

La naissance et le développement de la propulsion navale nucléaire en France

Dès 1939, **Frédéric Joliot-Curie**, physicien et chimiste Français qui a obtenu en 1935 le prix Nobel de chimie **avec sa femme Irène**, dépose un brevet de moteur mû par l'énergie nucléaire, mais les toutes les études sur le sujet en France s'arrêtent pendant la guerre.

L'aventure nucléaire industrielle de la France va réellement commencer avec la création **le 18 octobre 1945** par le Général de Gaulle du Commissariat à l'Energie Atomique (**le CEA**). Après l'acquisition des connaissances théoriques fondamentales, les applications du nucléaire vont être nombreuses dans les domaines de l'énergie, de l'industrie, de la santé, de la défense, etc.

Au sein du CEA, deux entités sont créées pour promouvoir la production d'énergie et la propulsion, ce sont :

- le Département de Construction des Piles (**DCP**) pour la production d'énergie dans de grandes installations
- le Département de Propulsion Nucléaire (**DPN**) pour la propulsion des sous-marins.

La société Technicatome sera créée le 1^{er} juillet 1972 à partir de l'équipe du Département de Construction des Piles (DCP) du CEA de Saclay. Elle se voit confier l'étude des projets de réacteurs, la réalisation et les essais des installations jusqu'à la livraison aux exploitants. C'est alors une filiale à 90% du CEA et à 10% d'EDF. En 1974, l'équipe du Département de Propulsion Nucléaire (DPN) du CEA rejoint Technicatome. Pour le développement de la propulsion nucléaire navale. **Technicatome** va travailler avec la Direction des Constructions navales (**DCN**) en coopération avec la **DGA**.

Technicatome deviendra Areva TA en 2006, puis de nouveau TechnicAtome en 2017.

Le lancement par les Américains du sous-marin (**SNA**) **Nautilus** va avoir un rôle déclencheur. Il est inauguré par le président Eisenhower en 1954 et il réalise sa première sortie en mer en janvier 1955. La propulsion nucléaire lui procure une autonomie en plongée à grande vitesse sans précédent. Aux USA, il va servir de modèle pour la construction de la première centrale électronucléaire de **Shippingport** qui diverge en décembre 1957.

En France, en avril 1954, un comité de liaison Marine-CEA recommande d'utiliser l'atome pour la propulsion d'un sous-marin. En juillet 1955, ne disposant pas d'uranium enrichi, la décision est prise de construire un sous-marin (**SNA**) équipé d'un réacteur à uranium naturel et eau lourde. Le nom de code est **Q 244** et la divergence est prévue pour juin 1958.

La construction de la coque est réalisée par l'Etablissement de DCN Cherbourg et le CEA étudie la réalisation du réacteur nucléaire. En 1957, les contraintes techniques rencontrées avec l'utilisation de l'eau lourde et le volume disponible sur le sous-marin jugé trop faible pour une telle installation font craindre l'échec. Fort opportunément, le Président Eisenhower annonce que les USA vont autoriser la vente d'uranium enrichi aux pays alliés pour la propulsion de navires de guerre. Un accord de vente à la France de 440 kg d'uranium enrichi à plus de 90% en Uranium 235 pour une utilisation exclusivement terrestre est signé **le 5 mai 1959**. Le 20 mai, la décision est prise de construire un prototype de chaufferie nucléaire à terre (**le PAT**) sur le site de Cadarache. Ce sera un réacteur à eau pressurisée (PWR), une totale nouveauté pour la France, qui ne maîtrisait alors que la filière UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz).

La technologie du réacteur à eau pressurisée offre de nombreux avantages. L'installation est compacte avec l'utilisation de l'eau légère (H₂O) comme modérateur de la réaction neutronique. L'eau également utilisée comme réfrigérant du circuit primaire et la mer comme source froide ; c'est un cycle thermodynamique bien connu des marins. Le rendement est faible (34% chez EDF pour une installation optimisée) mais le réacteur est stable. Une élévation de température provoquant une baisse de puissance ce qui est « rassurant » pour un réacteur soumis à des variations rapides de puissance. L'eau est aisément produite à bord et un envahissement du compartiment réacteur par l'eau de mer pourrait

assurer le refroidissement du cœur sans risque de réaction comme celle pouvant se produire avec un l'utilisation d'un métal liquide (sodium ou sels fondus).

Les Américains ont développé en parallèle deux types de réacteurs pour leurs sous-marins : un réacteur PWR pour le **Nautilus** et un réacteur au sodium liquide pour le 2^{ème} sous-marin le **Seawolf**. Ils ont rapidement choisi la filière PWR suite aux difficultés rencontrées avec le réacteur du Seawolf.

Le compartimentage du sous-marin impose de confiner le réacteur dans un compartiment étanche, inaccessible à la mer, en permanence en dépression et participant à la protection biologique de l'équipage. Tous les composants utilisés doivent être d'une fiabilité très élevée pour réduire la fréquence des opérations de maintenance qui ne peuvent s'effectuer que dans quelques ports spécialisés. D'autre part, la conduite d'un réacteur nucléaire demande un personnel qualifié et qui doit être présent en permanence à bord pour la surveillance ou la conduite de l'installation.

Le 8 juin 1959 est créé au sein du CEA le groupe de propulsion nucléaire pour sous-marins, suite à la décision de construire le Prototypé à terre. L'étude et la réalisation de l'appareil évaporatoire sont confiées au Département propulsion nucléaire (DPN) du CEA. L'Etablissement des constructions navales d'Indret est chargé de construire l'appareil moteur à vapeur. Tout était à concevoir depuis l'architecture d'ensemble permettant son installation à bord d'un sous-marin jusqu'au choix des aciers pour le circuit primaire et tous les composants.

La réalisation d'une propulsion nucléaire fiable a été jugée essentielle pour la réussite de la composante sous-marine de la dissuasion nucléaire française. Elle procure une autonomie illimitée en plongée (4 000h sur le PAT et plus de 10 000h actuellement) au sous-marin et elle fournit l'énergie nécessaire pour la production d'eau douce, d'oxygène, etc. et la consommation électrique de nombreuses installations à bord.

Tout était à concevoir : le cœur du réacteur, la cuve pour le recevoir, les générateurs de vapeur, les pompes primaires étanches, la robinetterie et toute l'instrumentation. Tout a été conçu et testé longuement pour aboutir à la mise en route de l'installation dans un délai de moins de 5 ans. Le cœur du réacteur sera choisi à plaques pour mieux résister aux chocs, aux mouvements de la plate-forme et à une utilisation très réactive de la puissance délivrée.

