitation et des réacteurs à terre vient compléter celles existant dans les ports d'entretien.

<sup>20</sup> Exemple : La réalisation sur la CAP / RNG d'un essai de fonctionnement en endurance avec un taux d'hydrogène dissous dans l'eau primaire abaissé par rapport à la consigne existante qui aurait permis de diminuer les quantités d'hydrogène manipulées à bord des navires en exploitation n'a hélas pas pu être décidée ; gageons que cet essai soit fait sur le RES.



Les participants à la réunion d'un comité de direction tenue à Cadarache assistent à un essai de dépressurisation de la boucle SUPERBEC<sup>21</sup>. On peut reconnaître Jean-Louis ANDRIEU, Roger DELAYRE (4<sup>ème</sup> gauche), Yves BONNET et Maurice FAJEAU (à l'extrême droite)

## 2.7 LES PROGRAMMES FUTURS

Les attermoissements de ces dernières années semblent progressivement s'estomper on peut penser que la construction d'un successeur au PA CdG sera prochainement entreprise. Une étude préliminaire a d'ailleurs été effectuée il y a quelques années à l'initiative de la DGA. D'autres projets de sous-marins ou navires de surface suivront dont peut être des navires marchands si la rareté du pétrole brut se traduit par une hausse durable des coûts ou si les réglementations anti-pollution d'accès dans les ports se renforcent.

A l'image des précédents, ces futurs projets de réacteurs contiendront leur part d'innovations gouvernée par ;

- le souci permanent de la maîtrise des coûts
- la prise en compte du retour d'expérience de conception/réalisation/exploitation des réacteurs antérieurs
- la recherche des simplifications par tous les moyens possibles<sup>22</sup>

<sup>21</sup> La boucle « SUPERBEC » destinée à tester des combustibles aux conditions thermodynamiques des réacteurs constitue de facto une maquette de réacteur à eau sous-pression d'architecture intégrée (avec un préssuriseur une pompe primaire et une instrumentation thermodynamique). En complément de sa vocation première, cette boucle équipée d'une vanne de décharge pyrotechnique de bon diamètre été utilisée pour valider le modèle de calcul de l'évolution des conditions thermodynamiques (pression, température, niveau dans la cuve, etc..)

<sup>22</sup> La simplicité d'une conception système ne s'obtient généralement pas du 1<sup>er</sup> coup car il s'agit bien de réaliser des fonctions qui peuvent être multiples, complexes voire évolutives avec un système qui reste simple

### 3 L'AVENTURE HUMAINE DE LA PROPULSION NUCLEAIRE DES NAVIRES EN FRANCE

#### 3.1 LA MOBILISATION GENERALE

La situation globalement satisfaisante résumée ci-dessus n'a été acquise que grâce à la mobilisation de l'ensemble des forces vives du pays disposant d'une expertise ou de moyens relevant des domaines marine ou nucléaire.

Du côté des exploitants : des Officiers de Marine, des Officiers des Equipages, des Officiers Mariniers

- souvent sous-marinières ayant une bonne connaissance de l'électricité et du contrôle commande, dont plusieurs ont fait partie de l'équipage de Jean-Louis ANDRIEU
- mais aussi ayant navigué sur navires de surface à propulsion/énergie mettant en oeuvre la vapeur sous forte pression<sup>23</sup>
- sans oublier quelques anciens pharmaciens-chimistes de la Marine



De la secrétaire au commandant en passant par les stagiaires militaires du contingent : L'équipage du PAT

Du côté des ingénieurs, **TOUTES** les écoles et formation de base sont représentées, parmi lesquelles, on peut noter ;

- nombre de « Gadz'Arts »
- bon nombre d'anciens « SupElec »
- bon nombre d'anciens ingénieurs des travaux de l'armement (IDT)
- une source précieuse, variée et renouvelée de recrutement provient des jeunes ingénieurs stagiaires militaires affectés pour emploi au CEA ou à Technicatome et qui passionnés par les travaux auxquels ils participent choisissent de rester à l'issue de leur service national.

