

Sommaire

Introduction	5
<hr/>	
Chapitre I – LE SOUS-MARIN : CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES	7
<hr/>	
1. Spécificité du sous-marin	7
2. Les fondamentaux	9
2.1 La propulsion	10
2.2 La maîtrise de l’immersion en plongée	14
2.3 La discrétion	16
2.4 L’armement	18
3. Concepts d’emploi	20
3.1 Sous-marins côtiers et sous-marins de course	20
3.2 De la lutte anti-surface à la lutte anti-sous-marine	21
3.3 L’action contre la terre	22
<hr/>	
Chapitre II – LES FORMES EXTÉRIEURES DU SOUS-MARIN	25
<hr/>	
1. Évolution des formes	27
1.1 Le sous-marin pur	27
1.2 Le submersible	27
1.3 Le sous-marin nucléaire	29
1.4 La discrétion acoustique	31
2. Les différents types de sous-marins	33
3. Les formes générales	37
3.1 Définition de la forme de base : le fuseau	37
3.2 Optimisation des formes de type Albacore	41
3.3 Le massif	43
3.4 La forme AR	47
3.5 La forme AV	50
<hr/>	
Chapitre III – L’ÉQUILIBRE STATIQUE	55
<hr/>	
1. Équilibre statique du sous-marin	56
1.1 Déplacements en plongée	56
1.2 Équilibre de la pesée en plongée	57
1.3 Déplacement en surface	61
1.4 Équilibre du sous-marin en surface	63

2. Stabilité de l'équilibre statique	64
2.1 Stabilité de l'équilibre en plongée.....	64
2.2 Stabilité de l'équilibre en surface.....	66
2.3 Stabilité lors de la prise et de la sortie de plongée	71

Chapitre IV – LA DYNAMIQUE EN PLONGÉE	75
--	----

1. Axes et paramètres du mouvement du sous-marin en plongée	76
1.1 Axes du mouvement.....	77
1.2 Paramètres du mouvement.....	79
2. Équations du mouvement	81
2.1 Termes d'inertie.....	83
2.2 Efforts statiques	85
2.3 Paramètres adimensionnels.....	86
2.4 Modèle linéaire du mouvement	87
3. Stabilité dynamique du sous-marin en plongée	90
3.1 Stabilité horizontale	91
3.2 Stabilité verticale	93
4. Évolutions du sous-marin en plongée	95
4.1 Changement d'immersion	95
4.2 Girations.....	97
4.3 Couplages.....	100
4.4 Domaine de sécurité immersion-vitesse	103
5. Forces hydrodynamiques sur les barres	107
5.1 Portance d'une aile de faible envergure	107
5.2 Masse d'eau ajoutée.....	110
5.3 Dimensionnement des barres.....	111
6. Modélisation simple de la chasse aux ballasts	111

Chapitre V – DYNAMIQUE SOUS-HOULE	113
--	-----

1. Caractéristiques de la houle	114
1.1 Houle régulière sinusoïdale en profondeur infinie	114
1.2 Houle régulière sinusoïdale en profondeur limitée.....	117
1.3 Houle irrégulière.....	118
1.4 Houle de rencontre.....	121
1.5 Houle non linéaire.....	123
2. Mouvements du sous-marin sous houle	124
2.1 Référentiel et équations du mouvement	124
2.2 Efforts hydrodynamiques du premier ordre.....	125
2.3 Efforts dus aux barres.....	130
2.4 Coefficients de transfert	132
3. Effets non-linéaires de la houle sur le sous-marin	134

Chapitre VI. RÉSISTANCE ET PROPULSION	139
1. Rendement propulsif	140
2. Résistance de carène	140
2.1 Résistance de frottement	143
2.2 Résistance de forme	144
2.3 Résistance des appendices	147
3. Estimation des coefficients de sillage et de succion	150
3.1 Sillage	150
3.2 Succion	153
4. Détermination expérimentale de la résistance, du sillage et de la succion	153
4.1 L'essai de remorquage	154
4.2 L'essai d'autopropulsion	156
5. Détermination des caractéristiques de l'hélice	157
5.1 Estimation rapide des caractéristiques principales	157
5.2 Les essais de l'hélice	159
5.3 Les pompes-hélices	166
Annexe. Hélice : notations et définitions	167
Chapitre VII – BRUIT HYDRODYNAMIQUE	171
1. Généralités sur le bruit hydrodynamique	172
1.1 Puissance acoustique, rendement acoustique, intensité acoustique	172
1.2 Mesure du son	174
1.3 Équation du sonar passif	175
1.4 Spectre de bruit	177
1.5 Propagation du son dans l'eau : équation de Helmholtz	179
1.6 Ondes simples : ondes planes et sphériques	181
1.7 Réflexion, réfraction d'une onde acoustique	183
1.8 Sources acoustiques	188
2. Bruit d'hélice	189
2.1 Fluctuations de poussée hydrodynamique	191
2.2 Bruit de pales	196
2.3 Bruit de cavitation d'hélice	198
2.4 Chant d'hélice	204
3. Bruit d'écoulement	205
3.1 Bruit de couche limite	205
3.2 Bruit de cavité	210
Chapitre VIII – LE BASSIN NUMÉRIQUE	213
1. Les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (Ranse)	214
2. Discrétisation	216
3. Maillages	218
4. Optimisation	220

Sommaire

5. Autres méthodes	223
5.1 La méthode LES.....	223
5.2 La méthode SPH.....	225

Bibliographie	229
----------------------------	-----

Introduction

Contrairement à l'embarcation de surface dont l'origine remonte à la nuit des temps, Noé est souvent considéré comme l'ancêtre biblique des constructeurs navals, le sous-marin est un engin moderne qui a réellement pris son essor il y a un peu plus d'un siècle. Comme l'avion, qui lui est contemporain, le sous-marin s'est donc développé, dès le départ, sur une base scientifique. La maîtrise du mouvement dans un espace fluide à trois dimensions et la production d'énergie en plongée ont conditionné ce développement.