Jacques Chevalier ancien chef du groupe de propulsion nucléaire du CEA témoigne de cette aventure vécue lors de la création du PAT :



Jacques CHEVALIER

*Lorsque je fus désigné pour ce poste, au printemps de 1959, j'étais depuis huit ans au Service des appareils moteurs à vapeur de l'Etablissement des constructions et armes navales (E.C.A.N.) d'Indret. De là m'étaient venues un certain nombre d'idées sur les méthodes permettant de mener à bien des révolutions techniques en sécurité aux coûts et délais minimaux à la nouvelle entreprise qui m'était confiée. Le point fort de cette quête fut ma rencontre, courant juillet, avec **Jean-Louis Andrieu**, commandant désigné pour commander le **Q 244**. Le courant passa, ce qui permit de constituer un tandem d'une efficacité redoutable, en réalisant une alliance étroite et inédite entre les points de vue technique et les contraintes opérationnelles.*

Depuis toujours, le rêve d'un moteur anaérobie a hanté les sous-marinières. Pendant la deuxième guerre mondiale, les premiers progrès sont apportés par le **schnorchel**, et par l'ambitieux système de propulsion à **turbine Walter** utilisant l'eau oxygénée (H₂O₂).

Aux USA, sous l'impulsion de l'amiral **Rickover**, la propulsion nucléaire apporte la solution. En février 1955 le Nautilus prend la mer. La vocation de "**Capital Ship**" du sous-marin nucléaire se dessine, en raison de la menace imparable qu'il fait planer, qu'il s'agisse des sous-marins nucléaires d'attaque comme on a pu le voir lors de **la guerre des Malouines**, ou des sous-marins nucléaires lance-engins, "**ultima ratio**" de la dissuasion nucléaire.

En 1955, la France décide de relever le gant, forte de son antériorité dans ce domaine, de Jules Verne aux brevets de l'équipe Joliot (mai 1939). Sans bien apprécier la difficulté, la France se lança ainsi dans la construction du **Q 244**, sous-marin nucléaire à l'uranium naturel et à l'eau lourde, entreprise abandonnée en 1958.

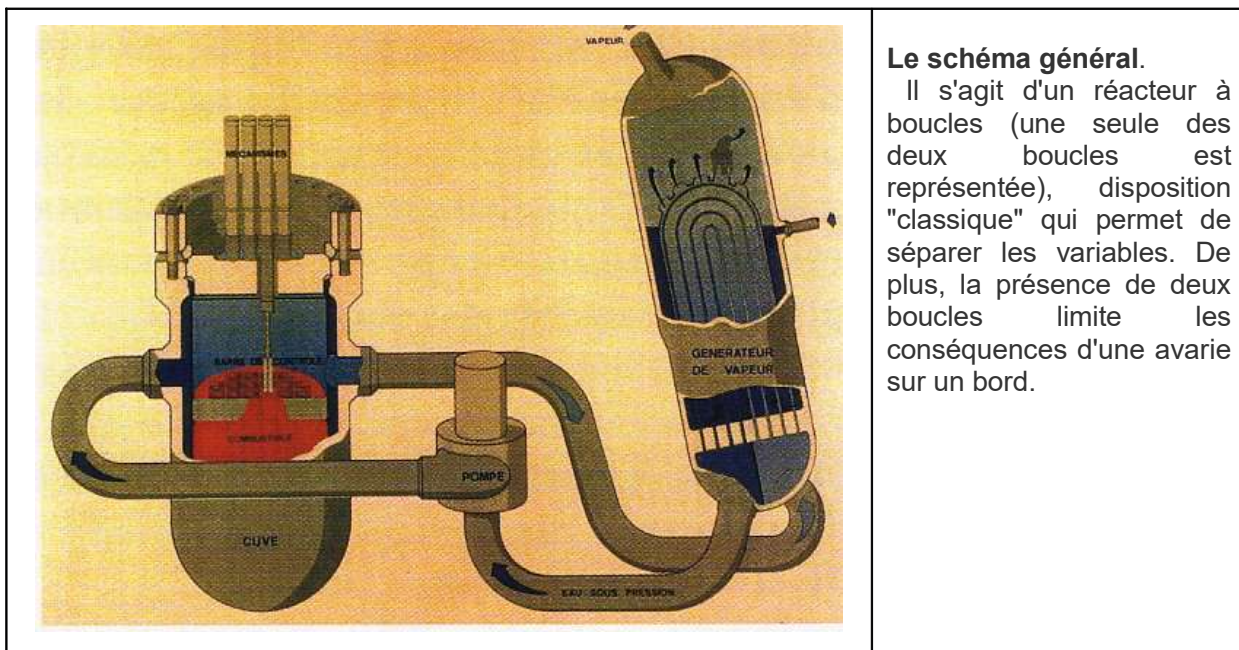
En 1959, de nouvelles perspectives s'ouvraient avec l'accord américain de vente à la France d'uranium enrichi pour un prototype à terre de propulsion nucléaire (P.A.T.), tout transfert de technologie étant exclu. On notera que l'Amiral Rickover qui était farouchement opposé à cet accord va le favoriser lors des débats devant le Congrès Américain. Un intervenant demanda à l'amiral : "**Y a-t-il une chance que la France réussisse à mettre au point un réacteur de propulsion ?**" L'amiral Rickover répondit : "**Pas la moindre chance**". L'intervenant conclut alors : "En ce cas, l'accord de cession d'uranium enrichi peut être signé".

Tandis que l'entreprise Q 244 avait été conduite par un tandem Marine-C.E.A., la maîtrise d'ouvrage du P.A.T. (Prototype à Terre) allait être confiée à un Groupe de propulsion nucléaire au sein du C.E.A.

De la demande de la Marine à la mise en service du P.A.T.

Le 11 septembre 1959, les caractéristiques demandées par la Marine pour l'installation de propulsion nucléaire nous étaient adressées et en une page l'essentiel était dit. L'avant-projet était demandé pour le 15 novembre 1959 et malgré les doutes l'avant-projet est remis le 17 novembre 1959. Quant aux délais, on prévoyait que le P.A.T. serait mis en service à Cadarache, au cours de l'été 1964. Ce délai de moins de cinq ans qui paraissait tenable pour une installation de propulsion classique, représentait à l'évidence un pari à la limite du raisonnable.

