

L'Empire du Silence

Technologie, Tactique et Géopolitique

du SOUS-MARIN



Sous-marin de la classe Scorpène (Naval-Group – France)

À propos de l'auteur

Ingénieur de formation, spécialiste des systèmes électroniques et informatiques, l'auteur a forgé son expertise au confluent de la simulation de pointe et de la guerre sous-marine. Il débute sa carrière dans l'univers des simulateurs "exotiques", concevant des systèmes de haute précision allant des radars de cartographie du sol aux simulateurs de tir et de conduite de navires, jusqu'aux centres opérationnels de sous-marins.

Intégré au sein d'une équipe d'experts mondiaux en acoustique sous-marine, il entreprend de transformer la détection sonar en un outil de décision global en développant leur prolongement naturel : les systèmes tactiques intégrés.

Architecte de la convergence industrielle, il est l'un des fondateurs de la joint-venture entre la DCN (aujourd'hui Naval Group) et Thomson-CSF (aujourd'hui Thales) : UDS-International. C'est sous sa direction et son impulsion qu'est né SUBTICS (Submarine Tactical Integrated Combat System), un système de combat révolutionnaire qui a redéfini les standards de la lutte sous-marine moderne.

Aujourd'hui, cet héritage technologique et le produit SUBTICS constituent le cœur opérationnel des bâtiments de Naval Group, tandis que Thales, partenaire stratégique et actionnaire, continue de fournir l'excellence des équipements de détection. Ce document est le fruit de cette double culture : celle de l'ingénieur système et celle du stratège industriel.

CV en bref : 1969 Ingénieur INSA ; 1971 Chef de projet – Division Simulateurs de LMT qui deviendra Thalès ; 1981 Maître d'œuvre en système de combat de sous-marins ; 1989 Sous-directeur de La division Acoustique sous-marine de Thalès à Sophia-Antipolis ; 1985 PDG de UDS-I et Directeur sous-marin de Thalès ; 2004 Directeur de la sécurité et de la sûreté maritime de Thalès ; 2009 Retraite.

Préface : L'Empire du Silence – Une Odyssée par-delà l'Invisible

Depuis que l'homme a tourné son regard vers les étoiles, il a souvent oublié que sous la surface d'argent des océans se déploie un univers bien plus vaste, plus hostile et plus technologique que l'orbite terrestre. Ce document n'est pas une simple étude technique ; c'est une plongée au cœur de la machine la plus complexe jamais conçue par l'esprit humain : le sous-marin.

Longtemps resté l'apanage des récits de Jules Verne, le sous-marin est devenu le pivot silencieux de la géopolitique mondiale. Dans un monde où 90 % des communications transitent par des câbles sous-marins et où la menace nucléaire maintient une paix de verre – stable en apparence mais prête à se briser –, le sous-marin est l'arbitre de l'ombre. Mais au-delà de sa fonction guerrière, il est un prodige de physique, de technologies. Imaginez un bâtiment de plusieurs milliers de tonnes, capable de s'équilibrer dans l'eau comme un aérostat dans l'air, naviguant à l'aveugle dans une obscurité totale, guidé par le seul écho des ondes.

À travers ces pages, nous allons lever le voile sur une épopée méconnue. Nous partirons des prémices héroïques et parfois truculentes de la guerre d'Indépendance des États-Unis, où des pionniers s'enfermaient dans des coques de bois munies de tarières, pour aboutir aux géants d'acier nucléaires d'aujourd'hui, véritables cathédrales technologiques capables de produire leur propre air et de rester immergés des mois durant.



Nous explorerons la science fascinante de l'acoustique, où l'on apprend que l'océan n'est pas le "Monde du Silence" de Cousteau, mais un chaos sonore que les "Oreilles d'Or" et l'Intelligence Artificielle doivent décoder. Vous découvrirez comment la température de l'eau peut devenir un bouclier, comment une centrale à inertie remplace le GPS, et pourquoi le duel entre un sous-marin et ses chasseurs — avions, hélicoptères, frégates — est le jeu du chat et de la souris le plus sophistiqué de l'histoire militaire.

Nous n'oublierons pas la dimension humaine : ces équipages qui acceptent de vivre sans soleil, dans une promiscuité absolue, où la moindre erreur de vanne peut transformer un navire en cercueil d'acier. De la tragédie du *Koursk* aux secrets de la machine *Enigma*, ce dossier explore les triomphes et les drames qui ont forgé cette confrérie de l'invisible.

Enfin, nous pénétrerons dans les arcanes de l'industrie mondiale, là où des géants comme Naval Group, Thales ou TKMS (Allemagne) s'affrontent pour dominer le marché des profondeurs.



Logos de nos deux champions nationaux

Que vous soyez passionné d'histoire, mordu de haute technologie ou simple curieux des mystères maritimes, ce voyage vous emmènera là où peu d'hommes ont eu le privilège de se rendre : dans l'abîme, là où le silence est d'or et la discrétion une question de survie.



*Un sous-marin ?! Mais tu hais les espaces confinés /
T'inquiètes, je vais faire ce que je fais toujours quand je me sens claustrophobes /
Respirations profondes ?/ Ouvrir une fenêtre
Dessin de Piers Baker – Ollie et Quentin - 2016*

Table des matières

Partie 1: TOUR D'HORIZON pour lecteur pressé.....	10
COMPARAISONS avec engins plus connus.....	10
L'ENGIN SOUS-MARIN : nature, équilibre et évolution.....	12
LA COQUE ET LA NAVIGATION : architecture et maîtrise de l'immersion.....	13
LES SENSEURS ET LE SONAR : voir et entendre sous la mer.....	14
SYSTÈME TACTIQUE ET ARMES : décider et agir sous la mer.....	15
LES SM DANS LE MONDE : acteurs, enjeux et perspectives.....	16
LA FRANCE : flotte, gouvernance et excellence industrielle.....	17
Partie 2: L'OBJET NAVAL – Genèse, Histoire et Vie à Bord.....	18
Chapitre 1 : Faisons connaissance avec le sous-marin.....	18
1.1 Le concept : un objet en équilibre entre deux eaux.....	18
1.2 Qu'est-ce qu'un sous-marin ? L'anatomie du prédateur.....	19
1.3 Le massif du sous-marin : rôles, fonctions et usages opérationnels.....	20
1.4 L'intérêt stratégique : l'arme de l'invisible.....	22
1.5 La France : une puissance de premier rang.....	22
Chapitre 2 : Genèse et enjeux du sous-marin moderne.....	23
2.1 De l'artisanat à l'arme stratégique.....	24
2.2 Les prémices : l'ingéniosité face à l'impossible.....	24
2.3 Les guerres mondiales : la maturité cruelle.....	33
2.4 Vers une nouvelle dimension : Les piliers de la révolution sous-marine.....	33
2.5 L'épreuve du vide : mécanique et supplice du schnorchel en immersion.....	34
2.6 Le secret d'Enigma : la guerre invisible des codes.....	36
2.7 Du Type XXI aux Laboratoires du Brusc.....	40
2.8 L'ère de l'atome : le silence et l'éternité.....	42
2.9 L'excellence française : un siècle d'innovation sous-marine.....	43
Chapitre 3 : Vivre sous cloche technologique.....	44
3.1 Le défi du milieu : une navette spatiale des abysses.....	45
3.2 L'alchimie de l'air : respirer de l'eau de mer.....	46
3.3 L'eau douce : le luxe du dessalement.....	47
3.4 La vie quotidienne : "le rythme des tiers" et la gastronomie.....	47
3.5 La mixité à bord : une révolution nécessaire.....	48
3.6 L'Humain au cœur du système : les deux équipages.....	48
3.7 La solitude de la "boîte de conserve".....	49
3.8 L'élite humaine : la sélection et la vie en immersion.....	49
3.9 L'exigence de compétence : un équipage d'élite.....	50
Partie 3: LA MÉCANIQUE DES ABYSSES – Physique et Architecture.....	51
Chapitre 1 : La physique de l'immersion – Naviguer dans l'équilibre et le silence.....	51
1.1 L'aérostat des mers : la pesée et l'assiette.....	52
1.2 La physique de l'immersion – Naviguer entre équilibre et pression.....	52
1.3 La stabilité statique : pesée, assiette et gîte.....	53
1.4 Mode de propulsion des sous-marins.....	54
1.5 Un pilotage en trois dimensions.....	55
Chapitre 2 : Sous-marin conventionnel (SSK) – L'art de l'énergie et de la discrétion.....	57
2.1 L'architecture énergétique : le cœur électrique.....	58
2.2 Le Schnorchel : le cordon ombilical et vulnérabilité.....	59
2.3 Le taux d'indiscrétion : le calcul de survie.....	59
2.4 L'équilibre physique : Pesée et Assiette.....	60
2.5 L'AIP (Air Independent Propulsion) : la révolution silencieuse.....	60
2.6 La vie à bord : une promiscuité programmée.....	61

2.7 La position de la France : l'excellence conventionnelle.....	61
Chapitre 3 : Les géants de l'atome – SNA et SNLE.....	61
3.1 La révolution de l'énergie : le réacteur nucléaire.....	62
3.2 Le SNA : le chasseur agile.....	62
3.3 Le SNLE : le sanctuaire de la dissuasion.....	63
3.4 Le Silence : le défi du "trou noir" vs bruits de pompe.....	64
3.5 La vie à bord : un monde de fer et de cycles.....	64
3.6 La France : un savoir-faire unique.....	65
3.7 Tableau comparatif : SSK vs SNA / SNLE.....	66
Chapitre 4 : Le SM à propulsion AIP – L'hybride des profondeurs.....	66
4.1 Le concept : s'affranchir de l'air de surface.....	66
4.2 L'héritage AIP : de la pile à combustible à l'hégémonie du lithium.....	68
Chapitre 5 : La Diversité des abysses – du Midget au drone.....	69
5.1 Les sous-marins de poche ou mini sous-marin ou midgets.....	70
5.2 L'exploration scientifique et les records (bathyscaphes).....	71
5.3 Travaux sous-marins et industrie.....	72
5.4 Le loisir et le tourisme.....	73
Chapitre 6 : Les points critiques de l'architecture navale sous-marine.....	74
6.1 Le centre de gravité et la stabilité du sous-marin.....	75
6.2 Les aides à la conception du sous-marin.....	77
6.3 La coque : l'enveloppe de survie et de pénétration.....	81
6.4 Le massif et les sorties de mâts.....	82
6.5 La propulsion : du mouvement au murmure.....	83
6.6 Silence et discrétion : l'art de l'invisibilité.....	83
6.7 Gouvernes : croix droite (+) vs croix de Saint-André (X).....	84
6.8 Les SAS : les interfaces avec le monde extérieur.....	84
6.9 Autres éléments critiques : la gestion des fluides et des masses.....	85
Chapitre 7 : Le cycle de vie du géant – de l'acier au silence.....	86
7.1 Le défi des abysses : la lutte contre l'érosion et l'usure marine.....	86
7.2 Une existence sous haute surveillance : le MCO.....	88
7.3 Le crépuscule d'un guerrier : le destin final.....	88
7.4 Construction et vie du navire (coque et structure).....	89
Partie 4: LE CERVEAU – Senseurs, Combat et IA.....	91
Chapitre 1 : L'enjeu : sonder l'environnement sans se révéler.....	91
Chapitre 2 : La panoplie des senseurs : une approche multi-spectrale.....	92
2.1 La Suite Sonar : une panoplie sensorielle sur mesure.....	92
2.2 Les senseurs optiques et optroniques.....	96
2.3 Les senseurs électromagnétiques : ESM et Radar.....	99
2.4 Les communications : le lien avec le monde.....	100
Chapitre 3 : Le système tactique : le cerveau du sous-marin.....	101
3.1 La construction de la situation tactique : de l'écho à la cartographie.....	103
3.2 La navigation stratégique : sécurité et "reprise de vue".....	104
3.3 L'engagement militaire : identifier, classifier et frapper.....	106
3.4 L'Interface Homme-Machine (IHM) : l'opérateur au cœur de la tâche.....	107
Chapitre 4 : L'engagement : de la mission à la frappe.....	109
4.1 Les missions du sous-marin : un spectre large.....	109
4.2 Le processus de décision et simulation.....	110
4.3 Le cas des torpilles : le fil d'Ariane sous-marin.....	111
4.4 Le cas des missiles : la surface franchie.....	113
4.5 Évaluation et maîtrise des risques.....	115
Chapitre 5 : Les technologies critiques du système de combat.....	115
5.1 L'architecture à deux étages : de la masse à l'intelligence.....	115
5.2 La formation de voies : redresser la courbe.....	116
5.3 La détection adaptative : "l'optique adaptative" de l'acoustique.....	117

5.4 La discrimination et le phénomène d'éclipse.....	117
5.5 La mesure de distance : télémétrie vs TMA.....	117
5.6 La classification par analyse spectrale (FFT).....	118
5.7 Le calcul des zones de menace : polygones d'indélectabilité.....	119
5.8 Autre technologie critique : la modélisation de propagation (ray tracing).....	119
Chapitre 6 : Système électronique et intelligence embarquée.....	120
6.1 La genèse opérationnelle : du laboratoire à la mer.....	120
6.2 Résilience, sécurité incendie et reconfiguration automatique.....	120
6.3 La prouesse des automatismes de reconfiguration.....	121
6.4 L'Intelligence Artificielle (IA) : L'avenir du combat et de la navigation.....	121
Partie 5: L'INTELLIGENCE ACOUSTIQUE – Le monstre de calcul au cœur du sonar.....	123
Chapitre 1 : La science des ondes et du signal.....	124
1.1 Duel de physiques : ondes électromagnétiques vs ondes acoustiques.....	124
1.2 Puissance de calcul : le balayage vs la formation de voies.....	126
1.3 Tableau des différences de conception.....	126
Chapitre 2 : La grammaire du silence : typologie et caractérisation des bruits.....	127
2.1 Les bruits « intéressants » : la signature de la cible.....	128
2.2 Les bruits « embêtants » : le vacarme de l'océan.....	129
2.3 Les bruits « gênants » : le bruit propre du navire.....	129
2.4 La caractérisation : l'art de la différenciation.....	130
Chapitre 3 : Les paradoxes du son sous la mer.....	131
3.1 La vitesse du son : une variable capricieuse.....	131
3.2 Le phénomène de réfraction continue.....	131
3.3 L'influence de la salinité et des couches thermiques : les "murs" invisibles.....	132
3.4 Fréquence et portée : le dilemme du sonariste.....	133
Chapitre 4 : Science des capteurs acoustiques.....	134
4.1 L'évolution des capteurs : de l'hydrophone à la "peau intelligente".....	134
4.2 L'architecture des antennes : formes et fonctions.....	135
4.3 La révolution du PVDF : vers une peau sensorielle continue.....	137
4.4 Tableau comparatif des technologies de détection (Horizon 2026).....	138
4.5 Synthèse : la fin de l'invisibilité ?.....	138
Partie 6: LA TRAQUE – L'art de la Lutte Sous-Marine (ASM).....	140
Chapitre 1 : Les sentinelles du ciel et de la surface.....	141
1.1 L'Avion de Patrouille Maritime (Patmar) : le prédateur longue distance.....	142
1.2 L'hélicoptère de lutte ASM : le sonar agile.....	143
1.3 Le Bâtiment de Surface : ses moyens acoustiques.....	144
Chapitre 2 : Contrôle et affrontements dans l'espace sous-marin.....	146
2.1 Le Sous-marin contre le Sous-marin : le duel invisible.....	146
2.2 La guerre dans les abysses : satellites, drones et réseaux.....	148
2.3 La protection des points sensibles (anti-intrusion).....	149
Chapitre 3 : L'engagement : du contact à l'assaut.....	149
3.1 Les armes de destruction : le marteau et l'enclume.....	149
3.2 La tactique de l'esquive : le duel de survie.....	150
3.3 Moyens Anti-Intrusion : la protection des points sensibles.....	150
Chapitre 4 : Conclusion de la traque : une question de patience.....	151
Partie 7: LES COULISSES DE LA PUISSANCE – Industrie et Géopolitique.....	152
Chapitre 1 : Les maîtres de l'acier : le paysage industriel mondial.....	152
1.1 Le paysage industriel et les risques.....	152
1.2 Le panorama mondial des constructeurs.....	152
1.3 Focus : ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS) et l'héritage HDW.....	153
1.4 Focus France : l'écosystème Naval Group et Thales.....	154
1.5 Les autres grands systémiers internationaux.....	155
1.6 La taille des SNLE : une comparaison internationale.....	156
Chapitre 2 : La géopolitique des abysses : un nouveau grand jeu.....	158

2.1 Le sous-marin, pivot immuable de la puissance au XXe siècle.....	159
2.2 Le sanctuaire des glaces : l'avantage du sous-marin.....	160
2.3 La guerre des infrastructures : câbles et pipelines.....	160
2.4 Le pivot Indo-Pacifique et le défi chinois.....	161
2.5 Le cadre juridique : la Convention de Montego Bay.....	161
Chapitre 3 : Prix du silence : risques, avaries et catastrophes.....	163
3.1 Incidents.....	163
3.2 Le sauvetage sous-marin (DSRV).....	164
3.3 Le drame de la marine française : la classe Vénus.....	165
3.4 L'hécatombe soviétique et russe.....	165
3.5 Les risques permanents : incendie et voie d'eau.....	167
Chapitre 4 : Le processus de passation d'un contrat majeur.....	169
4.1 La phase de genèse et d'expression du besoin (Années 1 à 3).....	169
4.2 La consultation et la mise en concurrence (années 3 à 5).....	169
4.3 La liste restreinte et l'étude de définition (années 5 à 8).....	169
4.4 Sélection finale et réalisation (années 8 à 20+).....	170
4.5 Le verrou étatique : l'autorisation d'exporter.....	170
4.6 Le "Livret du décideur" : l'art de convaincre en un coup d'œil.....	172
4.7 L'art de la visite de chantier — « l'effet vitrine ».....	173
4.8 Focus : La maîtrise des risques politiques.....	173
4.9 Conclusion : Au-delà de la technique, le facteur humain.....	173
Partie 8: HORIZONS ET DÉFIS – Le futur de la Guerre Sous-Marine.....	175
Chapitre 1 : L'horizon technologique.....	175
1.1 L'aube des drones sous-marins (UUV et XLUUV).....	175
1.2 L'Espace de bataille futur : drones et cybersécurité.....	175
1.3 Le sous-marin "vaisseau-mère" : l'ère des drones et de la robotique.....	176
1.4 Technologies révolutionnaires : capteurs et intelligence artificielle.....	176
1.5 L'Intelligence Artificielle (IA) et le Big Data Acoustique.....	176
Chapitre 2 : L'impact environnemental : le dilemme de la transparence acoustique.....	177
2.1 Le Sonar Actif Basse Fréquence (LFAS) : une arme de choc.....	178
2.2 La pollution des navires de surface vs sous-marins.....	178
2.3 L'exploitation des grands fonds : drones, robots et dommages collatéraux.....	178
2.4 Vers une "éco-conception" de la guerre sous-marine ?.....	178
2.5 La course aux ressources et la souveraineté.....	179
2.6 Synthèse finale : l'ombre et la lumière sous les mers.....	179
Chapitre 3 : L'arctique : le nouveau champ de bataille de la guerre froide 2.0.....	180
3.1 La Russie : le bastion du grand nord.....	180
3.2 L'OTAN et le GIUK Gap : le retour de la surveillance.....	180
3.3 La Chine, puissance "Proche-Arctique".....	181
3.4 Synthèse technologique de l'arctique.....	181
Partie 9: FRANCE & SOUS-MARINS.....	182
Chapitre 1 : Situation de la France.....	182
1.1 Historique.....	182
1.2 L'évolution de la flotte française : la transition technologique.....	184
1.3 Flotte française de sous-marin en 2025.....	184
Chapitre 2 : L'écosystème sous-marin français : entre souveraineté et rayonnement.....	187
2.1 Marine Nationale, DGA et les mécanismes de souveraineté.....	187
2.2 Naval Group : La métamorphose d'un géant, de Colbert à la haute technologie.....	187
2.3 Un territoire au service des profondeurs : les pôles d'excellence.....	189
2.4 Le rayonnement mondial : de la vente de navires au partenariat stratégique.....	191
2.5 Conclusion et perspectives : le défi de la "mer de verre".....	193
Chapitre 3 : La France et l'Australie : un bon début.....	194
3.1 Évolution de la force sous-marine australienne,.....	194
3.2 La Genèse de la Classe Collins et la France.....	195