Cet ouvrage présente, dans la perspective de cette courte histoire, l'état de l'art actuel dans la conception des sous-marins modernes, en matière d'hydrodynamique. Il fait suite à « *Hydrodynamique navale : théorie et modèles* », et en constitue un cas d'application complet puisque cette conception fait appel à tous les modèles hydrodynamiques du corps en mouvement. L'objectif de discrétion acoustique se rajoute aujourd'hui comme une contrainte dimensionnante de la conception et nécessite donc de prendre en compte la nature locale de l'écoulement sur la carène, ses appendices et son propulseur, autant que les caractéristiques globales des efforts hydrodynamiques sur la carène.

Bien évidemment, l'hydrodynamique ne constitue pas, à elle seule, la science du sous-marin. Et bien d'autres disciplines et de nombreuses technologies doivent être maîtrisées pour concevoir un tel engin, dont on prétend, à juste titre, qu'il est le plus sophistiqué et le plus complexe imaginé par l'esprit humain. On ne saurait prétendre non plus que les caractéristiques hydrodynamiques du sous-marin peuvent être optimisées, pour autant d'ailleurs que l'on possède les outils théoriques et de conception pour le faire, indépendamment des autres domaines - sécurité-plongée, production et gestion de l'énergie, de l'air, de l'eau, armement, emménagements intérieurs et habitabilité, maintenance, coûts de réalisation et d'exploitation... Néanmoins, la conception d'un sous-marin, qu'elle soit itérative ou tende vers une conception concourante, nécessite un point de départ. Celui-ci repose sur quelques grands équilibres qui imposent très rapidement les principales dimensions de l'engin. Dès lors, la forme générale de carène est quasiment définie.

D'autres aspects hydrodynamiques, plus localisés, seront abordés et résolus au cours du projet : définition détaillée du propulseur, analyse des bruits hydrodynamiques, réglages du pilotage automatique,... Ces différents aspects affecteront la définition de nombreuses autres installations du navire et pourront nécessiter plusieurs itérations avant d'arriver à un compromis global acceptable.

L'analyse, par simulation numérique, mais également sur maquettes, des performances hydrodynamiques, doit être faite tout au long du projet au fur et à mesure que les formes se précisent.

Le calcul numérique de modèles potentiels (méthodes par éléments de surface) a permis de faire des progrès considérables dans les années 90, notamment dans le calcul des propulseurs. Depuis une dizaine d'années, la croissance exponentielle des capacités de calcul a permis le développement de codes de résolution des équations de Navier-Stokes, dits de CFD, capables aujourd'hui de remplacer les essais physiques sur maquettes dans plusieurs domaines. L'identification numérique du modèle de manœuvrabilité en est la prochaine étape. Ces codes de

calcul, par leur précision, associés à des machines à hautes performances (High Performance Computing) permettent de procéder à de l'optimisation automatique sous contraintes grâce à des algorithmes de recherche opérationnelle. Le recours dans les phases critiques de la conception à des essais sur maquettes et sur modèles libres n'en restent pas moins nécessaires.

Le sous-marin en plongée est un espace totalement clos, physiquement et fonctionnellement. Cette caractéristique, que l'on ne retrouve peut-être que dans le vaisseau spatial habité, en fait un système fermé dont l'optimisation globale, et même tout simplement l'équilibre d'ensemble, ne supportent, de fait, que peu de tolérance. Le fluide qui l'entoure constitue son seul appui, pour flotter, se propulser, manœuvrer et le seul médium efficace pour s'informer. Il en est séparé par une double frontière (coque résistante et carène, souvent confondues) dont l'intégrité structurelle et les caractéristiques hydrodynamiques sont garantes de sa survie et de ses performances. Le mariage intime et complexe du sous-marin avec ce fluide mérite donc tout l'intérêt qui lui est porté depuis ses origines.

Chapitre I

LE SOUS-MARIN :

CARACTERISTIQUES GENERALES

1. SPÉCIFICITÉ DU SOUS-MARIN

Un sous-marin, ou un submersible, est un navire qui est capable de naviguer totalement immergé, c'est-à-dire sans qu'aucune de ses parties ne traverse la surface libre, se libérant ainsi de toute force de rappel hydrostatique dans la direction verticale. Il a donc la capacité d'évoluer selon les trois directions de l'espace et la mécanique de ces évolutions s'apparente davantage à la mécanique du vol des avions qu'à la manœuvrabilité des navires de surface. A l'inverse, un engin dont une partie au moins, quelles que soient ses dimensions, doit rester au dessus de la surface pour quelque raison que ce soit, même s'il est parfois qualifié de « semi-submersible », n'est pas un sous-marin.

Il est courant de considérer que la conception des sous-marins relève d'un corps de doctrine spécifique, distinct des règles et pratiques de l'architecture des navires de surface. En effet, pour donner au sous-marin la capacité de naviguer en plongée, il est nécessaire de maîtriser la tenue statique de l'immersion, naturellement instable, comme la mécanique du mouvement du mobile dans les trois directions de l'espace. En revanche, en plongée, le sous-marin s'abstrait de l'influence de la houle, tandis que disparaît la composante de résistance à l'avancement dite « de vagues ». Comme, à déplacement identique, la « *surface mouillée* » d'un sous-marin est supérieure à celle d'un navire de surface, un soin supérieur doit être apporté à la recherche de formes hydrodynamiques, c'est-à-dire minimisant la résistance de frottement de l'eau sur la carène.

