

LA PROPULSION NUCLÉAIRE

RÉSUMÉ

Dès 1942 (divergence de la première pile nucléaire), la capacité de disposer d'une source d'énergie anaérobie (en absence d'air) quasi-illimitée a permis d'assurer l'autonomie recherchée pour les sous-marins non seulement pour assurer leur propulsion, mais aussi toute la vie à bord (épuration d'air et usine d'oxygène, approvisionnement en eau par dessalement d'eau de mer) ; pratiquement, la durée des missions est désormais limitée par la nourriture et la capacité d'endurance des équipages.

La propulsion nucléaire apporte aux porte-avions une autonomie énergétique et donc opérationnelle (les ravitaillements en mer pour le kérosène des avions peuvent être espacés dans le temps). Pour ce qui concerne les bateaux de surface, la propulsion nucléaire impose des contraintes jugées rédhibitoires jusqu'à maintenant pour les navires marchands (ports base dotés d'installations nucléaires lourdes pour leur maintenance, difficultés réglementaires pour l'accueil de navires à propulsion nucléaire lors des nombreuses escales.

Pratiquement, en dehors des navires militaires (porte-avions, croiseurs), seuls les brise-glaces russes tirent profit de l'autonomie de la propulsion nucléaire, car ils assurent l'ouverture de la route stratégique entre les océans Atlantique et Pacifique par le nord de la Russie, dans des zones pratiquement inhabitées.

C'est en 1959 que le gouvernement français a pris la décision de construire un sous-marin nucléaire.

Aujourd'hui la France possède dix sous-marins et un porte-avions nucléaire qui tirent leur énergie de la fission de l'uranium. Les SNLE, sous-marins nucléaires lanceurs d'engins qui constituent la force océanique stratégique, en sont à leur deuxième génération.

Ils sont au nombre de quatre, équipés de missiles M51, dont les progrès portent sur la portée, la vitesse, la furtivité et la précision.



Porte-avions Charles de Gaulle



Les SNA sous-marins nucléaires d'attaque de 2^{ème} génération (programme Barracuda) remplacent progressivement les SNA de 1^{ère} génération (les deux premiers sur un total de six ont été mis en service actif respectivement en 2022 et 2024).

La décision concernant le lancement d'un 2^{ème} porte-avions nucléaire « nouvelle génération » (PANG) a été prise en 2020.

◀ SNLE en Rade de Brest

La DGA est le maître d'ouvrage des navires, et le CEA assure la maîtrise d'ouvrage de toutes les chaufferies nucléaires navales. Ils s'appuient sur les maîtres d'œuvre que sont les sociétés NAVAL GROUP et TECHNICATOM qui assurent depuis l'origine la conception, la réalisation, l'entretien et le démantèlement de la flotte nucléaire.

1. HISTORIQUE DES SOUS-MARINS NUCLÉAIRES (Réf. 1]

Le premier sous-marin nucléaire a été le Nautilus, lancé en 1955 par les Etats-Unis ; il s'est rapidement illustré en traversant l'océan arctique via le pôle Nord en 1958.

En France, le programme Q 244, lancé en 1954 sur la base d'un réacteur à uranium naturel modéré à l'eau lourde, fut un échec [Réf. 6].

Il a été suivi en 1959 par le programme Coelacanthe de SNLE.

En 1964, le PAT (prototype à terre) diverge avec de l'uranium américain à fort taux d'enrichissement.