Ces ingénieurs ou exploitants ont pour la plupart suivi une formation en Génie Atomique complémentaire de leur diplôme de base dispensée par l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) à Saclay ou

<sup>23</sup> Vers 1963 Jean SIMON, officier marinier, est «débarqué» du Clemenceau pour être affecté sur ordre à Cadarache où il est reçu par Jacques CHEVALLIER:

- « M.SIMON, vos états de service sont excellents, mais dites-moi : Vous vous y connaissez en vapeur ? »
- Réponse : « Ben ... je crois »
- « Bien, la machine du PAT doit être prête à recevoir la première vapeur réacteur dans six mois ; vous êtes en charge de la démarrer »

Grenoble –pour les plus anciens- ou à l' Ecole des Applications Militaires de l' Energie Atomique (EAMEA) après sa création au milieu des années 1960

Le brassage entre exploitants et ingénieurs est l'un des éléments clés ayant permis le succès de cette épopée nationale

### 3.2 LES INGENIEURS DE L' ARMEMENT

Les ingénieurs de l'armement (et antérieurement du génie maritime) ont naturellement pris une part éminente capitale à cette mobilisation nationale complètement dans la ligne des missions du Corps :

- Dès le milieu des années 1950 de nombreux ingénieurs du génie maritime font leur classe nucléaire à l' INSTN ou à l' EAMEA et sont affectés à l' étude et la construction du 1<sup>er</sup> sous-marin -le Q244 évoqué ci-dessus<sup>24</sup>-
- La croissance des effectifs n'étant pas conforme à ses souhaits, l' Ingénieur Général Roger BRARD responsable d'ensemble du Q244 affecte d'autorité une promotion entière du génie maritime au projet
- Par la suite, conformément aux accords de mise à disposition de personnel convenus entre le CEA et la DGA
  - des Ingénieurs de l'Armement au rythme moyen d'un ingénieur tous les deux ans choisiront de rallier les équipes du CEA ou de Technicatome en charge de la conception des réacteurs embarqués sur navires
  - des ingénieurs de l'armement confirmés seront nommés à des postes de responsabilité au CEA ou à Technicatome

### 3.3 TROIS ACTEURS EMINENTS

La liste exhaustive des acteurs principaux de l'épopée résumée ci-dessus n'a pas lieu d'être tracée ici. Quelques uns de ceux qui nous ont quittés sont évoqués.

Trois personnalités hors pairs» ont cependant marqué de leur empreinte quelquefois géniale la doctrine/philosophie française de conception des réacteurs de sous-marins.

#### 3.3.1 Jacques CHEVALLIER - X 40 - Ingénieur en Chef du GM



Jacques CHEVALLIER présente le pupitre de conduite du PAT au Général DE GAULLE en visite à Cadarache

<sup>24</sup> La coque du 1<sup>er</sup> projet de sous-marin -abandonné avant même d'avoir été baptisé- est la 244ème coque mise en chantier à Cherbourg

Il est Ingénieur Principal lorsqu'il quitte l' Etablissement des CAN d'INDRET mandaté par les Constructions Navales pour prendre la direction du Groupe de Propulsion Nucléaire (GPN<sup>25</sup>,) au CEA.

Investi «des pleins pouvoirs» il les exerce pleinement<sup>26</sup>, s'entend à merveille avec Jean-Louis ANDRIEU son adjoint, mène rondement son affaire et conduit la construction du PAT en moins de quatre ans, laquelle installation est une mine d'astuces de conception non explicites ici.

Vers 1967 sur la base du succès du PAT et à l'image de ce qui a été fait aux USA (réacteur de Shippingport puis grands réacteurs électrogènes Westinghouse, centrale de Chooz A en Europe) Jacques CHEVALLIER propose le développement en national d'un réacteur à eau sous-pression électrogène de grande puissance -le projet Champlain- alors même que la direction du CEA s'attache à développer la filière graphite-gaz. Ce conflit perdu est une des causes de son départ.

### **3.3.2 Jean-Louis ANDRIEU – Officier de Marine issu de l' Ecole Navale**



Officier sous-marinier au sortir de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale<sup>27</sup>, il s'intéresse dès le début des années 1950 à la propulsion nucléaire des sous-marins au point d'être désigné comme Commandant du Q244. L'abandon du projet fait qu'il passe naturellement -entraînant avec lui une bonne partie de son équipage- au GPN du CEA et se range aux côtés de Jacques CHEVALLIER. Celui-ci parti, Jean-Louis ANDRIEU<sup>28</sup> prend sa suite.

Il convainc la Marine de renoncer au programme d'une quinzaine de sous-marins d'attaque classiques<sup>29</sup> au profit d'une série de 5 sous-marins nucléaires d'attaque capables de mission très supérieures pour le même tonnage total ; ce sera le projet SNA 72 devenu par la suite le programme SNA type RUBIS.

Son «domaine réservé» est celui de la conduite des réacteurs et donc du contrôle-commande / interface homme machine des réacteurs de la propulsion navale dont avec André MOQUARD il pose les bases de ce qui est aujourd'hui la doctrine française de conception en la matière.