Les figures suivantes donnent une idée de la disposition retenue pour le PAT :



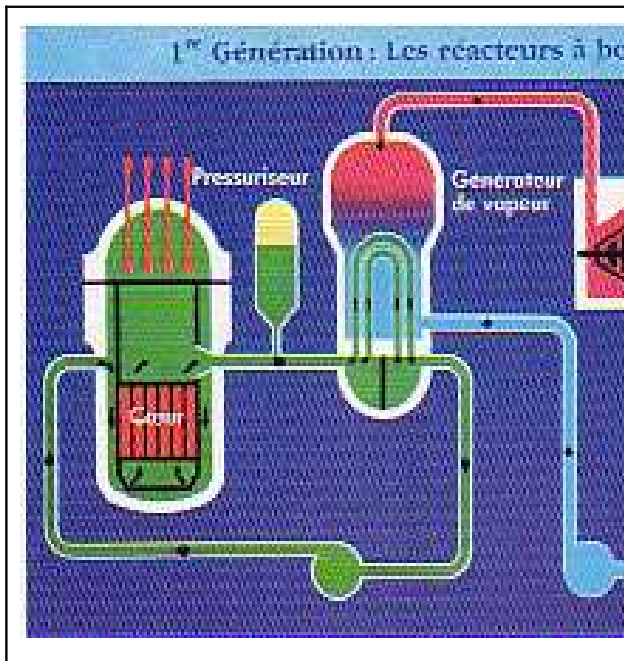
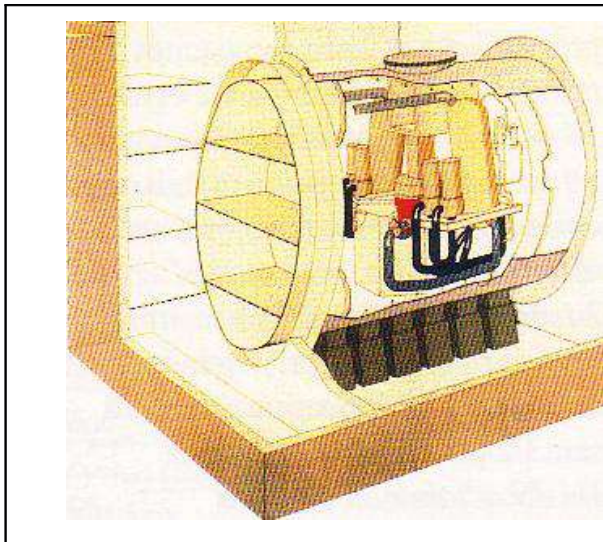


Schéma d'une boucle primaire.

Une seule des deux pompes est représentée. On peut remarquer le type particulier de fermeture de la cuve permettant de réduire au minimum le diamètre du couvercle.



Tronçon de coque dans son bassin.

Le tronçon de coque a un diamètre de SNLE, soit 10,6 m. A la partie supérieure, une course permet la circulation des personnes entre l'avant et l'arrière du sous-marin.

On voit "la brèche" dans la coque permettant le déchargement du coeur.

On constate la compacité de l'ensemble : le volume de l'installation rapporté à sa puissance est sensiblement le dixième de celui de l'enceinte réacteur d'une centrale électronucléaire, ce qui donne une idée des efforts nécessaires pour parvenir au but recherché.

L'avant-projet proposé fut approuvé, pratiquement sans observation, par le Comité de liaison Marine-C.E.A. et **la décision de lancement fut prise le 18 mars 1960.**

Il restait à passer à la réalisation, voici quelques étapes franchies :

- En février 1963, embarquement de la cuve du réacteur. Elle a été construite par l'établissement d'Indret, ainsi que les générateurs de vapeur, le pressuriseur et les autres capacités sous pression. Le montage des deux circuits primaire et secondaire a également été effectué par les équipes d'Indret.
- **Le 14 août 1964, c'est la première divergence du P.A.T.**
- Dès le 19 août 1964, prise d'autonomie électrique.
- Le 24 août 1964, la puissance nominale est atteinte.
- Du 19 octobre au 18 décembre 1964, ce sera le tour du monde fictif, soit 10.000 lieues sous les mers, mais un peu moins fictives que celles de Jules Verne.



Le Poste Central de Propulsion (PCP)

La coque du sous-marin a été matérialisée par une forme en Plexiglas.

On trouve :

- A droite, le pupitre réacteur,
- A gauche, le pupitre vapeur
- Sur le côté, le pupitre électricité

Le volume disponible sur un sous-marin n'autorise pas une plus grande expansion de la salle de conduite.

Les points saillants de la mise en service du P A T

Pour mettre le maximum de chance de notre côté, j'avais lancé la commande de trois prototypes de modèles différents pour les appareils les plus délicats : pompes primaires et mécanismes de croix de contrôle en particulier, avec l'espoir qu'au moins un des trois pourrait satisfaire l'attente.

Après quelques milliers d'heures de fonctionnement en inactif, le choix n'était pas évident. On adopta une démarche en deux temps : élimination du modèle de composant le moins "séduisant" et équipement des deux boucles avec 2 modèles de pompes primaires différentes, mais interchangeables, et réalisation de deux couvercles équipés de modèles de mécanismes différents.

A l'usage, l'une des types de pompe primaire donna lieu à des avaries systématiques au bout d'environ 10 000 heures de fonctionnement, ce qui conduisit à retenir l'autre type pour les sous-marins. Les deux types de mécanismes de croix donnèrent lieu à certaines défaillances qui n'étaient pas apparues lors des essais individuels. Cela conduisit à retenir, pour les sous-marins, un nouveau type de mécanisme réalisant une synthèse des dispositions les plus favorables des deux types retenus initialement pour le P.A.T.

La radioprotection

Lors de la mise en service du PAT, la protection contre les rayons gamma parut quelque peu surabondante, ce qui permit un allègement en partie haute, solution toujours bienvenue sur un sous-marin pour améliorer sa stabilité. On constata en revanche un flux neutronique excessif dans la coursive. Le remède trouvé fut la surélévation du plafond de la piscine de protection : construction d'une « rehausse piscine ».

Les performances

La puissance maximale a pu être poussée jusqu'à deux fois la puissance nominale demandée en novembre 1966. Ceci donne une idée de l'efficacité des efforts consentis pour optimiser les performances du cœur. L'énergie fournie par le premier cœur (plaques métalliques à l'uranium très enrichi avec incorporation de poisons neutroniques consommables) a été près de deux fois supérieure à la demande initiale. Ultérieurement, ont été mis au point des « **cœurs dits à longue durée de vie** » à base de plaquettes d'oxyde d'uranium moyennement enrichi quatre à cinq fois plus énergétiques, permettant d'assurer la propulsion d'un sous-marin pendant plus de la moitié de sa vie.

La fiabilité en service

Pendant des années - du temps de la guerre froide - trois S.N.L.E. Français ont été maintenus en permanence à la mer, pour quatre sous-marins dans le cycle opérationnel. Il est clair que le soin apporté

dans la conception, les choix et les mises au point technologiques, ainsi que la politique d'essais systématiques des composants et des sous-ensembles ont été payants.

Le fait de disposer d'un prototype à terre ayant une expérience de fonctionnement de plusieurs années sur les sous-marins en service a joué à l'évidence un rôle déterminant. Le P.A.T. a permis une expérimentation poussée avec des mesures approfondies impossibles à bord.