Figure 1 : Sous marin Nautilus (photo Wikipédia)

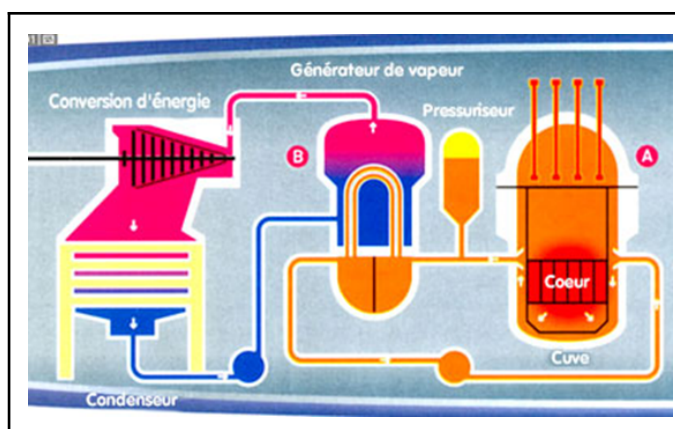
Début 1965, la mise en service de l'usine d'enrichissement de Pierrelatte permet à la France de devenir autonome en uranium enrichi, et le Redoutable est mis à la mer en 1971.

À cette époque, il y a déjà 90 sous-marins américains et 55 sous-marins russes opérationnels.

La force océanique stratégique (FOST), composante de la dissuasion

La France a adopté une stratégie de dissuasion, avec une composante aéroportée (initialement : Mirages III, fusées du plateau d'Albion) dont le vecteur est désormais le Rafale, notamment embarqué sur le porte-avions. L'autre composante est la force océanique stratégique, comprenant initialement 6 SNLE-M4^{*1}, et désormais 4 SNLE-NG^{*}.

2. LA TECHNOLOGIE DES CHAUFFERIES FRANÇAISES [Réf. 2]



Les chaufferies des SNLE^{*} de type « Redoutable » sont des réacteurs à eau pressurisée (REP^{*}), suffisamment compacts pour pouvoir être embarqués.

Les premiers réacteurs étaient à boucles, ce qui permettait de répartir les volumes de la cuve primaire et des deux générateurs de vapeur (GV^{*}).

◀ Figure 2 : Technologie à boucle

Pour les sous-marins nucléaires d'attaque, une conception originale a été développée : le GV est placé directement au-dessus du cœur.

Outre le gain de place, cette conception supprime le risque de rupture de la liaison cuve-GV, qui constitue le principal accident sur un réacteur nucléaire (dépressurisation et perte du refroidissement).

Cette technologie a été reconduite pour les SNLE de nouvelle génération (SNLE-NG, ou encore « SNG ») dans la conception des deux chaufferies K15 qui équipent également le porte-avions Charles de Gaulle (PACDG).

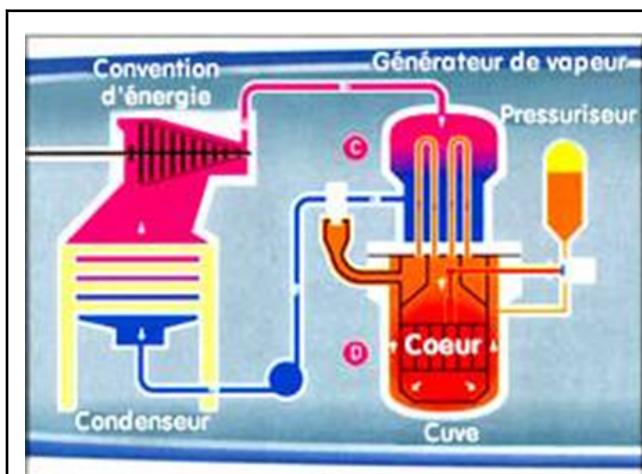


Figure 3 : Technologie intégrée

¹ Les sigles notés d'un astérisque renvoient au glossaire en fin de fiche.

La puissance est transmise à l'arbre d'hélice soit directement via une turbine de propulsion et un réducteur (cas des SNLE et PACDG) soit via un turbo alternateur et un moteur électrique couplé à l'arbre d'hélice (cas des SNA). Des turbo-alternateurs fournissent en parallèle l'alimentation électrique pour les systèmes et la vie à bord ainsi que le rechargement des batteries de secours.

