



NOVEMBRE
2023



La propulsion nucléaire navale Enjeux techniques et stratégiques d'une technologie confidentielle

Héloïse FAYET
Jean-Louis LOZIER

L’Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d’information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l’Ifri est une fondation reconnue d’utilité publique par décret du 16 novembre 2022. Elle n’est soumise à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L’Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l’échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n’engagent que la responsabilité des auteurs.

ISBN : 979-10-373-0778-1

© Tous droits réservés, Ifri, 2023

Couverture : Le SNA de classe Barracuda Suffren navigue au sud de Toulon le 10 octobre 2020. © Axel Manzano/Marine Nationale/Défense

Comment citer cette publication :

Héloïse Fayet et Jean-Louis Lozier, « La propulsion nucléaire navale. Enjeux techniques et stratégiques d’une technologie confidentielle », *Prolifération Papers*, n° 66, Ifri, novembre 2023.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Proliferation Papers

Face au retour de la compétition stratégique entre les grandes puissances, mais aussi les puissances intermédiaires, les armes nucléaires, et plus largement les armes de destruction massive (ADM), retrouvent progressivement le rôle prépondérant qu'elles jouaient pendant la guerre froide. Qu'il s'agisse de la rhétorique nucléaire agressive adoptée par la Russie dans le cadre de la guerre en Ukraine, de l'avancement du programme nucléaire nord-coréen, de la montée en puissance de la Chine ou encore du risque de prolifération au Moyen-Orient, les questions de dissuasion et de prolifération sont de nouveau un aspect essentiel de la politique internationale.

Depuis plus de 20 ans, le Centre des études de sécurité de l'Ifri publie la série « **Proliferation Papers** », avec l'objectif de faciliter la compréhension des ADM et sujets conventionnels connexes, en croisant les analyses sous différents angles : technique, régional, diplomatique et stratégique. Réunissant des auteurs reconnus comme émergents, la série s'efforce d'apporter un nouvel éclairage sur les problématiques relatives à la prolifération des ADM, à l'évolution des doctrines, concepts et postures nucléaires, ainsi qu'aux nouvelles technologies et capacités militaires.

Comité de rédaction

Rédacteur en chef : Élie Tenenbaum

Rédactrice en chef adjointe : Héloïse Fayet

Assistant d'édition : Rafaël Roussel

Auteurs

Héloïse Fayet est chercheuse au Centre des études de sécurité de l'Ifri et coordinatrice du programme Dissuasion et prolifération. À ce titre, ses recherches se concentrent sur la prolifération nucléaire au Moyen-Orient, les doctrines des États dotés et l'impact des nouvelles technologies sur la stabilité stratégique. Elle travaille également sur la géopolitique du Moyen-Orient et les questions de prospective stratégique.

Avant de rejoindre l'Ifri, elle a passé plusieurs années au ministère des Armées en tant qu'analyste spécialiste du Moyen-Orient. Elle est diplômée du *bachelor* de Sciences Po Paris, et du double master en journalisme et sécurité internationale de cette école. Elle a des activités d'enseignement et d'encadrement à Sciences Po Paris ainsi qu'à l'Institut des hautes études de la défense nationale (IHEDN).

Jean-Louis Lozier est conseiller du Centre des études de sécurité de l'Ifri et un officier de marine qui a servi durant 39 ans au sein de la Marine nationale. Il a quitté le service actif en août 2020. Entré à l'École navale en 1981, sa carrière embarquée s'est principalement déroulée à bord des sous-marins, et a été ponctuée par les commandements d'un sous-marin nucléaire d'attaque (1997-1999) et de deux sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (2004-2006). Il a suivi les cours de l'École de guerre britannique (ACSC3), est titulaire d'un MA en *Defence studies* de *King's College London* et a été auditeur du *Senior Course* du collège de défense de l'Organisation du traité de l'Atlantique nord (OTAN).

Promu officier général en 2012, il a exercé durant huit ans à des postes de hautes responsabilités, dont celui de chef de la division Forces nucléaires de l'état-major des Armées (2012-2014) et inspecteur des armements nucléaires (2014-2015). Il a terminé son parcours dans la Marine comme vice-amiral d'escadre, préfet maritime de l'Atlantique (délégué du gouvernement pour l'action de l'État en mer) et commandant de la zone maritime Atlantique, responsable de la conduite des opérations en Atlantique et dans l'Arctique (2018-2020).

Résumé

La propulsion nucléaire navale confère des capacités techniques et opérationnelles (discrétion, puissance, autonomie et manœuvrabilité) inégalées aux bâtiments de surface et aux sous-marins qu'elle équipe. Si la priorité des recherches sur le nucléaire militaire fut, pendant la Seconde Guerre mondiale, attribuée aux armes nucléaires, la fin du conflit permet aux pays assez avancés scientifiquement de repenser l'utilité de l'énergie nucléaire à des fins de propulsion.

Les États-Unis sont ainsi les premiers à mettre à la mer un sous-marin à propulsion nucléaire, le *Nautilus*, dont les essais à la mer débutent en janvier 1955. Dans un premier temps équipés uniquement de missiles conventionnels et de torpilles, les sous-marins de la guerre froide se diversifient et, en 1959, le premier sous-marin nucléaire lanceurs d'engins (SNLE), le *George Washington*, entre au service actif. Nécessitant une forte cohésion entre les armées et les industriels, la filière se structure petit à petit sous l'impulsion de l'amiral Rickover, véritable pionnier de la propulsion nucléaire.

Dans la dynamique de rivalités de puissance propre à la guerre froide, l'Union des républiques socialistes soviétiques (URSS) débute également ses recherches sur la propulsion nucléaire à la fin de la Seconde Guerre mondiale, mais les blocages politiques propres au régime stalinien et à ses successeurs ralentissent le programme. Il faut attendre 1958 pour les premiers essais à la mer du *Leninsky Komsomol*, premier sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) soviétique, rapidement suivi par des SNLE, acquis notamment grâce à une politique efficace d'espionnage des programmes américains. Cependant, une culture de sûreté défaillante, caractéristique des régimes autoritaires, est à l'origine de nombreux accidents, parfois mortels, nuisant à l'efficacité des sous-marins russes.

Les trois autres États dotés de l'arme nucléaire (EDAN) au titre du Traité de non-prolifération (TNP) nucléaire acquièrent également la maîtrise de la propulsion nucléaire au cours de la guerre froide, selon des modalités différentes. Alliée proche des États-Unis, le Royaume-Uni se voit fournir, après d'âpres négociations, un réacteur nucléaire permettant de construire son premier SNA, le *HMS Dreadnought*. Soucieuse de son indépendance et face au refus d'aide américaine, la France tente dans un premier temps de développer son propre programme, qui se clôt par l'échec du Q244. Ce n'est finalement qu'après l'adoption d'une filière spécifique et la fourniture par les États-Unis d'uranium enrichi que le *Redoutable*, premier SNLE français, peut être mis à l'eau en 1967. Enfin, ce n'est qu'en 1974 que le premier SNA chinois entre au service actif, dont le réacteur semble fortement inspiré des

brise-glace russes. Malgré plusieurs tentatives allemandes, brésiliennes, canadiennes ou encore japonaises, aucun État non-doté de l'arme nucléaire (ENDAN) ne parvient à développer la propulsion nucléaire au cours de la guerre froide.

Ce premier âge de la propulsion nucléaire permet donc de mettre en exergue le lien étroit entre les armes nucléaires et la technique de propulsion, bien que certains États possédant l'arme nucléaire n'aient pas – encore – de sous-marins ou de porte-avions à propulsion nucléaire (Israël, Pakistan et Corée du Nord). C'est en effet la furtivité et l'autonomie des SNLE qui assure la capacité de frappe en second d'un État et concourt donc à l'efficacité et à la crédibilité de la dissuasion nucléaire. Les SNA apportent également un soutien opérationnel capital à la dissuasion, par leur capacité à sécuriser les patrouilles de SNLE et à permettre une flexibilité des options stratégiques.

De plus, l'héritage historique de la guerre froide dresse quelques impératifs relatifs à la maîtrise de la propulsion nucléaire, ainsi que des enseignements techniques et opérationnels. Si aucun consensus n'a émergé concernant le choix du combustible (entre uranium faiblement enrichi [UFE] et uranium hautement enrichi [UHE]), la filière à eau pressurisée s'est quant à elle rapidement imposée à tous les pays intéressés par la propulsion nucléaire. De plus, la série d'accidents nucléaires, notamment en Union soviétique, ou d'avaries techniques a imposé une culture de sûreté nucléaire indispensable pour l'efficacité du programme, au travers d'organismes indépendants et de filières industrielles et administratives dédiées. Enfin, la propulsion nucléaire nécessite des compétences techniques et humaines pointues, avec des formations spécifiques et un vivier restreint, qui peut certes être entretenu avec les commandes relatives au nucléaire civil mais qui exige un flux constant de conception et de mise en œuvre de réacteurs militaires pour ne pas se perdre.

Ces enseignements historiques apportent donc un éclairage particulier à la propulsion nucléaire du XXI^e siècle, qui se caractérise notamment par un accroissement et une professionnalisation de la flotte chinoise et, en réaction, à l'émergence de nouveaux acteurs dans l'Indo-Pacifique. Grâce à un soutien soviétique puis russe, l'Inde est ainsi le premier État possédant des armes nucléaires mais non signataire du TNP à mettre en œuvre la propulsion nucléaire : Moscou loue un SNA à New Delhi à partir de 1988, puis l'Inde développe son propre programme de SNLE construits localement, au prix de plusieurs avaries et de nombreux délais. La montée en puissance de la Chine provoque également un intérêt pour la propulsion nucléaire dans des pays ayant déjà des capacités partielles ou totales du cycle du combustible, à l'image du Japon ou de la Corée du Sud, et qui possèdent déjà des sous-marins à propulsion conventionnelle. Le Brésil témoigne également un intérêt ancien pour les sous-marins, aidé par la France pour la partie conventionnelle au travers du programme PROSUB.

Enfin, l'accord AUKUS et sa déclinaison sous-marine, qui prévoit la vente de SNA américains et britanniques à l'Australie, puis la construction d'une classe de SNA AUKUS au Royaume-Uni et en Australie à l'horizon 2040, représente l'une des principales évolutions de la propulsion nucléaire du XXI^e siècle. C'est en effet la première fois qu'un ENDAN, qui plus est très investi dans les instances de désarmement, possédera, selon des modalités qui restent à définir, des sous-marins à propulsion nucléaire – mais sans missiles à tête nucléaire. Ce contrat témoigne notamment de l'importance croissante des SNA comme capacité stratégique.

Si le risque de prolifération nucléaire et notamment d'utilisation de la matière à des fins de construction d'armes nucléaire est minime, voire inexistant, dans le cas de l'Australie, l'accord AUKUS présage tout de même d'une adaptation des protocoles de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) afin de garantir la sûreté et la sécurité du réacteur et des installations de fabrication. Cela nécessite notamment l'instauration d'un dialogue technique poussé entre l'Australie et l'Agence afin d'implémenter des dispositions spécifiques prévues dans les garanties additionnelles. La qualité de cette discussion permettra de mettre en place un précédent législatif et normatif afin de réduire les risques de prolifération nucléaire en cas de réplique d'un tel accord avec des puissances moins irréfutables.

Bien que l'exécution à long terme du programme AUKUS permette de tirer les leçons du partage et de l'exportation de la propulsion nucléaire, les impératifs de sûreté, de rigueur industrielle et de non-prolifération plaident aujourd'hui pour le maintien d'une politique de non-exportation de cette technologie, et au respect des plus hauts standards pour les pays développant déjà la propulsion nucléaire.

Executive Summary

Naval nuclear propulsion provides surface ships and submarines with unrivalled technical and operational capabilities (discretion, power, range, and maneuverability). While most of the research on the military application of nuclear energy used to be allocated to weaponry during the Second World War, the end of the conflict allowed scientifically advanced countries to rethink the usefulness of nuclear energy for propulsion purposes.

Thus, United States became the first country to launch a nuclear-powered submarine, the *Nautilus*, with sea trials beginning in January 1955. Initially equipped only with conventional missiles and torpedoes, Cold War-era submarines diversified and, in 1959, the first nuclear-powered ballistic missile submarine (SSBN), the *George Washington*, entered active service. Requiring strong cohesion between armed forces and defense industry, the sector was gradually being structured during the 1960's, partly thanks to the Admiral Rickover, pioneer of nuclear propulsion.

As part of the Cold War dynamic of great powers competition, the Soviet Union also began its research on nuclear propulsion at the end of the Second World War, but the political paralysis specific to the Stalinist regime and its successors slowed down the program. It was not until 1958 that the first sea trials were carried out on the *Leninsky Komsomol*, the first Soviet nuclear attack submarine (SSN), quickly followed by a SSBN, acquired thanks to an effective policy of spying on American programs. However, a trend towards poor safety, characteristic of authoritarian regimes, has led to numerous accidents – some of them fatal – which have undermined the effectiveness of Russian submarines.

The three other Nuclear Weapons States (NWS) under the Nuclear Non-Proliferation Treaty (NPT) also acquired control of nuclear propulsion during the Cold War, in different ways. As a close ally of United States, the United Kingdom was supplied, after tough negotiations, with a nuclear reactor to build its first SSN, the *HMS Dreadnought*. Concerned about its independence and faced with the refusal of American aid, France initially tried to develop its own program, which ended with the failure of Q244. It was only after the adoption of a specific industry and the supply of enriched uranium by the United States that the *Redoutable*, the first French SSBN, could be launched in 1967. Finally, it was not until 1974 that China's first SSN entered active service, with a reactor strongly inspired by Russian icebreakers. Despite several attempts by Germany, Brazil, Canada and Japan, no non-nuclear weapon states (NNWS) succeeded in developing nuclear propulsion during the Cold War.

Therefore, the first age of nuclear propulsion highlights the close relation between nuclear weapons and propulsion technology, although several NWS (Israel, Pakistan and North Korea) do not – yet – have nuclear-powered submarines or aircraft carriers. Indeed, it is the stealth and autonomy of SSBNs that ensures a state's second-strike capability, and thus contributes to the effectiveness and credibility of nuclear deterrence. SSNs also provide vital operational support for deterrence, through their ability to secure SNLE patrols and allow flexibility of strategic options.

Moreover, the historical legacy of Cold War provides some imperatives related to the control of nuclear propulsion, as well as technical and operational teachings. While no consensus emerged on the choice of fuel (between low-enriched uranium [LEU] and highly enriched uranium [HEU]), the pressurized water option quickly became the preferred choice for all countries interested in nuclear propulsion. In addition, the nuclear accident series – particularly in the Soviet Union – and technical breakdowns imposed a nuclear safety culture that is essential to the program's effectiveness, through independent bodies and dedicated industrial and administrative sectors. Finally, nuclear propulsion requires technical and human skills, with specific training and limited pool, which can certainly be maintained with civil nuclear orders, but which requires a constant flow of military reactors design and implementation not to get lost.

These historical teachings therefore shed light on the nuclear propulsion of the 21st century, which is characterized in particular by an increase and professionalization of the Chinese fleet and, in reaction, to the emergence of new players in the Indopacific. Thanks to Soviet and then Russian support, India is the first state with nuclear weapons but not signatory to the NPT to implement nuclear propulsion: Moscow has rented an SSN to New Delhi from 1988, before India was able to develop its own locally built SSBN program, at the cost of several damages and many delays. China's rising is also provoking the interest in nuclear propulsion in countries that already have partial or total fuel cycle capabilities, such as Japan or South Korea, and that already have conventional propulsion submarines. Brazil also manifests old interest in submarines, helped by France for the conventional part through the PROSUB program.

Finally, the AUKUS agreement and its submarine version, which provides for the sale of American and British SSN to Australia, then a construction of a class of SSN AUKUS in the United Kingdom and Australia by 2040, is one of the major developments in nuclear propulsion in the 21st century. Indeed, it is the first time that an NNWS, all the more invested in disarmament, will have nuclear-powered submarines – but without nuclear-powered missiles – on terms yet to be defined. This contract reflects the growing importance of SSNs as a strategic capability.

While the risk of nuclear proliferation – and in particular of the use of the material to build nuclear weapons – is minimal, or even non-existent, in the case of Australia, the AUKUS agreement nevertheless foreshadows an adaptation of the International Atomic Energy Agency (IAEA) protocols to ensure the safety and security of the reactor and manufacturing facilities.

This requires specifically a technical dialogue between Australia and the Agency in order to implement specific provisions in the additional safeguards. The quality of this discussion will make it possible to set a legislative and normative precedent to reduce the risks of nuclear proliferation in case of replication of such an agreement with less irreproachable powers.

Although the long-term implementation of the AUKUS program enable to learn from the experience of sharing and exporting nuclear propulsion, the imperatives of safety, industrial rigor and non-proliferation today argue in favor of maintaining a policy of non-export of this technology and respecting the highest standards for countries already developing nuclear propulsion.

Sommaire

INTRODUCTION	12
LE PREMIER ÂGE DE LA PROPULSION NUCLÉAIRE	14
Les États-Unis, pionniers de la propulsion nucléaire.....	14
<i>Les premières découvertes scientifiques</i>	<i>14</i>
<i>Vers l'établissement d'un programme sous-marin</i>	<i>18</i>
<i>Accélération et diversification des programmes</i>	<i>20</i>
Un programme soviétique chaotique.....	23
<i>Les premiers projets de l'époque stalinienne</i>	<i>23</i>
<i>L'évolution vers les sous-marins à propulsion nucléaire.....</i>	<i>25</i>
<i>De nouvelles générations plus opérationnelles.....</i>	<i>26</i>
Un programme britannique dépendant de l'aide américaine	28
<i>De premières recherches infructueuses.....</i>	<i>29</i>
<i>Un appui américain décisif</i>	<i>29</i>
L'indépendance française	30
<i>L'échec salutaire du Q244.....</i>	<i>30</i>
<i>Un perfectionnement progressif.....</i>	<i>32</i>
Un programme chinois peu développé pendant la guerre froide	33
Les tentatives des États non-dotés de l'arme nucléaire.....	34
LES ENSEIGNEMENTS DU PREMIER ÂGE DE LA PN	36
Enseignements opérationnels	36
<i>Mobilité, endurance et furtivité : des atouts exceptionnels</i>	<i>36</i>
<i>L'apport stratégique des SNA</i>	<i>37</i>
<i>L'enjeu de la propulsion nucléaire en surface.....</i>	<i>38</i>
Enseignements techniques	38
<i>Le choix du combustible</i>	<i>38</i>
<i>L'imposition de la filière à eau pressurisée.....</i>	<i>39</i>
La sûreté nucléaire comme impératif absolu	40
Les clés du succès de la propulsion nucléaire.....	42
<i>Une organisation spécifique et efficace.....</i>	<i>42</i>
<i>Un personnel bien entraîné</i>	<i>44</i>

LA PROPULSION NUCLÉAIRE AU XXI^E SIÈCLE	46
 Pérennisation et adaptation de la PN des acteurs historiques	47
<i>Les adaptations post-guerre froide</i>	<i>47</i>
<i>Des exigences renforcées</i>	<i>49</i>
<i>La montée en puissance chinoise.....</i>	<i>50</i>
 Les nouveaux acteurs	51
<i>L'exception indienne</i>	<i>51</i>
<i>Japon, Corée du Sud et Australie : les autres tentations de l'Indo-Pacifique.....</i>	<i>53</i>
<i>Iran, un candidat potentiel ?</i>	<i>58</i>
<i>Brazil : un intérêt ancien.....</i>	<i>58</i>
 Le défi de la non-prolifération	60
<i>Les conséquences d'AUKUS</i>	<i>61</i>
<i>Vers de nouveaux usages ?.....</i>	<i>63</i>
CONCLUSION	65

Introduction

Le 15 septembre 2021, l'annonce du partenariat de sécurité « AUKUS » entre les États-Unis, l'Australie et le Royaume-Uni, qui comprend, entre autres dispositions, la livraison de sous-marins nucléaires d'attaque à l'Australie par ses partenaires anglo-saxons, a mis en lumière les spécificités de la propulsion nucléaire (PN) navale. Rarement étudiée au-delà de ses caractéristiques techniques, souvent ignorée au profit des armes nucléaires que les sous-marins transportent, la PN est pourtant au cœur de la dissuasion par la discrétion, la manœuvrabilité et l'endurance qu'elle permet.

Cette chape de confidentialité est entretenue par les pays détenteurs eux-mêmes : si neuf États possèdent, à ce jour, l'arme nucléaire, seuls six maîtrisent la technologie de la propulsion nucléaire, à des degrés différents. Les États-Unis, le Royaume-Uni et la France sont ainsi les seuls pays à entretenir depuis plus d'un demi-siècle une dissuasion océanique permanente, soit la présence constante d'un ou plusieurs sous-marins lanceurs d'engins (SNLE) à la mer. La Russie a interrompu cette permanence durant plusieurs années, tandis que la Chine et l'Inde se reposent sur leurs composantes terrestre et aérienne pour compenser une composante océanique plus faible.

De même, alors que des processus de partage d'informations sur les arsenaux nucléaires entre États détenteurs de l'arme existent, à l'image de l'accord New START – certes suspendu par la Russie depuis février 2023 – ou du processus P5¹, les échanges relatifs à la propulsion nucléaire sont extrêmement rares et les conditions d'aide au développement des programmes britannique, français et indien pendant la guerre froide ont été entourés de précautions drastiques. Ainsi, les États-Unis, pionniers de l'atome, ont d'abord refusé de partager leurs connaissances avec leur allié britannique après la première patrouille du *Nautilus*, premier sous-marin à propulsion nucléaire, en 1955. De même, l'aide sollicitée par la France fut très longtemps refusée, avant la livraison d'uranium enrichi aux équipes françaises, permettant l'avancée des travaux et la conception autonome d'un réacteur.

Cette histoire au cours de la guerre froide, marquée par de nombreux accidents en Union soviétique, a permis l'émergence dans les États détenteurs de la propulsion nucléaire d'une culture stratégique, technique et militaire dont des leçons peuvent être tirées aujourd'hui. La PN s'est ainsi

1. Les « P5 » sont les cinq membres permanents du Conseil de sécurité des Nations unies, et États dotés de l'arme nucléaire au titre du Traité de non-prolifération nucléaire (TNP). Avant la guerre en Ukraine, ils se réunissaient régulièrement dans une optique de réduction des risques stratégiques, au sein du « protocole P5 ».

imposée au fil des patrouilles et des tensions américano-soviétiques comme une condition impérative d'une dissuasion nucléaire crédible et efficace, mais également comme un atout opérationnel décisif grâce aux sous-marins nucléaires d'attaque. Les enseignements techniques sont aussi nombreux, notamment sur le choix du combustible et l'imposition de la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP), au détriment d'autres pistes. Une organisation humaine, militaire et politique solide apparaît enfin comme la condition primordiale d'une propulsion nucléaire sûre.