Partie 10: SOUS-MARINS DANS LE MONDE.....	197
Chapitre 1 : Les États-Unis et les sous-marins : une puissance océanique façonnée par la technologie, l'industrie et la stratégie globale.....	197
1.1 Un siècle d'histoire sous-marine américaine.....	198
1.2 L'industrie sous-marine américaine : un écosystème colossal.....	199
1.3 L'industrie sous-marine américaine et ses velléités d'exportation.....	200
1.4 La flotte actuelle : une force entièrement nucléaire.....	201
1.5 Doctrine opérationnelle : domination océanique et dissuasion globale.....	202
Chapitre 2 : Le Royaume-Uni et les sous-marins : une puissance océanique façonnée par l'innovation et l'industrie.....	203
2.1 Un siècle d'histoire sous-marine.....	203
2.2 L'industrie sous-marine britannique.....	205
2.3 L'écosystème électronique : de Ferranti et Plessey à Thales.....	205
2.4 La doctrine opérationnelle britannique.....	206
2.5 L'avenir : la classe Dreadnought et les SSN(R).....	206
Chapitre 3 : La Chine et les sous-marins : l'ascension silencieuse d'une puissance océanique.....	207
3.1 Historique.....	207
3.2 Une industrie tentaculaire : la puissance des chantiers chinois.....	208
3.3 La flotte actuelle : une force massive en pleine modernisation.....	208
3.4 Doctrine opérationnelle : déni d'accès, dissuasion régionale et projection progressive.....	208
Chapitre 4 : L'Allemagne et les sous-marins: une tradition navale, industrielle et exportatrice.....	209
4.1 Héritage des U-Boote : une culture opérationnelle fondatrice.....	209
4.2 La renaissance sous-marine de la Bundesmarine : une flotte littorale dédiée à l'OTAN.....	210
4.3 L'industrie allemande : un écosystème cohérent et performant.....	210
4.4 L'âge moderne : la montée en puissance de la flotte allemande.....	211
4.5 Les succès à l'exportation : une domination mondiale.....	211
4.6 La flotte sous-marine allemande aujourd'hui et sa doctrine opérationnelle.....	212
Chapitre 5 : Les Pays-Bas et les sous-marins : une tradition discrète mais solide.....	214
5.1 Historique.....	214
5.2 Un écosystème industriel national : RDM et HSA.....	214
5.3 La flotte néerlandaise.....	215
Chapitre 6 : La Suède et les sous-marins : une école d'ingénierie unique au monde.....	215
6.1 Un siècle d'histoire sous-marine.....	216
6.2 Kockums : le cœur industriel suédois.....	216
6.3 La flotte actuelle : Gotland et A26 Blekinge.....	216
Chapitre 7 : La Norvège et les sous-marins : la sentinelle silencieuse de l'Arctique.....	217
Chapitre 8 : L'Espagne et les sous-marins : une ambition contrariée mais persistante.....	218
8.1 Historique.....	218
8.2 Une industrie en quête d'autonomie : Navantia et le pari du S-80.....	218
8.3 La flotte actuelle : une force réduite mais modernisée.....	219
8.4 Doctrine opérationnelle : défense côtière, Méditerranée et OTAN.....	219
Chapitre 9 : L'Italie et les sous-marins : une tradition discrète, une maîtrise solide.....	219
9.1 Une industrie structurée autour de Fincantieri.....	220
9.2 La flotte actuelle : une force compacte mais très moderne.....	220
9.3 Doctrine opérationnelle : Méditerranée, OTAN et contrôle des approches.....	221
Chapitre 10 : La Russie et les sous-marins : une puissance des profondeurs façonnée par l'histoire, la géographie et la stratégie.....	221
10.1 Un siècle d'histoire sous-marine.....	222
10.2 Un écosystème industriel marqué par l'héritage soviétique.....	222
10.3 La flotte actuelle : une force nucléaire et conventionnelle encore redoutable.....	222
10.4 Doctrine opérationnelle : dissuasion, bastions et projection régionale.....	223
Chapitre 11 : L'Inde et les sous-marins : une puissance émergente entre ambition nationale et dépendances technologiques.....	226
11.1 Historique.....	226
11.2 Une industrie en construction : entre ambition nationale et partenariats étrangers.....	227

11.3 La flotte actuelle : une force en transition.....	227
11.4 Doctrine opérationnelle : contrôle de l'océan Indien, dissuasion et rivalité avec la Chine.....	228
Chapitre 12 : Le Japon et les sous-marins : la maîtrise silencieuse du Pacifique.....	228
12.1 Historique.....	228
12.2 Une industrie d'excellence : Mitsubishi, Kawasaki et la culture de l'amélioration continue.....	229
12.3 La flotte actuelle : une force compacte, moderne et redoutablement silencieuse.....	229
12.4 Doctrine opérationnelle : défense des approches, surveillance de la Chine et contrôle des détroits.....	230
Chapitre 13 : La Corée du Sud et les sous-marins : une puissance technologique en ascension.....	230
13.1 Historique.....	230
13.2 Une industrie en plein essor : Hyundai, DSME et l'ambition d'exporter.....	231
13.3 La flotte actuelle : une force moderne et en expansion.....	231
13.4 Doctrine opérationnelle : dissuasion régionale et contrôle des détroits.....	231
Chapitre 14 : La Turquie et les sous-marins : une puissance émergente entre Méditerranée et ambitions globales.....	232
Chapitre 15 : Israël et les sous-marins : la dissuasion silencieuse de la Méditerranée.....	233
Chapitre 16 : Le Brésil et les sous-marins : l'ambition océanique de l'Amérique du Sud.....	234
Chapitre 17 : L'Australie et les sous-marins : une transition stratégique vers l'ère nucléaire.....	235
Chapitre 18 : Panorama des autres puissances sous-marines en 2026.....	236
Chapitre 19 : Quantité de sous-marin en service en 2026.....	237
Chapitre 20 : Principales commandes de sous-marins.....	238
Partie 11: SYNTHÈSE ET ENJEUX DU XXIÈME SIÈCLE.....	239
1.1 Bilan sur le sous-marin.....	239
1.2 Défis technologiques et Axes de recherche.....	240
1.3 Problèmes tactiques et stratégiques.....	241
1.4 Aspect géopolitique : Le basculement vers l'Indopacifique.....	241
1.5 Habitat sous l'eau : les perspectives.....	242
1.6 Synthèse finale — Le silence comme destin.....	244
Partie 12: RÉFÉRENCES SUR LES SOUS-MARINS.....	245
1.1 Le mémo du sous-marin – Glossaire et lexique.....	245
1.2 Films sur les sous-marins.....	251
1.3 Livres sur les sous-marins.....	252
1.4 Sites sur les sous-marins.....	253
1.5 Au revoir et merci.....	255





Partie 1: **TOUR D'HORIZON pour lecteur pressé**

COMPARAISONS avec engins plus connus

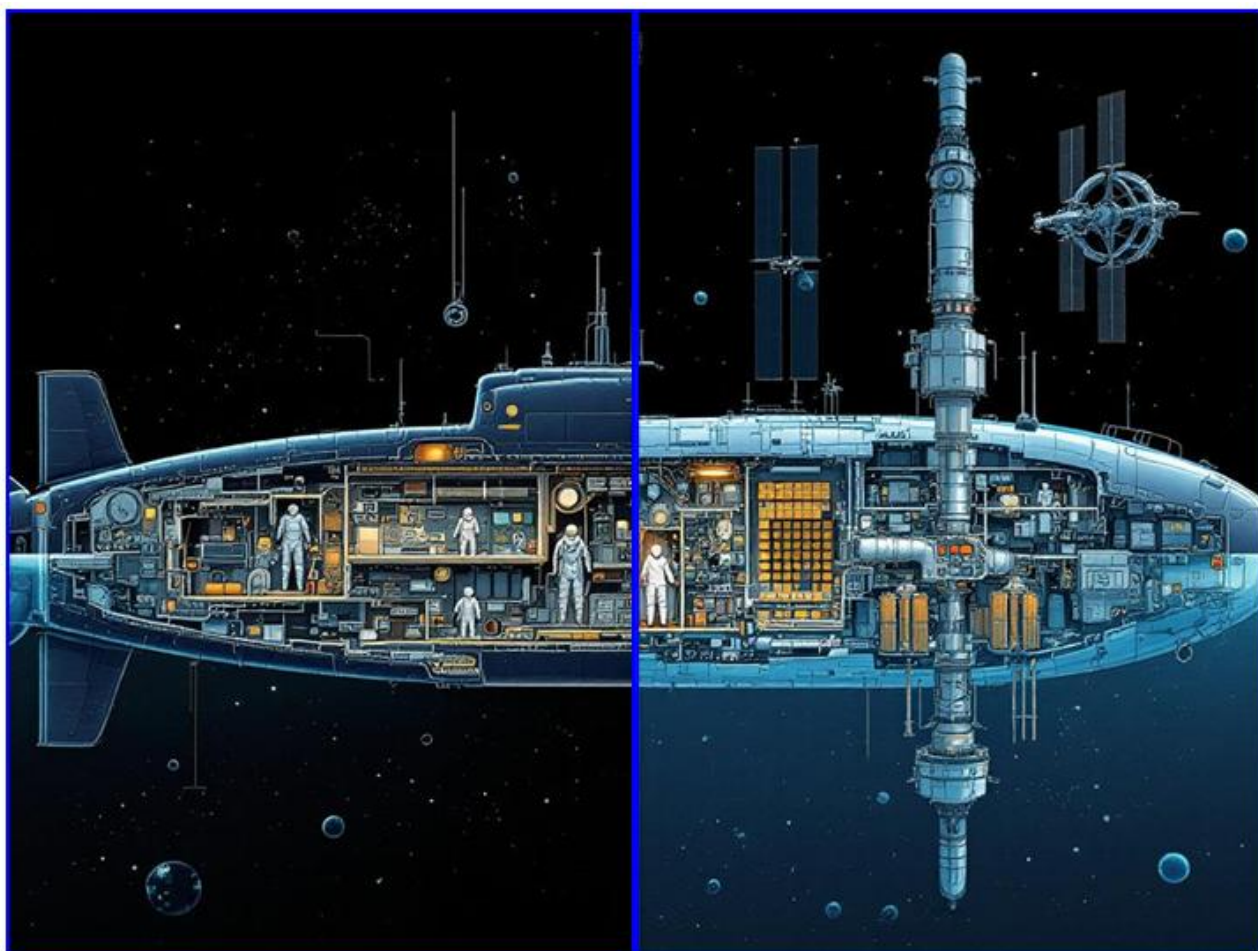
Sous-marin et aérostat : deux engins en équilibre.

- L'aérostat est en équilibre dans l'air tandis que le sous-marin est en équilibre dans l'eau : le sous-marin n'est pas comparable à un avion. Comme le ballon, il est soumis à une pesée permanente,
- Dans un ballon, on peut voir loin et entendre. Dans un sous-marin, seule l'écoute est possible
- Alors que les radars permettent de "voir" à distance dans l'air, cette méthode est inefficace sous l'eau, où le sonar devient l'outil indispensable pour connaître son environnement.



Station spatiale et sous-marin : deux environnements à recréer.

- Tous deux doivent recréer un environnement vital : pression, air, eau, électricité.
- Mais là où la station évolue dans le vide spatial, le sous-marin affronte un milieu hostile : pression écrasante, corrosion permanente.
- Tandis que la station suit une orbite prédéfinie, le sous-marin doit constamment manœuvrer, s'adapter, se cacher.
- Deux prouesses technologiques — mais des défis encore plus exigeants pour le sous-marin.



L'ENGIN SOUS-MARIN : nature, équilibre et évolution

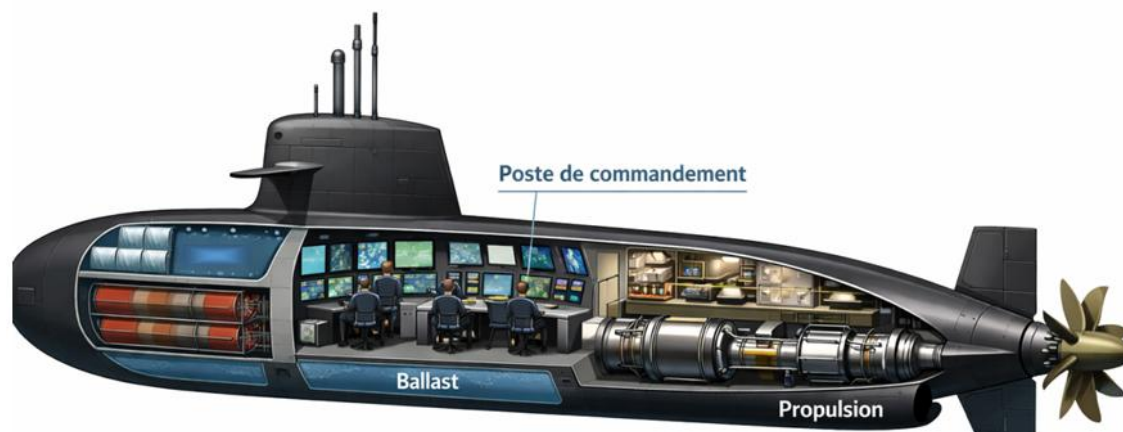
Machine discrète et redoutable, le sous-marin est à la fois navire, capteur et système d'armes. Comprendre son équilibre, sa navigation et son évolution technologique, c'est entrer dans un monde où la physique, l'ingénierie et la stratégie se rencontrent sous la surface des océans.

Un sous-marin est un bâtiment naval conçu pour évoluer durablement sous la surface de la mer tout en restant capable de naviguer en surface. Sa caractéristique première est la maîtrise de l'équilibre dans l'eau, obtenu par la gestion fine de sa masse et de sa flottabilité. À l'aide de ballasts remplis d'eau ou d'air, le sous-marin ajuste sa densité pour plonger, évoluer en immersion ou refaire surface. Cet équilibre dynamique est au cœur de sa manœuvrabilité et de sa discrétion.

La coque constitue l'élément structurant de l'engin. Généralement cylindrique, parfois à double coque, elle est conçue pour résister à des pressions considérables tout en minimisant la signature acoustique. La navigation s'effectue dans un environnement sans repères visuels, ce qui impose le recours à des systèmes de navigation inertielle – gyroscopes – extrêmement précis, complétés par des mises à jour satellitaires en surface ou à faible immersion.

Au-delà de la plateforme navale, le sous-marin est un véritable système de défense intégré. Il embarque des senseurs, des moyens de communication, un système tactique et des armes placés sous l'autorité du commandant. Ce dernier dispose d'une vision synthétique de la situation tactique et prend des décisions engageant la mission, la sécurité de l'équipage et parfois des enjeux stratégiques majeurs.

Synthèse d'ingénierie et de stratégie, le sous-marin est bien plus qu'un navire plongeant. Sa capacité à se dissimuler, observer et frapper en fait un acteur clé des équilibres navals modernes.



Coupe schématique d'un sous-marin moderne illustrant l'intégration des systèmes de bord.

LA COQUE ET LA NAVIGATION : architecture et maîtrise de l'immersion

Sous la mer, la survie et la performance du sous-marin reposent sur sa coque et sa capacité à se situer avec précision. Architecture, ballasts et navigation inertielle forment un ensemble indissociable permettant d'évoluer en toute sécurité dans un environnement contraint et invisible.

La coque du sous-marin est conçue pour répondre à des contraintes extrêmes. Elle doit résister à la pression hydrostatique croissante avec la profondeur, tout en restant suffisamment légère et silencieuse. La forme cylindrique s'impose naturellement, car elle répartit les efforts de manière homogène. De nombreux sous-marins modernes adoptent une architecture à double coque : une coque épaisse résistante à la pression, entourée d'une coque légère hydrodynamique qui abrite ballasts et équipements externes.

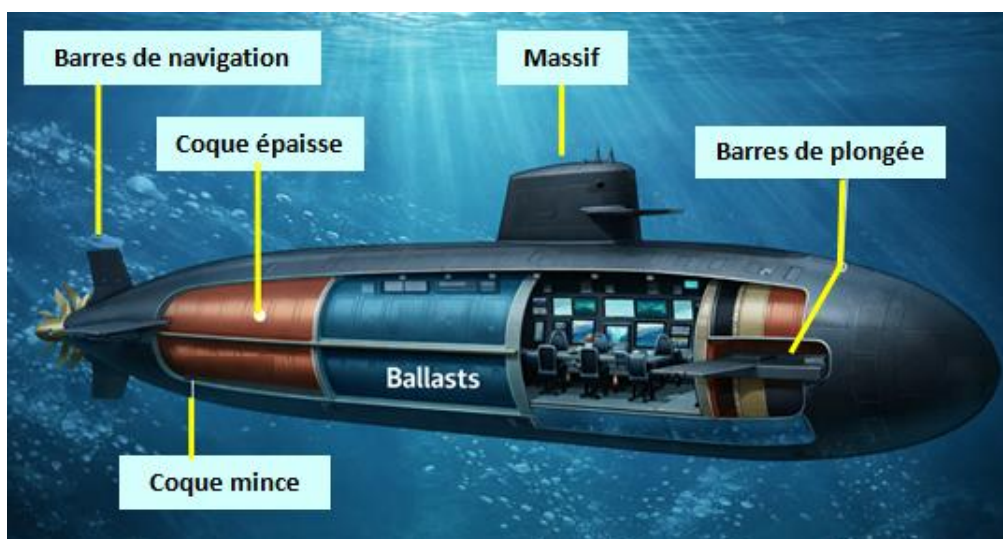
La profondeur maximale d'immersion est déterminée par la résistance mécanique de la coque épaisse, réalisée en aciers spéciaux ou alliages à haute limite élastique. Chaque plongée impose une vigilance constante sur l'intégrité structurelle, car la marge de sécurité diminue avec l'usure et le temps.

La navigation sous-marine repose sur la maîtrise de la pesée et de l'assiette. Les ballasts principaux permettent de plonger ou de faire surface en ajustant la flottabilité globale, tandis que des ballasts de réglage fin assurent l'équilibre longitudinal et transversal. Les barres de plongée, situées à l'avant et à l'arrière, contrôlent la profondeur et l'angle d'évolution.

Privé de signaux satellitaires en immersion, le sous-marin s'appuie sur une centrale de navigation inertielle. Ce système calcule en permanence la position, la vitesse et l'orientation à partir de capteurs gyroscopiques et d'accéléromètres. Bien que très précis, il dérive lentement avec le temps, nécessitant des recalages périodiques par des mesures externes lors de phases proches de la surface.

Historiquement, les premiers sous-marins opérationnels apparaissent à la fin du XIX^e siècle. Les avancées majeures incluent la propulsion diesel-électrique, puis nucléaire, l'essor du sonar, l'automatisation et la réduction drastique des signatures acoustiques. Aujourd'hui, le sous-marin est un outil central de la dissuasion et du renseignement naval.

Architecture de la coque et systèmes de navigation conditionnent directement la sécurité, la discrétion et l'endurance du sous-marin. Leur maîtrise permet d'exploiter pleinement la troisième dimension offerte par le milieu sous-marin.



Vue simplifiée de la coque et des ballasts illustrant la gestion de la flottabilité et du contrôle de la profondeur.

LES SENSEURS ET LE SONAR : voir et entendre sous la mer

Dans un environnement opaque et silencieux en apparence, l'information est une question d'écoute. Les senseurs, et en particulier le sonar, permettent au sous-marin de percevoir son environnement, de détecter des menaces lointaines et d'exploiter les propriétés acoustiques de l'océan pour rester dissimulé.