L'utilisation du PAT pour la formation approfondie des équipages de sous-marins à la conduite de l'installation a également constitué un apport irremplaçable.

Le Contrôle commande.

Grâce à Jean-louis Andrieu, sa fiabilité est proverbiale à bord de nos sous-marins. Les chutes intempestives de croix de contrôle du réacteur sont pratiquement inconnues sur le P.A.T. et les sous-marins et toujours assez fréquentes sur des installations civiles.

La sécurité

Les problèmes de sécurité ont en permanence figuré au premier rang de nos préoccupations, et cette préoccupation constitue toujours un impératif, et l'exemple de Tchernobyl montre ce qu'il peut en coûter de l'oublier.

Les équipes du PAT comptaient environ 200 personnes lors de la 1^{ère} divergence le 14 août 1964.

Le réacteur du PAT qui a divergé le 14 août 1964 atteint sa puissance nominale dès le 24 août. Le 19 octobre, le PAT prend la mer pour une croisière fictive autour du monde qu'il termine le 18 décembre.

En 1968, le réacteur fonctionne à pleine puissance deux mois consécutifs et le réacteur a même atteint quelques instants le double de sa puissance nominale. Les stages de formation des marins futurs exploitants se poursuivent avec succès.

L'arrêt du PAT aura lieu le 15 mars 1992.

En parallèle, pour alimenter la fabrication des cœurs de sous-marins, la France lance la construction d'une usine d'enrichissement de l'uranium par le procédé de **diffusion gazeuse sur le site de Pierrelatte**. L'installation démarre en 1964 et dès 1967 elle peut alimenter l'usine de fabrication des éléments combustibles située à Cadarache qui fabrique les cœurs de sous-marins. Cette installation servira d'usine pilote pour le projet d'enrichissement d'uranium civil d'**EURODIF** sur le site du Tricastin.

La réalisation et la mise en service opérationnel du Redoutable

En 1963, la mise en chantier du Redoutable est lancée *et* au sein de l'organisation **Coelacanthe** dirigée par l'**IGA Gempp** c'est à l'équipe du département propulsion nucléaire (DPN) du CEA que la réalisation de la chaufferie est confiée.

Le 26 février 1969, le cœur du Redoutable diverge et fin mai il effectue ses essais au point fixe amarré à la jetée du Homet. Après une plongée statique dans l'anse du Becquet le 25 juin, il plonge en route libre dès le 2 juillet dans la fosse d'Aurigny. Les essais vont se poursuivre en Atlantique pour la propulsion et les installations de sécurité-plongée. Ils s'achèvent le 8 novembre par une plongée de 10 jours qualifiée de « longue durée ».

Après la période dite des « démontages après essais » de novembre 1969 à septembre 1970, le Redoutable quitte Cherbourg le 25 septembre 1970. Il va opérer désormais en Atlantique à partir de l'île Longue. Avec l'équipage bleu, il appareille le 7 juillet pour une traversée de longue durée de 43 jours ou il part explorer sa future zone d'activité. Son admission au service actif est prononcée le 1er décembre 1971. Après l'embarquement des 16 missiles, c'est l'appareillage **le 28 janvier 1972 pour la 1^{ère} patrouille opérationnelle**.

Les cinq autres SNLE seront équipés d'une chaufferie nucléaire à boucles identique à celle du Redoutable.

Le montage, les essais et les opérations d'entretien de la chaufferie nucléaire amènent le DPN puis Technicatome à implanter dans les ports de Cherbourg puis Brest et Toulon des antennes locales qui travaillent en coopération avec DCAN et la Marine Nationale. Des équipes de renfort viennent ponctuellement de Cadarache pour conduire les essais, en double avec les équipes de marins.

Le PAT s'est arrêté en octobre 1992 après avoir effectué 3 540 divergences et vu passer 2822 marins en formation.

L'étude d'un nouveau type de réacteur plus compact commence : ce sera la CAP

Après la réussite du PAT adapté aux gros navires que sont les SNLE, l'intégration d'une chaufferie dans des bâtiments plus petits comme les SNA paraît difficile. Ainsi naît en 1968 le concept d'un réacteur compact où le générateur de vapeur servirait de couvercle à la cuve, entraînant la suppression des boucles primaires.

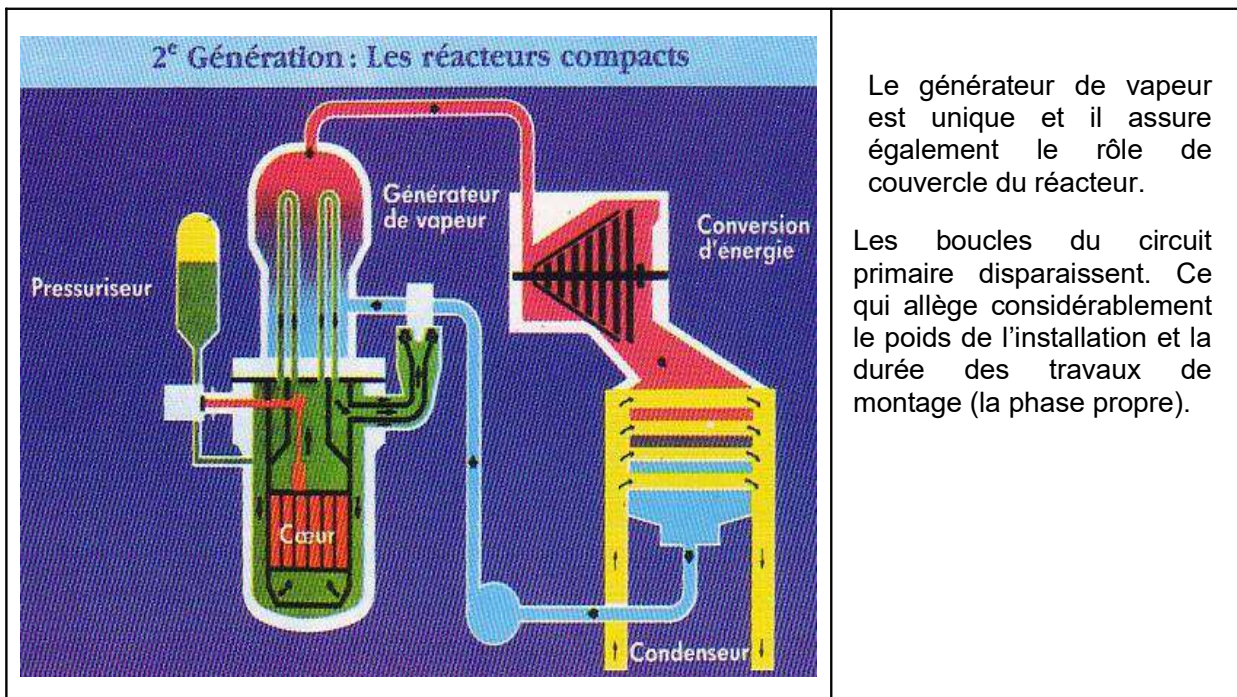
La deuxième génération de réacteurs embarqués

En se demandant quelles étaient les principales améliorations souhaitables, on en a retenu trois prioritaires :

- Le silence de l'installation, qui est une préoccupation de plus en plus recherchée pour un sous-marin,
- La réduction de la masse, pour permettre l'application à des bâtiments de moindre tonnage tels que des sous-marins d'attaque (S.N.A) et à un prix abordable pour la Marine,
- La rapidité du montage à bord, avec réduction des interférences entre le montage de la chaufferie nucléaire (phase "propre" en particulier) et le câblage électrique général du bâtiment.