Au-delà de l'hydrodynamique qui, comme on le voit, s'appuie pour les deux classes de navires sur deux hiérarchies différentes des phénomènes physiques, les fonctions opératives, dont les finalités sont pourtant identiques dans les deux cas telles que la navigation et les communications ou l'ensemble des fonctions, dites « hôtelières », qui permettent la vie à bord, mettent en œuvre des installations sensiblement différentes, en général plus complexes, ne serait-ce que par leur nécessaire compacité, dans le cas des sous-marins.

Enfin, le mode de propulsion joue pour le sous-marin, un rôle dimensionnant essentiel, beaucoup plus important encore que pour un navire de surface, à tel point que l'on peut considérer que l'invention, il y a un peu plus d'un siècle du sous-marin, son évolution et ses perspectives ne peuvent être disjointes de l'histoire de sa propulsion.

La première caractéristique architecturale du sous-marin est qu'il s'agit d'un espace totalement clos, à la fois géométriquement, physiquement et fonctionnellement. Ceci a pour conséquence que la coque résistante, qui délimite l'espace intérieur du sous-marin, fixe l'enveloppe en volume, mais aussi en masse et en centrage par le biais du principe d'Archimède, de l'ensemble des composants, équipements et installations devant être embarqués. La maîtrise des « *devis de poids* » et « *devis de volumes* » du flotteur est un impératif récurrent qui se manifeste, notamment, par la pesée de tout organe avant embarquement lors de la construction et ne se solde que lors de la vérification finale de la « *plongée statique* » du nouveau sous-marin. Le

maintien de l'équilibre statique du sous-marin, tout au long d'une croisière, nécessite de plus des dispositions très spécifiques que l'on nomme « *opérations de pesée* ». Mobile autonome dans un milieu hostile, le sous-marin ne peut compter que sur lui-même : l'air respirable, les vivres, l'énergie disponible constituent des limites à la plongée qui peuvent s'avérer fatales au combat. Le schnorchel, la régénération d'atmosphère, l'énergie nucléaire, les sources d'énergie anaérobies sont autant de réponses pour repousser ces limites.

Si l'on excepte quelques unités existantes de sous-marins d'exploration à vocation scientifique, successeurs des bathyscaphes, ou touristique, la quasi-totalité des sous-marins construits dans le monde est à but militaire. La deuxième caractéristique principale du sous-marin militaire est que sa raison d'être se fonde sur son indétectabilité. De ce fait, le sous-marin ne peut-être, en aucun cas, un outil de gesticulation diplomatique : il est une arme d'emploi, et doit donc, en permanence, être en situation de combat. Il profite, pour assurer son indétectabilité, de l'opacité de l'eau de mer qui le masque, en plongée, à la détection, qu'elle soit visuelle, radar ou infrarouge. Cependant, l'invisibilité ne suffit pas à garantir l'indétectabilité en plongée et au fil du temps la conception des sous-marins a du prendre en compte de nouveaux moyens de détection. Depuis la première guerre mondiale et l'apparition de l'ASDIC, ancêtre du sonar, l'indétectabilité du sous-marin repose sur sa discrétion acoustique et, dans ce domaine, l'aventure de la détection sous-marine est jalonnée par les progrès concurrents des moyens de détection et des techniques de réduction des bruits. La recherche de la discrétion, face à tous les moyens de localisation et d'identification que la technique du moment permet, est, pour le sous-marin, une nécessité vitale.

Car la troisième caractéristique du sous-marin est sa relative vulnérabilité. Maître des mers tant qu'il est indétecté, le sous-marin devient extrêmement vulnérable dès lors qu'il est localisé, tant face à un navire de surface que face à un aéronef. Faiblement protégé et pouvant difficilement survivre au premier coup reçu, le sous-marin n'a alors de défense que dans la fuite (le *dérobement*). Ceci a conduit certaines écoles, notamment russe et américaine, à chercher à doter les sous-marins de vitesses très élevées, parfois supérieures à 40 nd. La portée et la vitesse des armes anti-sous-marines modernes rendent cet objectif largement illusoire.

Vulnérable face à l'adversaire, le sous-marin l'est également face au milieu hostile. Les risques de rupture sous l'effet de la pression d'immersion de la coque résistante (le flambement) et des circuits d'eau de mer¹ (« *la voie d'eau* »), la corrosion et la fatigue qui fragilisent ces structures, les défaillances des barres et de leur système d'orientation (« *l'avarie de barre* »), les accidents de navigation (« *les fortunes de mer* »), notamment lors du retour en surface, l'explosion de batterie par accumulation d'hydrogène, l'incendie sont autant de dangers particuliers auxquels est confronté le sous-marin. Afin de réduire ces risques, un ensemble de dispositifs et de pratiques opératives s'est développé sous l'appellation de domaine générique de « *sécurité-plongée* ». La sécurité-plongée est une préoccupation permanente du monde des sous-mariniens. Elle couvre à la fois le domaine de la conception, celui des opérations et celui de la maintenance.