Pour le reste il s'appuie entièrement sur Yves BONNET<sup>30</sup>

---

<sup>25</sup> Devenu ultérieurement le Département de Propulsion Nucléaire (DPN)

<sup>26</sup> Quelques témoignages : Yves BONNET : «Jacques CHEVALLIER dirigeait tout de son bureau » - André MATHE : « Lorsque Jacques CHEVALLIER avait réfléchi à un sujet technique controversé et en avait tiré sa conclusion personnelle ; la terre entière se trompait , il avait raison »

<sup>27</sup> Jean-Louis ANDRIEU a notamment participé aux opérations en méditerranée dans la Marine française libre ; il se disait lui-même « rallié géographique » pour s'être trouvé affecté en Afrique du Nord au début des années 1940.

<sup>28</sup> La série de sous -marins nucléaires d'attaque initialement envisagée équipés de réacteurs à boucles dérivés de celui du PAT coûtait trop cher du fait de leur tonnage élevé. La Marine avait donc fait le choix d'un programme de sous-marins classiques destinés -entre autres- à former les équipages des SNLE.

<sup>29</sup> Yves BONNET : « Jean-Louis ANDRIEU fut mon maître »

<sup>30</sup> Jean-Louis ANDRIEU à son départ en retraite : « J'ai fait peser sur Yves BONNET une charge écrasante, dont il s'est toujours acquitté de façon exemplaire »

### 3.3.3 Yves BONNET - X 50 - Ingénieur Général de 1<sup>ère</sup> Classe de l'Armement (GM)



Considéré par nombre de ses pairs<sup>31</sup> comme le meilleur ingénieur concepteur de réacteurs français c'est à Yves BONNET que revient la charge de « garder la maison » à partir du début des années 1970 jusqu'à son départ en retraite vers 1992

Il aura

- relevé avec une énergie farouche le défi du plus petit sous-marin nucléaire océanique en concertation étroite avec Marc MENEZ son interlocuteur du coté des constructions navales
- dirigé le programme K15 de module commun aux SNLE type LE TRIOMPHANT et Porte-Avions Charles DE GAULLE
- convaincu l'ensemble des parties prenantes de la nécessité d'une base arrière à terre pérenne
- conduit et fait prospérer Technicatome avec par exemple la création/fondation de nombre de sociétés filiales dans un grand nombre de domaines technologiques de pointe
- conservé la confiance des responsables au plus haut niveau de la Marine du CEA et de la DGA durant 20 années en dépit des vicissitudes et aléas divers de cette longue période.

Ingénieur d'une intelligence d'une vivacité exceptionnelle, d'une puissance et rapidité de travail hors du commun, d'un jugement à la fois sûr et prudent, constamment à la recherche de l'innovation réaliste et du mieux possible, il a formé via un challenge permanent à l'excellence et la réussite nombre d'ingénieurs à la conception des réacteurs embarqués dont j'ai eu la chance et l'honneur de faire partie<sup>32</sup>

On doit ajouter à ces qualités professionnelles un rare sens de l'humain et une grande bonté

### 3.3.4 Un souhait

A l'occasion de sa prochaine divergence le réacteur d'essais à terre (le RES) pourrait être baptisé du nom d' « Yves BONNET »- Le nom « Réacteur Yves BONNET » (RYB) sonnera bien dans Technicatome et au CEA/DAM/DPN, j'en suis certain.

L'établissement Technicatome de Cadarache pourrait lui être dénommé « l' Etablissement Jacques CHEVALLIER »

Yves BONNET a voulu que l'établissement Technicatome d' Aix Les Milles qu'il a créé reçoive le nom de Jean-Louis ANDRIEU en abrégé JLA bien connu dans Technicatome 2018

Ainsi la mémoire de ces trois personnalités éminentes sera préservée d'un oubli prématuré. La nation leur doit bien cela.

<sup>31</sup> Comme par exemple d'éminents ingénieurs de Framatome, le « grand cousin » de Technicatome

<sup>32</sup> Sa recherche constante et opiniâtre de la simplicité a provoqué bien souvent autour d'un simple clapet de non retour sur l'un des circuits auxiliaires des chaufferies embarquées au moins une douzaine de revues de conception contradictoires étalées sur 3 ans au bas mot aux termes desquelles la suppression dudit CNR superfétatoire aura pu être valablement justifiée (La perfection n'est atteinte lorsqu'il n'y a plus rien à retirer... « nécessaire et suffisant » dirait le mathématicien)