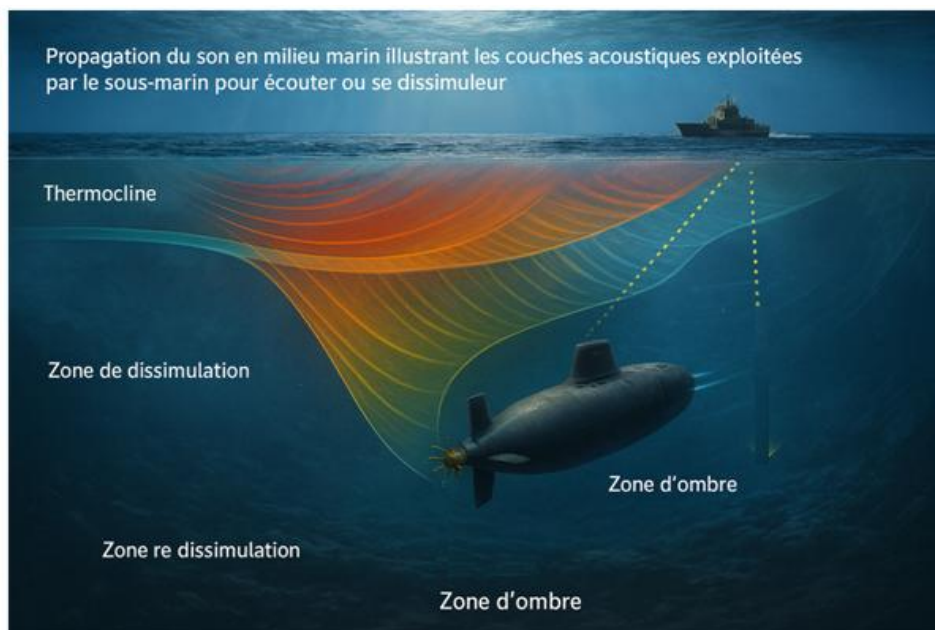
Privé de vision directe et d'ondes électromagnétiques efficaces, le sous-marin dépend presque exclusivement de l'acoustique pour appréhender son environnement. Les senseurs embarqués comprennent des capteurs de pression, de température, de salinité, mais surtout des systèmes sonar, véritables « yeux et oreilles » du bâtiment.

Le sonar se décline en deux grandes familles. Le sonar passif consiste à écouter les bruits rayonnés par les autres navires ou sous-marins : propulsion, écoulements hydrodynamiques, équipements internes. Cette écoute, totalement discrète, permet d'identifier, classifier et suivre des contacts à grande distance. Le sonar actif, quant à lui, émet une onde acoustique et analyse l'écho réfléchi par les objets immergés. Plus précis mais révélateur de la position, il est utilisé avec parcimonie.

Les sous-marins modernes disposent de sonars de coque (avant), de flanc (côtés), remorqués (arrière) et parfois immergés à grande profondeur. Le sonar remorqué, éloigné du bruit propre du bâtiment (hélice), offre des performances exceptionnelles en écoute lointaine. L'ensemble de ces capteurs alimente une image tactique cohérente, fusionnée par les systèmes de traitement du bord.

La propagation du son en mer dépend fortement des conditions océanographiques. Température, pression et salinité influencent la vitesse du son et créent des couches, des canaux ou des zones d'ombre acoustiques. Le sous-marin exploite ces phénomènes pour se dissimuler, se placer sous une couche favorable ou, au contraire, capter des émissions très éloignées grâce à des canaux de propagation.

La supériorité acoustique conditionne l'efficacité opérationnelle du sous-marin. Savoir écouter sans être entendu, et exploiter la physique de l'océan, demeure un art aussi stratégique que technologique.



Une idée de la propagation des sons dans l'eau

SYSTÈME TACTIQUE ET ARMES : décider et agir sous la mer

Au cœur du sous-marin, le système tactique transforme les données brutes en décisions opérationnelles. Fusion de l'information, analyse de la menace et emploi des armes permettent au commandant de conduire la mission avec discrétion, précision et maîtrise du tempo.

Le système tactique constitue le cerveau opérationnel du sous-marin. Il centralise l'ensemble des informations issues des senseurs, des moyens de navigation et des communications afin de produire une représentation cohérente et exploitable de l'environnement. Cette fusion de données permet d'identifier les contacts, d'évaluer leur nature, leur comportement et leur niveau de menace.

La cartographie de l'environnement sous-marin est dynamique. Elle intègre non seulement les fonds marins, les routes de navigation et les obstacles connus, mais aussi les incertitudes liées à l'acoustique et aux mouvements adverses. Les algorithmes d'aide à la décision assistent les opérateurs dans le suivi des pistes, l'anticipation des trajectoires et l'évaluation des intentions possibles.

Les armes embarquées sont variées et adaptées aux missions. Les torpilles lourdes constituent l'arme principale contre les bâtiments de surface et les sous-marins adverses. Les missiles, tirés depuis des tubes ou des silos verticaux, permettent des frappes à longue distance, parfois contre des objectifs terrestres. Des mines ou des drones sous-marins peuvent compléter l'arsenal selon les besoins opérationnels.

L'emploi des armes est indissociable de la discrétion. Chaque action doit être évaluée en termes de risque acoustique, de révélation de position et d'escalade. Le commandant, assisté de son équipe, arbitre en permanence entre renseignement, dissimulation et action. Il est le seul à disposer d'une vision globale lui permettant de décider du moment opportun pour agir ou se retirer.

La puissance du sous-marin ne réside pas uniquement dans ses armes, mais dans sa capacité à transformer l'information en décision. Le système tactique et le commandement en sont les clés.



Central opérations illustrant la fusion des données tactiques et le rôle central du commandant dans la décision.

LES SM DANS LE MONDE : acteurs, enjeux et perspectives

Pilier de la dissuasion et de la supériorité navale, le sous-marin structure les rapports de force maritimes mondiaux. Grandes flottes, industriels clés et programmes emblématiques illustrent les enjeux stratégiques et technologiques actuels.

Les sous-marins occupent une place stratégique majeure au sein des marines contemporaines. Cinq États disposent aujourd'hui de capacités sous-marines complètes, incluant propulsion nucléaire, armement stratégique et autonomie industrielle : **États-Unis, Russie, Chine, France et Royaume-Uni**. Les États-Unis exploitent la flotte la plus importante et la plus diversifiée, avec les SNLE de classe *Ohio* puis *Columbia* et les SNA de classe *Virginia*. La Russie s'appuie sur les classes *Borei* et *Yasen*, tandis que la Chine développe rapidement ses capacités avec les classes *Jin* et *Shang*, affirmant sa présence en Indo-Pacifique. La France et le Royaume-Uni, quant à eux, maintiennent une dissuasion océanique crédible reposant respectivement sur les SNLE *Triomphant* et *Vanguard*, bientôt remplacés par de nouvelles générations.

En parallèle, de nombreux pays investissent dans des sous-marins conventionnels pour renforcer leur contrôle maritime régional. L'Allemagne, la Suède, l'Italie, la Corée du Sud, le Japon ou encore l'Australie (dans le cadre du partenariat AUKUS) illustrent cette dynamique. Ces flottes privilégient la discrétion acoustique, l'endurance et la polyvalence, souvent avec des systèmes de propulsion anaérobie (AIP).

L'industrie du sous-marin repose sur un nombre limité d'acteurs majeurs : **Naval Group et Thalès** (France), **Electric Boat / Huntington Ingalls** (États-Unis), **BAE Systems** (Royaume-Uni), **Rubin et Malakhit** (Russie), **CSSC** (Chine), **TKMS** (Allemagne) ou **Saab Kockums** (Suède).

Sur le plan géopolitique, la capacité du sous-marin à rester indétectable en fait un outil central de dissuasion et de renseignement, notamment dans les zones sensibles comme l'Atlantique Nord, la mer de Chine méridionale ou l'Arctique. Le sous-marin du futur intégrera davantage d'automatisation, de drones sous-marins et de capacités de combat collaboratif, renforçant encore son rôle structurant dans les équilibres stratégiques.

Le parc mondial : environ 500 sous-marins

dont près de **140 à propulsion nucléaire** et **360 conventionnels**.

Principales flottes nucléaires

États-Unis : ~70 sous-marins (SNLE *Ohio*, SNA *Virginia* et *Los Angeles*).

Russie : ~60 sous-marins (SNLE *Borei*, SNA *Yasen*, unités héritées soviétiques).

Chine : ~55–60 sous-marins ; part croissante de bâtiments nucléaires.

France : **10 sous-marins nucléaires** (4 SNLE *Le Triomphant*, 6 SNA *Suffren*).

Royaume-Uni : 10 sous-marins nucléaires (SNLE *Vanguard*, SNA *Astute*).

Flottes conventionnelles majeures

Asie-Pacifique : Japon, Corée du Sud, Inde et Australie concentrent des flottes modernes orientées vers la dissuasion régionale et la maîtrise des détroits.

Europe : Allemagne, Italie, Espagne, Suède et Norvège disposent de sous-marins conventionnels avancés, souvent exportés.

Moyen-Orient et Méditerranée : Turquie, Israël et Égypte investissent fortement.

Zones de concentration stratégique

Atlantique Nord, mer de Chine méridionale, Indopacifique, Méditerranée orientale et Arctique constituent aujourd'hui les principaux espaces de déploiement et de compétition sous-marine.

LA FRANCE : flotte, gouvernance et excellence industrielle

La France fait partie des rares nations disposant d'une capacité sous-marine complète et souveraine. Sa flotte nucléaire, son organisation décisionnelle claire et son industrie de défense performante constituent un ensemble cohérent au service de la stratégie nationale et de son rayonnement international.

1) **La flotte sous-marine française actuelle** : La Marine nationale exploite deux catégories de sous-marins nucléaires complémentaires. Les **SNLE** (Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins) assurent la permanence à la mer de la dissuasion nucléaire française. Leur conception privilégie avant tout la discrétion, l'endurance et la fiabilité. Les **SNA** (Sous-marins Nucléaires d'Attaque) ont pour missions principales la protection de la dissuasion, le renseignement, la maîtrise des espaces maritimes, la lutte anti-sous-marine et l'appui aux forces navales.

2) **Le schéma décisionnel français** : la politique sous-marine française repose sur une chaîne décisionnelle structurée et centralisée. Le pouvoir politique, incarné par le Président de la République et le ministre des Armées, fixe les orientations stratégiques. La Marine nationale exprime les besoins opérationnels et définit les doctrines d'emploi. La DGA assure la conduite des programmes, la maîtrise technique, financière et calendaire. L'industrie, avec Naval Group et Thales, conçoit, réalise et soutient les plateformes et les systèmes. Cette organisation garantit cohérence, souveraineté et continuité des compétences.

3) **Naval Group et Thales : succès à l'exportation** : Naval Group et Thales figurent parmi les leaders mondiaux du domaine sous-marin. Leur capacité à proposer des solutions complètes — plateformes, systèmes de combat, sonars, soutien — a conduit à de nombreux succès à l'export, en Europe, en Asie et en Amérique latine. Ces réalisations renforcent l'influence stratégique et industrielle de la France.

Grâce à une flotte crédible, une gouvernance maîtrisée et une industrie d'excellence, la France dispose d'une autonomie stratégique rare dans le domaine sous-marin, lui conférant un rôle majeur sur la scène navale internationale.

Sous-marins	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Le Triomphant	SNLE				1997-2040						
Le Téméraire	Propulsion nucléaire				1999-2042						
Le Vigilant	& Armes nucléaires				2004-2045						
Le Terrible					2010-2045						
Rubis					1983-2008						
Saphir					1984-2019						
Casabianca					1987-2023						
Émeraude					1988-2024						
Améthyste	SNA				1992-2021						
Perle	Propulsion nucléaire				1993-2023						
Suffren	& Armes conventionnelles				2020-2060						
Duguay-Trouin					2023-2063						
Tourville					2023-2063						
De Grasse					2026-2066						
Rubis (NG)					2028-2068						
Casabianca					2030-2070						

Les dix sous-marins en service en 2025 dans la Marine Nationale (dates en rouge)



Partie 2: L'OBJET NAVAL – Genèse, Histoire et Vie à Bord

Pour celui qui veut comprendre ce qu'est un sous-marin, son histoire en passant par Enigma et le quotidien des équipages.



Une idée de l'évolution du sous-marin à travers les âges

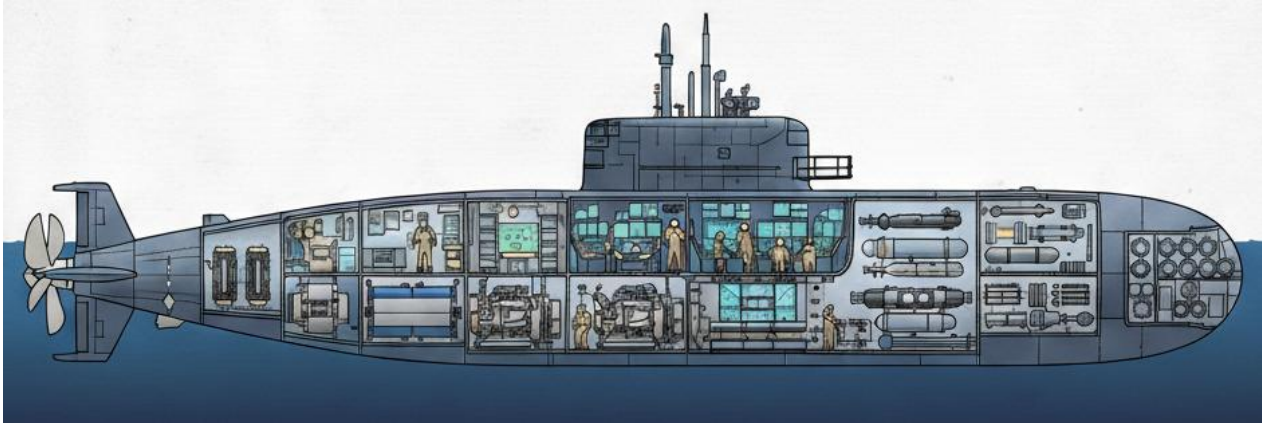
Le sous-marin est né de l'obsession millénaire de l'homme pour l'invisible. Cette deuxième partie retrace l'évolution technologique d'un objet passé du stade d'artisanat audacieux à celui d'arme stratégique absolue. Nous explorerons comment l'ingéniosité humaine a dû s'adapter à une physique impitoyable pour transformer un milieu hostile en un sanctuaire de souveraineté. De la cloche de bois aux géants d'acier de l'ère atomique, l'histoire sous-marine est avant tout celle d'une épopée de fer et de secret.

Chapitre 1 : Faisons connaissance avec le sous-marin

1.1 Le concept : un objet en équilibre entre deux eaux

Le sous-marin est un défi permanent aux lois de la physique. Contrairement au navire de surface qui flotte par nature, le sous-marin est conçu pour atteindre un état d'équilibre délicat : la pesée nulle.

Un sous-marin évolue grâce au contrôle de sa flottabilité. Pour plonger, il remplit ses ballasts (réservoirs) d'eau de mer (alourdissement). Pour remonter, il « chasse » cette eau à l'aide d'air comprimé. Une fois en immersion, il devient un corps dont le poids est égal à la poussée d'Archimède, lui permettant de "voler / flotter" dans l'eau. Il ajuste ensuite son assiette et sa profondeur fine via des barres de plongée (gouvernails horizontaux) et des caisses de réglage.

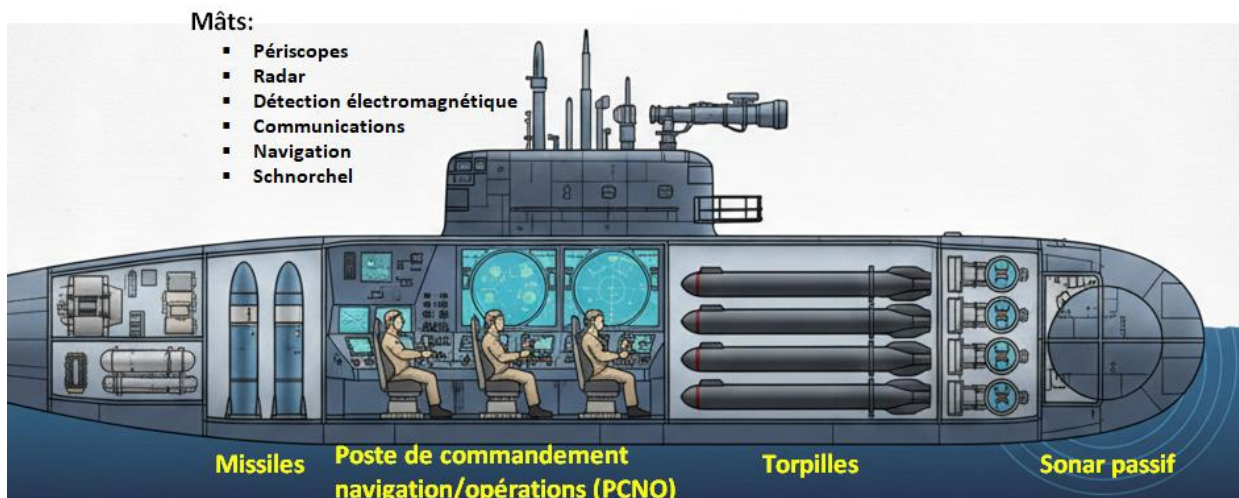


Sous-marin – Vue simplifiée

1.2 Qu'est-ce qu'un sous-marin ? L'anatomie du prédateur

Pour survivre et agir, cette plateforme repose sur trois piliers technologiques :

- **La coque (résistance et discrétion)** : elle doit résister à des pressions colossales (la coque épaisse intérieure) tout en étant profilée pour glisser sans bruit dans l'eau (la coque mince extérieure).
- **L'appareil de navigation et d'énergie** : véritable centrale électrique, le sous-marin doit produire son propre oxygène et son énergie (via propulsion diesel-électrique ou nucléaire) pour rester autonome durant des mois.
- **Le système d'armes et de détection** : c'est son "bras armé" (torpilles, missiles de croisière ou balistiques) couplé à ses "oreilles" (les sonars).



Système d'armes – Vue simplifiée

1.3 Le massif du sous-marin : rôles, fonctions et usages opérationnels

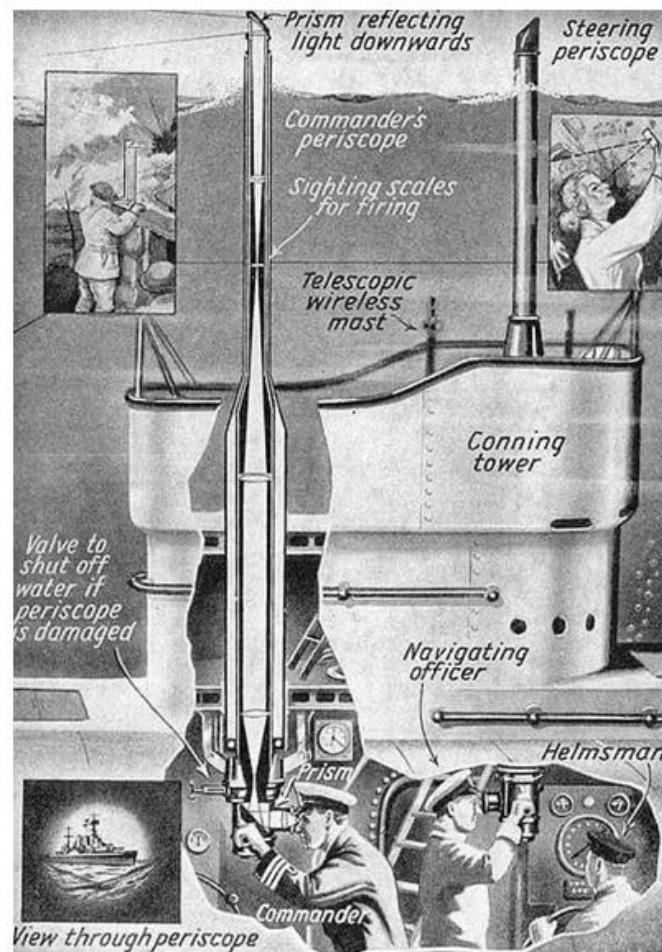


Le sous-marin SEAL (1914-1924) – Un des premiers avec massif et périscope rotatif rétractable.

Sur un sous-marin, le massif est la superstructure verticale située au-dessus de la coque résistante. Son appellation officielle dans la Marine nationale est massif, mais il est aussi désigné par plusieurs synonymes ou termes informels selon les marines et les époques : *kiosque* (terme historique), *baignoire* (argot marin), *sail* ou *conning tower* en anglais, parfois *flotte* par abus de langage (*Illustration : kiosque de sous-marin allemande type VII vers 1940*).