S'il peut y avoir de bons et de mauvais navires de surface, l'histoire navale est jalonnée d'exemples des deux catégories, il ne peut y avoir de mauvais sous-marin, car tant la navigation que le maintien de la discrétion en plongée n'autorisent pas de marge d'approximation par rapport à un ensemble de règles fondamentales. Le résultat n'est obtenu que par l'application stricte de principes d'architecture, de règles et de calculs de dimensionnement et de pratiques de fabrication, dénommé « *référentiel technique* ». Seuls quelques pays au monde, les États-Unis, la Russie, quelques pays d'Europe Occidentale, le Japon et la Chine, ceux-là même qui

¹ Canalisations d'eau de mer qui pénètrent la coque résistante afin d'assurer la réfrigération de différents équipements.

maîtrisent aussi les technologies aéronautiques et spatiales, sont en mesure aujourd'hui de mettre en œuvre complètement et avec succès un tel référentiel. L'apparition de la propulsion nucléaire n'a fait que renforcer la spécificité du sous-marin, même si ce mode a pu être étendu, mais de façon beaucoup moindre, à quelques navires de surface. Elle a de plus créé une nouvelle hiérarchie entre les cinq pays (États-Unis, Russie, France, Royaume-Uni, Chine) utilisant cette technologie et les autres nations. L'accession aux sous-marins à propulsion nucléaire est aujourd'hui un objectif stratégique pour les grandes puissances émergentes (Inde, Brésil).

En France comme aux États-Unis ou en Grande-Bretagne, le corps de doctrine s'est bâti, de façon continue, tout au long du XX^{ème} siècle.

2. LES FONDAMENTAUX

L'histoire de la navigation sous-marine est contemporaine de l'aventure aérospatiale. Née avec l'aérostation au XVIII^{ème} siècle, elle a balbutié tout au long du XIX^{ème} siècle pour prendre son essor au tournant du XX^{ème} siècle. Comme l'avion, le sous-marin n'a pu émerger des curiosités techniques pour devenir véritablement un moyen de déplacement robuste et efficace que lorsque les progrès généraux de la technique ont permis de résoudre quelques problèmes fondamentaux. Cependant, contrairement à l'aventure aérospatiale, l'aventure de la pénétration sous-marine n'a pas connu de révolution aussi radicale dans ses concepts que le passage du ballon à l'avion, puis de l'avion au véhicule exo-atmosphérique. Certes, l'énergie nucléaire qui a trouvé dans le sous-marin sa seule application durable au monde des transports et le missile à changement de milieu ont révolutionné les concepts d'emploi du sous-marin et ont influencé en profondeur leur architecture. Cependant, les formes générales, les principes d'équilibre, la vitesse, la profondeur d'immersion n'ont pas changé radicalement de nature ni d'ordre de grandeur depuis un siècle. Même si la cavitation constitue une contrainte importante à l'augmentation des performances hydrodynamiques, elle ne peut être comparée à l'obstacle qu'a représenté pour l'aérodynamique le « mur du son ». Aussi retrouve-t-on à la base de la conception des sous-marins les plus modernes les mêmes questions essentielles que se sont posées les inventeurs des siècles précédents.

Le sous-marin, engin spécifiquement militaire dont chaque type est construit à quelques unités, n'a jamais représenté un marché industriel suffisant pour justifier la recherche et le développement de technologies spécifiques. Ce n'est pas pour le sous-marin qu'ont été inventés le moteur électrique, les accumulateurs, l'énergie nucléaire, ou les piles à combustible. Même les technologies utilisées pour rendre les sous-marins silencieux sont issues d'autres domaines industriels. De fait, la conception du sous-marin est avant tout un exercice d'architecture visant à assembler des technologies éprouvées en un ensemble hautement intégré répondant au mieux à un concept d'emploi.

L'objet n'est pas ici de retracer une histoire exhaustive du sous-marin² mais d'illustrer la grande continuité et la grande similitude des modes de pensées dans les quelques pays où se sont développées depuis près d'un siècle la connaissance et la pratique qui sous-tendent cette grande aventure technologique.

² Il existe de nombreux ouvrages sur le sujet. On pourra se reporter, par exemple, aux ouvrages très complets de Pesce [37], de Jean-Jacques Antier [1], de Norman Friedman [19-20-21], de Compton-Hall [12-13-14], de Norman Polmar [38].

2.1 LA PROPULSION

La recherche du moteur idéal, capable de fonctionner avec la même efficacité, de façon autonome et prolongée, sous l'eau comme en surface constitue une constante de l'évolution du sous-marin depuis son origine. Quatre étapes majeures dans le mode de propulsion ont marqué l'histoire du sous-marin : l'apparition du moteur électrique, le développement du double système propulsif diesel-électrique, l'emploi de l'énergie nucléaire, le développement des modes de propulsion anaérobies non-nucléaires. Ces quatre évolutions ont été la cause de changements remarquables, tant dans l'architecture des sous-marins, que dans leur concept d'emploi.

Partant des expériences de Bushnell puis de Fulton, la capacité de navigation sous-marine a été longtemps limitée par la seule énergie disponible en plongée, l'énergie musculaire appliquée suivant les cas à des propulseurs hélicoïdaux comme sur la *Tortue* de Bushnell, des roues à aubes ou des rames, comme sur l'*Alligator* de Villeroy. A partir de 1860, quelques essais furent tentés de remplacer en plongée la force des bras par un moteur à air comprimé, comme sur le *Plongeur* de Bourgeois et Brun, un moteur à poudre ou à vapeur. Ces essais se sont soldés soit par des résultats décevants, soit tout simplement par des catastrophes. Le sous-marin est véritablement né, à la fin du XIX^{ème} siècle, du développement du moteur électrique et de la batterie d'accumulateurs au plomb, la conjonction de ces deux technologies permettant de fournir une énergie propulsive pendant une durée significative sans consommation d'air. La première application en a été faite par Drzewiecki en 1877. Dupuy de Lôme, inspiré Directeur des Construction navales, reconnaissait que « la question des aérostats et celle des bateaux sous-marins étaient liées... En effet, le point capital [était], dans les deux cas, d'imaginer un moteur puissant et léger, ne changeant pas de poids pendant son fonctionnement³ ».