La solution retenue a été une intégration du circuit primaire principal, en supprimant les boucles extérieures. Désormais, seul le pressuriseur est extérieur et les avantages obtenus sont spectaculaires :

- le fonctionnement du circuit primaire a lieu en circulation naturelle aux allures de croisière (silence pratiquement total). Même à grande allure, la source d'excitation est nettement diminuée avec des pompes primaires de faible puissance et la transmission des bruits est filtrée par la masse importante de l'ensemble Cuve-G.V. Le supportage de cet ensemble au voisinage de son centre de gravité favorise par ailleurs sa résistance aux chocs.
- la masse d'ensemble de la chaufferie est ramenée de 700 à 400 tonnes, à performances égales (principalement en raison de la réduction de la masse de protection rendue possible par la compacité du bloc primaire principal). Ceci a permis de réaliser les S.N.A. les plus petits du monde (2 700 t pour le Rubis).
- la durée de montage de la chaufferie sur le sous-marin est fortement réduite. La Chaufferie Avancée Prototype (C.A.P.) est lancée en 1970 et sa mise en service intervient en 1975.



Le générateur de vapeur est unique et il assure également le rôle de couvercle du réacteur.

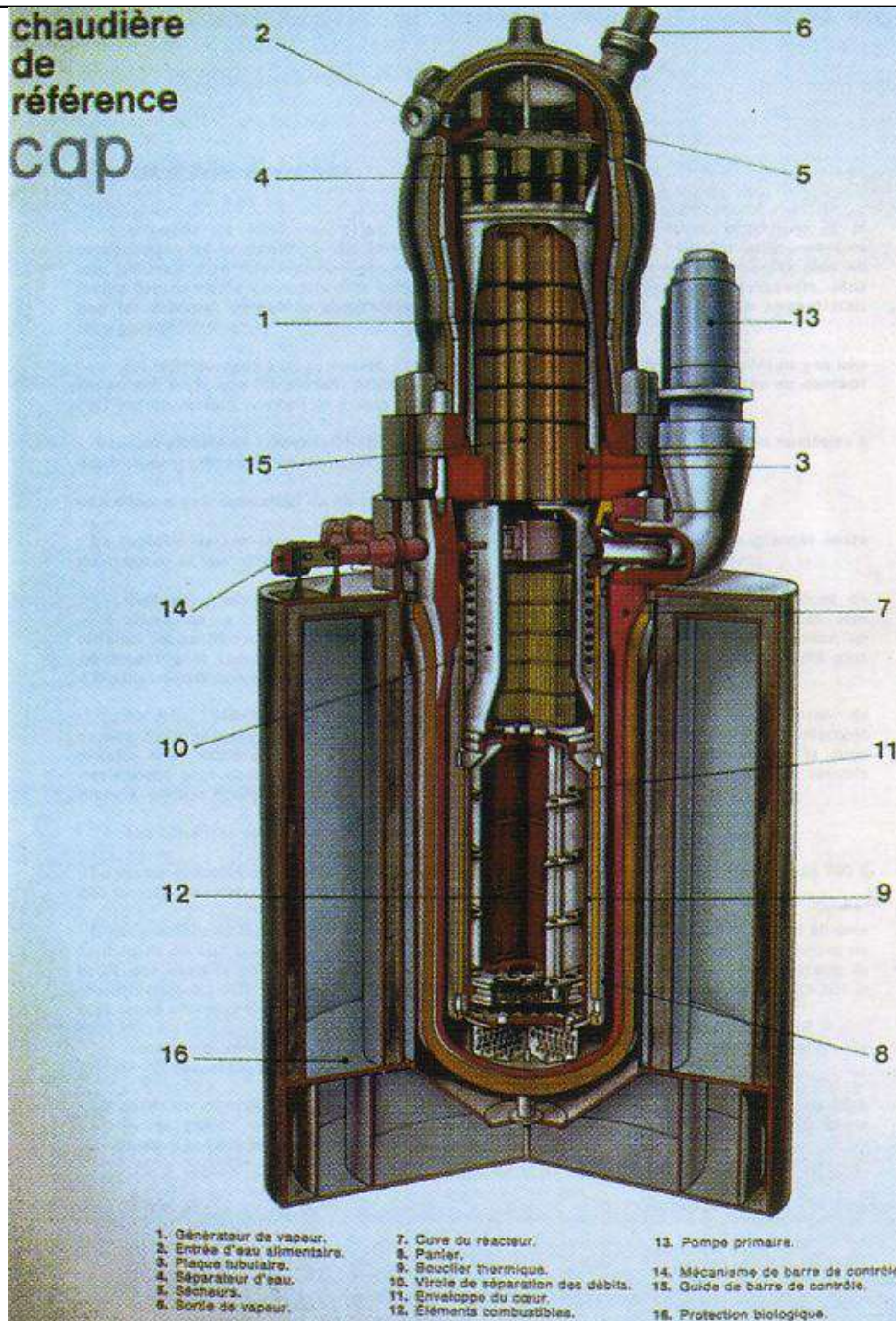
Les boucles du circuit primaire disparaissent. Ce qui allège considérablement le poids de l'installation et la durée des travaux de montage (la phase propre).

La CAP (Chaudière Avancée Prototype) diverge en 1975.

Pendant quelques années, elle assure la qualification des combustibles MOX (oxyde mixte d'uranium et plutonium) destinés aux réacteurs à eau sous pression du parc nucléaire français. Puis elle est adaptée pour recevoir et qualifier les combustibles des réacteurs embarqués de la marine nationale.

Plus tard, la CAP reprendra les essais pour la propulsion navale, sous une configuration aux performances améliorées appelée « **RNG** » (Réacteur nouvelle génération) dont l'exploitation s'est arrêtée en 2005.