Performances [Réf. 1]

Les performances des chaufferies nucléaires doivent être appréciées dans le cadre de l'environnement du navire et de ses conditions de navigation, ainsi que de ses missions militaires :

- environnement de navigation : roulis, tangage ; inclinaisons fortes
- ambiance marine corrosive
- accélérations, chocs militaires
- manœuvrabilité : passage de 10 % à 100 % de puissance nominale en 1 minute ; cyclages de puissance lors des catapultages
- disponibilité : situation de repli en cas d'accident ; redivergence au « pic xénon* »
- propriétés d'exploitation : facilité de conduite, d'entretien (accessibilité), disponibilité moyenne, caractère « pardonnant » à un écart ; coût de possession

3. LA FLOTTE NUCLÉAIRE FRANÇAISE

Depuis 2001, la flotte sous-marine française est exclusivement à propulsion nucléaire. Les sous-marins à propulsion classique qui continuent à être construits le sont uniquement pour l'exportation.



Figure 4 : SNLE

SNLE [Réf. 3] [Réf. 4]

Dans la politique de dissuasion, le rôle du SNLE est d'exercer un effet dissuasif à l'égard d'un agresseur potentiel des intérêts vitaux de la Nation, grâce à ses 16 fusées à têtes multiples qui peuvent détruire les centres principaux du pays agresseur.

Les 4 SNLE NG (nouvelle génération type TRIOMPHANT) sont basés à Brest (Ile longue). Deux équipages de 111 hommes chacun se relaient à bord. Le rôle du SNLE est d'être prêt à tout moment à lancer une salve, et pour cela de ne pas avoir été détecté. C'est pourquoi un effort particulier a été déployé vis-à-vis du bruit car, sous l'eau, toute vibration devient audible aux oreilles ennemies exercées.

Entre les deux générations de SNLE, un facteur 1 000 de discrétion sonore a été gagné.

SNA [Réf. 5]

Ils assurent la protection des SNLE, assistent les forces navales en surface, effectuent des missions de contrôle (ou d'interdiction) de zones maritimes ainsi que de renseignements (par exemple, en envoyant ou en récupérant des agents depuis la mer), défendent le territoire national (en allant au contact d'un navire menaçant).

Les six SNA en service sont basés à Toulon. Les deux équipages qui se relaient comptent 70 hommes.

Pendant les guerres de Yougoslavie, il suffisait d'un SNA patrouillant en Adriatique pour bloquer tout trafic non autorisé. Les SNA de 2^{ème} génération (programme Barracuda) pourront lancer des missiles de croisière, comme leurs homologues américains.



Figure 5 : SNA

Les innovations apportées à la propulsion nucléaire des SNA de 2^{ème} génération sont caractérisées :

- par l'augmentation de la durée de vie du cœur nucléaire qui permet d'améliorer significativement le taux de disponibilité du SNA en espaçant les périodes de maintenance majeure et donc en augmentant le nombre de jours en mer
- par l'accroissement des performances opérationnelles en améliorant la signature acoustique du navire et en faisant varier rapidement la puissance de la chaufferie
- par leurs nouvelles capacités de mise en œuvre de forces spéciales et de frappes d'objectifs terrestres situées à plusieurs centaines de kilomètres à l'aide de missiles de croisières navals .

Deux SNA 2^{ème} génération sont entrés en service actif (Suffren en 2022 , Duguay Trouin en 2024) , un troisième le Tourville le sera en 2025 ; la mise en service des 3 autres s'échelonnera jusqu'en 2030.



Figure 6 : Porte-avions Charles de Gaulle

PACDG [Réf. 6] [Réf. 7] photo DAM

Déplacement = 40 600 tonnes
Dimensions hors tout = 261,5 m x 64,4 m
2 catapultes de 74 m
1 îlot (le PA2 devrait en avoir 2)
8 ponts sous pont d'envol
Puissance propulsive maximale continue = 56 MW
2 lignes d'arbre
Vitesse de pointe = 27 nœuds
Il dispose de 2 réacteurs de type K15.



Figure 7 : Avion de combat

En service actif depuis le 18 mai 2001, il emporte 40 avions de combat dont certains peuvent être armés de missiles nucléaires.