Dès lors que le sous-marin pouvait se mouvoir en plongée grâce à son énergie électrique, s'est posée naturellement la question de l'autonomie, malheureusement limitée à quelques heures et quelques milles par la capacité de la batterie. Pour y répondre, Laubeuf inventa en 1898 le submersible, engin dual, bâtiment de surface propulsé par un moteur atmosphérique, en surface, et sous-marin mû par un moteur électrique en plongée. En surface, le moteur thermique couplé à une génératrice permet de recharger la batterie et peut être ravitaillé en combustible à la mer. Après quelques tâtonnements, c'est la réduction du temps de prise de plongée, de même que la sécurité de l'équipage qui ont conduit à évoluer rapidement pour le moteur thermique du moteur à vapeur au moteur diesel. L'Aigrette de Laubeuf, lancé en 1904, inaugura ainsi une configuration qui n'a quasiment plus changé jusqu'à aujourd'hui sur les sous-marins dont la propulsion est classiquement appelée « *diesel-électrique* ». L'invention d'un ingénieur hollandais, le « *snorkel* » constitué d'une prise d'air à clapet hissable au dessus de la surface, a permis, à partir de 1943, aux U-boat allemands, puis très rapidement à tous les sous-marins, de recharger les batteries en plongée à faible immersion. Cette opération reste cependant très risquée car, outre les dangers inhérents à la prise d'air juste au dessus de la surface⁴, le sous-marin à l'immersion périscopique est très peu manoeuvrant, ses moyens d'écoute fortement perturbés par le bruit des moteurs et ses capacités de reprise de plongée limitées par l'état de charge partielle de sa batterie. Compte tenu des dangers de navigation présentés par cette situation du sous-marin, il est nécessaire également d'avoir la vision de la situation en surface en hissant un périscope. Cette situation de navigation est donc appelée « *navigation à l'immersion périscopique* ».

³ Cité par Gustave Zédé, communication à l'Académie des Sciences du 5 avril 1886.

⁴ La marche au schnorchel présente de nombreux risques : asphyxie de l'équipage en cas de fermeture prolongée des clapets du schnorchel, entrée d'eau intempestive due à un mal fonctionnement de ces clapets, pouvant entraîner le noyage (et donc leur endommagement) des diesel, soit, de façon encore plus grave, une voie d'eau dans le bord, abordage par un bâtiment de surface, notamment par mauvaise mer. En cas de forte houle et de mauvaise pesée, le sous-marin peut également être « aspiré » de façon incontrôlable vers la surface perdant alors toute discrétion.

La capacité de recharger les batteries à l'immersion périscopique a permis de concevoir des sous-marins pour lesquels la situation en immersion devenait la situation normale, la navigation en surface exceptionnelle et, en principe, limitée aux transits de départ et de retour de patrouille. Les formes extérieures de carène ont pu ainsi être optimisées pour la plongée. Un sous-marin diesel-électrique, quelles que soient ses performances reste néanmoins lié à la surface car il doit revenir périodiquement à l'immersion périscopique. En effet, la charge normale d'une batterie ne permet pas de naviguer en plongée au-delà de quelques heures, pour les premiers sous-marins, de trois à quatre jours à faible vitesse, pour les sous-marins modernes. Or le fonctionnement au moteur diesel à l'immersion périscopique reste, pour le sous-marin, une indiscretion car il est aisément détectable par des moyens d'observation aéroportés et infiniment plus bruyant que sur propulsion électrique. On appelle d'ailleurs « *taux d'indiscrétion* » le rapport du temps passé à l'immersion périscopique sur le temps total de patrouille. Ce taux est, bien entendu fonction de la situation, c'est-à-dire de la consommation électrique du sous-marin en patrouille, ainsi que du temps de charge des batteries. Il augmente notamment fortement avec la vitesse de patrouille en plongée.

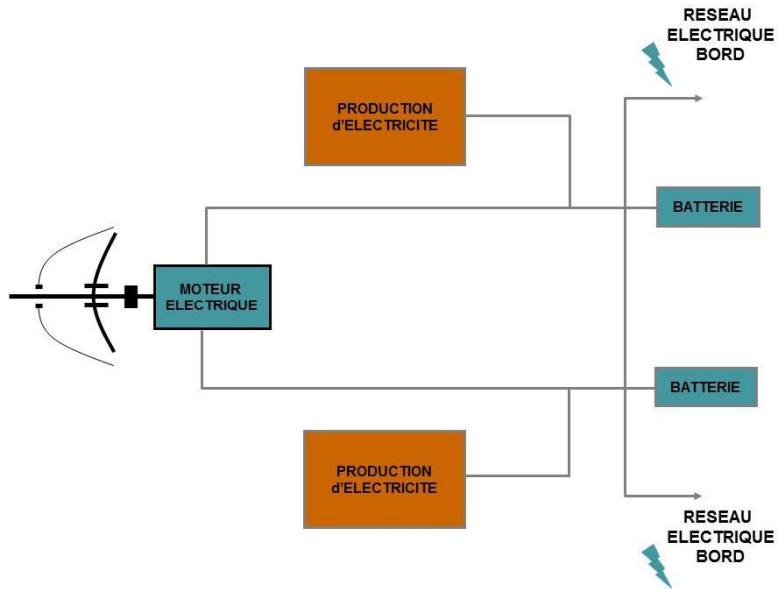


Figure I.1 Schéma d'une propulsion X-électrique de sous-marin

C'est pourquoi, et malgré le succès continu de l'architecture diesel-électrique, on s'est attaché à trouver le moteur capable de propulser, ou tout au moins de recharger les batteries en plongée, c'est-à-dire sans contact avec l'atmosphère.