La chaudière avancée prototype : CAP



- 1- Générateur de vapeur
- 2- Entrée eau dans GV
- 3- Plaque tubulaire
- 4- Séparateur d'eau
- 5- Sécheurs
- 6- Sortie vapeur
- 7- Cuve du réacteur
- 8- Panier
- 9- Bouclier thermique

- 10- Virole 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 compacité de l'ensemble est frappante comparée au P A T. On notera que les guides de tiges de croix de contrôle sont insérés dans le faisceau tubulaire du générateur de vapeur et les mécanismes

de commande des croix de contrôle sont disposés en périphérie et horizontalement, la commande se faisant par crémaillères.

La coursive permettant de circuler entre l'avant et l'arrière du bâtiment est située en abord. Elle abrite câbles électriques et « utilités » nécessaires au sous-marin. Ceci limite les interférences entre la chaufferie et le reste du bâtiment, aussi bien lors de la construction que lors des opérations d'entretien, lors du déchargement du cœur en particulier.

Cette solution de réacteur compact, dérivé de la C A P, est en tout d'abord mise en service pour les sous-marins nucléaires d'attaque : les SNA.

Un prototype de qualification est nécessaire pour un projet aussi innovant. Son financement, difficile à trouver, sera mixte militaire et civil. Le réacteur permettra également d'irradier des combustibles REP pour EDF. Sa construction se fait dans le prolongement du PAT et **sa mise en service intervient en décembre 1975**. Le premier cœur qui a été faiblement irradié sera ensuite utilisé sur un SNLE. Ensuite, les campagnes d'irradiation d'éléments combustibles destinés à EDF vont commencer.

Le succès de la CAP permet d'envisager la réalisation des SNA mais il faut tester la nouvelle chaufferie dans la CAP. Ce sera l'opération « **SNA dans CAP** ». Les nombreuses modifications concernent la mise en place d'un panier représentant le cœur d'un SNA, le mécanisme de commande des barres de contrôle, une pompe primaire installée sur une corne de la cuve, etc. Le générateur de vapeur sera celui d'un SNA.

Les essais de cette configuration « militaire » se déroulent d'août 1980 à avril 1981. Puis un nouveau cœur « civil » est mis en place et testé. La CAP présente une grande souplesse d'adaptation et elle va permettre ensuite de tester une nouvelle configuration adaptée aux SNLE-NG et au Porte-avions.

Le Réacteur nouvelle génération : RNG

Puis, vient le temps où il s'agit d'équiper des sous-marins beaucoup plus silencieux avec le développement des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins nouvelle génération et du porte-avions Charles de Gaulle. A Cadarache, on fait le choix d'une refonte quasi-totale de la CAP, seule la cuve d'origine est conservée. C'est ainsi qu'un nouveau prototype, baptisé « **réacteur nouvelle génération : RNG** », voit le jour.

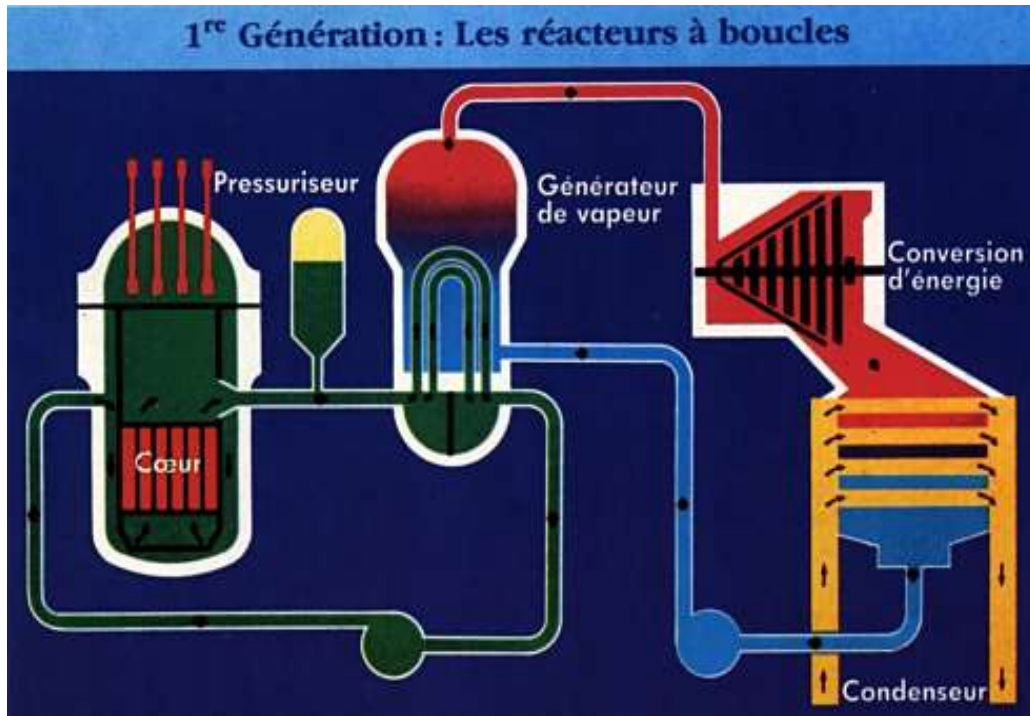
Le RNG dispose alors du premier contrôle-commande numérique permettant d'assurer la sûreté nucléaire du réacteur en pilotant les barres de contrôle (les absorbants) placés au sein du cœur.

Le RNG permettra de réaliser des avancées majeures dans la mise au point de combustibles toujours plus performants. Le RNG permettra de réaliser également d'importants progrès dans le domaine de la corrosion. En effet, pour le porte-avions Charles de Gaulle, la vapeur d'eau qui est émise par les générateurs de vapeur sert non seulement à faire tourner les turbines pour produire l'énergie mais aussi à alimenter des systèmes de catapultage des avions. Aussi, les recherches effectuées avec le RNG ont débouché sur la mise au point de matériaux encore plus résistants et d'une méthode innovante sans recours à un traitement chimique, pour filtrer l'eau du circuit secondaire qui sert à produire la vapeur utilisée pour produire de l'électricité.