Ses missions : attaquer des objectifs terrestres ou navals, assurer une couverture aérienne d'un théâtre d'opérations aussi bien à terre qu'en mer, et participer à la dissuasion nucléaire. Il a pris part à l'opération Héraclès en Afghanistan.

Haute de 75 mètres, soit un immeuble de 25 étages, cette ville flottante abrite près de 2000 membres d'équipage.

La décision de doter la marine française d'un deuxième porte-avions nucléaire de nouvelle génération PANG a été prise en décembre 2018 [7].pour une mise en chantier fin 2025 début 2026 et des premiers essais en pleine mer en 2035 -2036

Le PANG se rapprochera des dimensions des portes avions américains avec 305 m de long sur 79,5 m de large et 75.000 t à pleine charge. Sa propulsion sera assurée par deux nouveaux réacteurs avec deux chaufferies plus puissantes [JC1] permettant ainsi une autonomie de 10 ans.

De nouvelles catapultes électromagnétiques (electromagnetic aircraft lambing system EMALS) de conception américaine remplaceront le système du PACDG à propulsion vapeur

Ce bâtiment devrait être en pointe dans les futurs systèmes de combat mêlant drones, différents types d'avions, intelligence artificielle, satellites.....

4. LES FORCES MONDIALES

Pays	SNLE	SNA	Références
USA	14	54	Estimation OTAN
Russie	12	22	
Royaume Uni	4	7	
Inde	2		
Brésil ...			1 SNA (alvaro alberto) co-développé avec Naval Group Début de construction 2023 pour une mise en service 2031, objectif : 6 SNA

La France est le seul autre pays à disposer d'un porte-avions nucléaire, les Etats-Unis en comptent 11.

5. LES AUTRES NAVIRES DE SURFACE



Les Soviétiques ont construit 4 croiseurs porte-missiles à propulsion nucléaire du type Kirov, dont le plus ancien est retiré du service, deux sont en réserve et le plus récent rebaptisé Piotr Veliky (Pierre le Grand) est encore en activité.

Les Américains n'ont quant à eux plus de croiseurs nucléaires en service.

◀ **Figure 8 : Croiseur Porte-missile Piotr Veliky**

Les Russes disposent de 8 brise-glace équipés de deux réacteurs nucléaires chacun. La liaison Atlantique – Pacifique par l'océan arctique est, en effet, un axe stratégique pour la Russie.

On voit sur la photo le brise-glace nucléaire Le Let Podeby en route vers le pôle Nord en 2021.

Figure 9 : Brise-glace nucléaire Let Podeby
(Photo Ekaterina Anisimova - archives AFP) ▶



6. LA RECHERCHE ET LA FORMATION DES ÉQUIPAGES [Réf. 11]

Depuis le début de l'aventure française dans la propulsion nucléaire, les réacteurs ont été testés à terre : PAT (Prototype A Terre d'un réacteur à eau pressurisée à boucles destiné à équiper les SNLE-M4), CAP (Chaudière Avancée Prototype des réacteurs de SNA), RNG (Réacteur K15 pour les SNLE de Nouvelle Génération).

Maintenant que la conception compacte est parfaitement maîtrisée, a-t-on encore besoin de réacteur à terre ?

Le RES (Réacteur d'Essai) dédié aux études sur la propulsion nucléaire a divergé en octobre 2018 et est donc en service opérationnel. Ce réacteur est représentatif des chaufferies nucléaires compactes qui propulsent les sous-marins nucléaires et le porte-avions CDG : il permet de reproduire le fonctionnement des chaufferies embarquées en éprouvant les matériels dans des conditions d'endurance encore plus contraignantes.

Le RES est un outil de recherche et développement dont les données acquises permettront d'améliorer les simulations pour adapter les chaufferies aux besoins futurs des navires et rendre plus robuste la démonstration de sûreté ; Il permettra d'améliorer les connaissances notamment en neutronique, grâce à son instrumentation à cœur, et également à tester des composants périphériques de conception nouvelle.