Dans ce contexte, le partage de technologie prévue dans le partenariat AUKUS fait figure d'exception et semble refléter une évolution autour de la propulsion nucléaire. Depuis le début des années 2000, de nouveaux acteurs désireux de maîtriser cette technique s'affirment, notamment en Asie face à la puissance grandissante de la Chine. C'est d'ailleurs la montée en puissance de Pékin qui a motivé ce partenariat trilatéral, rompant avec une politique restrictive sur les échanges dans ce domaine. Se pose donc à nouveau la question de l'exportabilité de cette technologie, par rapport aux risques de prolifération de matière fissile, mais également celui du respect de la sûreté nucléaire.

Le premier âge de la propulsion nucléaire

L'idée d'appliquer les découvertes scientifiques relatives à la fission d'un noyau d'uranium, réalisées à la fin des années 1930, à la production d'énergie et à la propulsion de sous-marins émergea rapidement. Avec le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale, la priorité fut néanmoins donnée, en Grande-Bretagne dans un premier temps, puis aux États-Unis dans un deuxième, à la production d'armes nucléaires. L'US Navy relança le projet de propulsion nucléaire navale à l'issue du conflit, devenant pionnière du domaine dont elle garda soigneusement les secrets, partagés avec réticence uniquement avec les Britanniques. L'acquisition et le développement de cette technologie par un nombre restreint d'États durant les premières décennies de la guerre froide ont largement modelé le paysage de la propulsion nucléaire navale, selon des modalités et un rythme différents selon les pays.

Les États-Unis, pionniers de la propulsion nucléaire

La puissance industrielle et scientifique des États-Unis, ainsi que leur statut de première puissance mondiale à la fin de la Seconde Guerre mondiale leur permirent de devenir pionniers de l'utilisation de l'énergie atomique aux fins de propulsion navale.

Les premières découvertes scientifiques

Les réflexions sur l'utilisation de l'énergie atomique au profit de la propulsion des navires de l'US Navy commencèrent aux États-Unis avant même leur entrée dans le second conflit mondial. Le point de départ de cette aventure est l'expérience conduite en 1938 par Otto Hahn, Lise Meitner et Fritz Strassman à l'Institut de chimie Kaiser Wilhem à Berlin mettant en exergue la libération d'énergie d'un atome d'uranium ^{235}U bombardé par des neutrons. Le récit de cette expérience par Niels Bohr et Enrico Fermi lors de la 5^e conférence de physique théorique à Washington en janvier 1939 intéressa particulièrement un physicien travaillant pour le Naval Research Laboratory (NRL), Ross Gunn. Celui-ci parvint à intéresser le responsable du bureau d'ingénierie de l'état-major de l'US Navy, qui ne disposait cependant que d'un budget très limité pour entreprendre des recherches complémentaires pour tirer parti de ces découvertes. Cette même année, le physicien hongrois Leo Szilard, ayant compris les implications potentielles de l'expérience Hahn-Meitner-

Strassman, en particulier pour la fabrication de bombe atomique, parvint, au travers de ses échanges avec Albert Einstein, à alerter le président Roosevelt de son importance stratégique. Celui-ci créa un comité consultatif de l'uranium, sous la direction de l'ingénieur Lyman J. Briggs.

Début novembre 1939, ce comité rapporta au président que, bien que non encore expérimentée, la réaction en chaîne pouvait, si elle était contrôlée, constituer un moyen de propulsion pour les sous-marins. Le rapport indiquait également qu'elle pouvait fournir une énergie destructrice comparable à aucun explosif connu². Les travaux entrepris au sein du NRL débouchèrent sur un dispositif expérimental de séparation isotopique de l'uranium en 1941. Ces travaux ne fournirent les premiers résultats qu'en février 1942, alors que Roosevelt avait déjà confié à l'US Army la responsabilité de ce qui allait devenir le programme Manhattan, avec comme objectif de produire une arme nucléaire, entraînant un isolement de la Navy pour le reste de la guerre dans le domaine atomique.

Dans l'immédiat après-guerre, l'US Navy, prise par la démobilisation et les interrogations sur la résilience d'une flotte de surface face à une attaque par des armes atomiques, ne lança aucun projet relatif à la propulsion nucléaire. Certains de ses responsables s'accordaient sur l'idée selon laquelle la priorité pour la Navy était de développer et d'acquérir des armes nucléaires et les vecteurs pour les mettre en œuvre³.

Dans un contexte de réorganisation de la recherche et du développement d'armes atomiques, se traduisant par la mise en place en janvier 1947 d'un contrôle civil, avec la création de la Commission de l'énergie atomique (AEC), en remplacement du contrôle militaire exercé par le « *Manhattan district* », un projet de réacteur atomique expérimental fut développé à Oak Ridge (Tennessee). La Navy décida d'y envoyer une équipe d'officiers pour s'y former, sous la direction du capitaine de vaisseau Hyman Rickover. Celui-ci, grâce à ses rares qualités de leader, d'organisateur et d'ingénieur rigoureux, fut à l'origine de l'extraordinaire développement de la propulsion nucléaire dans l'US Navy, et par voie de conséquence du développement de l'énergie nucléaire électrique civile fondée sur des réacteurs à eau pressurisée.

La Seconde Guerre mondiale avait montré le rôle croissant des sous-marins dans les opérations navales, mais également leur vulnérabilité liée à la nécessité de revenir périodiquement en surface et à leur faible vitesse sous l'eau. Ceci conduisit l'amiral Nimitz, *Chief of Naval Operations* (CNO), à émettre en 1947 une première expression de besoin pour le développement d'un appareil propulsif utilisant l'énergie atomique destinée à un sous-marin. Fin 1948, le capitaine de vaisseau Rickover sut créer et faire reconnaître, une organisation de la propulsion nucléaire navale duale, sous la double autorité

2. R. G. Hewlett et F. Duncan, *Nuclear Navy, 1946-1962*, Chicago, The University of Chicago Press, 1974, p. 15-18.

3. *Ibid.*, p. 46.

du CNO et du *chairman* de la commission à l'énergie atomique, dénommée ultérieurement *Naval Reactors*, dont il allait assurer la direction pendant plus de trois décennies. Le développement de deux filières technologiques fut approuvé par le président Truman le 8 août 1950 : la première reposait sur la réaction en chaîne produite par des neutrons rapides, utilisant du sodium liquide comme caloporteur, développée par General Electric ; l'autre utilisait les neutrons thermiques et de l'eau pressurisée comme modérateur et caloporteur, développée par Westinghouse⁴.

Fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée (REP)

Cette solution technique repose sur deux circuits : le circuit primaire contenant le REP et le circuit secondaire contenant une machine à vapeur « classique ».

Circuit primaire

L'absorption d'un neutron par un noyau d'atome lourd, comme celui de l'uranium 235 (c'est-à-dire un noyau possédant 92 protons et 143 neutrons) entraîne la fission de celui-ci. De cette fission résultent deux ou plusieurs autres noyaux (produits de fission), ainsi que de l'énergie et enfin deux ou trois autres neutrons. Ces neutrons, dits neutrons rapides, possèdent une énergie très élevée. Leur probabilité de créer de nouvelles fissions est très faible. En revanche, en étant ralentis, ou modérés, la probabilité de créer de nouvelles fissions avec de l'U-235 est importante. Ces neutrons, dits thermiques, possèdent une énergie environ 1 000 fois moins élevée que celle des neutrons rapides.

Pour entretenir une réaction de fission en chaîne, il est nécessaire que chaque fission d'un atome d'U-235 crée un neutron thermique exploitable pour engendrer une nouvelle fission d'U-235. Le réacteur est alors dit « critique ».

Les réacteurs à eau pressurisée (REP ou PWR en anglais) utilisent comme énergie celle dégagée par la fission par neutrons thermiques des atomes d'U-235. Le cœur d'un REP est une capacité de quelques mètres cubes contenant le combustible situé dans des gaines autour desquelles circule de l'eau. Celle-ci est utilisée en tant que « modérateur » pour ralentir les neutrons et en tant que « caloporteur » pour récupérer la chaleur produite par le combustible et la véhiculer vers les générateurs de vapeur. Afin d'éviter son ébullition et la surchauffe des éléments combustibles, cette eau est

4. *Ibid.*, p. 163. Le président Truman, en plus de l'approbation de sous-marins à propulsion nucléaire, approuva également la construction d'un sous-marin utilisant un cycle fermé selon l'une des technologies développées par les Allemands durant la Seconde Guerre mondiale. Celui-ci ne fut cependant jamais construit, les études démontrant la supériorité opérationnelle de la propulsion nucléaire par rapport au cycle fermé.

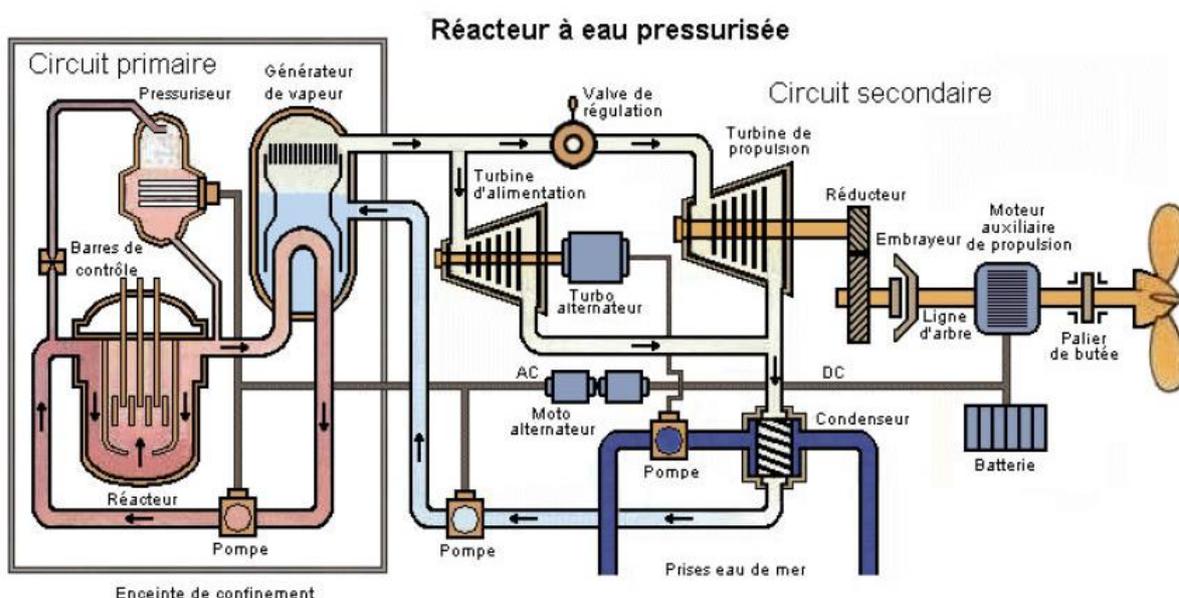
maintenue en permanence à une pression élevée grâce à un pressuriseur.

Contenue dans un circuit primaire, elle est en général mise en circulation à l'aide d'une ou plusieurs pompes primaires. Le contrôle de la réactivité du cœur et son arrêt sont réalisés grâce à des barres de contrôles, absorbant les neutrons, et insérées entre les gaines de combustible. Le démarrage d'un réacteur est effectué en levant les barres de contrôle pour atteindre l'état critique. Cette phase est appelée la divergence.

Circuit secondaire

L'eau contenue dans le circuit secondaire passe de l'état liquide en phase vapeur dans les générateurs de vapeur. Celle-ci est envoyée vers une ou des turbines, avant d'être condensée dans un condenseur refroidi à l'eau de mer, et renvoyée grâce à des pompes vers les générateurs de vapeur. La détente de la vapeur dans les turbines met en rotation ces dernières permettant ainsi de fournir de l'électricité et de propulser le sous-marin ou le bâtiment de surface (cf. schéma).

Fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée (chaufferie K-15 du porte-avions *Charles de Gaulle*)



Source : Wikipédia.

Fonctionnement d'un réacteur à neutrons rapides (RNR)

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) exploitent la « fertilité » de l'uranium 238 (comprenant 92 protons et 146 neutrons). Bombardé par des neutrons rapides, celui-ci est converti en plutonium 239 fissile. Dans ce type de réacteur, le caloporteur est constitué de métal liquide (sodium ou mélange bismuth-plomb) échangeant la chaleur dans un générateur de vapeur avec l'eau contenue dans le circuit secondaire et la transformer en vapeur alimentant les turbines.

Vers l'établissement d'un programme sous-marin

Cette décision présidentielle traduisait l'intérêt certain de la Navy pour l'énergie atomique que Rickover avait suscité, en transformant en quelques mois un projet de recherche en véritable programme sous-marin, avec une organisation étatique et industrielle adaptée.

La construction de prototypes à terre fut la première étape du développement de ces deux filières. La filière REP fut rapidement en avance sur la filière RNR. La construction du réacteur expérimental MK1 (avec une puissance de 70 mégawatts [MW]) sur un site dans l'Idaho débuta en décembre 1951, alors que celle du réacteur MkA de la filière rapide ne commença qu'en juin 1953 à West Milton (État de New York).

Rickover fit également accepter par la Navy le principe de commencer la construction des sous-marins à propulsion nucléaire sans attendre la fin des essais sur les prototypes à terre. C'est ainsi que la pose de la quille du sous-marin *Nautilus* au chantier Electric Boat de Groton dans le Connecticut fut réalisée en juin 1952, alors que les essais du réacteur Mk1 ne commencèrent qu'en 1953, le premier état critique étant atteint le 30 mars 1953. Un premier essai à puissance élevée, représentatif d'une traversée d'un sous-marin entre Groton et l'Irlande, durant 100 heures d'affilée, fut entrepris avec succès en juin 1953, confirmant les espoirs mis dans ce mode nouveau de propulsion. Ne se satisfaisant pas de ce premier succès, et alors que la Navy, toujours constituée de bâtiments construits pendant la Seconde Guerre mondiale, engageait des réflexions sur son renouvellement à l'issue de la guerre de Corée, Rickover put faire lancer des études sur d'autres réacteurs pour sous-marins, plus compacts ou permettant d'atteindre des vitesses très élevées, ou pour des bâtiments de surface.

L'année 1955 fut particulièrement importante pour la propulsion nucléaire :

- Le réacteur MK2 du sous-marin *Nautilus*, quasi-identique à celui fonctionnant en Idaho, divergea pour la première fois à la fin de l'année 1954 et fonctionna à pleine puissance le 3 janvier 1955. Le 17 janvier, le commandant du *Nautilus*, commençant ses essais à la mer, put transmettre ce compte rendu célèbre qui inaugurerait l'ère opérationnelle de la propulsion nucléaire navale : « Underway under nuclear propulsion ».
- Le réacteur à terre S1G (filère rapide, puissance de 78 MW) divergea cette année, alors que le sous-marin *Seawolf* équipé d'un réacteur S2G similaire était lancé en juillet. Les essais du S1G firent cependant apparaître les premiers doutes sur la fiabilité de cette filière, entraînant son abandon rapide⁵.
- La quille d'un sous-marin nucléaire d'un nouveau type, le *Skate*, fut posée à Groton à l'issue du lancement du *Seawolf*. La construction des deux suivants de la série, le *Swordfish* et le *Sargo* commença peu après, dans les arsenaux de Portsmouth et de Mare Island, marquant ainsi le début de l'extension industrielle des chantiers aptes à la construction de navires à propulsion atomique. Les sous-marins de la classe *Skate* étaient équipés de REP S3W/S4W (puissance de 38 MW)⁶.
- La conception d'un nouveau sous-marin, utilisant une coque aux formes hydrodynamiques optimisées pour les grandes vitesses (forme « Albacore »), et un nouveau réacteur, le S5W (puissance de 78 MW), produisant une puissance importante pour atteindre ces vitesses, était entreprise. La coque du premier de cette série, le *Skipjack*, fut posée l'année suivante, en mai 1956.
- Le nouveau CNO, l'amiral Arleigh A. Burke, décida à l'automne 1955 l'accélération des programmes de bâtiments à propulsion nucléaire, demandant la transformation de deux sous-marins à propulsion classique en construction en sous-marins nucléaires. Il prit surtout la décision de ne lancer désormais que des programmes de sous-marins à propulsion nucléaire et demanda également le lancement d'études pour équiper des bâtiments de surface de ce type de propulsion (porte-avions, croiseurs, frégates).

Finalement, l'année 1955 fut une année de transition permettant de passer d'une phase expérimentale avec la construction des premiers prototypes, à terre ou embarqués, à une phase de production opérationnelle, avec un plus grand nombre de chantiers impliqués et la planification de cinq appareils propulsifs atomiques différents.

5. Le *Seawolf* fut ultérieurement équipé d'un réacteur à eau pressurisée.

6. Réacteurs de conception identique, mais dont la réalisation comprenait quelques différences.

Accélération et diversification des programmes

Les réflexions sur le tir de missiles depuis la mer étaient lancées depuis 1955, avec la constitution d'une équipe projet sous la direction de l'amiral William F. Raborn. Après avoir éliminé le missile à propulsion liquide *Redstone*, seul existant en 1955, les études se portèrent un temps sur le missile *Jupiter* à propulsion solide, choix également abandonné par la Navy compte tenu de ses dimensions. Fin 1956, les progrès des équipes responsables des armes nucléaires permirent de lancer un nouveau projet d'un missile à propulsion solide plus léger, d'une portée de 1 500 miles nautiques : le *Polaris*. Le premier sous-marin équipé devait être opérationnel en 1963.

Le choc causé en 1957 par le lancement par l'Union soviétique du premier satellite *Sputnik* et la révélation de l'existence d'un programme soviétique de missile intercontinental, le R7 *Semyorka* (nom de code OTAN SS6), révélant la vulnérabilité des bases du *Strategic Air Command* (SAC), accélèrent le programme. Il fut ainsi décidé de transformer l'un des sous-marins de la classe *Skipjack* lancé fin 1957, en découpant les sections avant et arrière, et en insérant entre les deux une section d'une quarantaine de mètres de long contenant seize tubes lance-missiles.

Ce nouveau sous-marin, rebaptisé *George Washington*, fut le premier sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE ou SSBN) de l'histoire, admis au service actif fin 1959. Quatre autres SNLE furent construits sur le même modèle, avant que deux nouvelles classes de SNLE, armés du même missile *Polaris* (remplacés au début des années 1970 par le *Poséidon*) et équipés du réacteur S5W, ne rentrent en service : la classe *Ethan Allen* (cinq unités) à partir de 1961, puis classe *Lafayette* (31 unités) à partir de 1963.

Au même moment, une nouvelle classe de sous-marins d'attaque, le *Thresher*, équipée du S5W, ainsi que celle d'un porte-avions, l'*USS Enterprise*, équipé de huit réacteurs, et un croiseur – le *Long Beach* – étaient en cours de réalisation. Avec ces nouvelles accélérations de programme fut atteint un pic de construction de 37 bâtiments en 1961, mobilisant six chantiers navals : Electric Boat, Portsmouth, Mare Island, Newport News, Bethlehem (Quincy) et Ingalls (Pascagoula). À la courte série du *Thresher* succéda celle des *Sturgeon* (37 unités), construite à partir de 1961 jusqu'au début des années 1970, équipée également du réacteur S5W, et qui constitua le corps de bataille principal de l'US Navy dans le domaine de la lutte anti-sous-marine durant la guerre froide.

Tableau n° 1 : Classes de sous-marins nucléaires d'attaque américains en service pendant la guerre froide

Nom/Classe	Nombre	Admission service actif	Réacteur
<i>Nautilus</i>	1	1954	S2W
<i>Seawolf</i>	1	1957	S2G puis S2W
<i>Skate</i>	4	1957/1959	S3W/S4W
<i>Skipjack</i>	6	1959/1961	S5W
<i>Thresher</i>	14	1961/1967	S5W
<i>Sturgeon</i>	37	1967/1975	S5W

Tableau n° 2 : Sous-marins expérimentaux américains (un seul exemplaire par classe)

Nom	Admission service actif	Réacteur
<i>Triton (SM piquet radar)</i>	1959	S4G (2 réacteurs)
<i>Halibut (SM lanceur engin Regulus)</i>	1960	S3W
<i>Tulibee (prototype SNA hunter-killer)</i>	1960	S2C
<i>Narwhal (Sturgeon modifié)</i>	1969	S5G
<i>Glenard P Lipscomb</i>	1974	S5W

Tableau n° 3 : Classes de SNLE américains en service pendant la guerre froide

Nom/Classe	Nombre	Admission service actif	Réacteur
<i>George Washington</i>	5	1959/1961	S5W
<i>Ethan Allen</i>	5	1961/1963	S5W
<i>Lafayette/ Benjamin Franklin</i>	31	1963/1967	S5W

La nucléarisation des bâtiments de surface de l'US Navy fut en revanche plus irrégulière, la question du coût de ces programmes par rapport au gain opérationnel s'installant durablement dans les débats. La construction de l'*USS Enterprise*, premier porte-avions à propulsion nucléaire activé en 1961, fut ainsi suivie de celle d'un porte-avions à propulsion conventionnelle, l'*USS John Kennedy*, de la classe *Kitty Hawk*. Le choix de la propulsion nucléaire pour l'aéronavale n'est durablement confirmé qu'à partir du vote du budget de 1968 pour la classe *Nimitz*. S'agissant des bâtiments d'escorte du porte-avions, outre le croiseur *Long Beach* commissionné en 1961, huit autres croiseurs de quatre types différents (un *Bainbridge*, un *Truxtun*, deux *California*, quatre *Virginia*) furent construits dans les années 1960-1970.