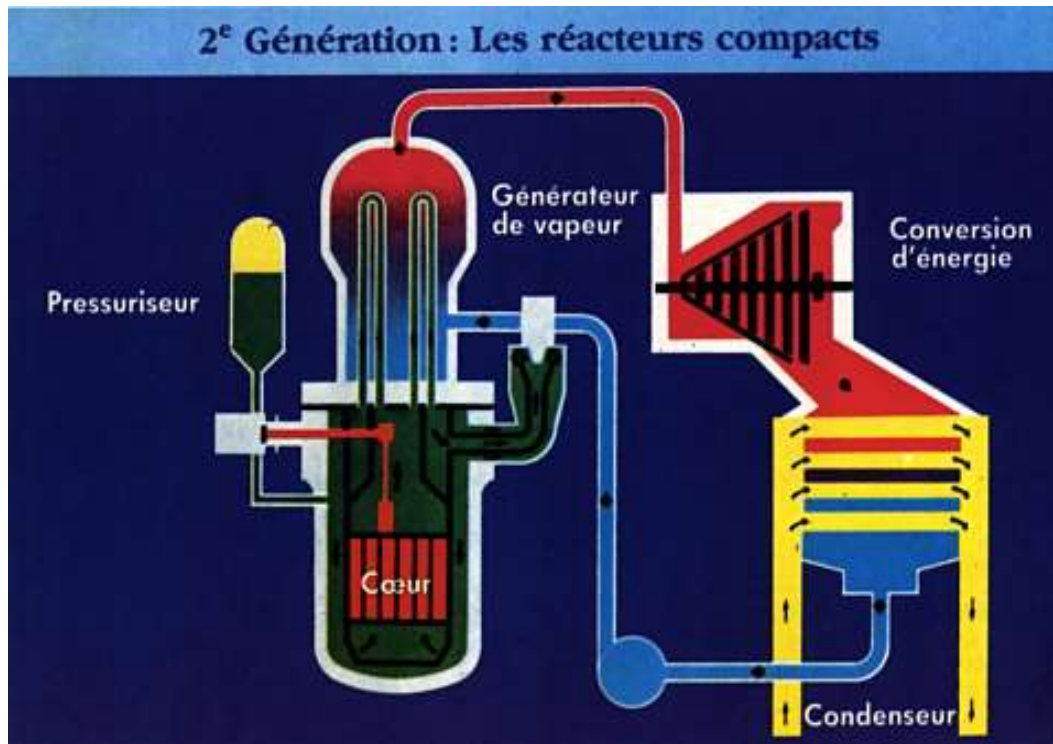
Aujourd'hui, la propulsion nucléaire a atteint un tel niveau de maturité qu'il ne s'agit plus de valider des concepts dans leur globalité, comme ce fut le cas avec **les prototypes PAT, CAP, puis RNG**. L'enjeu se trouve dans la possibilité de se focaliser et de valider certaines parties du concept, en particulier le cœur et le combustible nucléaire. Les futurs sous-marins, comme ceux du programme Barracuda, n'ont pas besoin d'un réacteur prototype mais d'un véritable banc d'essais. « C'est toute l'ambition de l'installation **RES** (Réacteur d'essais) qui va prendre le relais du RNG.

Comme pour l'opération SNA dans CAP, Technicatome conçoit une nouvelle configuration qui est réalisée par Indret. Un nouveau panier pour le combustible, un nouveau châssis pour les mécanismes de commande des barres de contrôle et un nouveau contrôle-commande qui va utiliser une technologie numérique. Cette nouvelle installation permet de valider le nouveau concept adapté aux SNLE-NG et également d'assurer la formation des équipages qui vont les conduire.

Les réacteurs nucléaires utilisés par la Marine Nationale



Ces réacteurs étaient en service sur les 6 SNLE de la 1^{ère} génération



Ces réacteurs ont été développés pour les SNA de type Rubis (6 exemplaires)

- Puis adaptés pour :
- les **SNLE-NG de type Triomphant** (4 exemplaires)
 - **Le PAN Charles de Gaulle** (2 réacteurs)
 - **Les SNA-NG de type Suffren** (6 exemplaires)

Les nombreuses et nécessaires installations d'essais pour le programme nucléaire

De nombreuses installations ont été construites pour faire les études et recherches essentielles en vue d'acquérir le savoir-faire technologique nécessaire à l'exploitation d'un réacteur nucléaire embarqué. On peut citer :

La pile AZUR

Cette pile critique du prototype à terre de la propulsion nucléaire fut construite rapidement et **elle diverge le 9 avril 1962**. Elle permet d'établir par un recalage précis les calculs de neutronique des cœurs destinés au premier réacteur destiné au PAT.

Sur cette pile, les mesures neutroniques peuvent y être effectuées à une puissance inférieure à 1kW et elles peuvent être effectuées sur tous les types de cœurs et dans différentes dispositions des absorbants neutroniques.

D'autres mesures effectuées à une puissance proche de 100 KW permettent également de dimensionner la radioprotection primaire des réacteurs, ce qui est capital sur un sous-marin où le personnel est très proche de l'installation.

Cette installation adoptée à l'évolution des différents programmes est toujours en service et reste le moyen d'essai indispensable utilisé pour une nouvelle installation. C'est aussi une école où les futurs exploitants se forment à l'étude de la neutronique. En l'an 2000, on comptabilisait plus de 36 000 divergences effectuées sur 525 chargements différents de combustibles nucléaires.

La grande boucle

Le DPN construit dès 1962 une installation reproduisant la boucle d'un circuit primaire de réacteur marine en respectant les conditions thermodynamiques de son fonctionnement. Elle est baptisée : « **La grande boucle** » et elle va permettre la mise au point des procédures de construction d'un circuit primaire. Ce sera le banc d'essais des composants principaux : pompes primaires, pressuriseur, sectionnements, capteurs divers, etc.

Elle permet également de suivre le traitement physico-chimique de l'eau, de mettre au point le contrôle-commande. Cette installation bien développée et instrumentée est très utile pour la qualification des équipements, les tests d'ensemble, etc.

Les essais de composants

Notamment, les mécanismes de manœuvres des barres de commande. Ils doivent être d'une fiabilité absolue et assurer en toute circonstance la fonction d'arrêt du cœur quelque soit le roulis, la gîte, les chocs ou les actions de grenadage subies par le bâtiment.

Cette fonction doit aussi être assurée lors d'une dépressurisation brutale du circuit primaire. Après une chute des barres de contrôle, par exemple lors des essais avec une pointe négative importante, la reprise de l'exploitation doit être rapide pour limiter la montée de l'empoisonnement du combustible.

Des boucles sont aussi construites pour détecter et mesurer les écoulements des fluides dans les tuyauteries. L'écoulement laminaire qui est le plus silencieux est recherché et les vibrations ne doivent pas être transmises à la coque. Pour ces expérimentations, un tronçon de coque échelle réduite est testé dans une piscine de Cadarache puis au **lac de Castillon** avec le concours de DCAN Toulon.

La formation des équipages

Le PAT n'était pas prévu pour la formation des personnels embarqués, mais dès l'arrivée du futur commandant du Redoutable en 1967, **le CF LOUZEAU**, il comprend l'intérêt du PAT pour la formation des équipages.

La marine construit à proximité de Cadarache un établissement dit « **Centre Marine Jouques-Cadarache** » pour loger les marins en formation. L'encadrement des stagiaires et l'enseignement se font sous la responsabilité de l'école des Applications Militaires de l'Energie Atomique : l'**EAMEA**. Après la formation théorique assurée à Cherbourg, la formation pratique s'effectue lors de stages de 13 semaines à Cadarache. La formation est tout d'abord assurée « en double » avec les opérateurs de Technicatome puis en « solo ». La conduite de l'installation nucléaire est réelle et des incidents pouvant se produire à bord sont reproduits pour tester le comportement des stagiaires.