En particulier, des gains importants pourraient être réalisés sur la gestion des combustibles, en augmentant leur durée de vie par une meilleure utilisation de leurs réserves énergétiques, tout en gardant des marges de sûreté acceptables.

Comme ses prédécesseurs, le RES servira aussi à la formation des équipages, en complément du simulateur « full scope » SARIE [Réf. 9].



7. LE DÉMANTÈLEMENT DES SOUS-MARINS NUCLÉAIRES [Réf. 12]

7.1. OPÉRATIONS



La conception modulaire par tranches facilite le démantèlement des sous-marins nucléaires : il suffit de découper le compartiment nucléaire, puis de ressouder les deux tronçons avant et arrière pour assurer la flottabilité de la coque, et son remorquage vers un chantier de déconstruction classique.

L'ex-Redoutable a été transformé en musée (Cité de la mer, Cherbourg).

Le compartiment nucléaire, de taille limitée (diamètre de 10 m), est entreposé quelques dizaines d'années, en visant une décroissance radioactive suffisante pour un transport et un stockage définitif de déchets radioactifs de surface.

Le combustible peut être soit retraité par les procédés d'Areva-NC, soit envoyé au stockage profond des déchets tel que défini dans la loi du 28 juin 2006.

◀ **Figure 10 : Découpage du compartiment réacteur**

Les Soviétiques puis les Russes ont lancé, de 1958 à 1997, 245 unités qui comprennent deux réacteurs chacune.

Lors de la dislocation de l'Union Soviétique, la Russie a dû gérer le retrait du service de près de 200 navires, et a fait appel aux autres membres du G8 pour l'aider, lors du sommet de Kananaskis en 2002.

Le flux annuel de démantèlement, qui était de 2 à 4 sous-marins dans les années 90, s'est accéléré à une vingtaine par an dans les années 2000, et la Russie devrait avoir fini de démanteler 190 sous-marins en 2010.

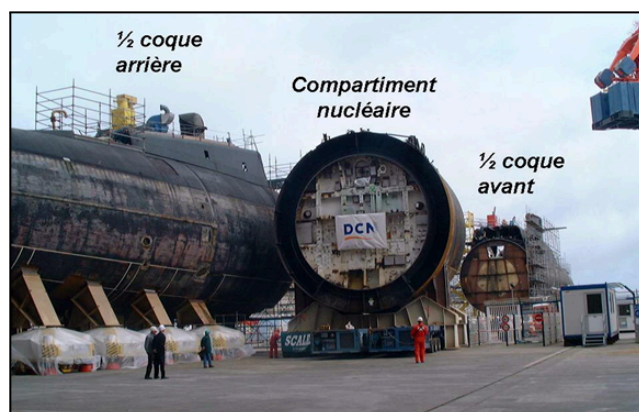


Figure 11 : SNLE en phase de démantèlement

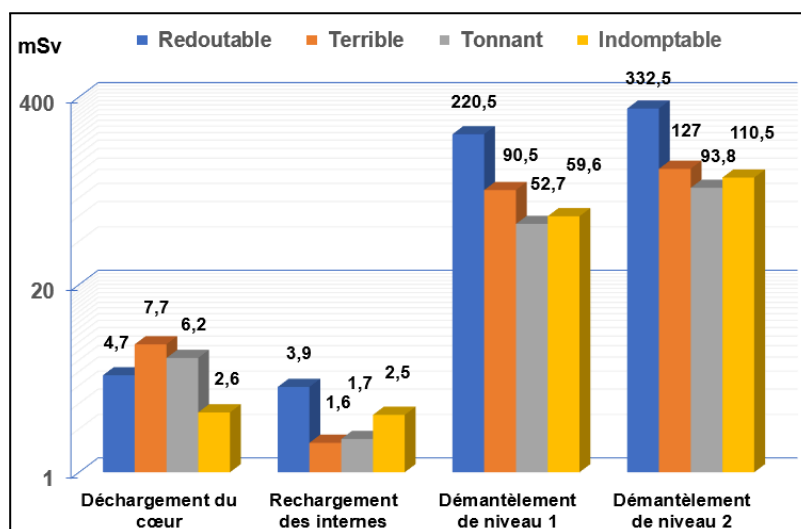
L'ex-Redoutable a été transformé en musée (Cité de la mer, Cherbourg).