Tableau n° 4 : Bâtiments de surface à propulsion nucléaire en service dans l'US Navy (1961-1998)

Type	Nom/classe	Nombre	Admission service actif	Réacteur (nombre)
PA	<i>Enterprise</i>	1	1961	A2W (8)
Croiseur	<i>Long Beach</i>	1	1961	C1W (2)
Croiseur	<i>Bainbridge</i>	1	1962	D2G (2)
Croiseur	<i>Tuxtrun</i>	1	1967	D2G (2)
Croiseur	<i>California</i>	2	1974/1975	D2G (2)
Croiseur	<i>Virginia</i>	4	1976/1980	D2G (2)
PA	<i>Nimitz</i>	3	1975 /1982	A4W/A1G (2)
PA	<i>Nimitz amélioré</i>	5	1986 /1998	A4W/A1G (2)

La flotte sous-marine à propulsion nucléaire continua pour sa part son expansion dans les années 1970 avec la construction d'une nouvelle série de 18 SNLE *Ohio*, dotés du réacteur S8G, capables d'emporter 24 missiles *Trident*, avec une charge et une portée largement supérieures aux *Polaris/Poséidon* et mis en service entre 1981 et 1997. Pour les SNA, la classe *Los Angeles*, dotée du réacteur S6G, mise en service de 1976 à 1996, constitua la plus grande classe d'unités de ce type au monde, avec 62 sous-marins construits.

Au bilan, à la fin de la guerre froide, l'US Navy avait construit 185 bâtiments à propulsion nucléaire, dont 170 sous-marins, sept porte-avions et huit croiseurs. Aucun événement grave d'origine nucléaire n'a été recensé. En revanche, deux accidents de sous-marins, celui du *Thresher* le 10 avril 1963 au large du Connecticut et celui du *Scorpio* le 22 mai 1968 au sud-ouest des Açores, ont entraîné le naufrage du sous-marin et de leur réacteur – ainsi que la mort de tout leur équipage. La grande profondeur des zones d'accident n'a pas permis leur renflouement.

Outre les programmes de propulsion destinés à l'US Navy, les États-Unis ont également investi dans un programme civil, totalement séparé de l'organisation mise en place par Rickover. Deux ans après son discours devant les Nations unies le 8 décembre 1953 promouvant l'utilisation pacifique de l'énergie atomique (programme « *Atoms for peace* »), le président Dwight Eisenhower lança en effet le projet de bâtiment civil à propulsion nucléaire *NS Savannah*. Le projet était piloté par la Commission à l'énergie atomique, le département du Commerce et l'Administration maritime américaine. Lancé en 1959, ce bâtiment de commerce de 20 000 tonnes, commercialement actif de 1962 à 1971, était doté d'un réacteur de 74 MW. D'abord employé pour la promotion du programme « *Atoms for peace* », il fut ensuite utilisé en tant que cargo à partir de 1965. Les coûts d'exploitation et la faible charge transportée en comparaison d'un cargo classique de même tonnage eurent raison de l'intérêt commercial de ce navire. Après retrait du cœur atomique en 1976, ce bâtiment fut donné à la ville de Savannah pour le transformer en musée.

En fin de compte, le remarquable développement, en toute sûreté, de la propulsion nucléaire militaire aux États-Unis, permit de conférer à l'US Navy durant la guerre froide une supériorité très nette face à la marine soviétique. Elle favorisa notamment, dès le début des années 1960, la mise en place d'une flotte de SNLE, renforçant la dissuasion nucléaire américaine grâce à cette capacité permanente de frappe en second. Elle permit également la construction d'une flotte de SNA performants et silencieux, surveillant au plus près de leurs bases les mouvements des navires soviétiques et qui assuraient une supériorité navale très nette dans l'Atlantique Nord. Enfin, les porte-avions nucléaires furent au cœur de la capacité de projection de puissance américaine et de la *Maritime Strategy* de l'ère Reagan, visant en cas de guerre à attaquer les forces soviétiques dans leurs bases de la presqu'île de Kola ou de Sibérie orientale⁷.

Un programme soviétique chaotique

Les premiers projets de l'époque stalinienne

Le développement de la propulsion nucléaire en Union soviétique se fit en réaction aux avancées observées aux États-Unis. Pourtant, les recherches scientifiques conduites dans les laboratoires européens et publiées jusqu'en 1939 dans les revues scientifiques, étaient connues en Union soviétique par quelques physiciens. À la suite des découvertes d'Hahn et Strassman, un scientifique russe, Igor Tamm, suggéra dès 1939 qu'une bombe à uranium

7. J. B. Hattendorf et P. M. Swartz (dir.), « U.S. Naval Strategy in the 1980's », *The Newport Papers*, n° 33, Naval War College, 2008.

pouvait détruire à elle seule la totalité d'une ville⁸. Cependant, dans le contexte de la terreur régnant en URSS à cette époque, peu de scientifiques osèrent poursuivre dans cette voie jugée inutile par Staline, car n'ayant pas d'utilité militaire immédiate. Après le début de l'opération Barbarossa, les scientifiques spécialistes de physique nucléaire travaillèrent sur d'autres projets jusqu'en 1942.

Selon l'historiographie officielle soviétique, c'est à la suite d'un courrier adressé en mai 1942 à Staline par un jeune scientifique, Georgi N. Fliorov, que des recherches furent relancées dans le domaine atomique. Fliorov, constatant l'absence depuis 1939 de résultats de recherches de physique nucléaire dans les revues scientifiques de renom, en déduisit qu'elles étaient couvertes désormais par le secret, témoignant ainsi de l'existence d'une probable application militaire à ces études⁹. Plus prosaïquement, l'espionnage soviétique, tant en Grande-Bretagne qu'aux États-Unis, avait été à l'origine du nouvel intérêt pour ces recherches.

Les ressources dédiées à ce programme restèrent cependant faibles jusqu'en juillet 1945. Au retour de la conférence de Potsdam, où Truman lui avait révélé l'existence d'une bombe ayant une puissance destructrice inédite, Staline ordonna au directeur du programme nucléaire, Igor V. Kourtchatov, d'accélérer les recherches, sans limitation de ressources, pour que l'URSS acquière une bombe atomique le plus tôt possible. Beria fut nommé responsable politique du programme. La première explosion nucléaire eut lieu à Semipalatinsk le 29 août 1949. L'effort fut ensuite maintenu plusieurs années sur le développement de l'armement nucléaire¹⁰.

L'idée de propulser un sous-marin grâce à un réacteur nucléaire émergea pour la première fois en 1946 dans un institut de physique dirigé par Piotr Kapitsa. Apprenant la nouvelle, le directeur du Commissariat du peuple aux Affaires intérieures (NKVD), Lavrenti Beria, fit promptement remplacer ce directeur, qui contrevenait à la priorité absolue accordée au développement d'une arme atomique. Son remplaçant, Anatoli A. Aleksandrov, réexamina le programme de propulsion nucléaire en 1948, pour le refermer rapidement sur ordre de Beria. L'attitude de ce dernier évolua en 1952. Une fois la maîtrise de la bombe à hydrogène acquise, le problème majeur fut de trouver des vecteurs pour l'amener sur des cibles aux États-Unis. Les programmes de bombardiers et de missiles furent lancés. Parmi les idées nouvelles émergea également celle d'une « super-torpille », porteuse d'une arme nucléaire pouvant atteindre les agglomérations portuaires américaines, et qui serait lancée depuis un sous-marin à propulsion nucléaire. Le lancement du projet de sous-marin à propulsion nucléaire (« code 627 ») fut ainsi décidé le 9 septembre 1952 et confié au

8. S. Zalorga, *Target America: The Soviet Union and the Strategic Arms Race, 1945-1964*, Novato (CA), Presidio Press, 1993, p. 4.

9. *Ibid.*, p. 10.

10. *Ibid.*

Bureau central 143 de Leningrad. Le chef d'état-major de la marine soviétique, l'amiral Nikolaï G. Kouznetsov, qui avait été tenu initialement à l'écart du projet, s'opposa au concept de super-torpille, compte tenu des risques qu'elle faisait courir au sous-marin porteur. Celle-ci fut abandonnée, mais le Projet 627 (baptisé « November » dans la classification de l'Organisation du traité de l'Atlantique nord [OTAN]) de sous-marin continua.

L'évolution vers les sous-marins à propulsion nucléaire

Ce projet commença par la réalisation d'un prototype à terre, réalisé à Obninsk, première « cité scientifique » soviétique, située dans la région de Moscou. La première divergence eut lieu le 8 mars 1956. Ce prototype servit également à la formation du premier équipage de sous-marin du Projet 627¹¹.

Deux ans plus tard, le 4 juillet 1958, le sous-marin nucléaire d'attaque K3 *Leninsky Komsomol* commença ses premiers essais à la mer. Premier d'une série de 13, il était équipé de deux réacteurs de type VM-A, à eau pressurisée, d'une puissance de 70 MW chacun. Dotées du même type de réacteurs, deux autres classes de sous-marins furent lancées à la fin des années 1950 et au début des années 1960 : une de sous-marins lanceurs de missiles de croisière (Projet 659/Echo 1 et Projet 675/Echo 2, avec respectivement cinq et 29 unités construites), et une de sous-marin nucléaire lanceurs d'engins, le Projet 658 (*Hotel* en dénomination OTAN).

À l'instar des sous-marins lanceurs d'engins à propulsion classique de la classe *Golf*, les SNLE de la classe *Hotel* disposaient de trois missiles stockés dans le kiosque du sous-marin. Ils devaient faire surface pour procéder à leur lancement, les rendant ainsi très vulnérables durant cette phase, ce qui limitait leur intérêt stratégique. Contrairement aux premiers sous-marins nucléaires américains, les versions soviétiques étaient dotées de deux réacteurs pour assurer une redondance, leur développement accéléré pour répondre à l'avance américaine dans ce domaine n'ayant pas permis aux Soviétiques de fiabiliser et de rendre sûre cette génération de réacteurs¹². Celle-ci connut ainsi de nombreux accidents nucléaires, allant d'accidents de criticité¹³ (à deux reprises en 1965 sur un *November* et en 1985 sur un *Echo 2*, tous deux à quai¹⁴) à des fuites du circuit primaire entraînant une dégradation du cœur (en 1961 à bord d'un *Hotel 1* en mer et en 1989 à bord d'un *Echo 2* en mer).

11. L. Gilstov, N. Mormoul et L. Ossipenko, *La Dramatique histoire des sous-marins soviétiques*, Paris, Robert Laffont, 1992, p. 82.

12. O. Reistad et P. L. Olgaard, « Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications » in *Nordic Nuclear Safety Research*, NKS-138, avril 2006, p. 11.

13. Un accident de criticité survient lorsqu'une fission d'un atome de matière fissile crée, de façon durable et non contrôlée, un nombre supérieur de fissions, se traduisant par un emballement de la réaction en chaîne.

14. O. Reistad et P. L. Olgaard, « Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications », *op. cit.*, p. 29.

Simultanément à la réalisation de réacteurs pour des sous-marins, l'URSS développa un réacteur pour équiper un brise-glace, le *Lenin*. Introduit en septembre 1959, il fut à la fois le premier navire de surface et le premier navire civil au monde à être équipé d'une propulsion atomique. Le *Lenin* était doté de trois REP OK-150 de 90 MW environ, tous trois situés dans un même compartiment. Ces réacteurs furent également l'objet de deux accidents graves, l'un conduisant à une fusion partielle d'un cœur suite à une erreur humaine entraînant une fuite du réfrigérant primaire (1965), l'autre étant la conséquence des dommages engendrés sur la protection neutronique et sur l'un des réacteurs pour localiser une fuite primaire (1967). À la suite de ce dernier accident, l'ensemble du compartiment réacteurs fut remplacé en 1970 avec deux nouveaux réacteurs de seconde génération, OK-900, de 159 MW chacun, qui équipèrent également, dans une version modifiée (OK 900A de 171 MW) une nouvelle série de six brise-glace de la classe *Artika*.

De nouvelles générations plus opérationnelles

La première génération de sous-marins soviétiques fut rapidement suivie d'une deuxième à partir du début de 1964, équipée de nouveaux REP VM-4, plus puissants et plus compacts. Constituée des SNA *Victor* I, II et III, des SSGN *Charlie* I et II, des SNLE *Yankee*, et de leurs dérivés les (SNLE *Delta* I, II, III et IV), cette deuxième génération constitua le cœur des forces sous-marines russes durant la deuxième partie de la guerre froide. Ces réacteurs VM-4 eurent plusieurs versions, allant d'une puissance de 72 MW (*Victor*) à 90 MW environ (*Charlie*, *Yankee*, *Delta*). Les SNLE de classe *Yankee*, dont le premier a été mis en service en 1967, furent les premiers vrais SNLE soviétiques, capables de rester durablement en plongée et de lancer des missiles en immersion, à l'instar des SNLE dotés des missiles *Polaris* américains.

En parallèle à ces séries de sous-marins nucléaires équipés de REP et utilisant de l'uranium faiblement enrichi (20 % maximum) furent également construits des sous-marins utilisant des réacteurs à neutrons rapides. Le premier d'entre eux, le K27, utilisant la coque d'un SNA *November*, était doté de deux réacteurs RM-1 refroidis par un mélange de métal liquide plomb-bismuth, et utilisant de l'uranium à enrichissement élevé. Ce sous-marin, entré en service en 1963, connut en 1968 un accident grave de réacteur. La présence d'impuretés dans le métal liquide entraîna une obturation du circuit primaire de l'un des deux réacteurs, la perte de la réfrigération et la fusion partielle du cœur¹⁵. Le niveau élevé des radiations et la prise tardive de mesures par le commandant entraînèrent le décès de neuf hommes et la contamination de 89 autres. Ayant pu rentrer à son port, le K27 ne put être réparé. Finalement retiré du service actif en 1979, il fut immergé par faibles

15. *Ibid.* p. 37.

fonds dans la baie de Stepovogo, au nord de la Nouvelle-Zemble en 1981, après que le compartiment endommagé a été rempli de bitume. Il s'y trouve toujours. Une autre classe de sous-marins utilisa également des réacteurs rapides, la classe Alpha. Construits avec une coque en titane leur permettant de plonger opérationnellement à 600 mètres et équipés chacun d'un réacteur refroidi au métal liquide (mélange plomb-bismuth) de 155 MW, ces sous-marins connurent de nombreux déboires. Quatre d'entre eux furent ainsi retirés de façon prématurée du service actif, notamment après des fuites du réfrigérant primaire dans le compartiment réacteur dans lequel il se solidifiait.

Tableau n° 5 : premières générations de sous-marins soviétiques (dénomination otanienne)¹⁶

	SNA	SSGN (sous-marins nucléaires lanceur de missiles de croisière)	SNLE
1^{re} génération	<i>November</i>	<i>Echo 1 et 2</i>	<i>Juliet</i>
2^e génération	<i>Victor 1, 2,3</i> <i>Alfa</i>	<i>Charlie 1 et 2</i>	<i>Yankee</i>
3^e génération	<i>Akula</i> <i>Sierra</i>	<i>Oscar 1 et 2</i>	<i>Delta 1,2,3,4</i> <i>Typhoon</i>

Autour d'une troisième génération de réacteur nucléaire, l'OK 650B (190 MW), furent construites à partir des années 1980 de nouvelles classes de sous-marins, les SNA Projets 971 (classe OTAN *Akula*, un réacteur), 945 (Sierra, un réacteur), les SSGN Projet 949 (*Oscar 1 et 2*, deux réacteurs) et enfin la classe de sous-marins de la taille la plus importante au monde, les SNLE Projet 941 (*Typhoon*, deux réacteurs).

Les années 1970-1980 virent également la construction de quatre croiseurs à propulsion nucléaire (classe *Kirov*), équipés chacun de deux réacteurs à eau pressurisée KN3 de 300 MW, ainsi que d'un bâtiment de commandement équipé de deux réacteurs OK-900, le *Kaputsa*. S'agissant des navires civils, le brise-glace *Lenin* fut suivi d'une série de six brise-glace de classe *Arktika*, d'une puissance de 159 MW, puis par la série des brise-glace classe *Taymyr* pourvus d'une nouvelle génération de réacteurs, KLT-40 de 171 MW, comme le fut l'unique cargo conçu en URSS, le *Sevmorput*.

16. *Ibid.*, p. 10.

Au moment de sa dislocation, l'URSS avait construit environ 220 sous-marins à propulsion nucléaire, ainsi que huit brise-glace, quatre croiseurs et un bâtiment de commandement.

Outre les accidents à caractère nucléaire mentionnés, la marine soviétique connut de nombreux autres accidents, à quai ou en mer, non directement liés à la propulsion¹⁷. En particulier, plusieurs sous-marins nucléaires soviétiques ont coulé :

- ▀ Le K8 (classe *November*) a coulé le 11 avril 1970, à la suite d'un incendie, au large du golfe de Gascogne, par 4 600 mètres (m) de fond.
- ▀ Le K429 (classe *Charlie 1*) a fait naufrage en juin 1983 au sud de la presqu'île du Kamtchatka par 50 m de fond. Il a été renfloué en août 1983.
- ▀ Le K219 (classe *Yankee*) marin a coulé à 800 kilomètres (km) environ au large des Bermudes à la suite d'un incendie du propergol liquide du missile SS-N-6, le 6 octobre 1986.
- ▀ Le sous-marin expérimental K278 *Komsomolets* a fait naufrage le 1^{er} avril 1989 en mer de Norvège à la suite d'un incendie.
- ▀ Après la fin de la guerre froide, il faut enfin mentionner le naufrage du SSGN *Koursk* le 12 août 2000 en mer de Barents.

Au final, les Soviétiques réalisèrent, avec un retard de quelques années par rapport aux Américains, une redoutable flotte à propulsion nucléaire, comprenant les plus gros sous-marins jamais construits. Ce retard devait, pour des raisons idéologiques, être comblé le plus rapidement possible, fût-ce au détriment de la sûreté nucléaire. Les nombreux accidents, aux conséquences humaines et environnementales importantes, restent attachés à ces premières décennies de l'utilisation de cette technologie en URSS.

Un programme britannique dépendant de l'aide américaine

La Royal Navy, deuxième marine mondiale en 1945, s'intéressa rapidement à la propulsion nucléaire. Les difficultés techniques et financières retardèrent la maîtrise rapide de cette technologie, mais l'aide américaine lui permit de devenir la troisième marine disposant de sous-marins nucléaires.

17. Pour une recension des accidents et incidents concernant les sous-marins russes, voir : L. Gilstov, N. Mormoul et L. Ossipenko, *La Dramatique histoire des sous-marins soviétiques*, op. cit. Pour une recension plus générale des accidents et incidents impliquant des navires à propulsion nucléaire, voir : P. L. Olgaard, « Accidents in Nuclear Ships » in *Nordic Nuclear Safety Research*, n° 2, 1996.

De premières recherches infructueuses

L'amirauté britannique, consciente de l'apport potentiel de l'énergie atomique pour la propulsion des sous-marins, envoya quelques officiers au laboratoire de recherche atomique d'Harwell en Angleterre dès 1948. De premières ébauches de réacteurs navals furent élaborées à partir du début des années 1950. Dans un contexte où la production de matière fissile hautement enrichie était réservée aux armes, les études se portèrent sur des réacteurs graphite-gaz, utilisant de l'uranium très faiblement enrichi. Cependant, elles montrèrent rapidement qu'un tel réacteur serait trop lourd et trop fragile pour être embarqué à bord d'un sous-marin. La conception d'un sous-marin à propulsion nucléaire fut ainsi suspendue en octobre 1952, la Royal Navy considérant que des travaux de ce type ne pourraient être repris qu'au cours des années 1960¹⁸. La connaissance par les Britanniques de la construction aux États-Unis du *Nautilus* relança leur intérêt pour ce type de navires. Néanmoins, le *Joint Committee on Atomic Energy* du Congrès américain, sur conseil de l'amiral Rickover, fermement décidé à n'échanger de secrets dans ce domaine à aucun État, était opposé à un soutien aux Britanniques.

Il fallut toute l'habileté, et l'aura, de l'amiral Mountbatten, alors *First Sea Lord*, auprès de son homologue américain, l'amiral Arleigh Burke, et de Rickover lui-même, pour obtenir en juin 1956 un accord sur l'échange d'informations dans le domaine de la propulsion atomique. Les recherches reprises au laboratoire d'Harwell conduisirent début 1957 au choix d'un REP, utilisant l'uranium enrichi issu de l'usine de Capenhurst. La décision de construire un prototype à terre à Dounreay, au nord de l'Écosse, fut également prise.

Un appui américain décisif

Les difficultés de coordination du nouveau projet rencontrées dans les premiers temps conduisirent à la création d'une organisation unique, la *Dreadnought Project Team* (DPT) en octobre 1957, qui n'empêcha pas la dérive calendaire. Un accord entre Américains et Britanniques prévoyant la fourniture d'un réacteur américain pour le premier sous-marin britannique fut signé à l'été 1958. Le réacteur fourni, de type S5W, équipa ainsi le premier SNA britannique, le *HMS Dreadnought*. Lancé en 1960, il fit ses premiers essais à la mer fin 1962 pour être admis au service actif en 1963.

En parallèle, le projet de réacteur naval britannique se poursuivait. Prenant en compte les premiers enseignements de l'exploitation du S5W du *Dreadnought*, le prototype à terre de Dounreay, baptisé *HMS Vulcan*, fut mis en service en 1965. Le premier SNA utilisant ce réacteur PWR1 de conception

18. E. Grove, *Vanguard to Trident: British Naval Policy since World War II*, Maryland, Naval Institute Press, 1987. p. 230.

et réalisation britanniques, le *HMS Valiant*, fut admis au service actif en 1966, le deuxième suivant en 1967. Simultanément, une autre classe de sous-marins à propulsion nucléaire recevait la priorité dans la programmation britannique. À la suite de l'accord de Nassau signé le 21 décembre 1962 entre le président américain Kennedy et le premier ministre MacMillan par lequel les États-Unis s'engageaient à livrer des missiles mer-sol balistique stratégique (MSBS) de type *Polaris*, le Royaume-Uni avait lancé un programme de SNLE. Également équipée de réacteurs PWR1, cette série de quatre bâtiments (classe *Resolution*) fut admise au service actif entre 1968 et 1969.

Les années 1970 virent la poursuite des programmes de SNA, avec la construction de trois SNA classe *Churchill*, suivie d'une série de six SNA classe *Swifsture*, et enfin durant les années 1980 de sept SNA classe *Trafalgar*. La Royal Navy put ainsi disposer durant les trois dernières décennies de la guerre froide d'une sous-marine à propulsion nucléaire très performante et active en soutien de l'US Navy pour l'acquisition de la supériorité maritime dans le nord-est de l'Atlantique face à la marine soviétique. Par ailleurs, un SNA britannique, le *HMS Conqueror*, fut le seul sous-marin à propulsion nucléaire à utiliser des torpilles en combat naval, durant la guerre des Malouines, coulant le croiseur argentin *Belgrano* le 2 mai 1982.