Le massif remplit plusieurs fonctions essentielles. Il supporte les mâts escamotables (périscopes, mâts optroniques, antennes radio, radar, GPS, guerre électronique), permettant au sous-marin de rester en immersion périscopique, donc discret, tout en assurant veille, navigation et communications. Il abrite également les postes de vision directe, donnant aux officiers la possibilité d'observer l'environnement de surface sans émerger complètement, fonction historiquement centrale avant l'arrivée des senseurs optroniques.



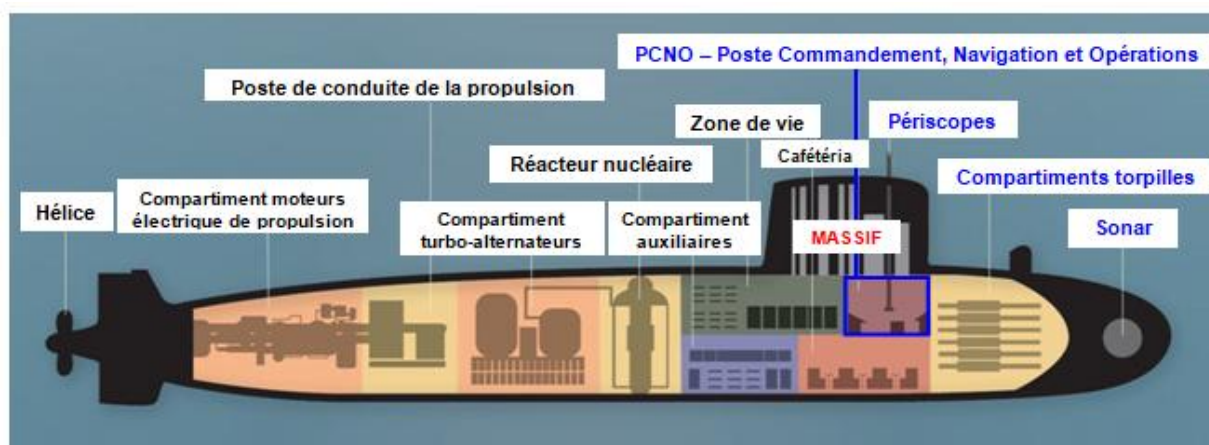


Une illustration ancienne illustrant l'utilisation du périscope

Le massif sert aussi à des accès spécifiques : embarquement ou débarquement ponctuel de personnel (forces spéciales, passagers), parfois par hélitreuillage (*Illustration*) sur certaines unités adaptées, ou lors d'opérations spéciales en surface. Il peut contenir des équipements particuliers modulaires, selon la mission : treuils (par exemple pour le rembobinage d'une flûte ou sonar remorquée), dispositifs de nageurs de combat, ou moyens de lancement spécifiques.



Enfin, le massif contribue à la stabilité hydrodynamique, à la protection des mâts et à la signature acoustique et radar du bâtiment, ce qui en fait un élément clé de la discrétion globale du sous-marin.



*Les principales parties d'un sous-marin (Ici, un sous-marin nucléaire d'attaque SNA)
Notez la silhouette longiligne surmontée du massif .*

1.4 L'intérêt stratégique : l'arme de l'invisible

L'intérêt majeur du sous-marin réside dans une phrase : « Voir sans être vu ».

Il est la seule plateforme de combat capable d'exploiter la troisième dimension du milieu maritime : la profondeur. Contrairement aux navires de surface, son efficacité repose sur l'opacité du milieu acoustique. Il sert tour à tour de vecteur de dissuasion nucléaire, d'outil de renseignement discret ou de chasseur de navires.

La Détection : le défi de l'obscurité

Dans l'eau, les ondes électromagnétiques (radar, radio) ne se propagent quasiment pas. La détection repose exclusivement sur l'acoustique :

- **Le sonar passif** : écoute des bruits environnants (hélices, pompes, flux d'eau). C'est le mode privilégié car il ne révèle pas la position du sous-marin.
- **Le sonar actif** : émission d'une impulsion sonore (ping) pour obtenir un écho. Cela révèle instantanément la position de l'émetteur.

Une épopée d'innovations : de la tortue à l'atome

L'histoire du sous-marin est jalonnée de ruptures technologiques :

- Les premiers prototypes manuels (le *Turtle* américain, le *Nautilus* de Fulton).
- L'apparition de la propulsion électrique et du moteur diesel à la fin du XIXe siècle.
- La révolution de la propulsion nucléaire navale (SNA/SNLE) dans les années 1950, offrant une autonomie virtuellement illimitée.
- L'automatisation et la réduction de la signature acoustique (la "furtivité" sous-marine).

1.5 La France : une puissance de premier rang

La France occupe une place singulière et historique dans ce domaine :

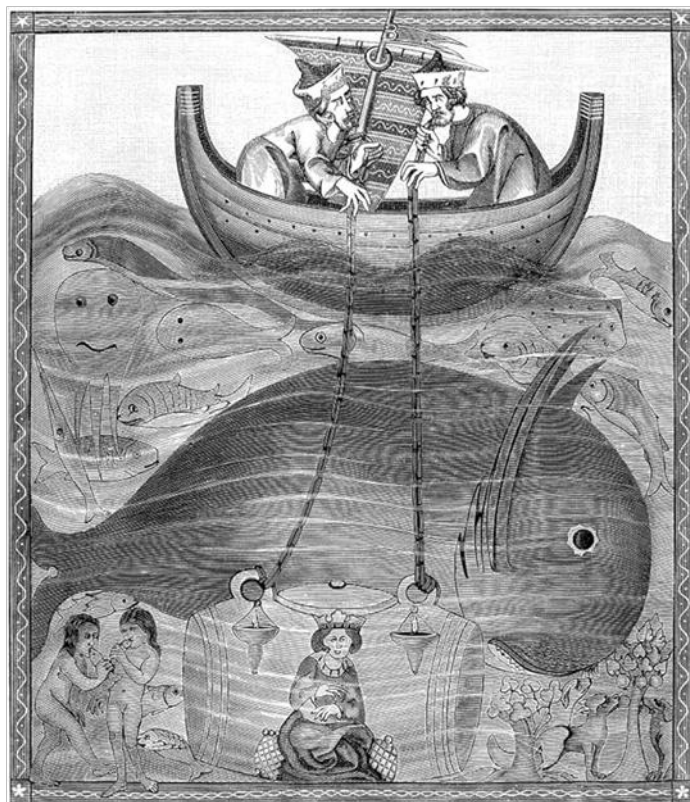
- **Innovation** : Elle fut pionnière avec le *Gymnote* (1888), premier sous-marin électrique performant au monde.

- **Construction** : Grâce à Naval Group, la France est l'un des rares pays au monde capable de concevoir et construire intégralement des sous-marins nucléaires et conventionnels de haute technologie.
- **La Marine Nationale** : La Force Océanique Stratégique (FOS) est le pilier de la défense française. Avec ses SNLE (Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins) et ses nouveaux SNA (Sous-marins Nucléaires d'Attaque) de classe *Suffren*, la France maintient une présence permanente et indécélable sous les mers.

Conclusion : l'odyssée méconnue des profondeurs

Si l'histoire de l'aviation est peuplée de figures héroïques et de machines mythiques connues de tous, celle des sous-marins demeure, par nature, immergée dans l'ombre. Pourtant, la conquête des abysses a exigé autant de courage, de génie et de sacrifices que celle des cieux. C'est une épopée de pionniers isolés dans des coques de fer, luttant contre l'écrasement et l'asphyxie, au sein d'un milieu bien plus hostile que l'atmosphère.

Chapitre 2 : Genèse et enjeux du sous-marin moderne



Alexandre le Grand (356–323 av. J.-C.), roi de Macédoine de 336 à 323 av. J.-C.

À droite : gravure au trait, d'après une enluminure d'un manuscrit français du XIII^e siècle, représentant la légende d'Alexandre descendu dans la mer à l'intérieur d'un tonneau (ou baril) de verre afin d'observer les poissons.

2.1 De l'artisanat à l'arme stratégique

L'idée de naviguer sous la surface de l'eau remonte à l'Antiquité, mais elle est restée durant des siècles au stade de la curiosité scientifique ou de l'expérimentation isolée. Les premières tentatives concrètes, comme la *Tortue* de Bushnell lors de la guerre d'Indépendance américaine (1775-1783) ou le *Nautilus* de Robert Fulton (1797), se heurtaient systématiquement aux limites de la propulsion et de l'étanchéité.

C'est avec la Première Guerre mondiale que le sous-marin démontre son potentiel de rupture. Les U-Boote allemands ont failli étrangler l'économie britannique par une guerre de course sous-marine sans précédent. Cependant, ces engins étaient techniquement des submersibles : ils naviguaient l'essentiel du temps en surface et ne plongeaient que pour l'attaque ou la fuite, en raison de batteries électriques à l'autonomie limitée et de la nécessité de faire fonctionner leurs moteurs Diesel à l'air libre pour recharger les batteries.

Le terme U-boot est l'abréviation d'Unterseeboot qui signifie sous-marin en allemand ; pluriel des U-Boote ou des U-Boots.

La Seconde Guerre mondiale marque l'apogée de cette technologie classique, avec les tactiques de "meutes de loups" en Atlantique. Mais c'est la Guerre froide qui va propulser le sous-marin dans une nouvelle dimension grâce à deux révolutions majeures : l'atome et le missile balistique. Le sous-marin n'est plus seulement un prédateur de convois ; il devient le gardien de la paix mondiale par la dissuasion, capable de raser des continents tout en restant invisible.

2.2 Les prémices : l'ingéniosité face à l'impossible

L'histoire du sous-marin ne commence pas avec l'acier, mais avec le bois et le cuir. Pendant des siècles, l'homme a cherché à briser la barrière de la surface. Bien que Léonard de Vinci ait esquissé des plans de navires submersibles qu'il garda secrets par crainte de la cruauté de la guerre, il fallut attendre le XVIIe siècle pour voir des tentatives concrètes.

Le premier grand saut technologique est l'œuvre du Hollandais Cornelis Drebbel en 1620. Son bâtiment, une barque recouverte de cuir graissé, aurait navigué dans la Tamise à plusieurs mètres de profondeur, propulsé par des rameurs dont les rames passaient à travers des manchons de cuir étanches. Si la légende raconte que le roi Jacques Ier y prit place, la science de l'époque ne permettait pas encore de résoudre le problème crucial du renouvellement de l'air.

1620


ANECDOTE

Le sous-marin qui a traversé l'atlantique... en 1620 !

Bien avant les monstres d'acier modernes, un ingénieur anglais visionnaire, Cornelis Drebbel, stupéfia la cour du roi Jacques Ier avec un engin qui semblait tout droit sorti d'un grimoire d'alchimiste. En 1620, son sous-marin en bois et cuir, propulsé par des rameurs enfermés dans une coque étanche, effectua plusieurs plongées sur la Tamise.


Mais l'histoire la plus folle reste celle rapportée par des chroniqueurs : Drebbel aurait tenté une traversée expérimentale de l'Atlantique, ou du moins une navigation hauturière prolongée, démontrant que son invention pouvait survivre en mer ouverte. Aucun document ne confirme totalement l'exploit, mais l'idée qu'un sous-marin primitif ait pu affronter l'océan au XVII^e siècle

	continue d'alimenter les fantasmes. Drebbel aurait même découvert un moyen de "renouveler l'air" grâce à un mystérieux procédé chimique, peut-être à base de salpêtre chauffé. Une intuition géniale, deux siècles avant les systèmes modernes.
--	--

1648 	Le sous-marin qui a défié les lois de la physique 1648 – Le sous-marin de John Wilkins, une invention avant-gardiste Dès 1648, le scientifique anglais John Wilkins a théorisé les avantages stratégiques des sous-marins : discrétion, attaque surprise, ravitaillement invisible. Ses idées, bien que révolutionnaires, n'ont pas abouti à des réalisations concrètes à l'époque. Pourtant, elles ont inspiré les ingénieurs des siècles suivants, prouvant que les sous-marins étaient bien plus que de simples engins : ils étaient une nouvelle façon de faire la guerre et d'explorer.
--	--

La guerre d'indépendance américaine (1775-1783) : le temps des "monstres" de bois

C'est lors de la Révolution américaine que le sous-marin sort du domaine de la curiosité pour devenir une arme de guerre, grâce à l'inventeur David Bushnell. En 1775, il conçoit la Turtle (la Tortue), un engin qui ressemble davantage à un œuf géant qu'à un navire moderne.

1776 	L'incroyable « Tortue » de la Révolution En 1776, bien avant la haute technologie, un inventeur américain crée le <i>Turtle</i> . C'est un minuscule œuf en bois pour une seule personne. Son arme ? Une mèche et de la poudre. Il a tenté de couler un navire britannique à New York. C'était la première attaque sous-marine de l'histoire : un homme seul, à la force du poignet, contre la plus grande flotte du monde !
--	--

Les détails truculents de la "Tortue"

La Turtle est un chef-d'œuvre d'ingéniosité artisanale :

- **Propulsion** : elle est actionnée par un seul homme qui doit pédaler pour faire tourner une hélice (une première mondiale) tout en manipulant un gouvernail.
- **Immersion** : elle est réglée par un ballast loger au fond de la tortue dont le remplissage est effectué à l'aide d'une pompe à manivelle.
- **Le système d'attaque** : à l'avant du bâtiment et en haut (*voir image*) se trouve une tarière (une sorte de foret). Le plan consistait à naviguer sous un navire de ligne britannique, à percer sa coque en cuivre à l'aide de ce foret, et d'y fixer une charge explosive de 70 kg de poudre noire reliée à un mécanisme d'horlogerie.
- **L'échec héroïque** : en 1776, le sergent Ezra Lee tente d'attaquer le *HMS Eagle* dans le port de New York. Il parvient sous le navire, mais la tarière bute contre une plaque de fer et ne peut mordre. À

L'Empire du Silence Technologie, Tactique et Géopolitique du SOUS-MARIN
Partie 2: L'OBJET NAVAL – Genèse, Histoire et Vie à Bord

bout de forces et manquant d'air, Lee doit abandonner, libérant sa charge qui explosa dans le port sans faire de victimes, mais marquant la naissance de la guerre sous-marine.



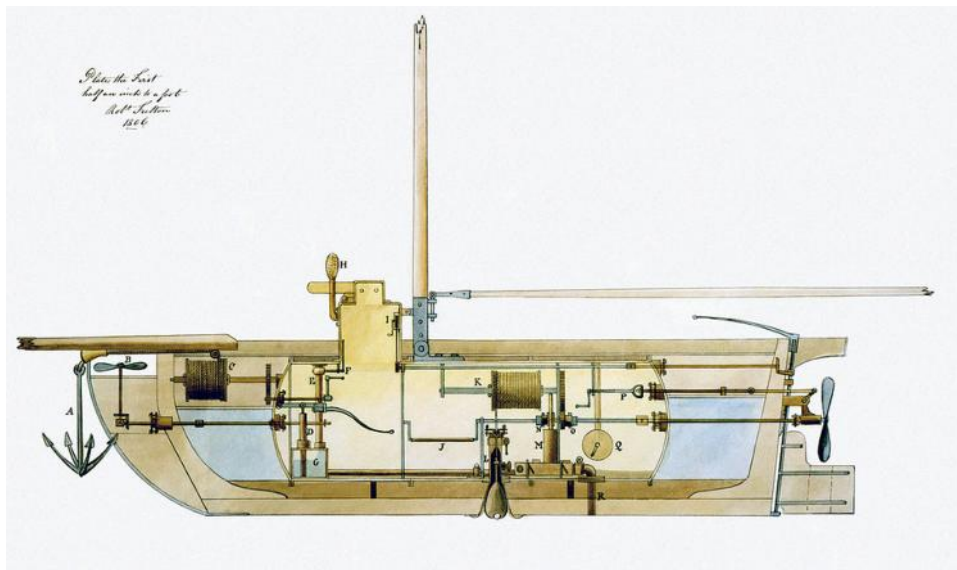
La tortue de Bushnell et sa tarière (flèche rouge)



Le "sous-marin" Turtle attaque le HMS Eagle en août 1776

Quelques années plus tard (1800), Robert Fulton, un autre Américain vivant en France, propose au Premier Consul Bonaparte le Nautilus. Ce navire introduit une innovation majeure : des réservoirs de plongée (ballasts) et des gouvernes de profondeur. Malgré des essais concluants en Seine et au large de Brest, Napoléon rejette l'invention, jugeant cette méthode de combat déloyale et non civilisée.

Pourtant, de nombreux progrès ont été accomplis par rapport au Turtle de Bushnell, trente ans plus tôt. L'équipage dispose d'un réservoir d'air comprimé à vingt atmosphères et d'absorbants de CO₂ à base de soude permettant de tenir plusieurs heures en plongée. Sans être parfaits, le contrôle de l'assiette en plongée et les manœuvres de plongée et d'émersion sont réalisables de façon pratique.



Le sous-marin Nautilus de Fulton

Le XIXe siècle : l'éclosion de la vapeur et de l'électricité

Le milieu du XIXe siècle voit une accélération technologique fulgurante, portée par la révolution industrielle. La Guerre de Sécession américaine est le théâtre d'un nouvel acte héroïque et tragique : le CSS Hunley. Premier sous-marin à couler un navire ennemi en 1864, il était propulsé par sept hommes actionnant un vilebrequin manuel. Il coula avec son équipage lors de l'attaque, prouvant que le sous-marin était alors aussi dangereux pour ses occupants que pour ses cibles.

1861

ANECDOTE

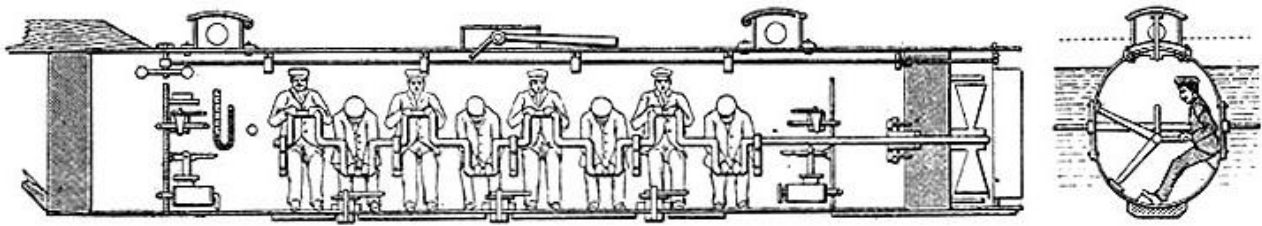
Le sous-marin qui a fait la guerre... à la manivelle

Il avançait lentement, silencieusement, mû uniquement par la force des bras humains. Pas de moteur, pas d'électricité, pas de technologie futuriste : en 1864, le H.L. Hunley, premier sous-marin à avoir coulé un navire ennemi, fonctionnait... à la manivelle. Huit hommes pédalaient littéralement dans l'obscurité totale pour faire tourner une hélice. Une erreur, une fuite, un malaise, et tout l'équipage mourait noyé.

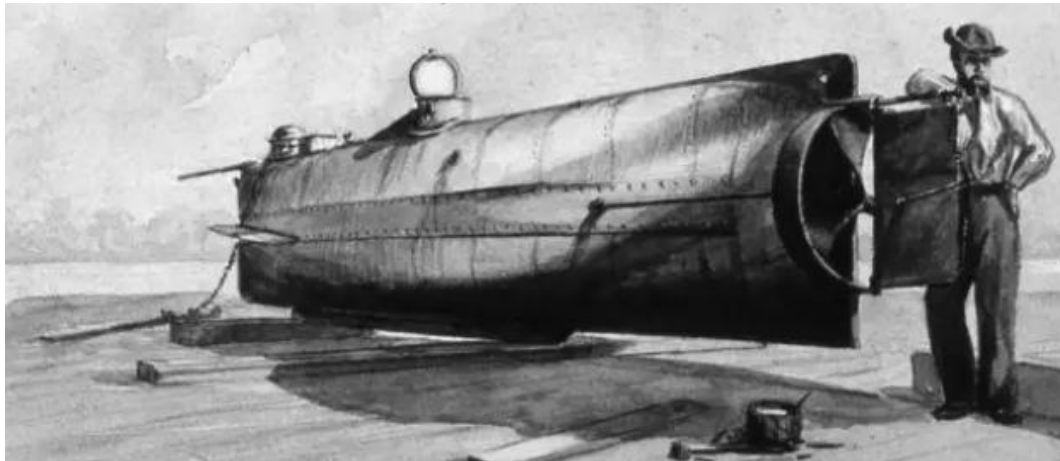
Le Hunley n'était pas seulement primitif : il était maudit. Avant même son entrée en guerre, il tua deux équipages entiers lors d'essais ratés. Pourtant, les Confédérés persistent. En pleine guerre de Sécession, ce cercueil d'acier s'approcha du USS *Housatonic* et plaça une charge explosive au bout d'une perche. L'explosion fut fatale au navire nordiste.