Le compartiment nucléaire, de taille limitée (diamètre de 10 m), est entreposé quelques dizaines d'années, en visant une décroissance radioactive suffisante pour un transport et un stockage définitif de déchets radioactifs de surface.

Le combustible peut être soit retraité par les procédés d'Areva-NC, soit envoyé au stockage profond des déchets tel que défini dans la loi du 28 juin 2006.

7.2. DOSIMÉTRIE LIÉE AUX OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT

Le graphe ci-contre montre l'évolution à la baisse des doses intégrées, résultant de l'expérience acquise.



8. RÉFÉRENCES

- [1] Charles Fribourg, « La propulsion nucléaire des navires », www.energethique.com
- [2] « La propulsion nucléaire, 50 ans sous les mers » [www.cea.fr/defense/propulsion_nucleaire/ 50 ans sous les mers](http://www.cea.fr/defense/propulsion_nucleaire/50_ans_sous_les_mers) (notamment des photos)
- [3] Les Redoutable, histoire d'une aventure technique, humaine et stratégique, V. Groizeleau <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=104185>
- [4] <http://www.netmarine.net/> (notamment des photos)
- [5] CEA presse et medias , 3 questions à Paul LUCAS directeur du programme propulsion nucléaire 21/07/2019
- [6] [http://www.defense.gouv.fr/dga/dossier/porte avion](http://www.defense.gouv.fr/dga/dossier/porte_avion) (25/06/2021)
- [7] Ministère des armées/dossier presse /PANG (8/12/2020)
- [8] Les flottes de combats édition 2018
- [9] Raids.fr
- [10] Times of India, 18/3/2010
- [11] http://www-cadarache.cea.fr/fr/activites/pdf/lepoinsturRES_atout_n15.pdf (avril-juin 2007)
- [12] DGA : « Démantèlement des sous-marins – Gestion des déchets »

ANNEXE : L'ORGANISATION ÉTATIQUE POUR LA CONSTRUCTION DES NAVIRES NUCLÉAIRES [Réf. 2]

En matière nucléaire concernant la Défense nationale, les rôles entre la DGA*, l'EMM* et le CEA sont répartis selon les termes d'un décret signé du Premier ministre.

L'élaboration d'un bâtiment à propulsion nucléaire est régie par deux maîtres d'ouvrage :

- la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) a pour missions d'orienter les développements en équipements militaires pour les trente ans à venir, de conduire les programmes d'armement et de développer la coopération européenne. Pour la propulsion navale, elle est maître d'ouvrage de l'ensemble du navire
- le CEA est maître d'ouvrage de la chaufferie nucléaire (deux dans le cas d'un porte-avions nucléaire). Il reste propriétaire du cœur et du combustible

Ces deux maîtres d'ouvrage, assistés par le STXN, passent commande auprès d'un groupement de quelques milliers d'industriels mené par deux entreprises principales, qui ont assuré la conception et la réalisation de la flotte nucléaire française :

- NALA GROUP est maître d'œuvre de l'ensemble du navire. Celui-ci est réalisé sur son site de Cherbourg pour les sous-marins nucléaires selon un mode d'assemblage modulaire, c'est-à-dire par tranches. La cuve, le générateur de vapeur et les systèmes qui composent le réacteur sont, eux, fabriqués sur le site DCN-Indret de Nantes et sont ensuite transportés par barge jusqu'à Cherbourg. Le futur Porte-avions sera construit par les chantiers de l'Atlantique à Saint Nazaire en partenariat avec NAVAL Group.
- Technicatome (Société technique pour l'énergie atomique, créée en 1972, issue de la fusion des départements de construction des piles et de la propulsion navale du CEA) est maître d'œuvre de la chaufferie nucléaire, du cœur et du combustible. Cette société a repris son appellation d'origine TechnicAtome, à sa sortie du groupe Areva en 2017.