L'indépendance française

Sortie exsangue de la Seconde Guerre mondiale, la Marine nationale fit une première tentative d'acquisition de la propulsion nucléaire durant les années 1950, période marquant le début de la reconstitution de ses capacités. Elle dut cependant attendre la fin des années 1960, avec la constitution d'une force de dissuasion nucléaire indépendante, pour transformer l'essai.

L'échec salutaire du Q244

Dès 1939, l'équipe regroupée autour de Frédéric Joliot-Curie au Collège de France travaillait sur l'obtention d'une réaction en chaîne contrôlée issue de la fission de l'uranium. Joliot-Curie avait pour objectif la réalisation d'un générateur d'énergie, mais envisageait aussi l'idée d'un appareil propulsif pour un sous-marin¹⁹. Après-guerre, les réflexions concernant le renouvellement de la flotte française évoquent dès 1947 la possibilité d'utiliser l'énergie atomique pour propulser des sous-marins, les estimations étant cependant qu'une telle réalisation n'était pas envisageable avant le milieu de la décennie suivante²⁰.

19. B. Goldschmidt, *Pionniers de l'atome*, Paris, Stock, 1987, p. 97.

20. P. Quérel, *Vers une marine atomique, la marine française, 1945-1958*, collection Histoires, Bruxelles, Bruylant, 1997.

C'est en 1954 qu'est créé, à l'initiative de Pierre Guillaumat, alors administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), un comité mixte Marine-CEA visant à conduire des études sur la propulsion nucléaire. Celles concernant le réacteur (circuit primaire) sont confiées au CEA, celles relatives au circuit secondaire, au générateur de vapeur, aux turbines de propulsion et au reste du sous-marin étant à la charge du Service technique des constructions et armes navales (STCAN), alors rattaché à la Marine.

La construction du sous-marin Q244 est décidée en juillet 1954. Faute d'uranium enrichi, et tirant parti de l'expérience française avec la pile ZOE ayant divergé en 1948, le réacteur envisagé est un modèle utilisant de l'uranium naturel comme combustible et de l'eau lourde comme fluide caloporteur et modérateur. Cependant, outre le problème de la disponibilité d'eau lourde en quantité suffisante, les calculs neutroniques indiquent un manque de réactivité, conduisant à mettre en place des réflecteurs et augmentant la masse du réacteur et donc la taille du sous-marin. Par ailleurs la réalisation d'un prototype à terre, qui aurait permis une levée des risques, est abandonnée. Face à l'amoncellement des difficultés techniques, au défaut d'organisation structurée pour la conduite du projet et profitant de l'annonce en décembre 1957 par le président américain Eisenhower de la possibilité de fourniture d'uranium enrichi, la filière à uranium naturel/eau lourde est abandonnée. L'accord de Washington, signé le 7 mai 1959, permet le transfert à la France de 440 kilogrammes (kg) d'U-235 (dont 300 kg enrichis à 90 %²¹) pour un emploi exclusif dans un prototype à terre.

Cet échec du Q244 s'avéra néanmoins riche d'enseignements, tant dans le domaine technique qu'en matière d'organisation²². Le comité de liaison Marine-CEA de mai 1959 proposa la réalisation d'un prototype à terre (PAT) de réacteur à eau pressurisée à deux boucles, utilisant l'uranium fourni par les États-Unis, et s'accorda sur la création au sein du CEA d'un groupe de propulsion nucléaire (GPN) confié à l'ingénieur du génie maritime Jacques Chevallier disposant d'une autorité étendue. La construction du PAT fut entreprise dès 1960 sur un site du CEA à Cadarache. Dès le début, les objectifs de fiabilité et de sûreté nucléaire furent considérés comme essentiels²³. La première divergence du PAT fut réalisée le 14 août 1964, année qui vit la décision prise en conseil de défense de lancer la composante océanique de la dissuasion.

21. F. Torres et B. Dänzer-Kantof, *Les Atomes de la mer*, Paris, Le Cherche-Midi, 2022, p. 132.

22. T. d'Arbonnea (dir.), *Encyclopédie des sous-marins français. Tome 3 : l'apogée des classiques*, Paris, Éditions SPE Barthélémy, 2012, p. 163.

23. Cycle de conférences par Yves Bonnet sur la conception des chaufferies nucléaires embarquées, 1993-1994.

Un perfectionnement progressif

Premier SNLE français, le *Redoutable* fut lancé le 29 mars 1967 à Cherbourg. La première divergence du réacteur fut réalisée le 26 février 1969, les premiers essais à la mer se déroulant au cours de l'été 1969. Admis au service actif le 1^{er} décembre 1971, il débuta la première patrouille opérationnelle fin janvier 1972. Il fut suivi de cinq autres SNLE admis au service en janvier 1973 (*Terrible*), juin 1974 (*Foudroyant*), décembre 1976 (*Indomptable*), mai 1980 (*Tonnant*) et avril 1985 (*Inflexible*).

Alors que les constructions de SNLE se déroulaient à un rythme accéléré, les réflexions sur de nouveaux concepts de chaufferies se poursuivaient, en vue notamment d'équiper des sous-marins de plus petite taille que les SNLE. Ce concept de chaufferie compacte, consistant à assembler entre eux la cuve, le générateur de vapeur, les mécanismes de barre de contrôle et les pompes de circulation primaire, permet une réduction de poids de la protection radiologique. La construction d'un nouveau réacteur prototype, la « chaufferie avancée prototype » (CAP) commença à Cadarache en 1971, pour une première divergence en 1975. Ce concept de chaufferie compacte fut dès lors appliqué à tous les programmes de réacteurs navals français, en premier les lieux les chaufferies K48 équipant les SNA de la classe *Rubis*. Ces SNA, les plus petits au monde, furent admis au service actif à partir de 1983.

Finalement, à la fin de la guerre froide, la Marine nationale mettait en œuvre de manière opérationnelle six SNLE et quatre SNA, les deux derniers de la série *Rubis* étant mis en service en 1992 et 1994. Dans le même temps débutent les travaux pour un porte-avions à propulsion nucléaire : si de premières réflexions avaient eu lieu dans les années 1970 pour le développement d'un porte-hélicoptères (le projet PH75), ce dernier est abandonné au tournant des années 1980 et remplacé par le projet du *Charles de Gaulle*. La construction de ce dernier débute en 1987, pour une admission au service actif en mai 2001²⁴, permettant de pérenniser la technique de fabrication de chaufferies nucléaires. Enfin, le programme français, outre son indépendance, se caractérisa par le fait que le premier bâtiment à propulsion nucléaire fut un SNLE, et non un SNA comme pour les trois autres programmes précédemment étudiés. Le succès de ce programme de SNLE permit d'entretenir une permanence à la mer de SNLE dès 1972, cette posture permanente étant portée à trois SNLE dès le début des années 1980.

24. O. Pauly, « En six dates, l'histoire de la construction du *Charles de Gaulle* à Brest », *Ouest-France*, 12 mars 2020, disponible sur : www.ouest-france.fr.

Un programme chinois peu développé pendant la guerre froide

La Chine fut la cinquième marine à se lancer dans le développement de la propulsion nucléaire navale, ne dépassant cependant pas durant la période de la guerre froide une flotte réduite d'échantillons.

Elle lança son programme de sous-marins à propulsion nucléaire en 1958, peu de temps après le lancement de son programme d'armes nucléaires. L'uranium hautement enrichi étant réservé pour celui-ci, la décision fut prise d'utiliser de l'uranium faiblement enrichi pour les réacteurs de propulsion navale²⁵. Un prototype à terre fut construit, mais il fallut attendre 1970 pour sa première divergence. Le premier sous-marin à propulsion nucléaire, le SNA de type 091 *Han*, effectua ses premiers essais en août 1971, pour une admission au service actif en 1974. Son réacteur semble avoir été dérivé du réacteur à eau pressurisée OK-150 équipant le brise-glace soviétique *Lenin*²⁶, d'une puissance de 58 MW. Il fut suivi de quatre autres de ce type, opérationnels en 1980 et 1992. Le premier SNLE chinois, le *Xia* (type 092) fut lancé en 1982 et mis en service opérationnel en 1987 avec le missile balistique JL1 (1 700 km de portée). Ce SNLE n'effectua néanmoins aucune patrouille opérationnelle en raison de multiples problèmes techniques et avaries²⁷.

Les délais importants entre le lancement des programmes et premières réalisations sont dus en partie aux débats idéologiques relatifs à la place des armes nucléaires dans la guerre populaire, mais également aux retards économiques et technologiques, ainsi qu'à la désorganisation causée par le « Grand bond en avant » (1958-1962) et la « Révolution culturelle » (1966-1968)²⁸.

En fin de compte, la Chine n'avait mis en service au début des années 1990 que six sous-marins à propulsion nucléaire, considérés comme ayant une faible valeur opérationnelle.

25. H. Zhang, « Chinese Naval Reactors », International Panel on Fissile Materials, mai 2017, disponible sur : fissilematerials.org.

26. *Ibid.*

27. H. Kristensen, « China's Strategic Systems and Programs », in J. M. Smith et P. J. Bolt (dir.), *China's Strategic Arsenal: Worldview, Doctrine and Systems*, Washington, DC, Georgetown University Press, 2021, p. 108.

28. N. Leveringhaus, « Chinese Nuclear Force Modernization and Doctrinal Change », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 19 août 2022.

Les tentatives des États non-dotés de l'arme nucléaire

Durant la période étudiée dans cette partie, d'autres États essayèrent également de développer, ou d'acquérir, la propulsion nucléaire à des fins civiles ou militaires, sans rencontrer de succès durable.

La République fédérale d'Allemagne (RFA) entreprit la construction d'un cargo mû par l'énergie atomique, le *Otto Hahn*. Équipé d'un réacteur compact de 38 MW, il commença ses essais à la mer en 1970. Ce cargo fut d'abord utilisé pour acquérir de l'expérience sur le fonctionnement de futurs bâtiments commerciaux. Il effectua du transport de phosphate entre le Maroc et la RFA, et participa à plusieurs transits vers l'Amérique du Sud. Un des objectifs visés était notamment de renforcer les liens avec le Brésil qui espérait ainsi progresser dans l'acquisition et dans la maîtrise de l'énergie nucléaire. L'ensemble de la propulsion nucléaire fut finalement débarqué en 1979, et remplacée par une propulsion classique au diesel.

Sous l'impulsion du chancelier Konrad Adenauer et de son ministre de la Défense Franz Joseph Strauss, la RFA fut également intéressée à la fin des années 1950 par l'acquisition d'un réacteur nucléaire pour sous-marins auprès des États-Unis. Une réponse négative ferme leur fut donnée par Washington, les accords entre alliés issus de la Seconde Guerre mondiale n'autorisant l'Allemagne qu'à la construction de petits sous-marins conventionnels d'un tonnage maximum de 350 tonnes²⁹.

Au Japon, le projet de bâtiment de commerce à propulsion nucléaire fut lancé par le gouvernement en 1963. Doté d'un réacteur de 36 MW, le *Mutsu* fut lancé en 1970, et le chargement du cœur achevé en septembre 1972. Néanmoins, face aux protestations des riverains et des pêcheurs du port d'Ohminato où le *Mutsu* était en achèvement, les essais de la propulsion nucléaire ne purent y être réalisés. Après de multiples négociations entre le gouvernement japonais, l'agence japonaise de l'énergie atomique et les protestataires, la décision fut prise de remorquer le *Mutsu* en haute mer pour y procéder à la première divergence qui eut lieu le 28 août 1974. Trois jours plus tard, alors que le réacteur approchait sa puissance maximale, une alarme se déclencha indiquant une augmentation des radiations, causée par un sous-dimensionnement de la protection neutronique. Le communiqué médiatique fait à cette occasion indiquant une « fuite radioactive » se traduisit par le refus des riverains du port d'appareillage d'accueillir le *Mutsu* à son retour. Après négociations, il put rentrer à son port mi-octobre. Il y demeura avant de subir des modifications entre 1978 et 1982 au port de Sasebo, alors que l'ensemble du projet était réexaminé par les autorités japonaises. Basé au port de Sekinehama, ce n'est qu'en 1990 qu'il entreprit

29. J. Rohweder et P. Neumann, *Quieter, Deeper, Faster: Innovations in German Submarine Constructions*, Hamburg/Bonn, E.S Mittler&Sohn, 2015, p. 70-72.

de nouveaux essais de sa propulsion nucléaire, au cours de trois sorties à la mer. La chaufferie nucléaire fut finalement retirée du *Mutsu* en 1992.

Les Pays-Bas conduisirent de 1961 à 1969 des études pour le développement d'un réacteur, le NERO, destiné à équiper un porte-conteneurs. Ce projet ne dépassa pas le stade des études³⁰.

En Italie, le président du conseil Giulio Andreotti annonça en 1959 la volonté italienne de réaliser un SNA, le *Giulio Marconi*. En 1963, il annonça son souhait de faire réaliser pour la marine italienne dans un premier temps un navire de surface doté d'un réacteur nucléaire, avant de construire un SNA. La demande d'aide au gouvernement américain eut une réponse négative. *Naval reactors* et Rickover ne souhaitaient pas transférer les secrets technologiques de la propulsion nucléaire, craignant une mise en danger de la sécurité nationale américaine, et estimaient par ailleurs que l'Italie ne disposait pas des infrastructures nucléaires nécessaires pour conduire un tel programme. Le projet de bâtiment de surface, nommé *Enrico Fermi*, fut poursuivi par la marine italienne durant les années 1960, mais fut finalement abandonné en 1971³¹.

À la fin de la guerre froide, le Canada fut également tenté par l'aventure de la propulsion nucléaire. Le *Livre blanc* publié en juin 1987 prévoyait l'acquisition de dix à douze sous-marins à propulsion nucléaire, pour permettre au Canada d'affirmer sa souveraineté dans l'océan Arctique. Les Britanniques, avec la proposition d'un SNA de classe *Trafalgar*, et les Français, avec la proposition d'un *Améthyste*³² modifié pour pouvoir percer la banquise, répondirent à l'appel d'offres du Canada. L'offre française fut provisoirement retenue. Le Canada abandonna néanmoins sa demande en avril 1989, en partie sous pression des États-Unis³³.

En conclusion, au tournant des années 1980-1990, seuls quatre pays (États-Unis, Russie, Royaume-Uni et France) maîtrisaient la propulsion nucléaire ; un cinquième, la Chine, ayant pu construire de premières unités utilisant cette technologie, sans que l'on puisse parler de maîtrise. Les développements à usage civil n'ont pas eu de suite, alors que les tentatives de plusieurs pays de développer ou de se faire fournir des réacteurs nucléaires ou des sous-marins nucléaires se sont heurtées à une opposition ferme des États-Unis. Ce club très restreint de la propulsion nucléaire navale s'explique par un certain nombre de facteurs techniques, organisationnels et humains, qui seront décrits dans la deuxième partie de cette étude.

30. J. R. Bauman, « Analysis of Past, Present and Future Applications of Nuclear Power for Propulsion of Marine Vehicles », Massachusetts Institute of Technology, 1972, p. 87-89.

31. P. Lobner, « Marine Nuclear Power: 1939 – 2018, Part. 4: Europe & Canada », The Lycean Project, juillet 2018, disponible sur : lynceans.org.

32. Du nom du cinquième SNA de la classe Rubis, qui dès sa construction, intégrait des améliorations importantes dans le domaine de la discrétion acoustique, du système d'armes et des transmissions.

33. F. Torres et B. Dänzer-Kantoff, *Les Atomes de la mer*, op. cit., p. 362-368.

Les enseignements du premier âge de la propulsion nucléaire

Au-delà du constat de la possession de la propulsion nucléaire par un nombre restreint d'États, se révélant être les États dotés de l'arme nucléaire au sens du TNP, plusieurs enseignements se dégagent de cette première période d'ordre à la fois opérationnels, techniques et stratégiques.

Enseignements opérationnels

Les premiers enseignements, justifiant l'intérêt porté à la technologie, sont d'abord d'ordre opérationnel.

Mobilité, endurance et furtivité : des atouts exceptionnels

Les qualités opérationnelles que confère aux sous-marins la propulsion nucléaire, notamment la mobilité à grande vitesse pendant des périodes prolongées sans la contrainte de revenir régulièrement à l'immersion périscopique pour recharger les batteries, ont été mises en exergue dès le début de la guerre froide. Dès les premiers essais du *Nautilus*, son commandant montra que « les résultats des essais réalisés indiquaient qu'une réévaluation complète des stratégies sous-marines et anti-sous-marines serait nécessaire³⁴ » au vu des performances permises par la PN. Les premiers exercices avec la flotte de l'Atlantique démontrèrent l'incapacité des groupes de bâtiments de surface et des avions de lutte anti-sous-marine à détecter et engager celui-ci. Les comparaisons faites avec les sous-marins classiques les plus récents de la classe *Guppy* renforcèrent ces premières impressions.

Ces qualités exceptionnelles furent démontrées à l'occasion de plusieurs déploiements lointains ou dans des zones jusqu'alors inaccessibles aux sous-marins. Le premier transit transpolaire fut ainsi réalisé par le *Nautilus* à l'été 1958 entre Pearl Harbor (État d'Hawaï) et Portland en Grande-Bretagne. Il fut suivi dans ces parages polaires cette même année par le *Skate*, qui démontra l'année suivante la faisabilité d'opérations sous-marines sous la banquise arctique. Les Soviétiques utilisèrent également le déploiement de leur premier SNA, le K3, au pôle Nord, en juillet 1962 et en

34. R. G. Hewlett et F. Duncan, *Nuclear Navy 1946-1962*, op. cit., p. 220.

octobre de cette même année où il y fit surface, pour affirmer leur maîtrise opérationnelle de la propulsion atomique.

La réalisation d'un tour du monde en immersion par un sous-marin à propulsion nucléaire servit également de jalon opérationnel et de vecteur de communication stratégique. Le *Triton* de l'US Navy réalisa ainsi le premier tour du monde en 83 jours au début de l'année 1960. Les Soviétiques annoncèrent pour leur part la réalisation d'un tour du monde par deux sous-marins nucléaires, les K113 (classe *November*) et K116 (classe *Echo II*) en 1966³⁵.

La plus-value opérationnelle de la propulsion atomique eut son plus grand impact stratégique avec la constitution des flottes de SNLE par les protagonistes de la guerre froide. En dotant les États-Unis, puis l'URSS, le Royaume-Uni et la France de forces pratiquement invulnérables à une frappe nucléaire en premier et elles-mêmes non susceptibles de participer à une frappe anti-forces compte tenu de la précision médiocre des premiers missiles MSBS embarqués à leur bord, les SNLE eurent ainsi un effet stabilisateur majeur entre les deux blocs. Celui-ci se renforça avec l'allongement de la portée des missiles MSBS, permettant aux SNLE de patrouiller dans des zones dans lesquelles l'adversaire pouvait difficilement tenter de pister et le cas échéant les engager.

La propulsion nucléaire, complétée par la mise au point des usines de régénération de l'atmosphère, autorisant des patrouilles prolongées sans nécessiter de retour à l'immersion périscopique, est la raison première de cette invulnérabilité et de la capacité des SNLE à contribuer de façon prioritaire à une frappe en second. Elle contribue très directement à l'atteinte de la plus grande crédibilité technique et opérationnelle possible des forces de dissuasion nucléaire.

L'apport stratégique des SNA

Outre l'apport des SNLE pour la dissuasion, les SNA furent d'un apport considérable. Côté occidental, les SNA américains et britanniques, et à un degré moindre français, jouèrent un rôle clé dans l'établissement de la supériorité navale de l'Alliance atlantique. Déployés près des bases navales soviétiques de la flotte du Pacifique et de la flotte du Nord, les SNA américains et britanniques assuraient ainsi une surveillance rapprochée des mouvements de la flotte soviétique, collectant des renseignements techniques et initialisant les opérations de pistage des unités soviétiques se déployant en Atlantique et en Méditerranée, ou dans le Pacifique. Inversement, les SNA et les SSGN soviétiques représentèrent l'option principale à la disposition des armées soviétiques pour contester cette supériorité. Déployés en Atlantique ou en Méditerranée, ils pouvaient

35. Ce tour du monde fut en réalité partiel. Voir à ce sujet L. Gilstov, N. Mormoul et L. Ossipenko, *La Dramatique histoire des sous-marins soviétiques*, op. cit.

menacer les lignes de communication et les déploiements des groupes de porte-avions américains.

Des opérations sous-marines, de surveillance, de pistage, voire des opérations spéciales permises par la propulsion nucléaire, se déroulèrent ainsi de façon continue et discrète durant les trois dernières décennies de la guerre froide. En dépit des frictions et de quelques collisions, dont beaucoup restent à ce jour confidentielles, aucune arme ne fut employée durant cette période par les différents protagonistes de la guerre froide. La seule arme lancée par un SNA fut la torpille du *HMS Conqueror* contre le *Belgrano* lors de la guerre des Malouines, illustrant ainsi la capacité d'un sous-marin nucléaire à se déployer rapidement à grande distance de ses bases et assurer ensuite par une action de combat décisive l'interdiction d'une zone maritime à une flotte de surface adverse.

L'enjeu de la propulsion nucléaire en surface

Dans le domaine des bâtiments de surface, l'apport opérationnel de la propulsion nucléaire fut constaté lors du premier déploiement du porte-avions *USS Enterprise* lors de la crise de Cuba en 1962, puis à l'occasion de ses déploiements durant la guerre du Vietnam. Sa capacité à durer en zone d'opérations et à répondre rapidement aux changements d'ordres opérationnels fut remarquée. La capacité d'une *task force* nucléaire à se déployer durablement et rapidement fut démontrée en 1964 à l'occasion du tour du monde réalisé en 65 jours par l'*USS Enterprise* accompagné des croiseurs nucléaires *USS Long Beach* et *USS Bainbridge*. Malgré cette plus-value opérationnelle, l'intérêt de poursuivre la nucléarisation de la propulsion des bâtiments de surface de l'US Navy fut largement débattu dans l'administration et au Congrès, pour des raisons de coûts et du besoin de conserver un nombre suffisant de bâtiments d'escorte. Malgré une autonomie largement inférieure de ces derniers en raison d'une propulsion conventionnelle, le choix fut fait de réserver la propulsion nucléaire aux porte-avions.

Enseignements techniques

Le choix du combustible

Les rappels historiques sur les débuts de la propulsion nucléaire indiquent tous que celle-ci s'est retrouvée à chaque fois en compétition avec les programmes d'armes nucléaires pour l'utilisation des combustibles fissiles. La priorité systématiquement accordée aux programmes d'armes nucléaires dans les cinq pays étudiés s'est traduite par le décalage temporel du développement de la propulsion atomique et souligne la place centrale de la problématique du combustible.