Victoire historique... suivie d'un drame. Le Hunley ne revint jamais. On ignore encore exactement ce qui tua son équipage : onde de choc, asphyxie, panique ? Le sous-marin resta perdu pendant plus de 130 ans avant d'être retrouvé en 1995. À l'intérieur, les squelettes étaient toujours à leur poste, figés dans la mort.

Un exploit militaire ? Oui. Mais surtout la preuve glaçante que la guerre sous-marine est née dans la souffrance, la sueur... et la peur.



Sous-marin CSS Hunley



Sous-marin CSS Hunley – Représentation par R.G. Skerett

1870

ANECDOTE

Quand Jules Verne avait presque tout prévu

Bien avant les sonars, les missiles et le nucléaire, Jules Verne avait déjà tout imaginé. En 1870, dans *Vingt mille lieues sous les mers*, il décrit le Nautilus : un sous-marin autonome, électrique, capable de rester longtemps sous l'eau, doté d'armes, de systèmes d'observation et même d'un équipage reclus, coupé du monde.

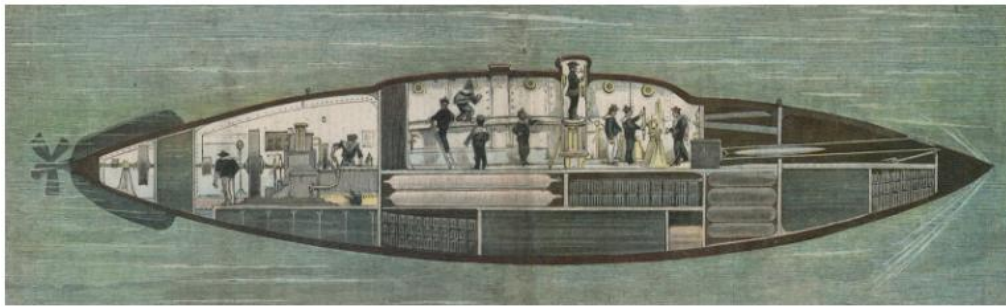
À l'époque, ces idées semblaient relever de la pure science-fiction. Pourtant, un demi-siècle plus tard, les ingénieurs militaires reconnaissent s'être inspirés directement du roman. Le capitaine Nemo, avec son obsession pour les profondeurs et sa haine du monde de la surface, préfigure même la psychologie très particulière des commandants de sous-marins modernes.

Plus troublant encore : Verne avait anticipé les dilemmes moraux de la guerre sous-marine. Attaquer sans être vu. Frapper sans sommation. Disparaître sans laisser de trace.

Aujourd'hui encore, dans certaines écoles navales, on fait lire Jules Verne aux futurs officiers. Non comme un romancier... mais comme un prophète.

Le tournant français : le Gymnote et le Narval

La France prend alors la tête de la recherche mondiale. En 1888, l'ingénieur Gustave Zédé lance le Gymnote (*Illustration*), le premier sous-marin à propulsion purement électrique. Il résout le problème de l'asphyxie des moteurs à combustion, mais reste limité par l'autonomie des batteries.

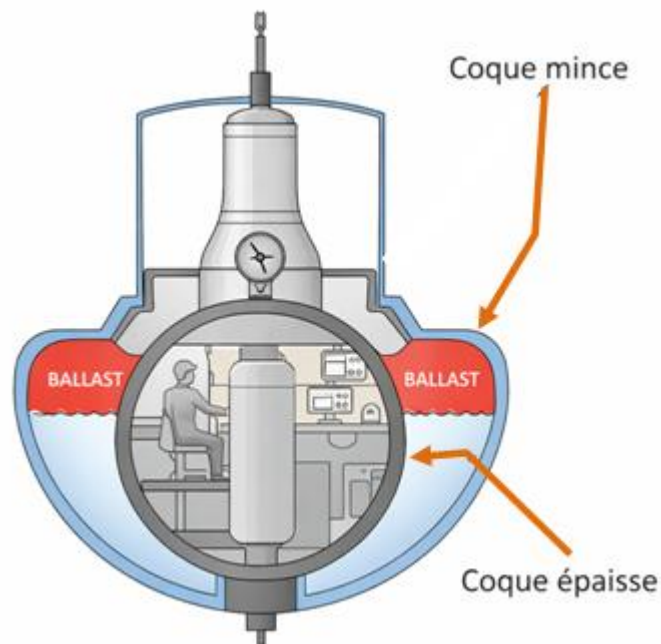


Maxime Laubeuf (1864-1939) est un ingénieur français spécialisé dans la construction navale. Il est considéré comme l'un des pères des sous-marins modernes. En 1899, il invente le véritable ancêtre du sous-marin moderne avec le **Narval**. Il introduit deux révolutions :



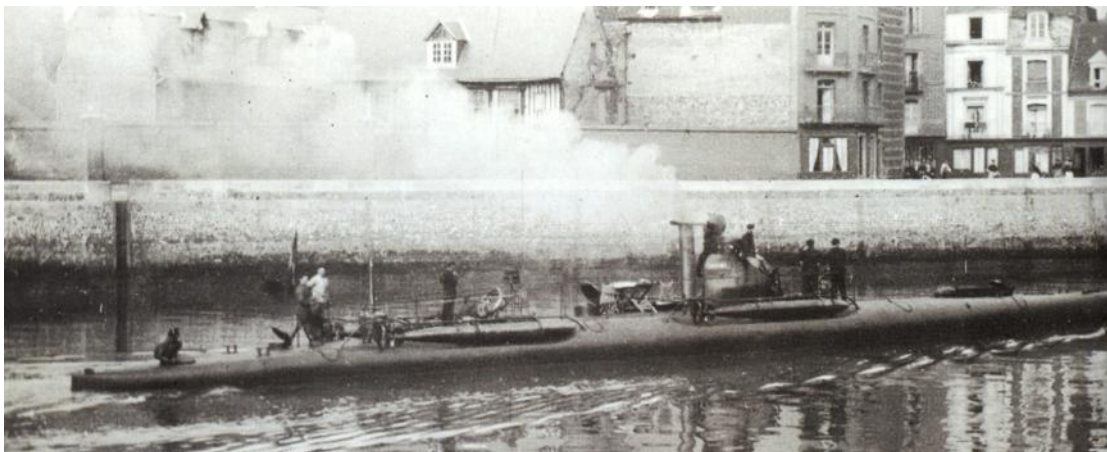
1. **La double coque** est une caractéristique essentielle des sous-marins modernes. La **coque épaisse**, ou coque pression, constitue le cœur du navire : elle résiste aux énormes pressions des profondeurs et protège les compartiments habités. Autour d'elle, la **coque mince** forme une enveloppe hydrodynamique qui améliore la pénétration dans l'eau, réduit les turbulences et permet d'intégrer des éléments non pressurisés comme les ballasts. Cette

configuration offre un compromis optimal entre résistance mécanique, discrétion acoustique et efficacité de navigation, tout en facilitant l'entretien et la modularité des équipements extérieurs.

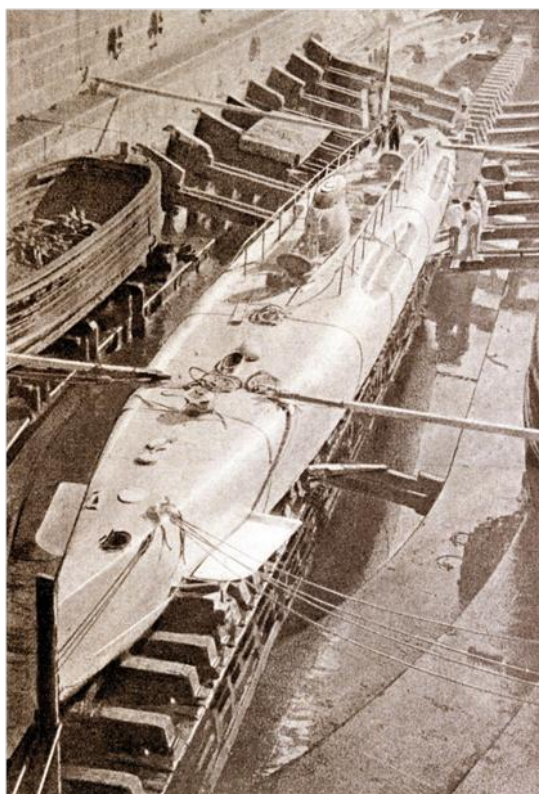


2. **La propulsion mixte** : Un moteur à vapeur (puis Diesel) pour la navigation en surface et la recharge des batteries, et un moteur électrique pour l'immersion. Le concept du "submersible" était né.

Ce sous-marin, le Narval, répondait à une demande formulée en 1896 pour un sous-marin ayant une autonomie en plongée de 10 milles nautiques à 8 nœuds. Il devait également avoir une distance franchissable de 100 milles nautiques à 12 nœuds et ne pas dépasser 200 tonnes. La Marine Nationale avait reçu 19 propositions de conception, le projet révolutionnaire de Laubeuf en fut le grand gagnant.



21 octobre 1899 : lancement du sous-marin le Narval (Cherbourg). Submersible français de 117 tonnes conçu par l'ingénieur du génie maritime Laubeuf. Propulsé par une machine à vapeur de 250 chevaux, il est doté d'un moteur électrique alimenté par des accumulateurs rechargeables en surface ce qui lui donne une certaine autonomie en plongée. C'est une première mondiale.



Le Narval sur tins (pièces de bois servant à soutenir le navire) – Premier torpilleur submersible français

Missions modernes : un outil multiforme

Aujourd'hui, le sous-marin n'est plus cantonné à la seule destruction de navires. Il est devenu un outil polyvalent de gestion de crise :

- La dissuasion : assurer qu'aucune puissance ne puisse frapper le territoire national sans s'exposer à une riposte dévastatrice.
- La collecte de renseignement : stationner silencieusement près d'une côte pour intercepter des communications ou surveiller des mouvements portuaires.
- Les opérations spéciales : déployer des nageurs de combat en les faisant sortir par une valise sèche (conteneur de pont permettant l'accès au matériel et la mise à l'eau), ces derniers utilisant ensuite des propulseurs sous-marins pour franchir de longues distances tout en restant indétectables.
- La frappe de précision : tirer des torpilles ou des missiles de croisière contre des cibles terrestres stratégiques à longue distance.

1905

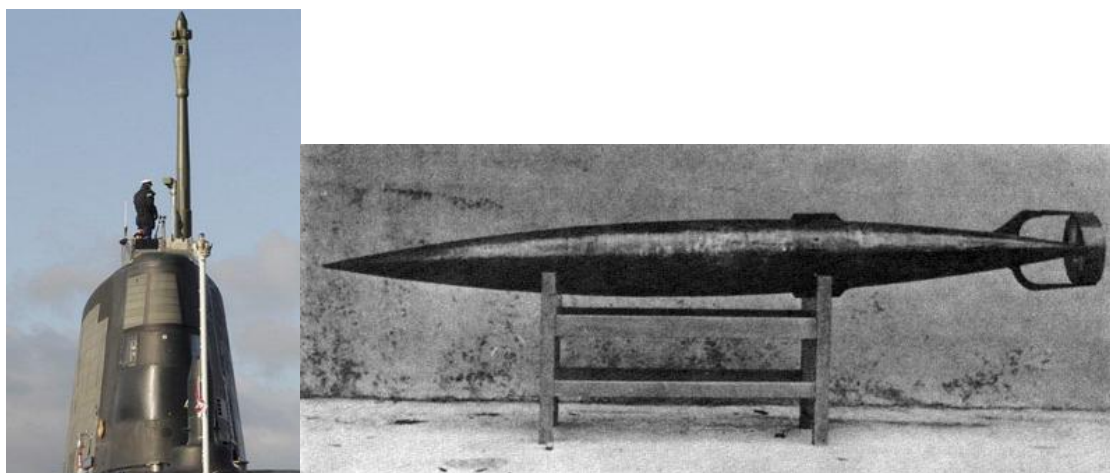
ANECDOTE

Le sous-marin qui a été “volé” par son propre équipage

En 1905, des marins russes mutinés prennent le contrôle du sous-marin *Kambala* pendant la révolution. Ils tentent de rejoindre un port allié, mais la navigation sous-marine exige une expertise qu'ils n'ont pas. Après plusieurs échouages, ils finissent par se rendre. C'est l'un des rares cas de piraterie... sous-marine.

2.3 Les guerres mondiales : la maturité cruelle

En 1914, le sous-marin est devenu une machine de guerre redoutable. L'introduction du périscope et de la torpille automobile change la donne. Les U-Boote allemands manquent de mettre le Royaume-Uni à genoux en coupant ses routes commerciales.



Périscope émergeant du massif du sous-marin / Une des premières torpilles

Les avancées technologiques entre les deux guerres

L'entre-deux-guerres voit l'amélioration de l'acoustique. On commence à utiliser l'écoute hydrophonique (écouteurs dans l'eau) pour repérer les navires au bruit de leurs hélices. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Allemagne développe le Schnorchel (ou snorkel) en 1936 – monté sur les sous-marins allemands qu'à partir de fin 1943 – permettant de faire fonctionner les moteurs Diesel en immersion périscopique. Cela réduit la nécessité de faire surface, mais le sous-marin reste dépendant de l'oxygène de l'air.

À la fin du conflit, le Type XXI allemand préfigure le sous-marin moderne : il est conçu pour rester presque exclusivement sous l'eau, avec une silhouette hydrodynamique optimisée pour la vitesse en plongée plutôt qu'en surface.

2.4 Vers une nouvelle dimension : Les piliers de la révolution sous-marine

L'issue de la Seconde Guerre mondiale ne s'est pas seulement jouée sur les champs de bataille, mais dans le silence oppressant des abysses et le secret des laboratoires. Pour comprendre comment le sous-marin est passé du statut de fragile prédateur de surface à celui de maître absolu des océans, nous allons maintenant consacrer trois chapitres à trois aventures structurantes. Ces récits sont les jalons d'une mutation technologique et stratégique qui dessine encore aujourd'hui l'avenir de nos flottes.

Notre exploration débutera par le **schnorchel**, cette délicate technologie mécanique qui a offert aux sous-marins leur premier véritable "poumon". Nous verrons comment ce simple tube a révolutionné la discrétion en permettant aux moteurs diesel de respirer sous la surface, déjouant ainsi la surveillance des radars alliés.

Nous plongerons ensuite dans l'univers de **la machine Enigma**. Cette guerre invisible des codes fut le théâtre d'un enjeu vital : la discrétion des communications. Dans un monde où un message intercepté signifiait une meute de loups débusquée, la maîtrise du chiffrement est devenue l'arme ultime de la guerre des nerfs.

Enfin, nous consacrerons un chapitre majeur au **sous-marin de Type XXI**. Véritable bond de géant réalisé par les ingénieurs allemands, ce navire a redéfini les lois de l'hydrodynamisme et de la puissance électrique. Nous raconterons comment cette avancée extraordinaire, une fois mise à disposition des Alliés après 1945, a constitué un immense coup de pouce technologique, propulsant le monde dans l'ère des sous-marins modernes et de la dissuasion nucléaire.

2.5 L'épreuve du vide : mécanique et supplice du schnorchel en immersion

Le **schnorchel** (ou *schnorkel*) est bien plus qu'un simple accessoire de confort permettant aux sous-mariniers de respirer l'air marin sans faire surface. C'est un organe vital, une prouesse d'ingénierie, mais aussi un instrument de torture physiologique et un risque sécuritaire majeur. Si le grand public l'assimile souvent au simple tube du plongeur, son fonctionnement dans un sous-marin de plusieurs centaines de tonnes, propulsé par des moteurs diesels gourmands en oxygène, relève d'un équilibre précaire entre discrétion tactique et survie de l'équipage.

L'impératif de l'air : le poumon du diesel

Pour comprendre l'importance du schnorchel, il faut revenir à la propulsion classique. Un sous-marin conventionnel est un navire électrique qui utilise des moteurs diesels pour recharger ses batteries. Or, un moteur thermique est un ogre pneumatique : pour brûler 1 kg de gasoil, il lui faut consommer environ 20 m³ d'air.

En surface, cette aspiration ne pose aucun problème. Mais la primauté d'un sous-marin est l'invisibilité. Dès la Seconde Guerre mondiale, avec l'avènement du radar, rester en surface pour recharger ses batteries devenait une condamnation à mort. Le schnorchel, popularisé par les ingénieurs allemands sur les U-Boote, permet de maintenir le bâtiment à l'immersion périscopique. Seul le sommet du tube émerge, réduisant considérablement la signature radar et visuelle du navire.

Un clapet entre la vie et la mort

Le sommet du schnorchel est équipé d'un clapet de tête. Son rôle est simple mais critique : laisser entrer l'air tout en empêchant l'eau de mer de s'engouffrer dans les cylindres des moteurs, ce qui provoquerait une casse moteur immédiate ou, pire, l'envahissement du bord.

Ce clapet est asservi à des électrodes de détection d'eau. Dès qu'une vague recouvre la tête du tube, le clapet se ferme instantanément. C'est ici que commence le défi pour l'équipage. En effet, les moteurs diesels, lancés à plein régime pour la charge, ne s'arrêtent pas de tourner immédiatement. Si le clapet se ferme, les moteurs continuent d'aspirer l'air... mais ils le font désormais à l'intérieur même du sous-marin.

La dépression : le supplice des tympans

Lorsque le clapet se ferme alors que les diesels tournent, le volume d'air contenu dans la coque pressurisée est aspiré par les machines. En quelques secondes, la pression atmosphérique à l'intérieur du bord chute drastiquement. On parle de dépression.

La limite de sécurité est généralement fixée à 220 millibars de dépression. Pour les hommes à l'intérieur, l'effet est brutal. C'est comme si l'on vous arrachait les tympans de l'intérieur. Les sinus se compriment, la gorge se serre. Le "bon" barreur de plongée est celui qui sait maintenir une immersion si précise que le clapet s'ouvre et se ferme de manière rythmée — le fameux « tchiii !.. tchou ! » — évitant que la dépression ne devienne insupportable. Un mauvais réglage ou une mer trop forte transforment la navigation en un calvaire physiologique permanent pour l'équipage.

Le drame de la "Minerve" : quand la technologie devient fatale

L'histoire de la Marine nationale française est marquée par la tragédie de la Minerve (S647) en 1968. Bien que plusieurs causes aient été discutées au fil des décennies (avarie de barre, explosion), l'une des hypothèses les plus sérieuses concerne justement l'utilisation du schnorchel par gros temps.

Sur les sous-marins de classe *Daphné*, le système de schnorchel était complexe. En cas de mer forte, si le clapet de tête reste bloqué ou si une commande échoue, l'eau peut s'introduire massivement dans le collecteur d'air. Une autre théorie suggère qu'une dépression trop forte, causée par une fermeture prolongée du clapet alors que les diesels aspiraient à plein débit, aurait pu désorienter l'équipage ou causer une défaillance technique majeure.

Cette catastrophe a rappelé que le schnorchel n'est pas un système passif. C'est une interface dynamique et dangereuse entre deux milieux hostiles : l'air et l'eau. Une erreur de manipulation de quelques secondes, un clapet qui gèle ou un capteur qui fait défaut, et le sous-marin peut s'alourdir de plusieurs tonnes d'eau en un instant, le précipitant au-delà de sa limite d'immersion.

La discrétion : un jeu de cache-cache électronique

Au-delà des risques mécaniques, le schnorchel est le talon d'Achille de la furtivité. Un tube qui dépasse crée une intumescence (un sillage) et des gaz d'échappement. Les radars modernes sont capables de détecter un tube de schnorchel à plusieurs milles nautiques.