GLOSSAIRE

DAM : Direction des Applications Militaires du CEA ; elle comprend 4 directions d'objectifs : armes nucléaires, matières et environnement, sécurité et non prolifération, propulsion nucléaire ; www-dam.cea.fr

DGA : Direction Générale de l'Armement, relevant du Ministère de la défense

EMM : Etat-Major de la Marine, relevant du Ministère de la défense

GV : générateur de vapeur ; permet de transformer la chaleur, extraite du cœur du réacteur par l'eau primaire sous pression en vapeur non radioactive pour alimenter les turbo-alternateurs, et – via un réducteur - la turbine de propulsion.

M4, M45, M51 [3, 4] : missile équipé d'engins nucléaires

PAN : porte-avions (à propulsion) nucléaire ; PACDG : porte-avions Charles de Gaulle

Pic xénon : ^{135}Xe ($T_{1/2}=9,2$ h) est un descendant du produit de fission ^{135}I ($T_{1/2}=6,7$ h) et il décroît en ^{135}Cs ; il absorbe également les neutrons en formant ^{136}Xe .

Réacteur en fonctionnement, il est à l'équilibre mais, sa demi-vie étant plus grande que celle de son père, il s'accumule lors d'un arrêt et devient un « poison neutronique » du cœur avec un maximum au bout d'une dizaine d'heures. Il faut alors insérer un surplus de réactivité pour remonter en puissance.

REP : réacteur à eau pressurisée (en anglais : PWR : pressurized water reactor) ; c'est le type de réacteur électrogène le plus répandu dans le monde.

Il est directement issu des réacteurs de sous-marins, compte tenu du rapport (taille / puissance) favorable.

Le fait que le CEA ait eu à mettre au point ce type de réacteur pour les besoins des SNLE a permis à Framatome de franciser rapidement la licence achetée à Westinghouse pour les réacteurs du parc d'EDF.

SNA : sous-marin nucléaire d'attaque (en anglais : attack submarine – SSN)

SNLE : sous-marin nucléaire lanceur d'engins (en anglais : ballistic missile submarine – SSBN) ; les premiers étaient équipés de missiles M4, les SNLE-NG (ou SNG : de nouvelle génération) sont équipés de M45 remplacés progressivement par des M51.

STXN : Service technique mixte pour la propulsion nucléaire : composé d'ingénieurs du CEA (# 50 %), de DGA, (# 20 - 25 %), d'officiers de la Marine (# 25 - 30 %).

Caractéristiques des sous-marins	SNLE	SNG	SNA	Barracuda
Longueur (m)	128	138	73	99,5
Diamètre (m)	10,6	12,5	7,6	8,8
Puissance propulsive (MW)	11,8	22,5	7	
Déplacement en plongée (tonnes)	9000	14335	2670	5300
Vitesse max en plongée (nœuds)	20	25	25	25
Équipage (hommes)	2 * 135	2 * 111	2 * 66	2 * 60

SNLE-M4 (service – retrait)	SNLE-NG (mise en service)	SNA (mise en service)	Barracuda (noms d'après [3]) (lancement / service)
Redoutable (1971 – 1991)	Triomphant (1997)	Rubis (1983)	Suffren (2011 / 2017)
Terrible (1973 – 1996)	Téméraire (1999)	Saphir (1984)	Dugay-Trouin (2013 / 2019)
Foudroyant (1975 – 1998)	Vigilant (2004)	Casabianca (1987)	<i>Dupetit-Thouars</i> (2021)
Indomptable (1976 – 2005)	Terrible (2010)	Emeraude (1988)	<i>Duquesne</i> (2023)
Tonnant (1981 – 2000)		Améthyste (1992)	<i>Tourville</i> (2025)
Inflexible (1985 – 2008)		Perle (1993)	<i>De Grasse</i> (2027)