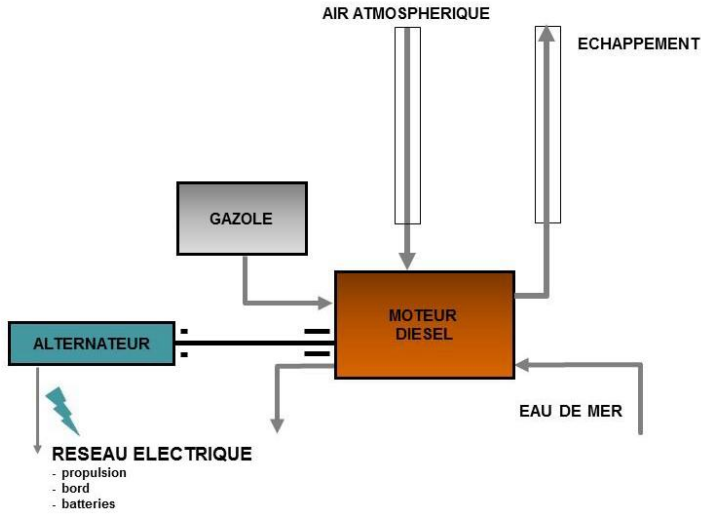


Figure I.2 Production d'énergie diesel-électrique

C'est évidemment l'énergie atomique qui a permis, à partir de 1955, date de l'entrée en service du premier sous-marin à propulsion nucléaire l'USS Nautilus, de réaliser le vieux rêve, exprimé 75 ans plus tôt par Jules Verne, d'une énergie illimitée, constamment disponible, sans combustion et sans rejets.

A la suite des États-Unis, l'Union soviétique, la Grande-Bretagne puis la France se sont progressivement dotées de flottes sous-marines à propulsion nucléaire, combinant des *sous-marins nucléaires lanceurs d'engins* ou SNLE (les SSBN pour *Submarine Balistic Nuclear* anglo-saxons) et des *sous-marins nucléaires d'attaque* ou SNA (SSN pour *Submarine Nuclear* en anglais). États-Unis, Grande-Bretagne et France n'opèrent plus, depuis plusieurs années de sous-marins à propulsion diesel-électrique (parfois dénommée également « propulsion classique » ou « propulsion conventionnelle »). La Russie et la Chine continuent à déployer une flotte mixte de sous-marins à propulsion conventionnelle et de sous-marins nucléaires. Les sous-marins nucléaires, lanceurs d'engin et d'attaque, ont joué un rôle essentiel dans l'affrontement technologique entre l'Est et l'Ouest pendant la Guerre froide. Les SNLE sont rapidement devenus la composante principale de la dissuasion nucléaire, et les SNA l'arme anti-sous-marin par excellence (les « *hunter-killers* » des romans de Tom Clancy), marquant profondément et pendant plusieurs décennies l'architecture et les concepts d'emploi des sous-marins.

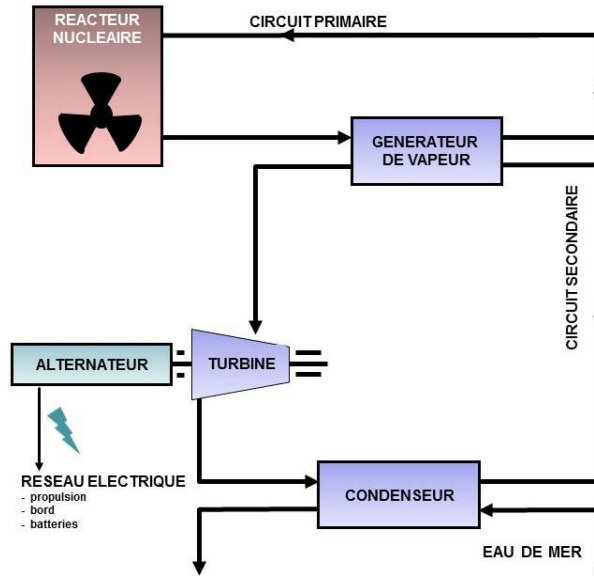


Figure I.3 Production d'énergie turbo-électrique (nucléaire)

Cependant, pour des raisons tant politiques que financières et techniques, la technologie des sous-marins à propulsion nucléaire reste encore réservée à un club très fermé de nations. D'autres manières de produire de l'énergie sans recours à l'atmosphère (les systèmes dits de « propulsion anaérobie » ou AIP pour *Air Independent Propulsion*) ont été examinées ; plusieurs même ont été testées, en général sans suite. Trois techniques ont donné lieu à des développements industriels et sont aujourd'hui appliquées sur des sous-marins en service : le moteur Stirling, moteur alternatif à gaz chaud, le système MESMA⁵, système thermoélectrique à double boucle, et la pile à combustible. Les deux premiers systèmes sont des systèmes à combustion externe (la production d'énergie thermique et la production d'énergie mécanique sont séparées contrairement à un moteur à combustion interne), le troisième système est un système électrochimique d'électrolyse inverse. Dans tous les cas, deux fluides sont embarqués, de l'oxygène généralement stocké sous forme liquide, et un carburant hydrogéné (hydrocarbure pour les systèmes à combustion ou hydrogène pur pour les piles à combustible). Les résultats de la réaction, pour l'essentiel du gaz carbonique et de l'eau, sont rejetés à la mer, éventuellement après avoir subi une recompression pour équilibrer la pression d'immersion. Ces systèmes capables de développer en continu une puissance suffisante pour recharger les batteries d'un sous-marin à propulsion classique augmentent significativement (jusqu'à cinq fois) l'endurance en plongée du sous-marin. Celle-ci reste néanmoins limitée par le volume d'oxygène et de carburant embarqué.

⁵ Pour « Module d'Énergie Sous-Marin Autonome ».