Pour contrer cela, l'ingénierie a dû ruser :

- **Revêtements RAM** : les têtes de schnorchel sont recouvertes de matériaux absorbant les ondes radar (Radar Absorbent Material).
- **Dissipation thermique** : l'échappement des gaz est refroidi et rejeté sous l'eau, le plus bas possible, pour éviter les panaches de fumée noire et réduire la signature infrarouge.
- **Formes hydrodynamiques** : le profilage du tube est conçu pour minimiser le sillage visible depuis un avion de patrouille maritime.





Conclusion : L'héritage d'une technologie délicate

Le schnorchel est le symbole du compromis technique. Il a permis aux sous-marins conventionnels de devenir de véritables prédateurs invisibles, capables de traverser des océans sans jamais faire surface totalement. Mais ce gain tactique a un prix humain et technique élevé.

Même avec l'arrivée de la propulsion nucléaire (qui n'a pas besoin d'air pour ses réacteurs), le schnorchel reste présent sur tous les bâtiments comme système de secours et de renouvellement d'air. Il demeure ce lien ténu et parfois violent avec l'atmosphère, rappelant aux marins que l'équilibre entre la machine, l'homme et la mer est toujours suspendu à un simple clapet de métal.

2.6 Le secret d'Enigma : la guerre invisible des codes



La machine Enigma ouverte

Si les radars, les porte-avions et l'arme atomique sont souvent cités comme les piliers de la victoire alliée, le décryptage des communications allemandes via la machine Enigma fut sans doute l'élément le plus décisif. Cette prouesse mathématique et humaine a raccourci la guerre d'au moins deux ans, sauvant des millions de vies.

Historique : d'une invention commerciale à l'arme absolue

Contrairement à une idée reçue, Enigma n'est pas née dans les laboratoires secrets de la Wehrmacht. Elle fut inventée par l'ingénieur allemand Arthur Scherbius en 1918. À l'origine, elle était destinée aux banques et aux grandes entreprises pour sécuriser leurs transactions.

Le succès commercial fut limité, mais l'armée allemande, traumatisée par la facilité avec laquelle les Alliés avaient brisé ses codes durant la Première Guerre mondiale, comprit le potentiel de la machine. Dès les années 1920, la Reichswehr (puis la Wehrmacht) acheta les droits et commença à militariser l'engin en y ajoutant des couches de sécurité supplémentaires, comme le tableau de connexions.

Principe de fonctionnement : la complexité par l'électromécanique

Enigma est une machine électromécanique combinant un clavier, un tableau de lampes et un système de rotors.

Le mécanisme des rotors : Le cœur de la machine repose sur des rotors amovibles (trois, puis quatre pour la Kriegsmarine). Chaque rotor possède 26 contacts de chaque côté, reliés de manière interne de façon anarchique. Lorsqu'on presse une touche (par exemple le 'A'), un courant électrique traverse les rotors, rebondit sur un "réflecteur" en fin de course, et revient illuminer une lettre sur le panneau de lampes (par exemple le 'X').

L'évolution permanente (le principe de la roue) : La force d'Enigma réside dans le fait qu'à chaque pression de touche, le premier rotor tourne d'un cran. Cela change instantanément tout le circuit électrique. Si vous tapez deux fois de suite sur 'A', la machine affichera deux lettres différentes en sortie.

Pour que deux machines communiquent, elles doivent être configurées exactement de la même manière au départ :

1. Le choix des rotors (parmi une collection disponible).
2. L'ordre des rotors dans la machine.
3. La position initiale de chaque rotor.
4. Le tableau de connexions (Steckerbrett) : situé à l'avant, il permettait de relier manuellement des paires de lettres par des câbles, multipliant les combinaisons possibles par des milliards.

Le nombre de combinaisons totales était de l'ordre de 10 milliards (10^{17}) ou 10 quadrillions pour les Américains. Les Allemands considéraient la machine comme absolument inviolable.

Les acteurs : les Briseurs de Code

L'histoire du décryptage est une course de relais internationale.

- Les Polonais (Le Bureau du Chiffre) : dès 1932, les mathématiciens polonais, dont le génial Marian Rejewski, réussirent à reconstruire une Enigma militaire à partir de documents fournis par un espion français (Hans-Thilo Schmidt). Ils furent les premiers à utiliser des machines (les "Bombes") pour automatiser la recherche des réglages. En 1939, sentant l'invasion proche, ils transmirent tout leur savoir aux Français et aux Britanniques.
- Bletchley Park (Station X) : le centre de décryptage britannique devint une "usine à cerveaux". Sous la direction de Dilly Knox puis d'Alan Turing, des milliers de mathématiciens, linguistes et champions d'échecs y travaillèrent dans le plus grand secret.

- Alan Turing : il comprit que seule une machine pouvait battre une autre machine. Il conçut la "Bombe électromécanique", une version immensément plus puissante que celle des Polonais, capable de tester les réglages d'Enigma en quelques heures.

1912
1954

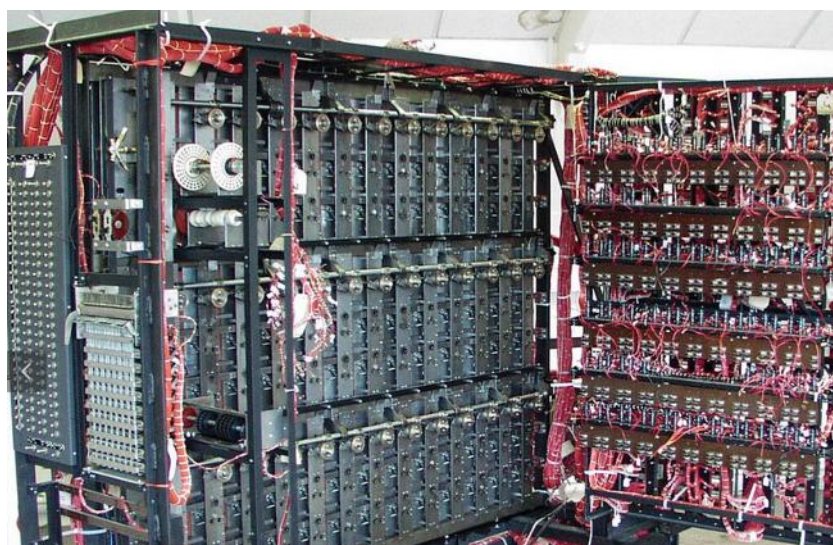
BIOGRAPHIE

Alan Turing – Père de l'informatique

Il est un mathématicien et logicien britannique, considéré comme l'un des pères de l'informatique moderne et de l'intelligence artificielle. Avant la Seconde Guerre mondiale, il pose les bases théoriques du calcul automatique avec la *machine de Turing*, modèle abstrait définissant ce qu'est un algorithme et ce qu'une machine peut calculer.

Durant la guerre, Turing joue un rôle déterminant dans le décryptage des communications militaires allemandes chiffrées par la machine **Enigma**. Affecté au centre de cryptanalyse de Bletchley Park, il conçoit et perfectionne des méthodes mathématiques et électromécaniques permettant d'exploiter les faiblesses du système Enigma. Il est l'un des principaux concepteurs de la Bombe, une machine électromécanique capable de tester rapidement des milliers de configurations de chiffrement, réduisant drastiquement le temps nécessaire pour retrouver les clés quotidiennes allemandes.

Les travaux de Turing permettent aux Alliés d'accéder à des renseignements stratégiques essentiels, notamment sur les opérations navales et les mouvements de sous-marins allemands, contribuant de manière décisive à la victoire alliée. Après la guerre, il poursuit ses recherches sur les ordinateurs électroniques et propose le célèbre test de Turing, destiné à évaluer la capacité d'une machine à imiter l'intelligence humaine. Son héritage scientifique et stratégique demeure fondamental dans l'histoire du calcul, du renseignement et des technologies de l'information.



La Bombe de Turing – Baies ouvertes

La stratégie de décodage : failles et "cribs"

Comment trouver les réglages parmi des milliards de possibilités ? Les briseurs de code utilisaient les failles humaines et protocolaires des Allemands :

- **Le défaut majeur d'Enigma** : une lettre ne pouvait jamais être codée par elle-même (un 'A' n'était jamais un 'A').
- **Les "Cribs"** : les Allemands envoyaient souvent des messages de routine (bulletins météo) commençant par les mêmes mots. En devinant une partie du texte clair ("Wettervorhersage"), les Britanniques pouvaient déduire la configuration des rotors.
- **La paresse des opérateurs** : certains utilisaient des réglages de départ prévisibles (comme trois lettres consécutives sur le clavier), offrant des indices précieux.

La Capture : le rôle crucial des U-Boote

Si Enigma fut brisée par le calcul, elle fut aussi "capturée". Les réglages de la Kriegsmarine (Enigma M4 à quatre rotors) étaient bien plus complexes.

L'épisode le plus célèbre fut la prise de l'U-110 en mai 1941 par la Royal Navy. Les marins britanniques réussirent à monter à bord du sous-marin avant qu'il ne coule et récupérèrent la machine Enigma ainsi que les livres de codes (les réglages quotidiens). Cette prise, tenue secrète même auprès des alliés américains au début, permit de lire les ordres de l'amiral Dönitz pendant des mois.

L'Impact opérationnel : l'information "Ultra"

Les messages décryptés étaient classés sous le nom de code "Ultra". Ils furent la clé de plusieurs victoires :

- La Bataille de l'Atlantique : en connaissant la position des "meutes de loups" (U-Boote), les Alliés purent détourner les convois de ravitaillement, sauvant des milliers de navires marchands.
- La Guerre du Désert : Churchill recevait les rapports de Rommel avant même que ceux-ci n'arrivent à Berlin, permettant à Montgomery de préparer la victoire d'El Alamein.
- Le Débarquement en Normandie : grâce à Ultra, les Alliés savaient que les Allemands croyaient à un débarquement dans le Pas-de-Calais, confirmant le succès de l'opération d'intoxication "Fortitude".

Conclusion : une clé de la victoire

On estime que sans le travail de Bletchley Park, la guerre aurait duré jusqu'en 1947 ou 1948, et l'Europe aurait été ravagée par de nouvelles armes allemandes (V2, nouveaux U-Boote).

Le secret d'Ultra fut si bien gardé que même après 1945, les Britanniques vendirent des machines Enigma capturées à leurs anciennes colonies sans leur dire qu'ils savaient les décoder, continuant ainsi leur espionnage durant le début de la Guerre froide. Le rôle d'Alan Turing et de ses collègues ne fut révélé au grand public qu'à partir des années 1970, sortant enfin ces combattants de l'ombre du silence où ils avaient œuvré.

1941

ANECDOTE

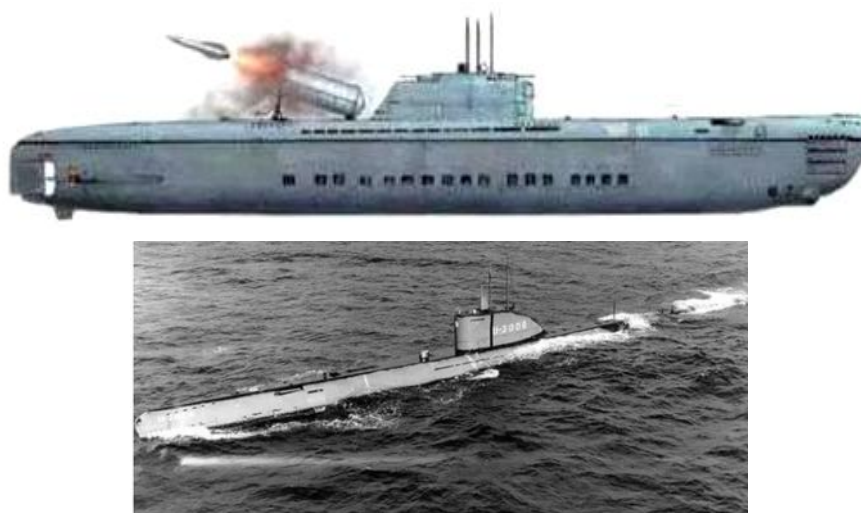
L'U-Boat qui s'est rendu à cause d'une ampoule

Le U-570 a eu l'une des carrières les plus courtes de l'histoire. En 1941, à peine sorti en mer, il est attaqué par un avion britannique. Paniqué par l'obscurité (les lumières ayant sauté) et l'inexpérience, l'équipage a agité un drap blanc. C'est le seul sous-marin allemand capturé intact en haute mer par les Alliés !

2.7 Du Type XXI aux Laboratoires du Brusac

L'Éveil du monstre : La révolution du sous-marin Type XXI

L'année 1944 marque un tournant irréversible dans l'histoire maritime : l'Allemagne développe le sous-marin Type XXI, le premier bâtiment véritablement moderne. Jusqu'alors, ce que l'on nommait « sous-marins » n'étaient en réalité que des submersibles, des navires de surface capables de s'immerger par intermittence. Avec le Type XXI, conçu par l'ingénieur Hellmuth Walter et produit principalement par les chantiers Blohm & Voss, AG Weser et Schichau-Seebeck entre 1943 et 1945, l'architecture navale bascule dans une dimension nouvelle.



Sous-marin allemand du type XXI - 1945

Le Type XXI brise tous les codes de l'époque. Alors que les célèbres U-Boote de type VII affichaient une silhouette anguleuse hérissée de canons, le Type XXI présente une coque aux lignes fluides et épurées. Cette robe d'acier lisse est la clé d'un hydrodynamisme révolutionnaire qui réduit le sillage et la signature acoustique. Sous cette peau de métal, le bâtiment cache une puissance électrique colossale. Ses batteries, trois fois plus puissantes que celles de ses prédécesseurs, lui permettent d'atteindre une vitesse inédite de 17 nœuds en plongée, surpassant même de nombreux navires de surface.

Toutefois, cette débauche d'énergie exigeait un souffle nouveau. C'est ici qu'intervient l'innovation technique la plus emblématique : le schnorchel révolutionnaire. Ce mât télescopique permettait de hisser à la surface une prise d'air et un échappement, autorisant le fonctionnement des moteurs diesel alors que le sous-marin demeurait caché sous l'eau. Les radars alliés ne détectaient plus qu'un minuscule tube, offrant au navire une discrétion quasi totale et lui permettant de rester immergé indéfiniment. Enfin, son véritable atout réside dans son « nez » électronique, le système de sonar passif Balkon. Installé sous l'étrave, cet ensemble d'hydrophones permettait de repérer ses cibles à des distances prodigieuses sans émettre le moindre signal décelable par l'ennemi.

La Grande Dérive : La traque des cerveaux et la récupération des épaves

En mai 1945, l'Allemagne capitule, mais la guerre pour la maîtrise des fonds marins ne fait que commencer. Le Type XXI est devenu le trophée le plus convoité de l'histoire navale. Les vainqueurs déclenchent une course effrénée pour s'emparer de cette technologie qui rendait instantanément obsolètes leurs flottes de surface.

Dans le cadre de l'Opération Pledge, les Alliés se partagent les rares unités opérationnelles. Les États-Unis récupèrent l'U-2513 et l'U-3008, tandis que l'URSS saisit les usines de Dantzig et déporte des milliers de techniciens pour recréer les chaînes de montage, jetant les bases de leurs futures classes *Whiskey* et *Zulu*. La France, bien que dévastée, refuse de rester à la traîne. Elle récupère l'U-2511, rebaptisé *Roland Morillot*. Ce bâtiment devient un laboratoire flottant pour les ingénieurs français du GEMA (Groupe d'Études de Matériel Allemand), qui recrutent des techniciens allemands spécialisés dans la propulsion et l'acoustique.

Le Sanctuaire du Brusuc : Maîtriser l'invisible

Le pivot de cette renaissance technologique française se situe au centre de recherche du Brusuc, près de Toulon. Sous la direction des services secrets et des ingénieurs maritimes, les experts du GEMA y décortiquent les secrets de la furtivité. L'enjeu majeur est de comprendre comment « voir » sans être vu.

Les ingénieurs se penchent sur les revêtements *Alberich*, ces tuiles de caoutchouc anéchoïques destinées à absorber les ondes des sonars adverses. Au Brusuc, on étudie également le système de sonar passif *Balkon*, apprenant à filtrer les bruits parasites de l'océan pour isoler la signature d'une hélice ennemie. Cette fusion entre l'héritage du Type XXI et l'ingéniosité française donne naissance, en 1954, à la classe *Narval*. Ces nouveaux sous-marins sont les descendants directs du géant allemand, intégrant les sonars ultra-sensibles nés des recherches effectuées dans le Var.

L'Héritage Perpétuel : Vers la Dissuasion

Aujourd'hui, l'unique exemplaire du Type XXI encore visible au monde, l'U-2540 "Wilhelm Bauer" à Bremerhaven, témoigne de cette avance technologique. Renfloué en 1957, il a servi de bâtiment d'essais jusqu'en 1982 avant de devenir un musée.

L'influence du Type XXI se lit encore dans la silhouette de nos sous-marins nucléaires actuels. La méthode de construction par sections séparées, inventée pour accélérer sa production, demeure le standard mondial. En capturant ce savoir-faire au moment opportun, le Centre du Brusuc a assuré à la France une place de premier plan dans l'élite technologique navale, faisant du silence la clé de voûte de la défense nationale.

Chronologie : De la révolution du Type XXI à l'acoustique moderne

1943 - 1945 : Construction en sections modulaires du Type XXI dans les chantiers allemands Blohm & Voss, AG Weser et Schichau-Seebeck.

Mai 1945 : Capitulation de l'Allemagne. Déclenchement des opérations de récupération technologique par les Alliés (Opération Pledge).

1945 (Après-guerre) : Création du GEMA (Groupe d'Études de Matériel Allemand) par la France pour intégrer des ingénieurs allemands et analyser les technologies de propulsion et d'acoustique.

1946 : La France reçoit l'U-2511, un Type XXI qu'elle rebaptise *Roland Morillot* pour servir de plateforme d'essais et de laboratoire flottant.

Années 1950 : Développement intensif au centre de recherche du Brusuc (Var) des premiers sonars passifs français et études sur les revêtements anéchoïques *Alberich*.

1954 : Lancement du premier sous-marin français de classe *Narval*, directement inspiré de l'architecture et des capacités d'immersion du Type XXI.

1957 : Renflouement de l'U-2540 dans la Baltique par la marine ouest-allemande.

- 1960 - 1982** : Le sous-marin renfloué est rebaptisé *Wilhelm Bauer* et sert de navire-école et de laboratoire d'essais technologiques pour la Bundesmarine.
- 1984** : L'*U-2540 Wilhelm Bauer* ouvre ses portes au public à Bremerhaven, devenant le seul navire-musée de type XXI au monde.
- 2026** : L'héritage du silence perdure dans la conception des nouveaux SNA de classe Suffren et les futurs programmes de dissuasion, utilisant toujours les principes de discrétion acoustique hérités du Brusac.

2.8 L'ère de l'atome : le silence et l'éternité

Le véritable saut dans l'ère moderne se produit en 1955 avec le lancement de l'USS Nautilus, le premier sous-marin à propulsion nucléaire. Issue de recherches débutées dans les années 1940, cette avancée met fin à la dépendance vis-à-vis de l'air. Le sous-marin n'est plus un navire qui plonge occasionnellement, mais un véritable habitant des profondeurs, capable de naviguer à grande vitesse (20-25 nœuds) en immersion prolongée sans jamais remonter pour recharger des batteries.



Exploit arctique de l'USS Nautilus (É.-U.) En août 1958, le premier sous-marin nucléaire au monde traverse silencieusement la banquise du pôle Nord, hors de portée des radars soviétiques. La région arctique devient ainsi un nouvel théâtre stratégique de la guerre froide, désormais accessible par les profondeurs.

Un défi d'ingénierie et de souveraineté

Au cœur de cette révolution siège la chaudière nucléaire, véritable bijou de miniaturisation. Elle consiste à faire tenir dans un espace extrêmement restreint toute la puissance d'une centrale terrestre. Ce défi exige un savoir-faire d'excellence que seule une poignée de nations maîtrisent : il faut garantir une sécurité absolue pour l'équipage qui vit à quelques mètres du cœur, tout en assurant une fiabilité totale pendant des décennies.