Certains programmes de PN privilégient l'uranium hautement enrichi (UHE) – au-delà de 20 % – alors que d'autres se sont orientés vers des technologies utilisant de l'uranium faiblement enrichi (UFE). Ces deux filières posent toutes deux de potentiels risques de sécurité ou de prolifération. Dans un cadre étatique, l'UHE peut être détourné de sa destination vers la propulsion nucléaire pour être utilisé dans un programme d'armes. En cas de détournement par des groupes terroristes ou criminels, il peut être directement utilisé pour la confection de bombes sales. Quant à l'UFE, il est une source potentielle de plutonium, et donc de matière pour une arme nucléaire, à condition de disposer d'une usine de retraitement. Dans le cas des deux filières, un État souhaitant être autonome doit posséder une usine d'enrichissement.

Les réacteurs navals américains et britanniques utilisent depuis le début de leurs programmes de l'UHE à plus de 90 %. L'utilisation de cette filière et le développement de nouveaux cœurs leur permettent d'utiliser un seul cœur durant toute la vie de leurs sous-marins (soit une trentaine d'années). Ces deux États, qui ne procèdent actuellement plus à l'enrichissement de leur combustible, possèdent des stocks d'uranium hautement enrichi leur permettant de répondre aux besoins de leur marine pour 50 ans s'agissant des États-Unis, et pour 80 ans s'agissant du Royaume-Uni.

L'URSS a également utilisé pour ses premiers réacteurs navals de l'UHE mais avec un taux d'enrichissement compris entre 20 et 40 %, hormis pour quelques réacteurs tels que le VT-1 équipant le K27 où le taux était de 90 %. La France a également commencé son programme de propulsion nucléaire en utilisant de l'UHE. Elle s'est orientée ensuite vers des cœurs utilisant de l'UFE, avec des taux d'enrichissement équivalents à ceux des réacteurs civils électrogènes. Ce choix est la conséquence de la fermeture en 1996 de l'usine destinée à la production d'UHE destiné à la fabrication d'armes. Le choix d'UFE permet de se fournir au même marché que le marché civil, permettant ainsi une réduction significative des coûts³⁶. Il semble enfin que la Chine utilise depuis le début de ses programmes PN de l'UFE.

L'imposition de la filière à eau pressurisée

Comme précédemment exposé, le développement en parallèle de deux filières différentes de réacteurs avait été programmé par l'amiral Rickover. La première faisant appel aux neutrons thermiques pour entretenir la réaction en chaîne et utilisant l'eau légère sous pression comme fluide modérateur et caloporteur, la seconde faisant appel aux neutrons rapides et utilisant du sodium liquide comme caloporteur.

36. A. Tournyol du Clos, « France's Choice for Naval Nuclear Propulsion: Why Low-enriched Uranium Was Chosen », Federation of American Scientists, décembre 2016, disponible sur : fas.org.

Si la filière rapide comportait des avantages en termes de rendement et de compacité, ses inconvénients techniques se révélèrent rapidement. La réaction violente du sodium avec l'eau nécessite en effet un dispositif particulier pour empêcher toute fuite au niveau du générateur de vapeur. La solution imaginée pour le réacteur S1G équipant le *Seawolf* fut de réaliser des épingles dans le générateur de vapeur à double paroi, avec entre elles du mercure, dont la détection dans le sodium ou l'eau indiquerait la présence d'une fuite. Cet exemple illustre la complexité requise pour un tel réacteur rapide. Selon Rickover, ces réacteurs étaient « chers à construire, compliqués à exploiter, susceptibles d'être arrêtés pour des périodes prolongées pour des problèmes mineurs, et dont la maintenance était difficile et longue³⁷ ». L'US Navy abandonna rapidement cette filière pour n'utiliser que la filière à eau pressurisée.

L'URSS a, elle, également expérimenté la filière à neutrons rapides. En dépit de l'échec du K27, les Soviétiques persistèrent dans la voie des réacteurs à neutrons rapides avec la série des SNA classe *Alpha*. Le caloporteur plomb-bismuth liquide de leur réacteur nécessitait un réchauffement systématique en cas d'arrêt du réacteur. En conséquence, des infrastructures spécifiques furent construites à la base de Zapadnaya Litsa, en presqu'île de Kola, pour réchauffer le circuit primaire à quai et maintenir le caloporteur à l'état liquide. En raison d'une fiabilité insuffisante de ces installations à terre, les réacteurs devaient fréquemment rester en fonctionnement à quai. Finalement, quatre unités sur sept durent être retirées du service actif avant le terme prévu en raison de problèmes rencontrés sur ce type de réacteur. Le démantèlement de ces sous-marins a également été compliqué, le mélange plomb-bismuth emprisonnant en se solidifiant les barres de contrôle. Ce démantèlement effectué dans les années 1990 n'a été rendu possible qu'en utilisant un outillage spécial fourni par le CEA français.

La complexité de mise en œuvre d'un réacteur à neutrons rapides à bord d'un sous-marin a laissé comme seule filière opérationnellement exploitable en toute sûreté celle des réacteurs à eau pressurisée.

La sûreté nucléaire comme impératif absolu

Les risques³⁸ inhérents à toute utilisation de l'énergie nucléaire ont dès le début amené les responsables des programmes navals nucléaires occidentaux à mettre la sécurité et la sûreté nucléaires au cœur de leurs préoccupations. Aux débuts du premier programme de propulsion nucléaire, Rickover avait compris la dangerosité liée aux installations nucléaires et l'importance à accorder à la sûreté nucléaire dès ses premiers jours passés à

37. R. G. Hewlett et F. Duncan, *Nuclear Navy 1946-1962*, op. cit., p. 273.

38. Risques spécifiques liés à la radioactivité, à la concentration d'une énergie importante dans le cœur et à la puissance résiduelle après arrêt du réacteur.

Oak Ridge en 1946. Il avait parfaitement compris les conséquences que pourrait avoir sur l'opinion publique américaine tout accident nucléaire sur un bâtiment de l'US Navy, avec une potentielle remise en cause du programme de propulsion nucléaire³⁹. Il parvint à mettre en place une organisation et des procédures permettant le développement des programmes de propulsion, tant chez les industriels – en particulier Westinghouse, General Electric, et les chantiers navals précédemment évoqués – qu'au sein de la Navy. Surtout, il sélectionna et forma le personnel capable de se soumettre à la « discipline de la technologie nucléaire⁴⁰ ».

La succession d'accidents nucléaires survenus à bord des bâtiments nucléaires soviétiques, avec leurs conséquences sur les personnels embarqués et l'environnement, indique *a contrario* son faible poids dans la culture communiste soviétique. La radioprotection est très mal prise en compte à bord des sous-marins soviétiques, conduisant beaucoup de sous-mariniers soviétiques à absorber « des doses considérables, parfois mortelles, souvent handicapantes⁴¹ ». L'accident du *Thresher*, dû probablement à un défaut de soudure de la coque⁴² et non à une défaillance du réacteur ou de son exploitation, démontra en revanche que les exigences de qualité attendues de la propulsion nucléaire devaient également s'appliquer à l'ensemble des bâtiments porteurs et des installations à terre nécessaires à leur construction, maintenance ou soutien.

La sûreté nucléaire comprend quatre éléments : la sûreté, la radioprotection, la prévention et la lutte contre les actes de malveillance ainsi que les actions de sécurité civile en cas d'accident⁴³. Il s'agit donc de l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets. Elle repose sur une démarche comprenant trois volets :

- L'analyse *a priori* des défaillances potentielles à considérer permettant de dimensionner et mettre en place les moyens permettant de les éviter ou d'en limiter les conséquences ;
- L'apprentissage, fondé sur la prise en compte du retour d'expérience ;
- La sécurisation des fonctions d'ultime secours, pour empêcher la survenue de certains accidents hors dimensionnement. :

39. R. G. Hewlett et F. Duncan, *Nuclear Navy 1946-1962*, op. cit., p. 342.

40. F. Duncan, *Rickover and the Nuclear Navy: The Discipline of Technology*, Annapolis, Naval Institute Press, 1989, pp. 279-294.

41. L. Gilstov, N. Mormoul et L. Ossipenko, *La Dramatique histoire des sous-marins soviétiques*, op. cit., p. 212.

42. F. Duncan, *Rickover and the Nuclear Navy: The Discipline of Technology*, op. cit., p. 52 et suivantes.

43. Article L-591-1 du Code de l'environnement.

Si la sûreté nucléaire repose sur la mise en place de procédures, elle repose d'abord sur les femmes et les hommes la mettant en œuvre. Un exemple cité par l'ingénieur russe Nicolai Mormoul illustre ce propos⁴⁴. Lors du premier allumage d'une des deux chaufferies du sous-marin soviétique K-19 (classe *Hotel*) en juillet 1961, la mise en pression du circuit primaire fut réalisée alors que les capteurs de pression n'étaient pas branchés. Il en résulta une surpression du circuit (400 bars au lieu de 200) déformant ce circuit. Le commandant du navire ne rendit pas compte de cet accident. Peu de temps après, lors de manœuvres navales, une rupture se produisit sur ce circuit, causant une perte de réfrigération du réacteur conduisant à sa mise en alarme. Faute de circuit d'injection de secours permettant d'évacuer la puissance résiduelle, l'équipage dut confectionner un circuit de refroidissement de fortune. Plusieurs marins ayant pénétré dans le compartiment réacteur furent gravement irradiés et contaminés, sept d'entre eux mourant dans les semaines suivant l'accident, et plusieurs autres quelques années plus tard. La mise en place de procédures, nécessaire, ne compense pas l'acquisition d'une culture de sûreté.

Selon la World Association of Nuclear Operators (WANO), « la culture de sûreté se définit comme les valeurs clés et les comportements résultant d'un engagement collectif de la part des leaders et des personnes, visant à mettre l'accent sur la sûreté aux dépens des objectifs en conflit avec la sûreté, ceci afin d'assurer la protection des personnes et de l'environnement⁴⁵ ». Cette culture de sûreté peut également être définie comme « l'ensemble des caractéristiques et des attitudes qui, dans les organismes et chez les individus, font que les questions relatives à la sûreté des installations et activités nucléaires bénéficient, en priorité, de l'attention qu'elles méritent en raison de leur importance⁴⁶ ». La culture de sûreté est une responsabilité collective, reposant sur deux facteurs clés : une organisation adéquate et la compétence du personnel. Elle nécessite une implication constante des responsables, au plus haut niveau de mise en œuvre.

Les clés du succès de la propulsion nucléaire

Une organisation spécifique et efficace

Le succès du programme de propulsion nucléaire américain dans les années suivant la Seconde Guerre mondiale repose largement sur l'organisation mise en place par l'amiral Rickover. Alors que la Navy avait été mise à l'écart

44. L. Gilstov, N. Mormoul et L. Ossipenko, *La Dramatique histoire des sous-marins soviétiques*, op. cit., p. 221-225.

45. World Association of Nuclear Operators, « PL 2013-1 Caractéristiques d'une culture de sûreté solide », mai 2013, disponible sur : www.wano.info.

46. Arrêté du 15 février 2022 fixant les règles générales relatives aux installations et activités nucléaires intéressant la défense, disponible sur : www.legifrance.gouv.fr.

du projet Manhattan et de la nouvelle agence civile de l'énergie atomique, et que les chantiers navals sortaient d'une période de production massive de navires et de sous-marins, il fallut toute la force et la pugnacité de Rickover pour fédérer toutes les énergies dans une organisation adaptée. La création de *Naval Reactors*, organisation duale dont il prit la tête et placée sous la double tutelle du bureau responsable des programmes de nouveaux bâtiments de la Navy (Buships) et celle de la Commission à l'énergie atomique, répondit à cette nécessité. Le détachement d'ingénieurs ne rendant compte qu'à Rickover dans chaque laboratoire ou chantier naval compléta le dispositif, en permettant un contrôle serré et réactif, conduisant au succès du programme⁴⁷.

En France, l'échec du projet Q244, dû en premier lieu à un choix initial technique erroné, mit également en évidence la faiblesse de l'organisation retenue. La décision de doter la France d'une force de dissuasion indépendante permit, grâce à une forte volonté politique, une réorganisation complète des structures. La première étape fut la création en 1959 au sein du CEA par Jacques Chevallier du Groupe de propulsion nucléaire, devenu rapidement Département de propulsion nucléaire. La deuxième étape fut la création le 5 avril 1961 de la Délégation ministérielle de l'armement (DMA), regroupant tous les services techniques et industriels des armées, avec trois objectifs :

- La constitution d'une force nucléaire stratégique indépendante ;
- La conduite des programmes d'armements classiques ;
- La restructuration de l'industrie de défense.

La troisième étape fut la création le 13 juin 1961 de l'œuvre commune Armées-CEA, définissant clairement les responsabilités des différents organismes dépendants du ministère des Armées ou du CEA dans la conduite des programmes atomiques. Enfin, la quatrième étape fut la création en 1962 au sein de la DMA de l'organisation Coelacanthé, destinée à conduire l'ensemble des programmes concourant à la constitution de la Force océanique stratégique (FOST).

Cette organisation permit de conduire avec succès tous les programmes de la dissuasion, et en particulier le premier d'entre eux, celui du SNLE *Le Redoutable*. Elle a subi quelques évolutions, avec en particulier le rattachement du département de propulsion nucléaire à la société Technicatome⁴⁸ en 1974 ou la création du Service technique mixte des chaudières nucléaires de propulsion navale (STXN) regroupant des experts de la Direction générale de l'armement (DGA), du CEA et de la Marine nationale en 1994. Cette organisation permet de définir clairement les responsabilités de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre, et favorise une

47. Lire à ce sujet R. G. Hewlett et F. Duncan, *Nuclear Navy 1946-1962, op. cit.*, en particulier les chapitres 3, 4 et 9.

48. Devenue ArevaTA en 2006 puis TechnicAtome en 2017.

proximité des concepteurs, réalisateurs, opérationnels et responsables de la maintenance avec un très haut niveau de sûreté. Par ailleurs, l'actionnariat de TechnicAtome, majoritairement étatique, fait que l'écosystème de la propulsion nucléaire est toujours resté dans le giron de l'État français, permettant notamment une proximité intellectuelle des principaux responsables du domaine, propice à la résolution rapide des éventuels problèmes techniques.

L'impératif de sûreté nucléaire doit aussi se décliner par la mise en place d'une organisation claire définissant les responsabilités, de conception et d'exploitation, dans l'ensemble des situations du bâtiment à propulsion nucléaire ou des installations terrestres associées (études, construction, exploitation opérationnelle en mer ou pendant les périodes de maintenance, mise hors service et démantèlement). Une autorité de sûreté indépendante des concepteurs et exploitants, validant les objectifs de sûreté et contrôlant la sûreté tout au long de la vie des systèmes nucléaires, est enfin nécessaire ; ces principes d'organisation sont ceux définis en France par le code de la Défense et l'arrêté exploitant.

Un personnel bien entraîné

Autre facteur clé, le personnel fut identifié dès les débuts du premier programme de propulsion nucléaire par l'Amiral Rickover. Il accordait une importance particulière à la formation et à l'entraînement, tant des officiers que des équipages des bâtiments, que du personnel travaillant dans l'organisation *Naval Reactors*. Rickover recevait et sélectionnait personnellement les officiers destinés à armer les sous-marins et bâtiments de surface nucléaires, avant qu'ils n'aillent suivre une formation d'un an⁴⁹. La formation professionnelle des équipages faisait également l'objet d'une attention particulière dans la flotte soviétique, mais à côté des disciplines « idéologiques », largement responsables d'erreurs graves de commandement, comme dans le cas d'un des accidents du K19 relaté *supra*⁵⁰.

L'importance de disposer de personnel compétent fut également bien perçue en France dès les débuts, avec la création en 1956 de l'École d'application maritime de l'énergie atomique, devenue ultérieurement École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA), située à Cherbourg. Cette école forme, théoriquement et pratiquement, les officiers et les opérateurs mettant en œuvre – ou concourants à leur mise en œuvre – les chaufferies nucléaires à bord de bâtiments de la Marine nationale. Ce dispositif est complété dans les ports de Brest et Toulon par des centres hébergeant des simulateurs sur lesquels les équipages s'entraînent régulièrement. Enfin un contrôle des connaissances, théoriques et pratiques,

49. R. G. Hewlett et F. Duncan, *Nuclear Navy 1946-1962*, op. cit., p. 216.

50. L. Gilstov, N. Mormoul et L. Ossipenko, *La Dramatique histoire des sous-marins soviétiques*, op. cit., p. 217.

est réalisé annuellement, afin de vérifier que le niveau des équipes d'exploitation à bord des sous-marins et du porte-avions *Charles de Gaulle* est à la hauteur de celui qu'exige la filière nucléaire. Il s'agit bien d'abord « de professionnaliser les hommes plutôt que de sophistiquer structures et procédures⁵¹ ».

Ce besoin de disposer de personnel aux compétences pointues concerne l'ensemble de la filière, en particulier la partie étatique ou industrielle réalisant la conception, la fabrication, l'intégration et la maintenance des bâtiments à propulsion nucléaire et des installations nucléaires. Ces compétences pour la propulsion sont en grande partie communes avec celles de la filière nucléaire civile, notamment dans les domaines de la métallurgie, de la thermodynamique et thermohydraulique, neutronique et mécanique des fluides. Elle s'en distingue néanmoins en raison des caractéristiques spécifiques d'un bâtiment de combat : dimension réduite complexifiant les exigences de radioprotection compte tenu de la présence des équipages à proximité des réacteurs, mouvement de plateforme, variations de vitesse importantes, résistance aux chocs⁵², etc.

Si l'existence d'une filière nucléaire civile forte, dans les domaines scientifique, technologique et industriel, favorise celle de la propulsion nucléaire, elle ne saurait garantir à elle seule son existence et le maintien des compétences dans ces domaines spécifiques sans continuité des efforts. Ainsi, les programmes de petits réacteurs civils (*small modular reactor*) favorisent les synergies, notamment industrielles, et consolident la propulsion nucléaire. Ils ne permettent cependant pas d'entretenir les savoirs et savoir-faire spécifiques à la propulsion nucléaire. La continuité dans la réalisation des programmes de propulsion nucléaire, notamment en ce qui concerne la conception des chaufferies embarquées, mais également le savoir-faire des sous-traitants⁵³, est vitale pour garantir la crédibilité technique de la dissuasion nucléaire.

En conclusion, les bâtiments à propulsion nucléaire, compte tenu de leur plus-value opérationnelle, demeurent dans la première partie du XXI^e siècle, l'un des fondements de la puissance navale. Dans un contexte de réarmement naval prononcé, cette capacité va intéresser progressivement un plus grand nombre de marines. L'impératif de sûreté nucléaire, d'acquisition d'une organisation des responsabilités et d'entretien en nombre suffisant des compétences nécessaires à la mise en œuvre et à leur entretien, restera des enjeux majeurs pour les nouveaux venus.

51. Propos de Michel Crozier, sociologue, cité par l'amiral Casabianca à l'occasion de la séance inaugurale de l'EAMEA le 26 octobre 2022.

52. Entretien avec Laurent Sellier, directeur de la propulsion navale, CEA/DAM, le 21 octobre 2022.

53. Compte rendu de l'audition à huis clos de F. Jacq, administrateur général du Commissariat général à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et de V. Salvetti, directeur des applications militaires au CEA, sur la dissuasion nucléaire, Commission de la Défense nationale et des forces armées, Assemblée nationale, 18 janvier 2023.

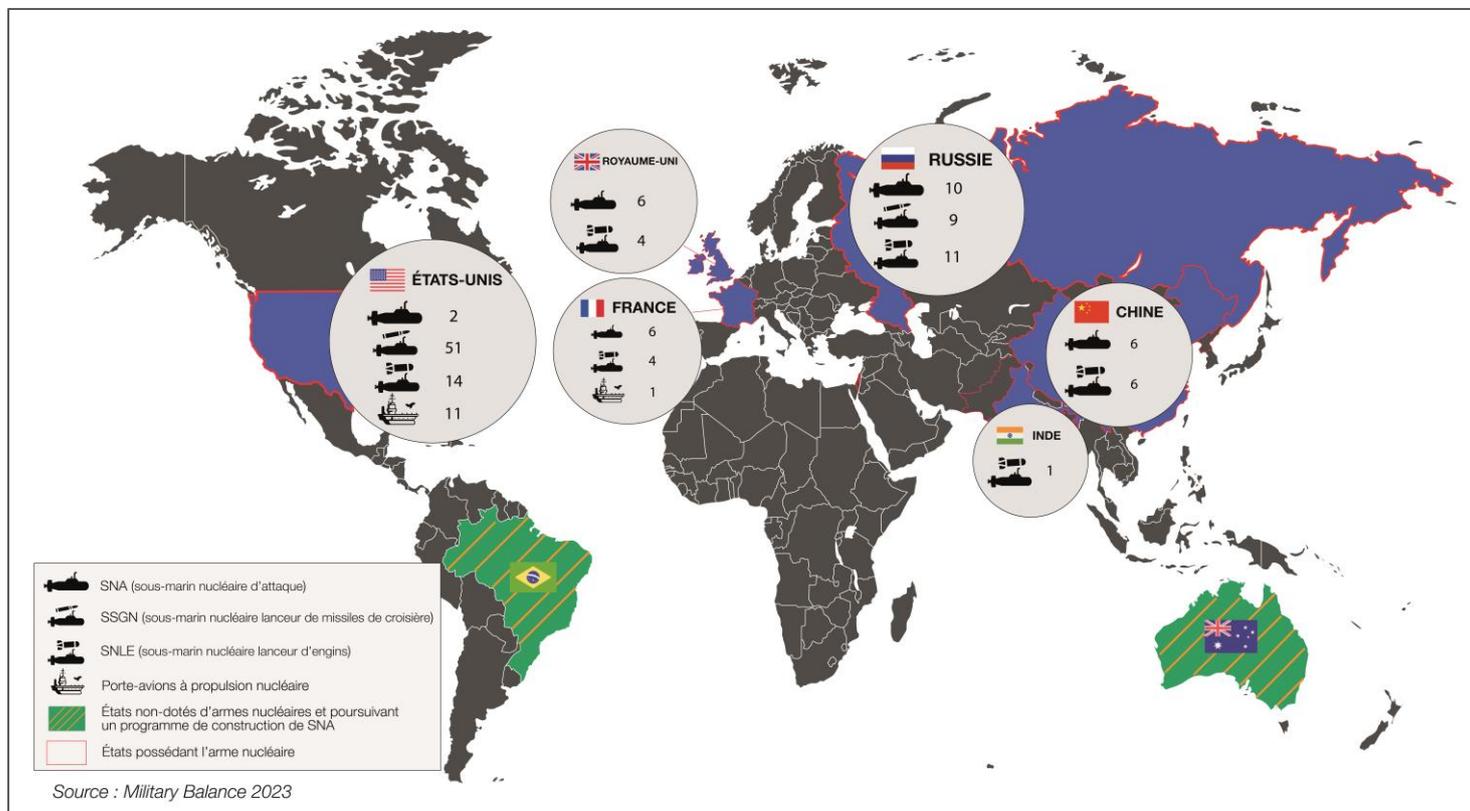
La propulsion nucléaire au XXI^e siècle

Alors que la propulsion nucléaire semblait, pendant la guerre froide, être l'apanage des États dotés de l'arme nucléaire (EDAN) en raison d'importantes exigences techniques et d'un partage du combustible entre armes nucléaires et chaufferies, on observe au tournant des années 2000, une extension de la technologie de la PN avec l'émergence de plusieurs programmes, principalement en Asie. Si aucune velléité ne s'est pour le moment concrétisée à l'exception de l'Inde, l'enjeu du partage de la technologie, voire de son acquisition autonome, en particulier par des États non-dotés de l'arme nucléaire, semble bel et bien relancé.