La formation s'achève par le passage devant la « **commission mixte** » qui va délivrer l'autorisation de conduire une chaufferie nucléaire. Cette commission est coprésidée par le commandant de l'école atomique et le directeur local de Technicatome. C'est principalement un examen oral individuel des stagiaires pour s'assurer de leur acquis.

L'atelier de fabrication du combustible

C'est dans l'atelier de fabrication et de montage du combustible (FSMC) qu'arrive la poudre d'uranium enrichi qui sert à fabriquer les combustibles nucléaires. Ces combustibles rejoignent ensuite les sous-marins ou le porte-avions pour être chargés dans les cuves de réacteurs à Cherbourg, à l'Île Longue ou à Toulon. Technicatome fabrique le combustible et le CEA en est le garant.

Le Réacteur d'Essais à terre, le RES

Le projet de RES est né au début des années 90. Les réacteurs compact de **type K15** donnent satisfaction mais on veut mieux maîtriser le comportement des combustibles sous irradiation prolongée. Les besoins opérationnels conduisent à augmenter la durée d'utilisation des cœurs entre deux arrêts majeurs des bâtiments sous-marins ou porte-avions.

Le réacteur d'essai (RES) est représentatif des chaufferies nucléaires compactes qui propulsent les sous-marins français et le porte-avions Charles de Gaulle. Il permet de reproduire le fonctionnement des chaufferies embarquées, en éprouvant les matériels dans des conditions d'endurance encore plus contraignantes. Il contribue ainsi à accroître leur disponibilité opérationnelle et à démontrer leur sûreté. Les prédécesseurs du RES étaient des prototypes destinés à mettre au point les concepts successifs de chaufferies.

Le RES est un outil expérimental de recherche & développement, doté d'une importante instrumentation spécifique au cœur du réacteur. Les données acquises permettront d'améliorer les simulations pour adapter les chaufferies aux besoins futurs des bateaux, tout en rendant encore plus robuste la démonstration de sûreté. Le RES contribue également au maintien des compétences des équipes en charge de la propulsion nucléaire.

On pourra par exemple tester une chaufferie avec un gros cœur, un réacteur de forte puissance ou un nouveau concept de générateur de vapeur.

Les objectifs principaux sont :

- Le soutien à l'exploitation du parc des chaufferies nucléaires de propulsion navale
- le développement de nouvelles filières de réacteurs embarqués, par exemple : SNLE-3G.
- l'amélioration des chaufferies nucléaires embarquées à bord du porte-avions Charles de Gaulle et des projets de sous-marins nucléaires d'attaque, en particulier l'essai de nouveaux générateurs de vapeur à plaques
- la production du tritium pour les besoins de la Force de dissuasion nucléaire française. **Les réacteurs Célestins** de Marcoule ayant été mis à l'arrêt en 2009.
- la formation des équipages marine à la conduite des réacteurs nucléaires

- l'alimentation en chaleur du réseau de chauffage du centre de Cadarache.

La construction du RES a commencé en 2003, mais au fil de sa construction, il a dû faire face aux évolutions de la réglementation de sûreté, aux contraintes budgétaires, aux problèmes contractuels liés à la passation des marchés. Ce qui explique, le retard sur le calendrier initial.

Le réacteur RES est un réacteur à eau pressurisée alimenté par de l'oxyde d'uranium enrichi à moins de 20%. Il est situé au sein de l'Installation nucléaire de base secrète Propulsion Nucléaire (INBS-PN) de Cadarache et le RES est une version modifiée des réacteurs de type K15.

La piscine d'entreposage des combustibles du RES est en service depuis 2005 et elle a reçu des cœurs usés en provenance de Toulon.

Le 10 octobre 2018, le réacteur d'essais (RES) a pu diverger. Cette divergence marque sa mise en service opérationnel. C'est le successeur des 2 générations précédentes : le réacteur PAT (Prototype A Terre) arrêté en 1992 et le réacteur RNG (Réacteur de Nouvelle Génération) arrêté en 2005,

La réalisation de ce projet a été confiée à la Direction de la Propulsion Nucléaire (DPN) du CEA et la maîtrise d'œuvre a été confiée à la société AREVA-TA.



Piscine du RES. Immersion d'un emballage de transport dédié aux éléments combustibles.

L'avenir de la propulsion nucléaire

Elle reste un marché protégé car liée à la dissuasion nucléaire mais elle doit chercher en coopération avec Naval group à réduire ses coûts en recherchant l'innovation et des coopérations industrielles.

L'élaboration des cœurs combustible est un domaine maîtrisé par TechnicAtome qui réalise les cœurs pour les réacteurs nucléaires embarqués. La Marine Nationale souhaite maintenant des durées de vie plus longues pour ces cœurs dont les dates d'échange fixent les arrêts longue durée des bâtiments.

Le CEA puis Technicatome depuis 1972 ont acquis depuis une connaissance dans la conception d'une chaufferie nucléaire et une expérience dans la conduite des installations nucléaires qui se vérifie quotidiennement dans la fiabilité des installations embarquées sur SNLE, SNA ou Porte-avions.

Quelques dates importantes :

- ✓ Le 1^{er} réacteur mis au point par Enrico Fermi diverge le 2 décembre 1942 à Chicago

- ✓ le 15 décembre 1948 : divergence de ZOÉ, la première pile atomique française à Fontenay-aux-Roses,
- ✓ Le 18 mars 1960, la décision est prise de construire un prototype à terre (PAT) d'un « moteur atomique » capable de propulser un sous-marin, sur le site de Cadarache.
- ✓ Le 09 avril 1962 : divergence de la pile AZUR
- ✓ Le 14 août 1964 : divergence du PAT – Prototype A Terre – Chaufferie nucléaire destinée au Redoutable
- ✓ Le 1^{er} réacteur PWR français de 300 MWe (EDF/SENA) est mis en service en avril 1967 sur le site de Chooz dans les Ardennes
- ✓ Le 26 février 1969 : divergence du réacteur embarqué sur le Redoutable
- ✓ En novembre 1974, divergence de la CAP – Chaudière Avancée Prototype - qui permet de valider la chaufferie K48 destinée aux SNA. Arrêtée en 1987, elle sera transformée en RNG
- ✓ Le 09 août 1989 : divergence du RNG – Réacteur de Nouvelle Génération – qui a permis la qualification de la chaufferie K15 destinée aux SNLE-NG et au porte-avions. Il a été mis à l'arrêt en 2005.
- ✓ Le 10 octobre 2018 : divergence du réacteur d'essais, le RES. Chaufferie de type K15, cette Installation très instrumentée doit permettre l'étude de nouveaux cœurs et de nouveaux composants.