Si les Américains ont partagé cette technologie avec les Britanniques, la France, la Russie et la Chine l'ont développée de façon autonome. Aujourd'hui, ce "club" restreint opère environ 160 navires à propulsion nucléaire (incluant des porte-avions et brise-glaces), totalisant plus de 200 petits réacteurs en service.

Changement d'échelle et discrétion absolue

Cette puissance énergétique se traduit par un changement d'échelle radical par rapport aux navires conventionnels. Là où un sous-marin diesel-électrique mesure généralement entre 60 et 75 mètres pour 2 000 tonnes, les sous-marins nucléaires sont des géants : un SNA comme le *Suffren* français atteint 99 mètres, tandis que les SNLE dépassent souvent les 150 mètres pour des déplacements supérieurs à 15 000 tonnes.

Depuis lors, la course technologique s'est déplacée vers le silence. L'endurance étant désormais quasi illimitée — restreinte uniquement par les vivres et le moral des hommes — la priorité est devenue l'indétectabilité :

- Chaque pièce de machinerie est montée sur des **suspensions élastiques** (plots amortisseurs).
- Les coques sont recouvertes de **tuiles anéchoïques** pour absorber les ondes des sonars.
- Les hélices sont remplacées par des **pompes-hélices** pour éviter la cavitation.

2.9 L'excellence française : un siècle d'innovation sous-marine

La France occupe une place singulière dans l'histoire de la navigation sous-marine, s'affirmant dès la fin du XIXe siècle comme un précurseur technologique majeur. Cette position s'explique par une lignée d'architectes navals inventifs, à l'instar de Gustave Zédé avec le *Gymnote* (1888), premier sous-marin électrique véritablement opérationnel, ou de Maxime Laubeuf, dont le *Narval* (1899) a posé les bases de la conception moderne avec sa double coque et sa propulsion mixte.

Depuis ces origines, l'industrie navale française — portée aujourd'hui par Naval Group et la Direction Générale de l'Armement (DGA) — a conçu et mis en service près de 250 sous-marins à travers les décennies. Ce savoir-faire souverain permet à la France d'être l'un des rares pays au monde capables de maîtriser l'intégralité de la chaîne de conception, de la coque épaisse aux chaufferies nucléaires embarquées, sans dépendance technologique étrangère.

Aujourd'hui, la Marine nationale opère une force sous-marine de premier plan, composée de dix bâtiments en service actif :

- 6 Sous-marins Nucléaires d'Attaque (SNA) : la flotte est en pleine transition avec le retrait progressif de la classe *Rubis* au profit de la classe *Suffren*.
- 4 Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins (SNLE) : de la classe *Le Triomphant*, ils assurent la permanence de la dissuasion nucléaire française.

Cette flotte, bien que numériquement plus resserrée que durant la Guerre froide, compense par une avance technologique décisive. Chaque nouveau bâtiment, comme le récent *Suffren* (admis au service actif en 2022 ; prononcez : *suftrin*), représente l'aboutissement de millions d'heures d'ingénierie, maintenant la France au sommet de la hiérarchie navale mondiale.



SNA SUFFREN à la mer

Conclusion : une technologie de l'extrême

L'histoire des sous-marins est celle d'un défi permanent aux lois de la physique. Des barques en cuir de Drebbel aux monstres d'acier de la classe *Suffren* ou *Ohio*, chaque étape a été franchie grâce à des ingénieurs visionnaires et des équipages dont l'héroïsme, bien que silencieux, égale celui des plus grands aviateurs. Le sous-marin est devenu l'objet le plus complexe jamais construit par l'homme, un vaisseau spatial opérant sous une pression qui broierait instantanément toute autre structure.

Chapitre 3 : Vivre sous cloche technologique

Naviguer sous la mer, c'est s'extraire de la biosphère pour rejoindre un monde où chaque seconde de survie dépend de la machine. Cette partie traite du défi de l'autonomie humaine et technique : comment recréer une atmosphère respirable, gérer l'équilibre complexe de la pesée et choisir la propulsion adaptée — nucléaire ou anaérobie — pour garantir l'endurance. C'est ici que se joue le quotidien des « chevaliers du silence », dans une boîte de conserve technologique où l'alchimie de l'air et de l'eau est le premier rempart contre l'abîme.

Si un sous-marin est une arme de guerre, c'est avant tout un écosystème autonome et artificiel. En immersion, l'équipage vit dans une bulle d'air entourée d'un milieu mortel. Pour tenir des mois sans voir le soleil, les ingénieurs ont dû résoudre trois défis majeurs qui tiennent de l'alchimie moderne : fabriquer de l'air, produire de l'eau et gérer le temps.

1914

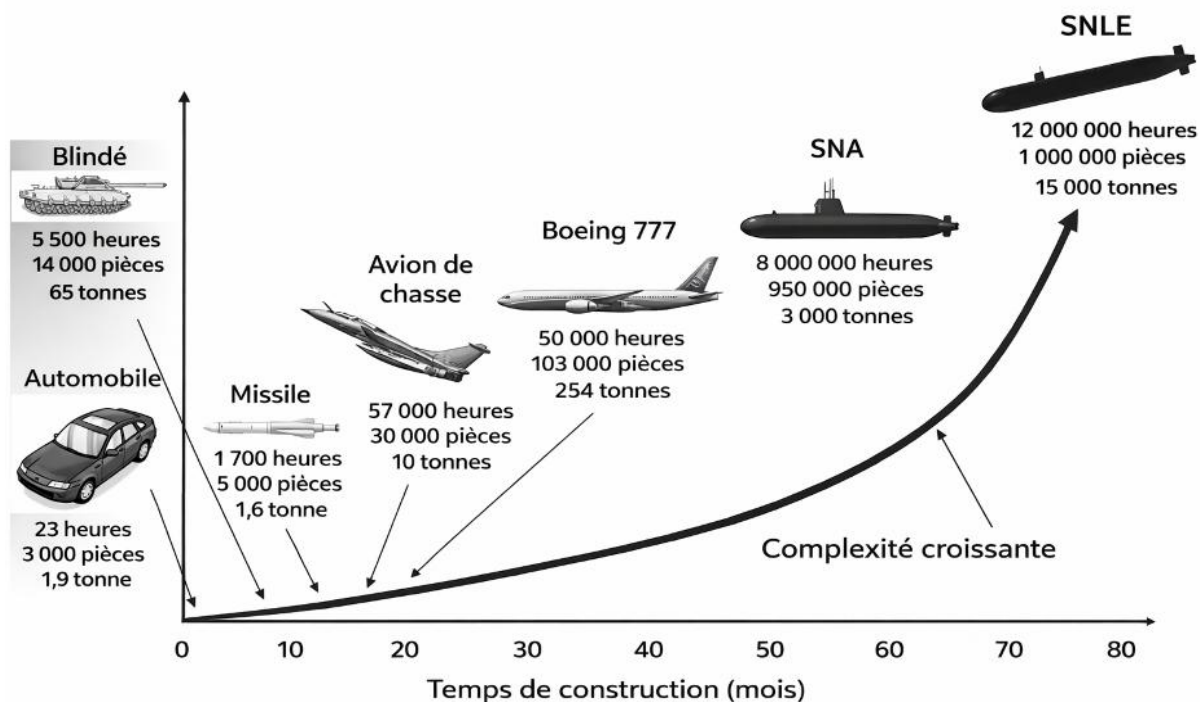
ANECDOTE

Le sous-marin qui a été pris pour un monstre marin

En 1914, des pêcheurs écossais affirment avoir vu un "serpent de mer métallique" onduler sous la surface. Il s'agissait en réalité d'un sous-marin britannique testant un système de propulsion expérimentale produisant des remous inhabituels. L'armée laisse courir la rumeur pour brouiller les pistes.

3.1 Le défi du milieu : une navette spatiale des abysses

Comparer un sous-marin nucléaire à une navette spatiale n'est pas une figure de style, mais une réalité technique. Le milieu sous-marin est, par certains aspects, plus exigeant que le vide spatial.



Complexité comparée de divers engins

La pression hydrostatique

Alors qu'une navette spatiale doit maintenir une pression interne de 1 bar contre le vide (0 bar), un sous-marin subit une pression qui augmente d'environ 1 bar tous les 10 mètres. À 300 mètres de profondeur, chaque centimètre carré de la coque doit supporter 30 kg. Cela impose l'utilisation d'aciers spéciaux à haute limite élastique (comme l'acier 80 HLES en France) et des soudures d'une précision absolue.

1963

ANECDOTE

Le sous-marin qui a survécu à une explosion nucléaire

1963 – L'USS Thresher, une tragédie qui a tout changé

En 1963, l'USS Thresher, un sous-marin nucléaire américain, a sombré lors d'essais en mer, emportant 129 hommes. L'enquête a révélé un défaut de conception dans les soudures des tuyauteries, entraînant une inondation catastrophique. Cet accident a conduit à la mise en place de normes de sécurité drastiques, encore en vigueur aujourd'hui. Une leçon douloureuse, mais qui a sauvé d'innombrables vies.

L'opacité et l'invisibilité

L'espace permet l'observation visuelle et radar sur des milliers de kilomètres. L'océan, lui, est opaque. À partir de 100 mètres de profondeur, la lumière disparaît. Les ondes radio et radar ne pénètrent pas l'eau.

Pour se diriger, le sous-marin doit compter sur ses centrales à inertie (gyroscopes de haute précision) pour la navigation estimée, et sur le son pour la détection. L'immersion le protège des satellites, mais le soumet au "bruit de fond" de l'océan, qu'il doit apprendre à masquer ou à interpréter.

2023

ANECDOTE

Ils voulaient toucher le mythe. L'océan les a broyés.

Ils appelaient ça une expédition. En réalité, c'était un pari.

Le 18 juin 2023, au large de Terre-Neuve, un petit sous-marin blanc baptisé *Titan* disparaît sous les vagues. À son bord, cinq hommes. Des fortunes colossales. Un explorateur mythique. Et le concepteur de l'engin lui-même, convaincu que l'innovation pouvait s'affranchir des règles.

Direction : 3 800 mètres de profondeur. Le Titanic. Le mythe. Le cimetière.

À l'intérieur, pas de hublots multiples, pas de tableau de bord futuriste. Une coque en matériaux composites. Une manette de jeu vidéo pour piloter. Et une foi presque religieuse dans la technologie « différente ». Trop différente.

Moins de deux heures après le début de la descente, le silence. Plus de signal. Plus de voix. À la surface, l'angoisse explose. Les écrans du monde entier s'illuminent. On parle d'oxygène, de compte à rebours, de sauvetage impossible mais espéré.

En réalité, tout est déjà terminé.

Quelque part dans l'obscurité totale, la pression — 400 fois celle de l'air — fait ce qu'elle a toujours fait. Elle écrase. Elle ne négocie pas. La coque cède en une fraction de seconde. Une implosion instantanée. Pas de lutte. Pas de panique. Juste la fin.

Les débris seront retrouvés près de l'épave du Titanic. À quelques centaines de mètres. Comme une ironie cruelle. Un naufrage moderne venu rejoindre le plus célèbre de l'histoire.

Ils voulaient contempler un fantôme. Ils sont devenus les suivants. Car sous la mer, la guerre, l'exploration et l'orgueil humain ont un point commun : l'océan finit toujours par gagner.

3.2 L'alchimie de l'air : respirer de l'eau de mer

Dans un sous-marin nucléaire, l'oxygène ne provient pas de bouteilles de stockage, mais de l'océan lui-même.

- **L'électrolyse** : grâce à l'énergie inépuisable du réacteur, on fait passer un courant électrique dans de l'eau de mer purifiée. Cette réaction décompose la molécule d'eau (H₂O) en hydrogène et en oxygène. L'hydrogène est rejeté à la mer, tandis que l'oxygène est injecté dans le bord.
- **Le piège à gaz** : le défi n'est pas seulement d'apporter de l'oxygène, mais d'éliminer le dioxyde de carbone (CO₂) expiré. On utilise pour cela des "scrubbers" (laveurs de CO₂) ou des résines spéciales.
- **L'anecdote du "test de la flamme"** : les sous-marinières racontent souvent que l'on s'habitue à des taux de CO₂ bien plus élevés que sur Terre. Il arrivait autrefois que l'équipage ne se rende compte d'un dysfonctionnement que lorsqu'il devenait impossible d'allumer un briquet ou une allumette

dans le carré des officiers : l'air était devenu trop pauvre pour la combustion, mais les poumons continuaient de lutter.

Le saviez-vous ?

Vie: air et eau

L'oxygène est recyclé... comme dans l'espace: dans un sous-marin, l'air est recyclé en permanence. Des machines, appelées "scrubbers", éliminent le CO₂, tandis que des générateurs d'oxygène produisent ce gaz vital à partir d'eau. Une technologie similaire à celle des stations spatiales !

Respirer grâce à des bougies : en cas de panne du système principal, les sous-mariniens utilisent des "bougies à oxygène" (chlorate de sodium). En brûlant, ces cartouches ne produisent pas de lumière, mais dégagent de l'oxygène pur par réaction chimique. Une seule bougie peut maintenir en vie une dizaine d'hommes pendant plusieurs heures.

L'eau douce vient de l'eau salée : l'eau potable est produite à bord par distillation ou osmose inverse. Elle sert à boire, cuisiner... mais pas à se laver librement. Les douches sont chronométrées, et chaque goutte compte. On apprend vite à se laver en mode "commando".

3.3 L'eau douce : le luxe du dessalement

L'eau est l'ennemie du sous-marin à l'extérieur, mais sa sève à l'intérieur. Un bâtiment comme le *Suffren* produit plusieurs dizaines de tonnes d'eau douce par jour via des bouilleurs ou l'osmose inverse.

- **Priorité à la machine :** l'eau la plus pure est réservée au circuit primaire du réacteur nucléaire.
- **La discipline des douches :** pour l'équipage, l'eau est théoriquement illimitée, mais la tradition impose une gestion stricte. Sur les anciens SNA de la classe *Rubis*, l'espace était si réduit que les douches étaient chronométrées. Une anecdote célèbre veut que lors des premières patrouilles de longue durée, les marins utilisaient des savons spéciaux dits "eau de mer" qui ne moussaient presque pas, une expérience irritante pour la peau et le moral.

3.4 La vie quotidienne : "le rythme des tiers" et la gastronomie

Sans alternance jour/nuit, le cerveau perd ses repères. Pour compenser, la vie est réglée comme une horloge atomique.

- **Les quarts :** la journée est divisée en roulements. Un marin travaille 4 heures, assure l'entretien ou la formation pendant 4 heures, et dort 4 heures. Ce cycle immuable brise la notion de semaine ou de week-end. Pour signifier le passage au soir, les lumières du bord passent au rouge dans les zones de vie : cela prépare les yeux à une éventuelle utilisation du périscope et aide le corps à sécréter de la mélatonine.
- **La table : le moral du bord :** on dit souvent que "le cuisinier est le deuxième homme le plus important après le commandant". La nourriture est le seul plaisir sensoriel restant. Les sous-marins français sont réputés pour avoir les meilleures tables de la marine : pain frais pétri chaque nuit, pâtisseries et plats élaborés.

- **L'anecdote des "vivres frais"** : en début de mission, le sous-marin est un garde-manger géant. Des cageots de fruits et légumes sont stockés jusque dans les coursives. Les marins doivent parfois littéralement "marcher sur les pommes de terre" pendant les trois premiers jours, le temps que la place se libère dans les cales.

2012	James Cameron, explorateur des abysses 2012 – Le roi du monde... sous-marin Le réalisateur de Titanic et Avatar, James Cameron, n'est pas seulement un maître du cinéma. En 2012, il est devenu le premier homme à descendre en solo à près de 11 000 mètres de profondeur, dans la fosse des Mariannes, à bord du Deepsea Challenger. Un exploit qui a permis de ramener des images, des données et des spécimens uniques pour la science. Cameron a prouvé que les sous-marins ne servent pas qu'à la guerre : ils sont aussi des outils d'exploration et de découverte.
-------------	---

Le saviez-vous ?	Vie quotidienne L'espace, une denrée rare: dans un sous-marin, chaque centimètre carré est optimisé. Les couchettes sont souvent superposées, et les espaces de rangement sont limités. Un conseil : rangez vos affaires dans des sacs souples plutôt que des valises rigides pour gagner de la place ! La nourriture, un moral en boîte : les repas à bord sont souvent lyophilisés ou en conserve, mais les cuisiniers font des miracles ! Attendez-vous à des plats réconfortants comme des ragoûts, des pâtes, et même... des glaces (grâce aux congélateurs). Et oui, on mange bien, même sous l'eau ! Pas de douche quotidienne: l'eau douce est précieuse et rationnée. Les douches sont limitées à quelques minutes par semaine, et l'eau est souvent recyclée. Prévoyez des lingettes et du savon sans rinçage pour rester frais entre deux douches !
-------------------------	---

3.5 La mixité à bord : une révolution nécessaire

Longtemps resté le dernier bastion exclusivement masculin de l'armée, le sous-marin s'est ouvert aux femmes (en France depuis 2018 sur les SNLE, puis les SNA).

Aménagements : La mixité impose des défis dans un espace où chaque centimètre carré compte. Des aménagements ont été nécessaires pour garantir l'intimité (postes de couchage et sanitaires séparés). Au-delà de l'aspect matériel, c'est une évolution culturelle majeure qui permet de recruter les meilleurs talents, quel que soit leur genre.

3.6 L'Humain au cœur du système : les deux équipages

Pour rentabiliser ces machines extrêmement coûteuses, la Marine nationale utilise le système du double équipage (Équipage Bleu et Équipage Rouge).

Le Relais : Pendant qu'un équipage est en mer pour une mission (environ 3 à 4 mois), l'autre est en période de permission, d'entraînement sur simulateur ou d'entretien du bâtiment à la base. Ce roulement permet au sous-marin de rester à la mer près de 200 jours par an, optimisant ainsi la disponibilité opérationnelle.

3.7 La solitude de la "boîte de conserve"

Le silence radio est absolu. Un SNLE en mission ne transmet jamais, il ne fait qu'écouter. Les familles peuvent envoyer de courts messages (les "familigrammes"), mais le marin ne peut pas répondre.

Le "Bruit du Silence" : Dans un SNA en traque, l'équipage porte des chaussons ou des chaussures à semelles de gomme. On ne ferme pas une porte, on "l'accompagne". Faire tomber une clé à molette sur le pont peut être capté par un sonar ennemi à plusieurs milles de distance. C'est cette tension permanente entre le confort douillet du carré et la menace invisible du milieu qui forge le caractère unique des "Chevaliers du Silence".

3.8 L'élite humaine : la sélection et la vie en immersion

La technologie la plus avancée ne vaut que par les femmes et les hommes qui l'opèrent. La vie à bord d'un sous-marin est une expérience de confinement et de discipline intellectuelle unique.

Le recrutement et la formation

Les marins sous-marinières sont triés sur le volet après des tests psychologiques rigoureux. L'isolement total (pas d'Internet, pas de téléphone, des messages familiaux de quelques mots seulement par semaine) exige une grande stabilité émotionnelle. Chaque membre d'équipage doit être un expert dans sa spécialité (nucléaire, acoustique, armement) tout en étant capable de réagir à une avarie majeure (incendie ou voie d'eau) dans un espace restreint.

La perception acoustique : les Oreilles d'Or

Dans cet univers sonore, certains officiers marinières spécialisés, les analystes en acoustique ou "Oreilles d'Or", sont capables d'identifier à l'oreille le type de navire, sa vitesse, et parfois même le nom spécifique d'une unité à travers les bruits de sa ligne d'arbre ou de ses auxiliaires. Ils sont les yeux du commandant dans les ténèbres abyssaux.

Le saviez-vous ?

Vie à bord

Les sous-marinières vivent sans soleil pendant des mois : certains sous-marins nucléaires restent en plongée plus de 90 jours. Sans lumière naturelle, l'équipage suit un rythme artificiel de 18 heures de "jour" et 6 heures de "nuit" pour éviter les troubles du sommeil.

Les équipages de sous-marins vivent **sans notion du jour et de la nuit**. L'éclairage artificiel et le rythme opérationnel remplacent le cycle naturel. Le temps est mesuré en quarts, pas en heures, ce qui modifie profondément la perception humaine du quotidien.