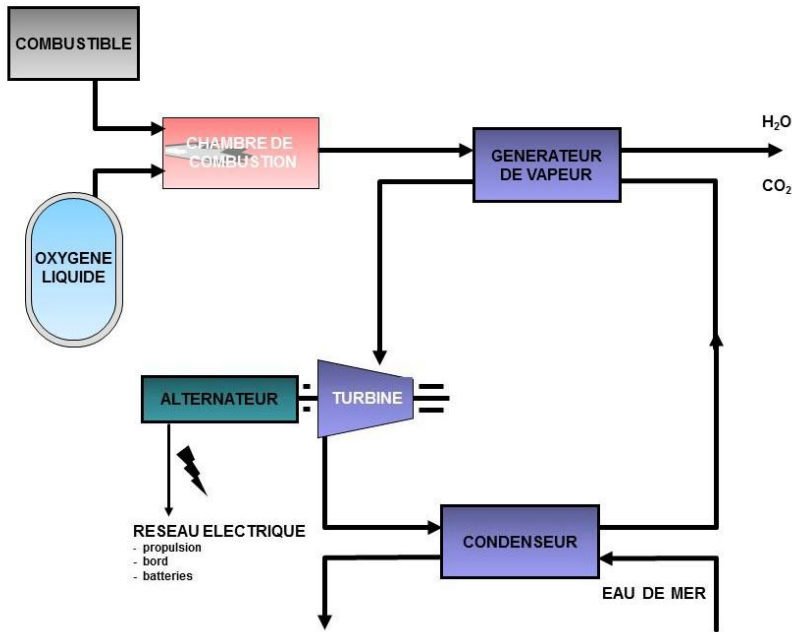


Figure I.4 Système de production d'énergie anaérobie MESMA

2.2 LA MAÎTRISE DE L'IMMERSION EN PLONGÉE

La capacité à maintenir une altitude constante et à manœuvrer de façon contrôlée dans un milieu à trois dimensions a également constitué une des préoccupations permanentes majeures des sous-marins.

Compte tenu de la très faible vitesse de déplacement que la force des bras pouvait leur conférer, le problème du contrôle de l'immersion se réduisait, lors des premières tentatives de navigation sous-marine à la réalisation de l'équilibre statique de l'engin. La question de la prise et de la tenue d'immersion statique a été rapidement résolue, en fait dès les tentatives de Bushnell, par l'introduction de caisses d'eau embarquées permettant, par échange d'eau avec la mer, d'ajuster le poids de l'engin à la poussée d'Archimède qu'il subit. Ce principe a été par la suite développé dans les systèmes de ballasts. Aujourd'hui, encore, le volume et la distribution des ballasts constituent des choix déterminants dans l'architecture du sous-marin et font toujours l'objet de débats entre différentes écoles. Une fois la plongée réalisée et l'engin en immersion totale, le maintien de l'équilibre statique nécessite d'ajuster le lest à toutes les variations de masse de l'engin dues à des consommations diverses et aux variations de masse volumique de l'eau. Cet ajustement doit se faire en valeur et en centrage d'un lest ; ainsi se sont rapidement développés des systèmes de réglage et de compensation par déplacement du lest liquide entre différents réservoirs.

Une fois l'immersion prise et l'équilibre atteint sans vitesse d'avance, les mouvements dans le plan vertical pouvaient être réalisés soit par de petites variations de lest, comme sur un ballon atmosphérique, soit par des propulseurs hélicoïdaux à axe vertical. Beaucoup plus complexe est le problème de la tenue dynamique d'immersion et de la manœuvrabilité en plongée lorsque le sous-marin se déplace. Ce problème n'a pu être résolu que par une approche mathématique. L'aérodynamique, dans le domaine de la modélisation des efforts et de la compréhension de la

mécanique du vol a apporté beaucoup à la maîtrise de la dynamique du sous-marin en plongée.

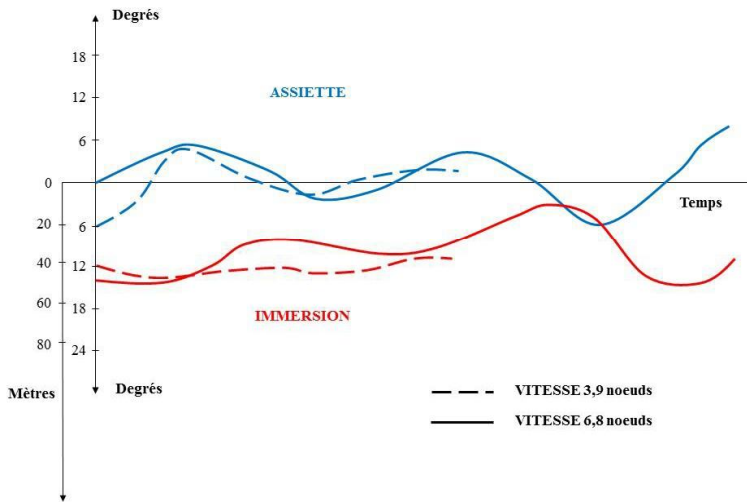


Figure 1.5 Exemple d'instabilité en assiette et immersion: sous-marin La Créole (mis sur cale en 1937). Le sous-marin, stable à 3,9 nd s'avère instable à 6,8 nd

Tant du point de vue de l'efficacité que de la sécurité du sous-marin, la maîtrise de l'immersion est essentielle. Elle constitue, tout au long de l'histoire, un souci majeur des équipages comme des constructeurs. Il fallu pourtant plusieurs décennies pour en comprendre les mécanismes hydrodynamiques complexes, concevoir des systèmes de gouvernes sûrs et efficaces, développer et perfectionner le pilotage automatique.