Les derniers développements technologiques et surtout la spectaculaire montée en puissance de la marine chinoise changent la donne stratégique. C'est en grande partie en réponse à ce défi qu'est signé en septembre 2021 l'accord tripartite de coopération de défense entre l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis (AUKUS) prévoyant, entre autres, la livraison à Canberra d'une flotte de sous-marins à propulsion nucléaire.

Ce nouveau contexte repose la question des enjeux politiques, stratégiques, industriels et même juridiques et sécuritaires du transfert de cette technologie. Il interroge naturellement les décisions à venir d'autres acteurs majeurs comme l'Inde mais aussi le Japon, la péninsule coréenne ou encore le Brésil. Enfin, il nécessite de repenser les standards de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) de lutte contre la prolifération nucléaire.

La propulsion nucléaire navale dans le monde en 2023



Copyright : Ifri, 2023.

Pérennisation et adaptation de la PN des acteurs historiques

Les adaptations post-guerre froide

La dislocation de l'URSS en 1991 et la fin de la guerre froide ont entraîné des réductions sensibles des formats et des adaptations des flottes nucléaires des quatre États maîtrisant la propulsion nucléaire. Aux États-Unis, une vingtaine de SNLE des classes *Lafayette* et *Benjamin Franklin* fut ainsi désarmée entre 1989 et 1995, tandis que la France réduisait sa flotte de SNLE de six à quatre unités, et limitait sa flotte de SNA de type *Rubis* à six unités au lieu de huit envisagées initialement.

Ces réductions de format furent néanmoins accompagnées du renforcement de la nucléarisation de ces flottes et de la pérennisation des programmes déjà lancés. Le Royaume-Uni et la France désarmèrent ainsi leurs sous-marins à propulsion conventionnelle dans les années 1990 et 2000⁵⁴. La France se dota également d'un porte-avions à propulsion nucléaire, le *Charles*

54. La France remet néanmoins de façon temporaire en service un sous-marin classique, l'*Ouessant*, aux fins de formation des sous-mariniers malaisiens.

de Gaulle, au début des années 2000, et mit en service quatre SNLE de la classe *Le Triomphant* entre 1997 et 2010, tous équipés de chaufferies type K15 de 150 MW. Les États-Unis passèrent à une flotte de porte-avions entièrement nucléarisée en 2005 avec le retrait du service actif de l'*USS Kennedy*, et adaptèrent leur flotte sous-marine. Quatre SNLE de la classe *Ohio* furent ainsi convertis en sous-marins lanceurs de missiles de croisière (SSGN), embarquant chacun 154 missiles *Tomahawk* à bord. La nouvelle classe de SNA type *Seawolf*, conçue pour la guerre froide, fut limitée à trois unités, remplacée par la classe *Virginia*, plus adaptée au nouveau contexte.

Au Royaume-Uni, la pérennisation de la propulsion nucléaire a été confrontée à de nombreuses difficultés, résolues en renforçant la dépendance britannique à son partenaire américain. La construction du premier SNA de la classe *Astute* au chantier de BAE Systems à Barrow-in-Furness subit ainsi de nombreux délais dus à la perte de compétences en ingénierie. Le renfort d'une centaine d'ingénieurs et techniciens américains de la compagnie General Dynamics Electric Boat permit de relancer avec succès ce programme⁵⁵. À la suite d'expertises prouvant des vulnérabilités des réacteurs PWR2 équipant les SNLE *Vanguard* et SNA *Astute*, en particulier dans le cas de fuite du circuit primaire, le choix pour le réacteur des SNLE de 3^e génération classe *Dreadnought*, s'est porté sur un réacteur PWR3, dérivé du réacteur S9G équipant les SNA américains *Virginia*⁵⁶.

En France, l'enchaînement des programmes de SNLE *Le Triomphant*, SNA *Suffren* (chaufferie dérivée K15), réacteur à terre RES puis, à l'horizon 2035, des SNLE de 3^e génération (aussi équipés d'une chaufferie dérivée K15) permet d'assurer la pérennisation des savoir-faire de TechnicAtome et Naval Group, mais aussi de leurs sous-traitants. Le travail sur les chaufferies K22 qui équiperont à horizon 2038 le futur porte-avions de nouvelle génération (PA-NG) participe également à l'entretien des compétences dans le domaine de la conception. Un point important à surveiller est d'assurer un bouclage au sein des équipes entre la conception initiale et la mise en service, et d'en assurer le retour d'expérience⁵⁷.

Les soubresauts consécutifs de la fin de la guerre froide ont eu des effets majeurs sur la flotte russe, en particulier sa flotte sous-marine, confrontée à des difficultés industrielles, tant pour la conception de nouveaux types de sous-marins que pour la construction de nouvelles unités ou leur entretien. Les déploiements de sous-marins nucléaires se raréfient pendant les années 1990 et au début des années 2000. La marine russe fut par exemple incapable de déployer des unités à propulsion nucléaire pendant la crise du Kosovo, au printemps 1999. Le SSGN *Koursk* ne fut déployé en Méditerranée qu'à l'été, après que la crise a été résolue. Le moment le plus dramatique de

55. J. F. Schank *et al.*, « Learning from Experience: Lessons from the United Kingdom's Astute Submarine Program », RAND Corporation, 2011, disponible sur : www.rand.org.

56. C. Mills, « Replacing the UK's Strategic Nuclear Deterrent: Progress of the Dreadnought Class », House of Commons Library, 28 septembre 2022, disponible sur : commonslibrary.parliament.uk.

57. Entretien avec Loïc Rocard, PDG de TechnicAtome, le 25 octobre 2022.

cette période fut le naufrage de ce dernier, un an plus tard. Alors que les pays occidentaux proposaient leur aide pour secourir les quelques sous-marinières encore vivants, le président Poutine refusa ce concours, condamnant ces sous-marinières à la mort⁵⁸.

Les années 2010 permirent à la flotte russe un début de renouvellement, avec la mise en service en 2013 du SSGN *Severodvinsk*, premier de la classe *Yasen*, ainsi que celle du premier SNLE de la classe *Borei*.

Des exigences renforcées

Le retrait du service actif des premières générations de bâtiments à propulsion nucléaire, accéléré avec la fin de la guerre froide, a introduit une nouvelle problématique, celle de leur démantèlement. Les Américains ont été les premiers à mettre en place un tel programme à partir de 1992, le *Ship-submarine Recycling Program* (SRP). La France a également commencé à démanteler ses premiers SNLE de la classe *Le Redoutable* à partir du début des années 1990, en débarquant les cœurs et en retirant les compartiments réacteurs, traités de façon spécifique. Les processus de déconstruction des coques ont quant à eux débuté en 2018.

Les Britanniques ont été plus tardifs à mettre en place un tel programme. Ainsi, vingt sous-marins, dont neuf avec toujours le cœur à bord, étaient en attente de démantèlement début 2019⁵⁹. Un programme, le *Submarine Dismantling Project*, a finalement été lancé par Londres en 2021⁶⁰.

La gestion et le démantèlement de l'héritage de la flotte nucléaire soviétique ont nécessité un vaste effort international, conduit notamment par la Norvège, les États membres du G7 et l'Union européenne (UE) qui l'ont financé. Cet effort a permis ainsi de démanteler près de 200 sous-marins nucléaires ex-soviétiques et de sécuriser de nombreux stocks de déchets nucléaires⁶¹. En dépit des actions réalisées, le devenir de plusieurs épaves ou compartiments nucléaires volontairement immergés, en particulier près de la Nouvelle-Zemble demeure problématique, comme le cas du sous-marin K27 (voir *supra*). Alors que la Russie s'était engagée à entreprendre le renflouement de cette épave au printemps 2021 à l'occasion du début de sa présidence du Conseil de l'Arctique, l'invasion de l'Ukraine et les sanctions occidentales consécutives pourraient fragiliser ce projet⁶².

58. Z. Barany, « The Tragedy of the Kursk: Crisis Management in Putin's Russia », *Government and Opposition*, vol. 38, n° 3, 2004, p. 476-503.

59. Rapport du National Audit Service du gouvernement britannique, « Investigation into Submarine Defueling and Dismantling », 3 avril 2019, disponible sur : www.nao.org.uk.

60. « Project to Dismantle ex-Royal Navy Nuclear Submarines Inches Forward », *Navy Lookout*, 7 février 2022, disponible sur : www.navylookout.com.

61. C. Digges, « Norway and Russia Mark 25 Years of Cooperative Work on Radiation Security », *Bellona*, 4 octobre 2021, disponible sur : bellona.org.

62. C. Digges, « Will Russia Raise Its Sunken Subs Now That It Has Invaded Ukraine? », *Bellona*, 5 décembre 2022, disponible sur : bellona.org.

Outre le démantèlement des unités nucléaires et des installations à terre associées, le renforcement des exigences de sûreté nucléaire, du moins dans les marines occidentales, a marqué cette période. Ces exigences concernent les réacteurs embarqués, mais également les infrastructures, en particulier après le tsunami de mars 2011 et ses conséquences à Fukushima. Ainsi, les nouveaux programmes de rénovation des infrastructures des nouvelles unités nucléaires, comme celles de la base navale de Toulon destinées à l'accueil des SNA de la classe *Suffren*, prennent en compte les exigences renforcées en ce qui concerne les risques générés par des événements environnementaux exceptionnels (tsunamis, séisme, submersion, etc.⁶³).

Cette prise en compte renforcée des risques sismiques a ainsi entraîné l'US Navy à fermer début 2023 temporairement quatre bassins servant à la maintenance des sous-marins nucléaires, à Puget Sound et à la base de Bangor, dans l'État de Washington⁶⁴.

La montée en puissance chinoise

Sans valeur opérationnelle jusqu'à la fin de du XX^e siècle, la flotte sous-marine chinoise à propulsion nucléaire est progressivement montée en puissance. La mise au service actif à partir de 2010 de quatre SNLE classe *Jin* (ou Type 094), dotés de deux réacteurs de 75 MW⁶⁵ et stationnés à la base, en partie souterraine, de Longpo sur l'île de Hainan en mer de Chine méridionale, a conféré à Pékin sa première capacité de frappe en second. Cette dernière demeure toutefois limitée par la portée de son missile, le JL2, estimée à environ 7 000 km, ce qui ne permet pas de cibler le territoire américain depuis des zones de patrouille proches de la Chine. D'autre part, l'indiscrétion du *Jin* le rend vulnérable en cas de déploiement dans la partie orientale du Pacifique⁶⁶. Cette série devrait être portée à six unités. Elle sera suivie d'une nouvelle classe de SNLE, type 096, qui devrait être dotée d'un nouveau missile, le JL3, d'une portée estimée entre 10 000 et 12 000 km et munie d'un unique réacteur et d'un propulseur type *pump-jet* permettant d'améliorer la discrétion acoustique⁶⁷.

La flotte de SNA de la marine chinoise a également été enrichie par la mise en service de six type 093 *Shang*, également dotés de deux réacteurs de 75 MW, remplaçant la classe *Han*. Dans un premier temps limitée à six unités produites entre 2002 et 2023, il semblerait que la construction se soit accélérée, avec la mise en production d'un huitième SNA de type 093

63. N. Cuoco, « "On change de siècle..." ». À Toulon, les infrastructures de la base navale se modernisent », *Var Matin*, 19 septembre 2022.

64. S. La Grone et M. Shelbourne, « Navy Closes 4 Puget Sound Submarine Dry Docks Following Earthquake Risk Study », *USNI News*, 27 janvier 2023, disponible sur : news.usni.org.

65. C. P. Carlson et H. Wang, « China Maritime Report No. 30: A Brief Technical History of PLAN Nuclear Submarines », U. S. Naval War College, août 2023, disponible sur : digital-commons.usnwc.edu, p. 18.

66. H. Kristensen, « China's Strategic Systems and Programs », *op. cit.*, p. 109.

67. C. P. Carlson et H. Wang, « China Maritime Report No. 30: A Brief Technical History of PLAN Nuclear Submarines », *op. cit.*, p. 19.

en janvier 2023⁶⁸. Le rythme demeure cependant assez lent, ce qui pourrait traduire les limites de l'unique chantier de construction de sous-marins à propulsion nucléaire à Bohai, également en charge de la construction des SNLE⁶⁹.

Enfin, la construction d'un brise-glace à propulsion nucléaire a été annoncée en 2018. Les informations sur ce projet restent rares⁷⁰. Le développement d'un réacteur pour un brise-glace pourrait également servir à l'avenir à un projet de porte-avions à propulsion nucléaire⁷¹.

Les nouveaux acteurs

Du fait de cette montée en puissance de la marine chinoise⁷², l'émergence de nouveaux enjeux dans l'Indo-Pacifique et, plus prosaïquement, des distances importantes à parcourir, la plupart des pays intéressés par la PN à ce jour se situent en Asie, à l'exception du Brésil et du Canada⁷³, qui avaient déjà entamé des démarches d'acquisition de la propulsion nucléaire à la fin des années 1980⁷⁴. Les pays européens intéressés par une propulsion nucléaire au cours de la guerre froide (Allemagne et Italie) se sont quant à eux tournés vers une propulsion diesel-électrique, Berlin ayant développé une compétence suffisante pour proposer ses sous-marins conçus par ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS) à l'export, notamment vers l'Italie, mais aussi la Grèce, le Portugal, la Turquie, la Norvège et Israël⁷⁵.

L'exception indienne

L'Inde reste, à ce jour, le seul État non-signataire du TNP doté de sous-marins à propulsion nucléaire, avec deux SNLE de la classe *Arihant*. Ces deux navires complètent une flotte de sous-marins d'attaque à propulsion diesel-électrique conséquente, avec 17 unités actuellement en service de trois classes

68. C. Biggers, « China Launches Second Possible Type 093B Hull », *Jane's*, 1^{er} février 2023, disponible sur : www.janes.com.

69. H. I. Sutton, « Chinese Navy Type 093 Shang Class Submarine », *Covert Shores*, 10 décembre 2020, disponible sur : www.hisutton.com.

70. T. Eiterjord, « Checking Back in on China's Nuclear Icebreaker », *The Diplomat*, 13 février 2013.

71. G. Honrada, « China's Next Aircraft Carrier Likely to Be Nuclear », *Asia Times*, 10 octobre 2022, disponible sur : asiatimes.com.

72. En une vingtaine d'années, la marine chinoise est ainsi passée d'une vocation côtière et à une marine de haute mer, avec une croissance en termes de tonnage estimée à 138 % entre 2008 et 2030. Lire notamment « Le réarmement naval dans le monde », *Études marines*, Centre d'études stratégiques de la Marine, janvier 2023.

73. T. Choi et C. Spedding, « Canadian Submarine Recapitalization within the Context of Climate Change », *BASIC*, novembre 2022, disponible sur : basicint.org.

74. On note un intérêt également de la part de la Pologne qui souhaite relancer son programme d'acquisition de sous-marins conventionnels, mais sans exclure le choix de la propulsion nucléaire bien que son intérêt stratégique serait réduit. Lire T. Grotnik, « Orka Reactivation – Which Submarines for Poland ? », *Naval News*, 1^{er} juin 2023, disponible sur : www.navalnews.com.

75. V. Groizeleau, « Fincantieri lance la construction du nouveau sous-marin italien », *Mer et Marine*, 13 janvier 2022, disponible sur : www.meretmarine.com.

différentes : la classe *Shishumar*, développée conjointement entre l'Inde et l'Allemagne, la classe *Sindhughosh* directement dérivée de la classe *Kilo* développée par l'Union soviétique puis la Russie, et enfin la classe *Kalvari* adaptée du *Scorpène*, sous-marin à propulsion conventionnelle conçu par le Français Naval Group pour l'export. Les six *Scorpène* prévus dans le contrat signé en 2005 ont désormais été lancés, dont le dernier, le *Vagsheer*, en avril 2022. Le constructeur français a cependant choisi de se retirer de l'appel d'offres visant à fournir les successeurs de la classe *Kalvari* dans le cadre du projet P75-I⁷⁶, bien qu'il reste présent pour aider les industriels indiens à moderniser et assurer la maintenance des *Kalvari* existants⁷⁷.

Si le projet de se doter d'une flotte de sous-marins fonctionnant à la propulsion nucléaire remonte aux origines du programme d'armement nucléaire indien et donc aux années 1970, le développement du premier SNLE dans le cadre du projet *Varsha* prend quant à lui beaucoup plus de temps et nécessite une aide extérieure. À l'image des Britanniques soutenus par les États-Unis pour développer leur premier sous-marin, l'Inde a bénéficié d'un important soutien de la part de la Russie, permettant à Moscou de saper l'influence américaine en Asie et d'aider un concurrent de la Chine à se développer⁷⁸. En 1981 est signé un accord d'assistance entre l'Union soviétique et l'Inde pour aider cette dernière à développer la propulsion navale nucléaire. Cette collaboration s'incarne dans le partage de compétences et la formation de scientifiques indiens par leurs homologues atomiciens soviétiques, mais également par la livraison, en 1988, d'un SNA soviétique qui est transféré à la flotte indienne, l'*INS Chakra*. Les constructeurs indiens s'inspirent de ce design pour concevoir, toujours avec l'aide soviétique, l'*INS Arihant*, premier SNLE de fabrication indienne, doté de 12 missiles balistiques mer-sol K-15 *Sagarika* de 750 km de portée⁷⁹.

Le lancement du navire a lieu en 2009, mais de multiples avaries, difficultés techniques et accidents ralentissent sa mise en service : la divergence du réacteur n'est atteinte qu'en juillet 2013, et l'*INS Arihant* effectue sa première patrouille opérationnelle, qualifiée de « patrouille de dissuasion » par le Premier ministre Narendra Modi, en novembre 2018. La construction du deuxième sous-marin de la classe *Arihant*, l'*INS Arighat*, est lancée en 2017, et pourrait entrer au service actif en 2024. Plus puissant, il est censé emporter quatre missiles balistiques mer-sol *Agni-III/K-14*, d'une portée de 3 500 km. Deux autres SNLE de la classe *Arihant* sont prévus pour

76. À ne pas confondre avec le Projet 75 Alpha qui concerne la livraison de SNA. Lire L. Lagneau, « Le français Naval Group se retire de l'appel d'offres lancé par l'Inde pour six sous-marins supplémentaires », *Zone Militaire*, 2 mai 2022, disponible sur : www.opex360.com.

77. V. Raghuvanshi, « Indian Lab Teams Up with France's Naval Group on Submarine Tech », *Defense News*, 24 janvier 2023, disponible sur : www.defensenews.com.

78. K. R. Bolton, « Indo-Russian Defence Cooperation and INS Arihant: Some Geopolitical Implications », *World Affairs*, vol. 17, n° 1, 2013.

79. E. Maitre, « Où en est la composante océanique indienne ? », *Bulletin de l'Observatoire de la dissuasion*, n° 72, Fondation pour la recherche stratégique, janvier 2020, disponible sur : www.frstrategie.org.

la décennie 2020, tandis que les travaux pour la 2^e génération de sous-marins stratégiques ont été lancés en 2017. Cette dernière prévoit trois sous-marins armés de 12 à 16 missiles mirvés K-6, portant donc la flotte de sous-marins stratégiques indiens à sept unités à l'horizon 2040⁸⁰.

Enfin, l'Inde souhaite également renforcer sa capacité de sous-marins nucléaires d'attaque : si les deux bâtiments jadis prêtés par l'Union soviétique ont été retirés du service – respectivement en 1991 pour l'*INS Chakra I* et en 2021 pour l'*INS Chakra II*⁸¹ –, le Projet 75 *Alpha* prévoit la construction de six SNA en propre par l'Inde, tandis que le SNA russe de la classe *Akula*, dont la location par New Delhi a été approuvée en 2019 pour un montant de trois milliards de dollars, devrait rejoindre la marine indienne d'ici 2025⁸². Bien que l'Inde ait pour ambition de construire ces SNLE et ces SNA d'une façon indépendante, il n'est pas certain qu'elle en ait les moyens humains et techniques, au vu de la lenteur du programme. Ainsi, à la suite de l'annonce d'AUKUS, un appel du pied a été formulé par certains analystes indiens en direction de la France, considérant que le partenariat avait « ouvert la porte » à Paris et New Delhi en matière de transfert de technologie afin d'aller plus loin que la livraison de sous-marins conventionnels de classe *Scorpène*⁸³.

À l'aide de cette flotte, l'Inde dispose donc d'une triade nucléaire complète, qui lui permet de décupler l'efficacité de sa dissuasion pour couvrir l'ensemble des menaces régionales, en particulier le Pakistan mais également la Chine, tout en conservant une capacité de seconde frappe. Cette triade s'inscrit dans une doctrine de « dissuasion minimale », en accord avec un arsenal plutôt restreint, et une politique de non-emploi en premier dont la pertinence est de plus en plus remise en cause dans les débats stratégiques indiens⁸⁴.

L'intérêt pakistanais pour la propulsion nucléaire, possiblement avec une aide chinoise, est également croissant : Islamabad ne dispose en effet pas à ce jour de SNLE, et la crédibilité de ses missiles de croisière à tête nucléaire pouvant être embarqués sur ses sous-marins conventionnels fait l'objet de critiques grandissantes⁸⁵.