Une difficulté supplémentaire apparaît lorsque le sous-marin, dont l'équilibre vertical est instable, contrairement au navire de surface, doit naviguer à proximité de la surface. En effet, bien que les efforts dus à la houle diminuent rapidement avec la profondeur, le sous-marin, du fait de l'instabilité naturelle de son équilibre vertical, leur est particulièrement sensible. Le problème de la tenue d'immersion sous houle, critique pour la navigation à l'immersion périscopique, a encore vu son importance et sa difficulté s'accroître avec le lancement vertical des missiles à changement de milieu, balistiques par les sous-marins stratégiques lanceurs d'engins ou tactiques, tels le Tomahawk américain, par les sous-marins d'attaque. En effet, pour éviter des efforts de cisaillement trop importants sur le missile lors de sa sortie du tube, la vitesse du sous-marin lors du lancement doit être limitée. Sous forte houle, la tenue de l'immersion de lancement peut alors nécessiter de mettre en jeu des actionneurs spécifiques.

En navigation « normale » où la discrétion et la conservation des meilleures capacités d'écoute prévalent, les évolutions du sous-marin, en cap comme en immersion, se font de façon progressive, c'est-à-dire avec de faibles inclinaisons de l'axe longitudinal du sous-marin par rapport à la direction instantanée de son vecteur vitesse. De telles évolutions sont parfois qualifiées, en navigation sous-marine comme en aéronautique, d'évolutions « *aux petits angles* ». La modélisation mathématique de ces évolutions repose sur un modèle hydrodynamique simplifié (modèle linéaire). Cependant, dans certaines circonstances de pistage ou de combat où dans le cas de manœuvres d'urgence consécutives à une avarie, le sous-marin peut prendre de fortes inclinaisons (évolutions « *aux grands angles* »). L'écoulement autour de la carène devient très complexe et conduit à des phénomènes, bien connus des sous-mariniens, mais de modélisation mathématique difficile, tels que « *l'alourdissement de l'arrière* », ou la « *remontée en feuille morte* ».

2.3 LA DISCRÉTION

Sur les premiers sous-marins et jusqu'à la première guerre mondiale, on considérait que l'immersion complète suffisait à assurer l'invisibilité et ce faisant l'invulnérabilité. Cependant, très vite, il est apparu que le sous-marin, s'il n'était pas à une immersion suffisante, pouvait être vu par un observateur aérien. C'est pourquoi, la Tortue de Bushnell dans le port de New York pendant la guerre d'Indépendance américaine, comme les « meutes » d'U-boat de la seconde guerre mondiale en Atlantique, attaquaient de nuit pour échapper à tout risque de détection visuelle à faible immersion. Le sous-marin doit donc être conçu avec une profondeur d'immersion de service (ou une profondeur maximale d'immersion ce qui recouvre, pour les sous-marins français, la même notion) suffisante pour le soustraire à toute détection optique à travers la surface, en dehors du temps où le sous-marin est contraint de revenir à l'immersion périscopique. Depuis quelques décennies la menace de détection optique à grande profondeur s'est accrue avec le développement de radars à ouverture synthétique, ou de détecteurs à laser portés par satellites.

Bien évidemment, l'émergence d'un appendice, périscope, antenne, tube d'air, et leur sillage de surface sont autant d'indiscrétions supplémentaires.

Le sous-marin a disparu au cours de la seconde guerre mondiale face à l'adversité représentée par l'utilisation intensive de radars montés sur avions de patrouille maritime. Le sous-marin en surface était devenu une cible de choix, « a sitting duck », pour les forces anti-sous-marines. L'invention du schnorchel permit, à partir de 1943, de concevoir des sous-marins pour la station et la navigation prolongée sous la surface. La conception des formes extérieures, s'en est trouvée révolutionnée.

En surface, la cavitation représente, pour sous-marins comme pour bâtiments de surface, une limitation car pouvant entraîner de rapides dégradations de l'hélice par érosion. En plongée, elle est rapidement devenue la principale cause de détection par les appareils d'écoute passive. Des progrès ont été rapidement réalisés en dégageant les hélices de la carène et en redressant les lignes d'arbres à l'horizontale. Cependant le maintien de deux lignes d'arbres, y compris sur les sous-marins construits après guerre, a limité les gains réalisés.

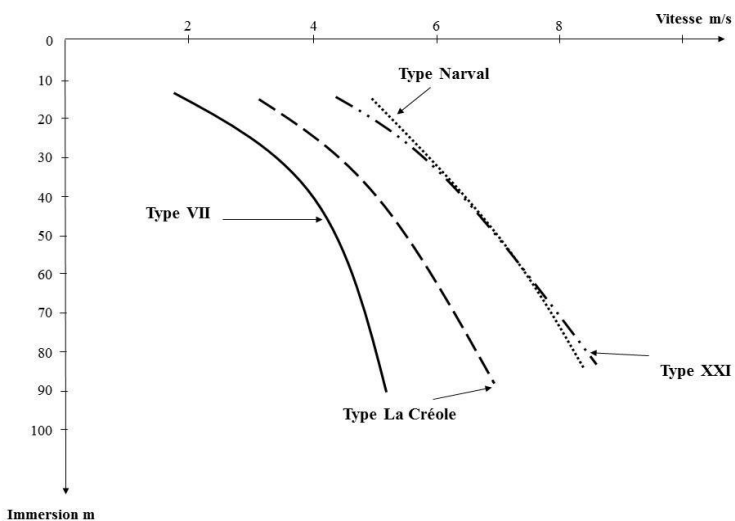


Figure I.6 Courbes de cavitation de sous-marins à deux lignes d'arbres