Japon, Corée du Sud et Australie : les autres tentations de l'Indo-Pacifique

Si l'Inde est, à ce jour, le seul autre pays asiatique à disposer de sous-marins à propulsion nucléaire en dehors de la Chine, le réarmement naval de la part

80. *Ibid.*

81. « L'INS Chakra II », *Red Samovar*, 27 novembre 2021, disponible sur : redsamovar.com.

82. F. Torres et B. Dänzer-Kantof, *Les Atomes de la mer*, *op. cit.*, p. 476.

83. V. Robert, C. Dieterich et A. Bauer, « Après la crise des sous-marins, l'Inde cherche à ménager la France », *Les Échos*, 23 septembre 2021.

84. S. Kaushal *et al.*, « India's Nuclear Doctrine: The Agni-P and the Stability-Instability Paradox », RUSI, 8 juillet 2021, disponible sur : rusi.org.

85. S. Ullah, « Strategic Calculation Behind Pakistan's Pursuit of Sea-Based Nuclear Deterrence », *South Asian Voices*, 11 juin 2020, disponible sur : southasianvoices.org.

de l'Armée populaire de libération (APL) et l'instabilité grandissante en Asie de l'Est suscitent également des réflexions de la part de puissances moyennes quant à l'intérêt de se doter de SNA à propulsion nucléaire.

Ainsi, les débats au Japon sur le sujet sont virulents, après, comme on l'a vu, de premières recherches dans les années 1950. Un net regain d'intérêt est observé dans le débat public à la suite de la signature de l'accord AUKUS, qui a coïncidé avec la campagne électorale pour désigner le chef du parti au pouvoir, et donc le nouveau Premier ministre japonais, Fumio Kishida, entré en fonction fin septembre 2021. Tout en affichant son soutien au projet australien⁸⁶, il s'est montré prudent, voire opposé, à l'acquisition par le Japon d'un sous-marin à propulsion nucléaire, considérant qu'il ne s'agissait pas d'un enjeu prioritaire⁸⁷, une position confirmée par son ministre de la Défense. Certains de ses opposants se sont montrés au contraire favorables au projet, affirmant qu'une telle capacité augmenterait la « dissuasion » japonaise – quand bien même ces sous-marins ne seraient pas dotés d'armes nucléaires – et sous-entendant qu'un transfert de technologie des États-Unis vers le Japon était désormais possible grâce au précédent d'AUKUS. Plus largement, plusieurs analystes et éditorialistes japonais appellent même à une intégration de leur pays dans l'accord, ce qui lui permettrait de développer une dimension plus résolument asiatique tout en ouvrant le champ des possibles au Japon⁸⁸.

À ce stade, il semble cependant peu probable que le Japon évolue vers une démarche d'acquisition d'un sous-marin à propulsion nucléaire. Tout d'abord, le budget de la défense reste limité : malgré la décision par le gouvernement Kishida de s'affranchir d'une convention politique datant de 1974 et le plafonnant à 1 % du produit intérieur brut, il n'est pas certain que l'augmentation prévue à 2 % soit suffisante pour débiter un programme coûteux de développement ou d'acquisition de la PN⁸⁹. De plus, la flotte japonaise de sous-marins à propulsion classique, qui compte 22 bateaux, est considérée comme l'une des meilleures au monde, avec la récente mise en service de la classe *Taigei* pour remplacer la classe *Soryu*⁹⁰. Les missions actuelles attribuées à cette flotte, à savoir la défense du territoire national japonais en accord avec la Constitution japonaise « pacifique », sont ainsi correctement remplies, sans besoin affiché d'évoluer vers une propulsion nucléaire.

86. « Japan Welcomes Australia's Planned Nuclear Submarine Acquisition under AUKUS », NHK, 14 mars 2023, disponible sur : www3.nhk.or.jp.

87. « Kishida Cautious about Japan Acquiring Nuclear-powered Subs », *Nikkei Asia*, 19 juin 2022, disponible sur : asia.nikkei.com.

88. « AUKUS Sub Deal Is One Pillar of Regional Security », *The Japan Times*, 17 mars 2023, disponible sur : www.japantimes.co.jp.

89. C. Pajon, « Nouvelle stratégie de sécurité et de défense au Japon. Comment dit-on *Zeitenwende* en japonais ? », *Lettre du Centre Asie*, n° 101, Ifri, 19 décembre 2022, disponible sur : www.ifri.org.

90. C. Lee Bell, « Is Japan Likely to Acquire Nuclear Powered Submarines? », *Australian Defence Magazine*, 24 février 2022, disponible sur : www.australiandefence.com.

Cependant, si le Japon venait à vouloir s'inscrire militairement dans la compétition stratégique vis-à-vis de la Chine et effectuer par exemple des patrouilles conjointes avec des SNA américains déployés dans la région, il est probable que la question se reposerait. De même, si le transfert de sous-marins à propulsion nucléaire vers l'Australie par les États-Unis est achevé, le Japon serait alors le seul pays du Dialogue quadrilatéral pour la sécurité (QUAD) à ne pas disposer de la propulsion nucléaire, augmentant à nouveau le déséquilibre entre les membres de cette alliance (États-Unis, Inde, Australie et Japon).

Des considérations similaires agitent la Corée du Sud, dont l'intérêt pour les sous-marins à propulsion nucléaire remonte aux années 2000 et à la découverte d'un programme secret d'enrichissement d'uranium et de recherches sur la PN, stoppé en 2004 en raison de craintes liées à la prolifération de matière. L'intérêt n'a en revanche jamais diminué et, pendant sa campagne présidentielle de 2017, l'ancien président sud-coréen, Moon Jae-In s'était ainsi montré déterminé à acquérir des sous-marins à propulsion nucléaire pour la Corée du Sud au travers d'un partage de connaissances avec les États-Unis, voire à développer les compétences en interne si une telle négociation échouait⁹¹. On observe une dialectique similaire au sujet des armes nucléaires elles-mêmes, le président Yoon Suk-yeol n'hésitant pas à menacer de développer un arsenal en cas de perte de confiance dans les garanties de sécurité américaines face à la Corée du Nord, ce qui a poussé les États-Unis à de nouvelles démonstrations de réassurance au printemps 2023 (voir *infra*)⁹². De même, 71 % de la population sud-coréenne serait favorable au développement d'un programme nucléaire militaire national⁹³.

Cette volonté est principalement motivée par l'agitation nucléaire de la Corée du Nord, qui multiplie les tests de missiles balistiques lancés depuis un sous-marin et serait actuellement en train de développer son propre sous-marin à propulsion nucléaire, venant compléter une flotte déjà conséquente de 60 à 80 sous-marins à propulsion classique⁹⁴. En septembre 2023, Pyongyang a également présenté un sous-marin diesel-électrique capable d'emporter des missiles balistiques et de croisière nucléaires, ce qui confirme leur volonté de se doter d'une capacité de frappe en second⁹⁵. Cette augmentation de la menace nord-coréenne ainsi que le développement de l'arsenal chinois, suscitent à Séoul un besoin de renforcement des garanties

91. G. Honrada, « South Korea Has Nuclear Subs Firmly in Its Sights », *Asia Times*, 6 juin 2022, disponible sur : asiatimes.com.

92. A. Panda, « The Washington Declaration is a Software Upgrade for the U.S.-South Korea Alliance », Carnegie Endowment for International Peace, 1^{er} mai 2023, disponible sur : carnegieendowment.org.

93. J. Mohan, « Nuclear Weapons Gaffe in South Korea Is a Warning to Leaders Everywhere », *The Bulletin of Atomic Scientists*, 15 mars 2023, disponible sur : thebulletin.org.

94. L. Kim, « A Race for Nuclear-Powered Submarines on the Korean Peninsula? », *The National Bureau of Asian Research*, 31 mars 2021, disponible sur : www.nbr.org.

95. T. Rogoway, « North Korea's Diesel-Electric Ballistic Missile 'Frankensub' Emerges », *The Drive*, 7 septembre 2023, disponible sur : www.thedrive.com.

de sécurité américaines, y compris au travers d'exercices et de signaux stratégiques : le début de l'année 2023 a ainsi vu le renouvellement de l'alliance entre les deux pays, une multiplication de manœuvres conjointes entre la Corée du Sud et les États-Unis, ainsi que l'escale d'un SNA américain⁹⁶ puis d'un SNLE⁹⁷. Enfin, la compétition « techno-nationaliste » avec le Japon apparaît comme une autre motivation pour Séoul, désireuse d'avancer plus loin que Tokyo sur le chemin de la propulsion nucléaire.

Cependant, comme pour le Japon, les obstacles au développement ou à l'acquisition de sous-marins à propulsion nucléaire par la Corée du Sud sont nombreux. L'objectif d'une dénucléarisation de la péninsule coréenne, notamment porté par la déclaration conjointe de la Corée du Nord et de la Corée du Sud de 1992 sur la dénucléarisation de la péninsule⁹⁸, apparaît ainsi incompatible avec un programme d'enrichissement d'uranium qui serait nécessaire au développement de la propulsion nucléaire, et ceci même si la Corée du Sud choisissait la voie de l'uranium faiblement enrichi, à l'image de la France. Si les restrictions de partage de technologies nucléaires sensibles entre les États-Unis et la Corée du Sud ont récemment été allégées quand Séoul a rejoint le programme américain de *small modular reactors*⁹⁹, les craintes de prolifération restent élevées. De même, l'intérêt opérationnel d'une propulsion nucléaire pour la Corée du Sud, qui dispose déjà de 19 sous-marins classiques¹⁰⁰, est limité : ces derniers sont capables de remplir efficacement leurs missions de dissuasion conventionnelle envers la Corée du Nord, et Séoul ne s'est pas encore positionné dans une compétition stratégique en mer de Chine méridionale qui nécessiterait l'acquisition d'une propulsion nucléaire.

Face à la montée en puissance de la Chine, l'Australie se positionne également sur l'acquisition de sous-marins nucléaires d'attaque au travers du partenariat AUKUS annoncé en septembre 2021. Outre un partage accru de renseignement et des partenariats sur l'intelligence artificielle et le quantique, le cœur de l'accord consiste en la fourniture de SNA à l'Australie, selon un schéma présenté en mars 2023 par le président américain et les Premiers ministres britannique et australien¹⁰¹. Dans un premier temps, des personnels militaires et civils australiens devraient être embarqués au sein des forces sous-marines britannique et américaine, ainsi que dans leurs

96. « US Nuclear-powered Submarine Arrives in South Korea Amid North Provocations », *The Korea Times*, 26 février 2023, disponible sur : www.scmp.com.

97. H. Mongilio, « USS Kentucky Make Port Call in South Korea, First SSBN in 40 Years », *USNI News*, 18 juillet 2023, disponible sur : news.usni.org.

98. Cette déclaration engageait les deux Corées à ne pas posséder, fabriquer ou utiliser d'armes nucléaires, et interdisait l'enrichissement de l'uranium et le retraitement du plutonium. Si la Corée du Nord est clairement en violation de cet accord, ce n'est pas – encore – le cas de la Corée du Sud.

99. « United States-Republic of Korea Leaders' Joint Statement », Maison-Blanche, 21 mai 2022, disponible sur : www.whitehouse.gov.

100. « South Korea Submarine Capabilities », The Nuclear Threat Initiative, 7 octobre 2022, disponible sur : nti.org.

101. « Fact Sheet: Trilateral Australia-UK-US Partnership on Nuclear-powered Submarines », Maison-Blanche, 13 mars 2023, disponible sur : www.whitehouse.gov.

bases industrielles, permettant une acculturation de la marine australienne à la propulsion nucléaire. À partir de 2027, une rotation de sous-marins britannique (classe *Astute*) et américain (classe *Virginia*) est prévue au sein de la base sous-marine australienne de Perth, toujours dans cette démarche d'acculturation et de construction d'une main-d'œuvre australienne compétente pour la maintenance à terme de ses propres navires. En effet, les deux dernières étapes du partenariat consistent en la vente de trois sous-marins américains de classe *Virginia* à l'Australie, qui seraient ensuite opérés indépendamment par la Marine australienne, et enfin la co-construction de la classe AUKUS, combinant une coque britannique – dont BAE Systems a remporté l'appel d'offres en octobre 2023¹⁰² – et une technologie américaine. Cette classe de SNA serait ensuite en service dans les marines australienne et britannique.

Si ce partenariat où la propulsion nucléaire apparaît comme un « cœur actif en dimension stratégique à part entière¹⁰³ » est un signal fort envoyé à la Chine (laquelle n'a pas manqué de réagir¹⁰⁴), de nombreuses questions restent en suspens sur la faisabilité d'une telle manœuvre, sur les plans technique, budgétaire et surtout humain. Comme démontré au cours du premier âge de la PN, cette dernière nécessite des personnels hautement qualifiés, partageant une culture de sûreté nucléaire, qu'il sera probablement difficile d'acquérir dans un pays sans base scientifique et industrielle nucléaire. Elle requiert aussi une base industrielle développée, avec des filières adéquates sur le long terme, ce dont ne dispose pas actuellement l'Australie et qui semble complexe à développer en moins de dix ans¹⁰⁵. De plus, les estimations budgétaires sont conséquentes : le projet nécessiterait un investissement de 240 milliards de dollars australiens jusqu'en 2055, engendrant donc probablement des coupes dans d'autres domaines militaires, qui pourraient eux aussi être utiles pour la compétition stratégique contre la Chine¹⁰⁶. Aux États-Unis, la *Strategic Posture Commission* souligne la tension que cette production supplémentaire de sous-marins fait peser sur l'industrie navale américaine, censée construire un sous-marin de la classe *Columbia* par an, soutenir l'effort de production de la classe *Virginia*, et entretenir la classe *Ohio*, avec des infrastructures communes¹⁰⁷.

102. D. Afanasieva, « BAE Systems Wins £4 Billion UK Contract for Nuclear Submarines », Bloomberg, 1^{er} octobre 2023, disponible sur : www.bloomberg.com.

103. F. Torres et B. Dänzer-Kantof, *Les Atomes de la mer*, op. cit., p. 434.

104. N. Camut, « China Warns AUKUS: You've Gone Down a 'Dangerous Road' with Nuclear Subs Deal », Politico, 14 mars 2023, disponible sur : www.politico.eu.

105. J. Edwards, « The Limits on Australia's Submarine Industry », *The Interpreter*, 17 mars 2023, disponible sur : www.lowyinstitute.org.

106. M. Ryan, « AUKUS Submarine Agreement: Historic but Not Yet Smooth Sailing », Center for Strategic & International Studies, 17 mars 2023, disponible sur : www.csis.org.

107. Rapport de la commission du Congrès sur la posture stratégique des États-Unis, octobre 2023, disponible sur : armedservices.house.gov.

Au niveau régional, les pays du Pacifique-Sud, marqués par des essais nucléaires aux conséquences encore mal évaluées sur l'environnement, témoignent d'une certaine inquiétude envers le projet¹⁰⁸. Enfin, si les risques de prolifération nucléaire sont minimes, voire inexistants, vis-à-vis de l'Australie, cette décision constitue tout de même un précédent en matière de transfert de technologie nucléaire militaire à un pays non-doté de l'arme nucléaire (cf. *infra*).

Iran, un candidat potentiel ?

État dont les volontés proliférantes ne sont plus à démontrer, l'Iran affirme aussi vouloir développer des sous-marins à propulsion nucléaire : les déclarations d'officiels issus de la Marine iranienne¹⁰⁹, des Gardiens de la Révolution ou de l'Organisation iranienne de l'énergie atomique se multiplient en ce sens depuis 2012¹¹⁰. De même, en 2018, l'Iran avait adressé une lettre à l'AIEA, l'informant de sa volonté de développer un tel programme, sans impliquer d'installations nucléaires dans les cinq premières années¹¹¹. Cette capacité compléterait une flotte déjà conséquente de sous-marins à propulsion classique (sept sous-marins d'attaque à propulsion diesel-électrique et 27 mini sous-marins), dont certains seraient capables de tirer des missiles de croisière. L'Iran aurait également rétrofité un sous-marin conventionnel russe de classe *Kilo* pour témoigner de sa capacité technologique avancée.

Cependant, à ce stade, il est peu probable que l'Iran puisse accéder à court terme à la propulsion nucléaire¹¹² ; les éventuels sous-marins conçus ne pourraient de toute façon qu'emporter des missiles conventionnels, Téhéran n'ayant pas – encore – développé de missiles à têtes nucléaires. Néanmoins, la relation grandissante entre l'Iran et la Russie à la faveur de la guerre en Ukraine pourrait provoquer à terme l'aide technique de Moscou aux scientifiques iraniens pour développer un sous-marin, voire la livraison d'un navire fonctionnel, à l'image du partenariat russo-indien.

Brésil : un intérêt ancien

Enfin, pour terminer ce tour d'horizon de la propulsion nucléaire chez les États non-dotés d'armes nucléaires, il est intéressant de s'attarder sur le cas brésilien. Ayant développé un programme nucléaire civil dans les années

108. M. Keen, « AUKUS in the Pacific: Calm with Undercurrents », *The Interpreter*, 20 mars 2023, disponible sur : www.lowyinstitute.org.

109. O. Heinonen, « Nuclear Submarines Program Surfaces in Iran », Harvard Kennedy School, Belfer Center, 23 juillet 2012, disponible sur : www.belfercenter.org.

110. « Iranian Navy: Building Nuclear-powered Submarine is a 'Top Priority' », *Naval Today* 16 avril 2020, disponible sur : www.navaltoday.com.

111. « Iran Looking to Build Nuclear Submarines, Watchdogs Says », *The Times of Israel*, 23 février 2018, disponible sur : www.timesofisrael.com.

112. « Iran Submarine Capabilities », The Nuclear Threat Initiative, 17 février 2023, disponible sur : nti.org.

1950 au travers du programme « *Atoms for Peace* », Brasilia tente brièvement de militariser ce programme dans les années 1970 et 1980, dans le double contexte d'une junte militaire au pouvoir et d'une rivalité croissante avec l'Argentine¹¹³. Si les ambitions de développer un programme nucléaire militaire s'arrêtent dans les années 1990 avec la signature du traité de Tlateloloco en 1994 (qui fait de l'Amérique du Sud une zone exempte d'armes nucléaires) puis du TNP en 1998, l'objectif de développer la propulsion nucléaire navale est quant à lui maintenu, en s'appuyant sur une maîtrise croissante du cycle du combustible¹¹⁴. L'armée brésilienne justifie le besoin d'un sous-marin à propulsion nucléaire par la nécessité de surveiller efficacement la côte brésilienne, lieu de résidence d'une majorité de la population et des puits de pétrole brésiliens¹¹⁵.

Ce projet s'inscrit également dans une démarche de développement de sous-marins conventionnels, avec l'aide de la France. Signé en 2008 entre Paris et Brasilia, le programme de sous-marins (PROSUB) vise à la construction de quatre sous-marins à propulsion diesel-électrique, la classe *Riachuelo*, dérivé du *Scorpène* et dont le premier a été mis en service en 2022¹¹⁶, ainsi que d'un sous-marin à propulsion nucléaire (SN-10). Ce dernier devrait toutefois être uniquement conçu par la Marine brésilienne et l'industriel brésilien *Itaguaí Construções Navais*, l'apport français se limitant à une influence sur le choix du combustible (uranium faiblement enrichi, comme les SNA et SNLE français), le design de la coque¹¹⁷, et une acquisition de capacités techniques au travers de la fabrication conjointe de la classe *Riachuelo*. Cet accord exclut officiellement toute implication française sur les parties nucléaires du sous-marin, bien que des échanges aient probablement lieu à très haut niveau¹¹⁸. Ce développement indigène du réacteur, dont l'assemblage du prototype à terre n'a débuté qu'en 2020¹¹⁹, semble expliquer en partie les retards du programme. L'objectif est désormais d'achever le réacteur nucléaire en 2027, et le sous-marin d'ici 2033.

113. V. Narang, *Seeking the Bomb: Strategies of Nuclear Proliferation*, Princeton, Princeton University Press, 2022, p. 100 et suivantes.

114. D. Rocha, « Les maîtres silencieux des océans. Les enjeux stratégiques et de non-prolifération des sous-marins à propulsion nucléaire en Australie et au Brésil », Institut d'études de stratégie et de défense, janvier 2023.

115. L. Rodriguez, « Brazil Moves Closer to Developing a Nuclear-Powered Submarine », CSIS, 13 juillet 2022, disponible sur : nuclearnetwork.csis.org.

116. P. Chapleau, « Le sous-marin brésilien *Riachuelo* de type *Scorpène* mis en service », *Ouest-France*, 2 septembre 2022, disponible sur : lignesdedefense.blogs.ouest-france.fr.

117. Le design du SNA brésilien aurait ainsi été approuvé en la présence d'autorités françaises. Voir X. Vavasseur, « Brazil's Nuclear-Powered Submarine Project SN-BR Making Progress », *Naval News*, 6 décembre 2021, disponible sur : www.navalnews.com.

118. « Le Brésil en négociations avec la France pour son sous-marin nucléaire », *Le Marin*, 25 octobre 2023, disponible sur : lemarin.ouest-france.fr.

119. A. Galante, « Marinha inicia montagem de reator do prototipo de propulsao nuclear em Aramar », *Poder Naval*, 21 octobre 2020, disponible sur : www.naval.com.br.

Le défi de la non-prolifération

Le débat de l'intégration de la propulsion navale nucléaire dans les activités prohibées par le TNP n'est pas nouveau : dès les années 1960 et les premières négociations autour du TNP, des États comme l'Italie et les Pays-Bas ont insisté pour que la PN ne soit pas incluse dans le TNP, car désireux de développer des réacteurs nucléaires pour des bâtiments de surface commerciaux ou militaires. De même, le Royaume-Uni ne souhaitait pas de législation internationale sur le sujet afin de continuer à bénéficier de l'aide américaine pour le développement de ses sous-marins à propulsion nucléaire¹²⁰. Enfin, les prérogatives strictement civiles de l'AIEA, qui ne peut inspecter des sites nucléaires militaires afin de respecter la confidentialité des programmes étatiques, entraient en contradiction avec le projet de contrôle des sous-marins à propulsion nucléaire.

Publiée en 1972, la circulaire n° 153 de l'AIEA (INFCIRC/153) représente une première évolution dans la prise en compte de la propulsion nucléaire par l'AIEA et le régime de non-prolifération. Son paragraphe 14 prévoit en effet un mécanisme permettant à un État de soustraire aux garanties de l'AIEA des matières nucléaires utilisées dans un « but non pacifique », à condition que celles-ci ne soient pas employées dans un objectif interdit par le TNP, c'est-à-dire l'utilisation pour fabriquer une arme ou toute autre utilisation « explosive ». Bien que ne mentionnant pas l'usage pour la PN, cette disposition est généralement comprise comme permettant l'enrichissement de matières fissiles – ou le transfert de matières fissiles – par un État non doté en vue de développer une propulsion nucléaire.

Ce dispositif, qui doit s'inscrire dans un accord spécifique entre le pays concerné et l'AIEA, n'a à ce jour jamais été mis en œuvre, bien que plusieurs États y aient réfléchi, notamment le Canada et le Brésil dans le cadre de son programme SN-10 (cf. *supra*)¹²¹. Les premières négociations entre l'autorité argentine-brésilienne de contrôle du nucléaire (ABACC)¹²² et l'AIEA ont ainsi débuté en juin 2022 pour l'établissement d'un protocole de garanties additionnelles, dont le Brésil ne dispose pas encore¹²³. Le processus risque d'être encore plus complexe¹²⁴ que pour l'Australie, qui entretient déjà des relations plus abouties avec l'Agence.

120. J. C. Moltz, « Closing the NPT Loophole on Exports of Naval Propulsion Reactors », *The Nonproliferation Review*, 1998, p. 108-114.

121. L. Rockwood, « Naval Nuclear Propulsion and IAEA Safeguards », Federation of American Scientists, août 2017.

122. L'accord de Guadalajara, signé en 1991, a conduit à la création de la Brazilian-Argentine Agency for Accounting and Control of Nuclear Materials (ABACC), qui prévoit un usage strictement pacifique de l'énergie nucléaire produite par les deux pays.

123. I. J. Stewart, « Brazil Wants Special Treatment for Its Nuclear Submarine Program – Just Like Australia », *The Bulletin of Atomic Scientists*, 28 juin 2022, disponible sur : thebulletin.org.

124. M. Spektor, « Prospects for Safeguarding Brazil's Naval Nuclear Propulsion Program », Federation of American Scientists, août 2017.

Les conséquences d'AUKUS

En plus de spécifier le format du partenariat et le calendrier prévu des livraisons, la déclaration trilatérale du 13 mars 2023 sur AUKUS fut l'occasion de préciser les modalités quant au risque de prolifération nucléaire, une inquiétude largement partagée lors des premières annonces. Affichant sa volonté de respecter les plus hauts standards de non-prolifération, l'Australie a notamment annoncé engager des négociations avec l'AIEA dans le cadre de l'article 14 de ses accords de garanties avec l'Agence, reprenant les dispositions de l'INFCIRC/153. Traditionnellement considéré comme un moyen « repoussoir » pour empêcher les pays d'acquérir la propulsion nucléaire¹²⁵, le processus demeure complexe sur le plan juridique et technique, selon le directeur de l'AIEA¹²⁶.

Ces dispositions juridiques s'accompagnent de précautions techniques pour limiter au maximum la manipulation de matière fissile par l'Australie. Les réacteurs devraient ainsi être livrés scellés et ne nécessiter aucune opérations pendant leur durée de vie¹²⁷, notamment grâce à l'utilisation d'UHE dans les sous-marins américain et britannique, à l'inverse du choix français de l'UFE qui nécessite un ou plusieurs changements de cœur au cours de la vie du sous-marin. Ce combustible ne sera pas non plus traité par des opérateurs australiens et ne pourra pas être utilisé pour la fabrication d'armes nucléaires sans un important processus de reconditionnement dont ne dispose pas Canberra¹²⁸. Cependant, cette livraison « clés en main » n'est pas sans poser de question sur la sûreté nucléaire et aux interventions à conduire, par exemple en cas de présence d'élément combustible poreux contaminant le circuit primaire ou d'incident à bord.

Il est évident que les risques de prolifération nucléaire en Australie dans le cadre d'AUKUS sont minimes voire nuls : Canberra est traditionnellement opposé aux armes atomiques – d'où d'importants débats dans la société par rapport à l'acquisition de la propulsion nucléaire –, signataire du TNP et du traité de Rarotonga qui fait du Pacifique Sud une zone exempte d'armes nucléaires. Certains analystes font état d'un possible emploi de ces sous-marins pour l'emport d'armes nucléaires américaines sous double-clé, à l'image des bombes à gravité américaines stockées dans certains pays de l'OTAN : cette démarche nécessiterait cependant des circonvolutions légales pour contourner l'appartenance de l'Australie à une zone exempte d'armes nucléaires, créant de ce fait un narratif dangereux pour la non-prolifération¹²⁹.

125. T. de Champchesnel, « AUKUS, un nouveau défi pour le régime de non-prolifération », *Revue Défense nationale*, n° 852, 2022/7, p. 61-65.

126. Déclaration du directeur général de l'AIEA à propos de l'annonce d'AUKUS, Agence internationale de l'énergie atomique, 14 mars 2023, disponible sur : www.iaea.org.

127. « The AUKUS Nuclear-Powered Submarine Pathway: Nuclear Non-Proliferation Fact Sheet », Ministère de la Défense australien, mars 2023, disponible sur : www.defence.gov.au.

128. *Ibid.*

129. T. Dalton et A. Levite, « AUKUS as a Nonproliferation Standard? », *Arms Control Today*, juillet 2023, disponible sur : www.armscontrol.org.

La principale conséquence du partenariat AUKUS est en effet la création d'un « double standard », ou en tout cas la perception d'une manipulation des normes internationales par les États-Unis pour servir ses propres intérêts dans l'Indo-Pacifique. Washington avait en effet jusqu'alors découragé le transfert de la technologie d'un État doté à un État non-doté, notamment de la France vers le Brésil ou auparavant vers le Canada (cf. *supra*). De même, les États-Unis œuvrent depuis la fin de la guerre froide à la réduction de l'utilisation de l'uranium hautement enrichi dans les réacteurs de recherche, alors même que la Navy américaine continue d'utiliser de l'UHE dans les réacteurs de ses sous-marins¹³⁰, et pourrait utiliser le précédent australien dans une démarche d'exportation de ce modèle.

La 10^e conférence de réexamen du TNP, qui s'est tenue en août 2022 et était donc la première post-AUKUS, fut l'occasion pour certains pays d'exprimer leurs griefs par rapport à ce « double standard » américain. La Chine, soutenue par d'autres États asiatiques non-alignés, a ainsi affirmé qu'il s'agissait d'un « transfert illégal de matières fissiles de qualité militaire », que les trois pays signataires « induisaient les opinions publiques en erreur » et remettaient en question les « sanctions imposées unilatéralement » sur les États non-dotés qui acquièrent et développent un programme nucléaire civil¹³¹. Pékin a réitéré ces griefs lors de l'annonce formelle d'AUKUS en mars 2023, considérant que les risques de prolifération nucléaire étaient élevés et que le transfert violait le TNP, tout en critiquant les garanties apportées par l'Australie à l'AIEA¹³². L'Indonésie s'est également saisie du sujet, proposant un *working paper* à la conférence de réexamen et considérant la propulsion nucléaire comme un « grand risque pour la paix dans le monde et la sécurité¹³³ ». Des positions similaires ont été exprimées lors de la réunion de préparation de la 11^e conférence de réexamen du TNP à Vienne en septembre 2023.

Plus largement, AUKUS apparaît finalement comme un moyen de combler le « vide juridique » de la propulsion nucléaire en posant de nouveaux standards, à condition que la négociation entre l'Australie et l'AIEA sur l'implémentation de l'article 14 des accords de garanties aboutisse. À terme, la qualité de ces standards exercera une influence sur la capacité d'autres États à développer une propulsion nucléaire dans le respect de la non-prolifération, ce qui n'est pas évident pour certains pays d'ores et déjà

130. E. Maitre, « Sous-marins à propulsion nucléaire et prolifération », Observatoire de la dissuasion, Bulletin n° 92, Fondation pour la recherche stratégique, novembre 2021, disponible sur : www.frstrategie.org.

131. « Commentary III on AUKUS: the US, UK and Australia Misperceive Public Opinion by Playing with Concepts », Mission permanente de la République populaire de Chine aux Nations unies et à d'autres organisations internationales à Vienne, 10 août 2022, disponible sur : vienna.china-mission.gov.cn.

132. « China Firmly Opposes AUKUS's Coercing IAEA to Endorse Its Nuclear Submarine Cooperation: Foreign Minister », *The Global Times*, 15 mars 2023, disponible sur : www.globaltimes.cn.

133. « Indonesia Mainstreams Issue of Nuclear Naval Propulsion at UN », *Antara News*, 28 août 2022, disponible sur : kalsel.antaranews.com.

intéressés par un programme nucléaire militaire, comme la Corée du Sud, le Brésil ou l'Iran.

Vers de nouveaux usages ?

Au-delà de la propulsion pour des sous-marins, l'énergie nucléaire est également envisagée comme moyen de propulsion d'autres engins, avec des stades différents d'avancée, tant pour le civil que pour le militaire. Ces projets posent leurs propres défis par rapport au risque d'accident et de prolifération des matières fissiles.

L'utilisation du nucléaire pour la propulsion spatiale est ainsi sérieusement envisagée par plusieurs pays, dont les États-Unis au travers de multiples programmes mis en œuvre par la National Aeronautics and Space Administration (NASA). En partenariat avec la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), l'agence spatiale américaine a ainsi annoncé en juillet 2023 avoir choisi l'industriel Lockheed Martin pour la conception et la fabrication d'un véhicule et d'un moteur de fusée nucléo-thermique. De premiers tests sont attendus en 2027. En France, le CEA a également lancé à l'été 2023 deux études de faisabilité pour le compte de l'Agence spatiale européenne, sur la réalisation d'un moteur de propulsion nucléo-thermique similaire au projet américain. Ces projets partagent une technique similaire : grâce à la chaleur produite par le réacteur nucléaire, le carburant (propergol) est chauffé rapidement à des températures extrêmes, permettant d'obtenir un rapport très avantageux entre énergie et propulsion (plus de 10 000 fois supérieure à la propulsion électrique, et deux à cinq fois supérieure à la propulsion chimique¹³⁴). D'autres projets, s'appuyant sur les percées technologiques en matière de petits réacteurs modulaires, imaginent la fourniture d'électricité nécessaire au fonctionnement d'installations spatiales sur la surface d'autres planètes grâce aux *small modular reactor*¹³⁵. Ces technologies pourraient aussi être appliquées à des satellites militaires, permettant potentiellement d'améliorer leur manœuvrabilité et donc réduire leur vulnérabilité aux attaques antisatellites, un projet déjà exploré dans les années 1970 par l'Union soviétique¹³⁶.

À un stade plus avancé, on peut également mentionner les projets de torpille à propulsion nucléaire, permettant d'augmenter très largement la portée de l'arme, sa vitesse et sa manœuvrabilité, et la rendant donc potentiellement inarrêtable par les systèmes d'interception existants. La Russie développerait actuellement le *Poseidon*, une torpille sous-marine à

134. « Lockheed Martin va concevoir des fusées à propulsion nucléaire », *Revue générale nucléaire*, Société française de l'énergie nucléaire, 28 juillet 2023, disponible sur : www.sfen.org.

135. W. Picot, « Nuclear Technology Set to Propel and Power Future Space Missions, IAEA Panel Says », Agence internationale de l'énergie atomique, 18 février 2022, disponible sur : www.iaea.org.

136. S. Erwin, « Report: Nuclear Propulsion Would Help Military Satellites Maneuver out of Harm's Way », *SpaceNews*, 14 janvier 2022, disponible sur : spacenews.com.

propulsion nucléaire et capable d'emporter une tête nucléaire¹³⁷. Ce projet avait été dévoilé par le président de la Fédération de Russie Vladimir Poutine dans un discours en mars 2018, mais la torpille n'a pour le moment jamais été observée en exercice ou en opération. Le test prévu en novembre 2022 à partir du *Belgorod*, le plus gros SNLE en dotation dans la Marine russe et supposée plateforme de tir du *Poseidon*, aurait ainsi échoué¹³⁸. En revanche, les travaux autour du *Burevestnik*, un missile de croisière subsonique à propulsion nucléaire, semblent plus aboutis, avec un test présenté comme réussi en septembre 2023. Si l'atout de l'endurance et de la manœuvrabilité proposées par cette combinaison est indéniable, sa faible vitesse et l'instabilité potentielle du réacteur en font à ce stade plus un objet de communication stratégique qu'un nouvel armement fonctionnel¹³⁹.

La Chine développerait également un projet de torpille à propulsion nucléaire, mais à des fins principalement conventionnelles, le réacteur permettant surtout d'approcher le missile de la cible avant de se détacher. L'arme serait donc bien moins coûteuse qu'une torpille de type *Poséidon*¹⁴⁰.

Enfin, du côté des bâtiments de surface, l'engouement démontré dans les années 1970 pour la construction de frégates et de destroyers à propulsion nucléaire s'est rapidement émoussé en raison du coût élevé d'entretien, laissant uniquement la place aux porte-avions. À ce jour, seule la Russie dispose encore de bâtiments de surface à propulsion nucléaire hors porte-avions : les croiseurs de la classe *Kirov*, et les brise-glace (classes *Arktika* et *Taymyr*). Tout comme les sous-marins à propulsion nucléaire, la maîtrise technologique pour la construction de porte-avions à PN reste rare et, à ce stade, seuls deux États en disposent : les États-Unis, avec 11 porte-avions propulsés par l'énergie atomique, et la France, avec le *Charles de Gaulle*.

137. H. I. Sutton, « Russia's New 'Poseidon' Super-Weapon: What You Need to Know », *NavalNews*, 3 mars 2022, disponible sur : www.navalnews.com.

138. M. Evans, « Russia's Nuclear-powered Torpedo 'Failed Test on Technical Issues' », *The Times*, 11 novembre 2022, disponible sur : www.thetimes.co.uk.

139. T. Wright, « Russia Claims to Have Tested Nuclear-powered Cruise Missile », International Institute for Strategic Studies, 13 octobre 2023, disponible sur : www.iiss.org.

140. H. Altman, « China's Nuclear Powered Super Long-Range Torpedo Concept Fits Concerning Pattern », *The Warzone*, 21 juillet 2022, disponible sur : www.thedrive.com.

Conclusion

L'histoire de la propulsion nucléaire atteste de l'extrême complexité du développement et de l'exploitation en sûreté, de cette technologie, en particulier appliquée aux sous-marins. Ceci explique qu'elle n'était maîtrisée à la fin de la guerre froide que par quatre États (États-Unis, URSS – au prix de multiples accidents à caractère nucléaire –, Royaume-Uni et France), la Chine n'étant encore qu'au stade des balbutiements. En permettant la création de flottes de SNLE, aptes en permanence à une frappe en second, et en conférant à l'US Navy des capacités opérationnelles lui ayant permis d'acquérir la supériorité navale grâce à ses flottes de SNA et de porte-avions, la propulsion nucléaire a indéniablement joué un rôle clé au cours de la guerre froide. Cette plus-value stratégique explique le blocage des exportations de réacteurs ou d'échanges d'information sur cette technologie de la part des États-Unis vers des pays demandeurs, comme la France, l'Allemagne ou l'Italie. Proche alliée depuis la Seconde Guerre mondiale, et déjà puissance nucléaire possédant, outre l'arme, des infrastructures et surtout les compétences nécessaires pour leur mise en œuvre, le Royaume-Uni constitue l'exception.

Ce premier âge de la PN permet d'isoler quelques conditions nécessaires au développement et à la maîtrise durable de cet outil. Outre une organisation dédiée, permettant de faire travailler efficacement bureaux d'études et industries spécialisées dans les domaines nucléaire ou naval, le point le plus crucial est celui du maintien des compétences. Celles-ci concernent bien sûr l'exploitation, avec le besoin de former et de conserver durablement les équipages. Mais il s'agit aussi des compétences en matière de conception, de construction, de maintenance et de démantèlement, ainsi que celles indispensables pour l'analyse du retour d'expérience et des faits pouvant concerner la sûreté nucléaire.

Le cas britannique, ayant subi une interruption dans ces domaines, les obligeant à un recours à une aide américaine pour la construction des SNA *Astute* et à l'adoption d'une technologie également américaine pour leur réacteur PWR 3, doit inciter un pays comme la France à une très grande vigilance. Ce sera l'un des enjeux des prochaines lois de programmation militaire que de pouvoir assurer la maîtrise durable de cette technologie et le maintien des compétences nécessaires, afin de garantir la crédibilité dans la durée de la dissuasion nucléaire française qui leur est indispensable. Enfin, il convient d'accorder une priorité à la sûreté nucléaire, notamment de la part des organismes et individus, au travers d'instances de contrôle indépendants de ceux de mise en œuvre. Les nombreux accidents enregistrés en URSS, puis en Russie, rappellent que cette priorité peut facilement s'effacer devant d'autres dans les régimes totalitaires, autoritaires ou corrompus.

Le XXI^e siècle présente un paysage de la propulsion nucléaire en pleine évolution. Les cinq États possédant déjà la technologie ont pérennisé des programmes navals nucléaires, la Chine ayant comblé son retard technologique, mais se distinguant malgré tout par une relative lenteur à produire de nouvelles unités, en particulier en comparaison de l'extraordinaire croissance de sa marine dans le domaine des bâtiments, sous-marins et de surface, à propulsion conventionnelle. L'Inde, avec une aide russe, a rallié ce club, le Brésil tentant plus laborieusement encore d'y parvenir.

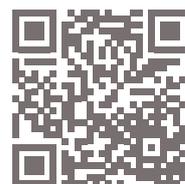
L'accord AUKUS, et son volet sous-marin prévoyant la fourniture de SNA à l'Australie, rompt avec une politique, mise en place par les États-Unis eux-mêmes, dans le domaine des échanges technologiques concernant la propulsion nucléaire militaire. Dans une région marquée par les ambitions politiques, militaires et maritimes chinoises, et où l'acquisition de cette technologie pourrait intéresser à terme d'autres États comme la Corée du Sud ou le Japon, cet accord marque une nouvelle étape dans le partage des technologies. Il s'agit en effet de la première fois que des sous-marins à propulsion nucléaire, quelle que soit la solution retenue, sont fournis à un État ne possédant pas d'infrastructures scientifiques, de recherche ou énergétiques nucléaires et les compétences associées. S'il se prête aisément à la critique de « double-standard » de la part des États-Unis, et créé un précédent potentiellement dangereux vis-à-vis d'États moins recommandables que l'Australie, il ne soulève pas d'inquiétudes sérieuses vis-à-vis du risque de prolifération nucléaire et de respect par Canberra de ses obligations au titre du TNP. En revanche, des engagements fermes sont attendus de la part des trois États parties à l'accord, et en particulier de la part de l'Australie, pour une coopération pleine et entière avec l'AIEA afin de ne pas susciter de nouvelles critiques.

AUKUS soulève cependant des doutes sérieux dans le domaine de la sûreté nucléaire. Celle-ci semble en effet le point le plus sensible dans le cas d'export de la technologie de la propulsion, *a fortiori* vis-à-vis d'un pays ne possédant aucune culture nucléaire. Si la mise en place de procédures d'échanges de retour d'expérience et d'analyse commune des faits impactant la sûreté nucléaire semble être une condition minimale nécessaire à l'export de cette technologie vers un État possédant déjà une forte culture de sûreté nucléaire, des conditions renforcées dans ce domaine s'imposent¹⁴¹. Les pays signataires de l'accord auront de ce point de vue un devoir de transparence vis-à-vis de l'ensemble de la communauté mondiale. Ce dernier point, très sensible, justifie que la France ne remette pas en cause sa politique de non-exportation de cette technologie, malgré la porte ouverte maladroitement par les trois États signataires de l'accord AUKUS.

141. En 1959, l'amiral Rickover avait demandé à pouvoir sélectionner personnellement les officiers britanniques ayant des responsabilités dans la conduite des réacteurs fournis par les États-Unis. Cela lui fut refusé, mais cette demande illustre la sensibilité du contrôle de la compétence des exploitants des réacteurs. Voir E. Grove, *Vanguard to Trident: British Naval Policy since World War II*, op. cit., p. 233.

Les dernières publications des *Proliferation Papers*

- Anya Fink, [« The Wind Rose's Directions: Russia's Strategic Deterrence during the First Year of the War in Ukraine »](#), *Proliferation Papers*, n° 65, Ifri, août 2023.
- Jean-Louis Lozier, [« Arctique : vers la fin de l'exception ? Enjeux stratégiques, nucléaires et maritimes »](#), *Proliferation Papers*, n° 64, Ifri, avril 2022.
- Corentin Brustlein, [« La réduction des risques stratégiques entre puissances nucléaires »](#), *Proliferation Papers*, n° 63, Ifri, janvier 2021.
- Brian Weeden, [« Current and Future Trends in Chinese Counterspace Capabilities »](#), *Proliferation Papers*, n° 62, Ifri, novembre 2020.
- Emmanuelle Maitre, [« The Franco-German Tandem: Bridging the Gap on Nuclear Issues »](#), *Proliferation Papers*, n° 61, Ifri, janvier 2019.
- Corentin Brustlein, [« The Erosion of Strategic Stability and the Future of Arms Control in Europe »](#), *Proliferation Papers*, n° 60, Ifri, novembre 2018.
- Heather Williams, [« Tailored Assurance: Balancing Deterrence and Disarmament in Responding to NATO-Russia Tension »](#), *Proliferation Papers*, n° 59, Ifri, juillet 2018.
- John K. Warden, [« North Korea's Nuclear Posture: an Evolving Challenge for U.S. Deterrence »](#), *Proliferation Papers*, n° 58, Ifri, mars 2017.
- William Alberque, [« The NPT and the Origins of NATO's Nuclear Sharing Agreements »](#), *Proliferation Papers*, n° 57, Ifri, février 2017.
- Ron Tira, [« The Future Middle East Strategic Balance: Conventional and Unconventional Sources of Instability »](#), *Proliferation Papers*, n° 56, Ifri, septembre 2016.
- Linton Brooks and Tom McKane, [« The Challenges of Maintaining Nuclear Cultures: U.S. and UK perspectives »](#), *Proliferation Papers*, n° 55, Ifri, janvier 2016.
- Dimitry Adamsky, [« Cross-Domain Coercion: The Current Russian Art of Strategy »](#), *Proliferation Papers*, n° 54, Ifri, novembre 2015.
- Feroz Hassan Khan, [« Going Tactical: Pakistan's Nuclear Posture and Implications for Stability »](#), *Proliferation Papers*, n° 53, Ifri, septembre 2015.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org