L'odeur du retour: l'odorat est le sens le plus malmené à bord. À cause du recyclage de l'air, des vapeurs de cuisine, du gasoil et de l'absence de douches quotidiennes, une odeur unique imprègne les vêtements et la peau. Les

familles de sous-mariniers reconnaissent souvent leur proche à cette "odeur de bord" caractéristique.

La gestion des déchets, un écosystème fermé : dans un sous-marin, chaque déchet est traité ou stocké. Les eaux usées sont purifiées par des systèmes de filtration biologique et chimique, tandis que les déchets solides sont compactés et stockés jusqu'au retour à la base. Certains sous-marins nucléaires utilisent même des incinérateurs pour réduire le volume des déchets.



Affiche amusante de sous-marin en coupe montrant ce qui se passe "vraiment" à bord d'un sous-marin.
Source : Submarine poster shop - Etsy

3.9 L'exigence de compétence : un équipage d'élite

Dans un espace souvent plus restreint que sur les SNA, la promiscuité est totale, mais l'efficacité doit être chirurgicale.

- L'absorption des données : le système tactique reste aussi complexe que sur un navire nucléaire. Les officiers et les analystes doivent emmagasiner et traiter des flux constants d'informations acoustiques et électromagnétiques. La capacité d'analyse humaine reste le dernier rempart contre l'incertitude du combat.
- La connaissance du bord : il est bluffant de constater qu'un Commandant de sous-marin connaît chaque vanne, chaque tableau électrique et chaque tuyauterie de son bâtiment. Dans un milieu où une simple fuite peut devenir une catastrophe en quelques secondes, cette connaissance intime de la "machine" permet de prendre des décisions instantanées sous pression. Chaque recoin du SM est mémorisé, car dans l'obscurité d'une avarie, c'est cette carte mentale qui sauve l'équipage.



Partie 3: LA MÉCANIQUE DES ABYSSES – Physique et Architecture

Pour le passionné de technique : comment on flotte, comment on plonge, du réacteur nucléaire aux propulsions hybrides AIP.

1864
1939

BIOGRAPHIE

Maxime Laubeuf – Pionnier français en architecture de SM

Il fut un ingénieur du Génie maritime français dont les travaux fondent l'architecture des sous-marins modernes. Polytechnicien formé à l'ENSTA, il commence sa carrière au service des constructions navales à Brest, où il étudie les premiers submersibles expérimentaux avant de proposer une solution technique radicale : une **double coque** structurée autour d'une coque intérieure résistante à la pression et d'une coque extérieure optimisée pour la navigation de surface. Ce concept résout simultanément les contraintes hydrodynamiques en surface et les contraintes structurales en immersion, marquant une étape décisive dans la conception des submersibles militaires.

Son projet retenu lors du concours naval de 1896 aboutit à la construction du Narval, lancé en 1899 à Cherbourg, combinant un système de propulsion hybride (machine thermique pour la surface, moteur électrique pour la plongée) et une flottabilité contrôlée par double coque : innovations qui servent de modèle aux sous-marins jusqu'au milieu du XX^e siècle.

Outre ses réalisations techniques, Laubeuf contribue à la diffusion de la discipline : il participe à la structuration des enseignements d'architecture des sous-marins et est élu à l'Académie des sciences en 1920.

Dans la continuité de cette tradition d'ingénierie navale, l'Inspecteur général de l'armement **Marc Menez** s'est fait connaître dans les années récentes comme consultant spécialisé sous-marin au sein du groupe Thales, apportant une expertise précieuse sur les systèmes embarqués et les interfaces d'architecture pour les marchés export de matériels sous-marins. Son rôle de consultant favorisa le lien entre conception technique et exigences stratégiques commerciales à l'export, renforçant l'influence française dans les programmes internationaux de sous-marins modernes.

Chapitre 1 : La physique de l'immersion – Naviguer dans l'équilibre et le silence

Naviguer sous l'eau est un défi permanent contre deux forces : la gravité et l'opacité. Contrairement à une idée reçue, le sous-marin ne « vole » pas dans l'eau comme un avion ; il y « flotte » en équilibre précaire.

1.1 L'aérostat des mers : la pesée et l'assiette

Pour comprendre le mouvement d'un sous-marin, il faut oublier l'aile de l'avion et penser au ballon dirigeable. Un avion utilise sa vitesse pour créer une portance ; s'il s'arrête, il tombe. Le sous-marin, lui, recherche la flottabilité nulle.

- **Les Ballasts** : ce sont de grands réservoirs situés entre la coque épaisse et la coque mince. Pour plonger, on ouvre les purges pour chasser l'air et remplir les ballasts d'eau : le sous-marin devient plus lourd que le volume d'eau déplacé.
- **Les Régleurs** : une fois en immersion, le réglage fin se fait via les régleurs. Ce sont des caisses internes où l'on ajuste la quantité d'eau au litre près pour compenser les variations de poids (consommation des vivres, tir de missiles, changement de salinité de l'eau).
- **Les Caisses d'Assiette** : situées à l'avant et à l'arrière, elles permettent de basculer l'engin pour qu'il reste parfaitement horizontal. Un sous-marin mal pesé "pique du nez" ou "culotte", rendant sa conduite instable.

1.2 La physique de l'immersion – Naviguer entre équilibre et pression

La navigation sous-marine repose sur deux lois fondamentales qui régissent tout corps immergé : les principes de Pascal et d'Archimède.

Le principe de Pascal : la résistance à l'écrasement

Le principe de Pascal établit que plus on descend, plus la pression augmente.

- **Action de la pression** : elle s'exerce perpendiculairement à la surface du corps, dirigée vers l'intérieur.
- **Valeur** : elle est égale, en bars, au nombre de dizaines de mètres d'immersion (ex : 10 bars à 100 mètres).
- **La coque épaisse** : pour protéger l'équipage, le sous-marin possède une coque en acier très résistant dont l'épaisseur est calculée selon l'immersion maximale. Pour gagner 100 mètres de profondeur, il faut épaissir la coque d'environ 10 mm.
- **Éléments en équipression** : les ballasts et soutes extérieurs sont en communication avec la mer ; les pressions s'équilibrent, permettant l'usage de tôles minces (5 à 10 mm).

Le principe d'Archimède : la flottabilité

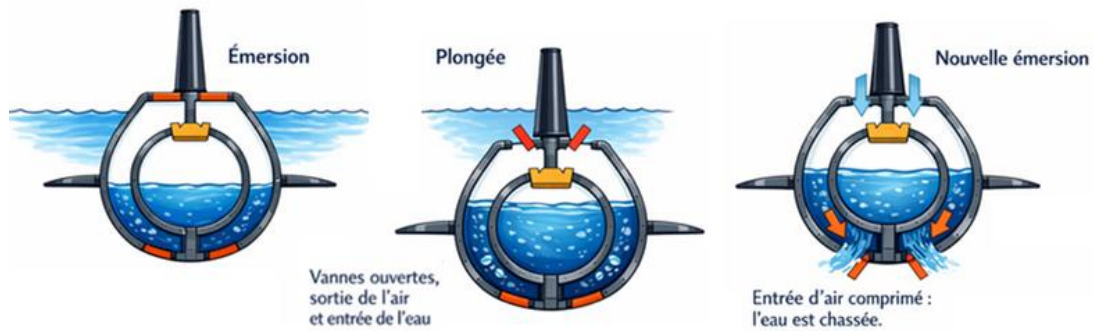
Tout corps plongé dans un liquide reçoit une poussée verticale dirigée vers le haut, égale au poids du volume de liquide déplacé. Le sous-marin est donc le théâtre d'un duel entre deux forces :

- **Le Poids (P)** : appliqué au centre de gravité (G), il tire le navire vers le bas.
- **La Poussée (C)** : appliquée au centre du volume immergé, elle le pousse vers le haut.

Le pilotage de la flottabilité : les ballasts

Le passage de la surface à la plongée se fait par le transfert de masses liquides.

- **En surface** : les ballasts sont vides d'eau ; le poids du volume d'eau déplacé est égal au poids du navire.
- **La prise de plongée** : on ouvre les purges pour chasser l'air et laisser entrer l'eau. Le sous-marin s'alourdit et s'enfonce jusqu'à l'immersion totale.
- **Le retour en surface (Chasser)** : on injecte de l'air comprimé pour vider l'eau des ballasts. Le bâtiment devient "léger" et remonte.



Remplissage, réglage et purge des ballasts

1.3 La stabilité statique : pesée, assiette et gîte

Une fois en immersion, le sous-marin doit rester horizontal et stable. On dit qu'il navigue "entre deux eaux".

1. **La Pesée** : opération consistant à ajuster le poids du bâtiment pour obtenir l'égalité stricte Poids = Poussée. Elle se réalise via des caisses à eau spécifiques nommées "régleurs".
2. **L'Assiette** : c'est l'inclinaison longitudinale (avant/arrière). Si le sous-marin est trop chargé à l'arrière, l'assiette est positive. On la corrige grâce aux caisses d'assiette.
3. **La Gîte** : c'est l'inclinaison transversale (babord/tribord), causée par une mauvaise répartition latérale des masses.
4. **La Stabilité** : pour qu'un sous-marin revienne seul en position horizontale, les installations les plus lourdes sont placées le plus bas possible afin d'abaisser le centre de gravité au maximum.

Le saviez-vous ?

Coque du sous-marin

La résistance des coques, un défi de métallurgie extrême: les coques des sous-marins nucléaires sont fabriquées en acier HLES (Haute Limite Élastique Spéciale), comme le HLES 100, capable de résister à des contraintes dépassant 1 000 MPa. Ces alliages sont traités thermiquement pour éviter la fragilisation par l'hydrogène, un risque majeur en milieu marin profond.

Le sel ronge le fer: les coques de sous-marins en acier sont constamment attaquées par la corrosion saline. Pour y résister, elles sont recouvertes de peintures spéciales et parfois de revêtements anéchoïques (tuiles qui absorbent les ondes sonores). Mais même ces protections s'usent : un sous-marin laissé trop longtemps à quai peut devenir plus vulnérable qu'en patrouille.

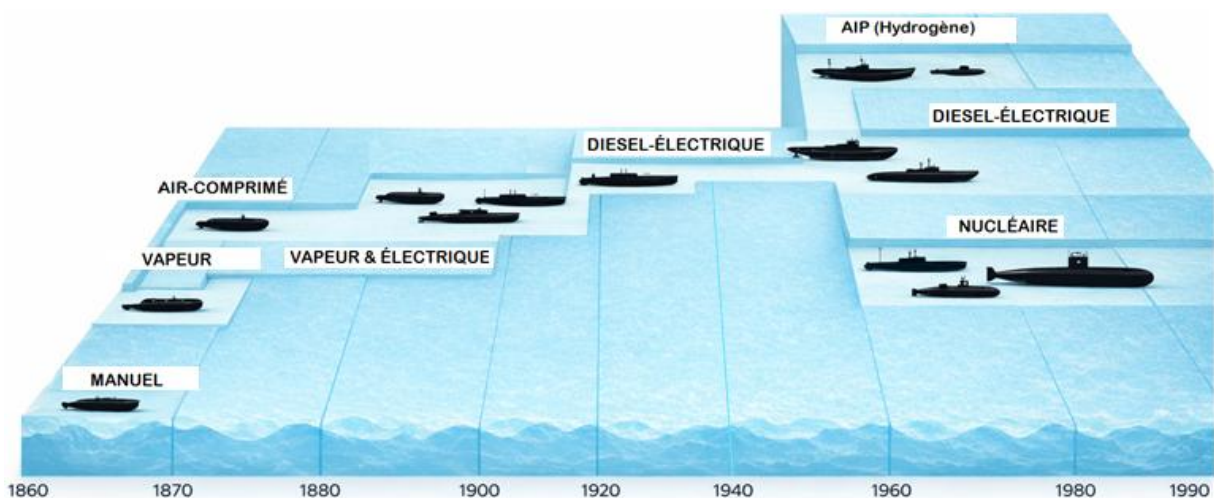
Une pression à faire implorer un ballon : à 300 mètres de profondeur, la

pression est 30 fois supérieure à celle de la surface. Un sous-marin doit résister à une force capable d'écraser un ballon d'acier comme une feuille de papier. Leur coque, en acier spécial, peut supporter jusqu'à 1 000 mètres !

L'**anode sacrificielle** protège la coque en s'oxydant à sa place. Composée de zinc, d'aluminium ou de magnésium, elle se corrodé préférentiellement dans l'eau de mer. Ce "bouclier chimique" détourne la corrosion galvanique et prolonge la vie des structures métalliques immergées.

1.4 Mode de propulsion des sous-marins

Après avoir exploré au fil du temps une grande variété de modes de propulsion – allant des moteurs à vapeur aux premiers systèmes thermiques embarqués – les sous-marins modernes reposent aujourd'hui sur trois grandes familles de solutions. Les bâtiments classiques utilisent le groupe diesel-électrique, combinaison éprouvée où le moteur diesel recharge des batteries alimentant la propulsion en plongée. Les sous-marins nucléaires, eux, disposent d'une véritable mini-centrale embarquée, offrant une autonomie presque illimitée et une endurance sans équivalent. Plus récemment, les marines ont adopté des systèmes AIP (Air Independent Propulsion), souvent basés sur l'hydrogène ou des piles à combustible, permettant de rester immergé plusieurs semaines sans remonter pour recharger, tout en conservant une signature acoustique extrêmement faible.



Évolution des modes de propulsion des sous-marins

La distinction entre les flottes mondiales repose sur le mode de propulsion. Si de nombreux pays (environ 40) opèrent des sous-marins conventionnels (Diesel-Électrique ; comprenez : groupe électrogène, proche du mode hybride des voitures), seuls cinq membres permanents du Conseil de Sécurité de l'ONU (Chine, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France et Royaume-Uni), ainsi que l'Inde et bientôt le Brésil, maîtrisent la propulsion nucléaire.

L'avantage majeur du nucléaire est l'autonomie quasi illimitée. La seule limite est la résistance de l'équipage et le stockage des vivres. Un réacteur nucléaire naval fonctionne sur le même principe qu'une centrale terrestre : la fission de l'uranium produit de la chaleur, qui génère de la vapeur, faisant tourner des turbines.

Le saviez-vous ?

Propulsion

Les réacteurs nucléaires, une centrale en miniature : les sous-marins nucléaires embarquent des réacteurs à eau pressurisée (REP) de quelques mégawatts, capables de fonctionner pendant des décennies avec un seul cœur de combustible. Ces réacteurs sont conçus pour résister aux chocs, aux variations de pression et aux radiations, tout en produisant de la vapeur pour les turbines.

Le diesel peut être plus furtif: contre-intuitivement, certains sous-marins à propulsion diesel-électrique sont plus discrets que les nucléaires. Lorsqu'ils fonctionnent sur batteries, ils n'émettent presque aucun bruit. Les modèles AIP (Air Independent Propulsion) peuvent rester immergés des semaines sans faire surface, devenant des chasseurs silencieux dans les eaux côtières.

La propulsion anaérobie, une révolution discrète: les sous-marins conventionnels modernes utilisent des systèmes AIP (Air-Independent Propulsion), comme les piles à combustible ou les moteurs Stirling. Ces technologies permettent de rester en plongée pendant plusieurs semaines sans faire surface, en produisant de l'électricité à partir de diesel ou d'hydrogène stocké.

1.5 Un pilotage en trois dimensions

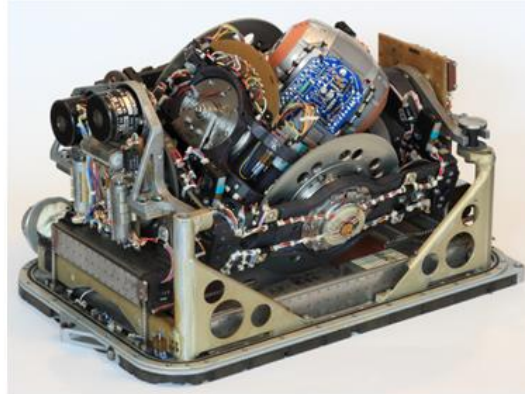
Position du sous-marin

Si la propulsion a connu de telles évolutions, la navigation sous-marine a elle aussi profondément changé. Contrairement aux voiliers d'antan, capables de se repérer grâce aux étoiles ou à l'horizon, un sous-marin plongé dans les profondeurs ne peut compter sur aucun repère extérieur. Sa position est donc estimée grâce à une **centrale inertielle**, un ensemble de gyroscopes et d'accéléromètres d'une précision remarquable. Ces capteurs enregistrent en continu les moindres mouvements du bâtiment – rotations, accélérations, variations d'assiette – et additionnent ces données pour déduire la position actuelle. Cette méthode, appelée navigation inertielle, permet au sous-marin de « s'imaginer » dans l'espace, même isolé du monde extérieur, et de poursuivre sa mission en toute discrétion.

La centrale à inertie d'un sous-marin a un rôle essentiel : fournir en permanence la position, la vitesse et la route du bâtiment, même en plongée profonde, sans aucune aide extérieure. Son principe repose sur trois gyroscopes ultra-précis, orientés selon les trois axes du sous-marin, associés à des accéléromètres. En mesurant en continu les rotations et les accélérations, la centrale calcule la trajectoire par intégration mathématique : c'est la navigation inertielle.

Ce système présente un avantage majeur : il est totalement autonome, indétectable et impossible à brouiller. Mais il possède aussi une faiblesse : la dérive. De minuscules erreurs de mesure, inévitables même avec des capteurs de très haute qualité, s'accumulent progressivement et entraînent une incertitude croissante sur la position réelle du sous-marin.

Pour maintenir la précision, la centrale doit être recalée régulièrement. Ce recalage peut se faire en surface grâce au GPS, mais aussi en plongée à partir de points fixes acoustiques, de cartes bathymétriques ou de mesures opportunistes (fonds, reliefs, anomalies). Une fois corrigée, la centrale retrouve une précision remarquable et permet au sous-marin de poursuivre sa mission en restant parfaitement discret.



Centrale à inertie : un bijou de technologie électro-mécanique compacte

Gouvernes

Les sous-marins disposent d'un ensemble d'appendices extérieurs qui assurent leur contrôle en immersion comme en surface. Parmi eux, les **barres de plongée** jouent un rôle essentiel : situées à l'avant (barres d'étrave) ou à l'arrière, elles orientent le bâtiment vers le haut ou vers le bas. En modifiant leur incidence, l'équipage ajuste la profondeur et l'assiette, exactement comme les plans horizontaux d'un avion.

Le **safran**, gouverne verticale placée à l'arrière, permet de faire virer le sous-marin à gauche ou à droite. Il fonctionne comme un gouvernail classique, mais dans un environnement où la finesse hydrodynamique et la discrétion sont primordiales.

L'ensemble de ces surfaces mobiles forme les **gouvernes**, dont la disposition varie selon les modèles. La configuration traditionnelle est celle en **croix (+)** : deux plans horizontaux (barres de plongée arrière) et deux plans verticaux (safran et contre-safran). Cette architecture simple et robuste équipe encore de nombreux sous-marins. Une alternative plus récente est la configuration en **X**, où quatre gouvernes inclinées remplacent la croix classique. Ce dispositif offre une meilleure manœuvrabilité, une redondance accrue en cas d'avarie et une signature acoustique plus discrète, au prix d'une commande plus complexe.

À ces appendices s'ajoutent les **ballasts**, qui règlent la flottabilité, ainsi que divers plans stabilisateurs. Ensemble, ces dispositifs permettent au sous-marin de se déplacer en trois dimensions avec une précision remarquable, tout en conservant la discrétion indispensable à sa mission.

Pilotage

Le poste de pilotage, souvent appelé "centrale", ressemble à un cockpit d'avion de ligne, mais avec des fonctions dédoublées. Le pilotage se fait généralement à deux :

- **Le barreur de direction** : il gère le cap (gauche/droite) à l'aide d'un manche ou d'un volant agissant sur les safrans verticaux.
- **Le barreur de profondeur** : il gère l'immersion et l'inclinaison. Il utilise les barres de plongée (horizontales) pour faire monter ou descendre l'engin.

- **La coordination** : contrairement à l'avion, la vitesse influe sur l'efficacité des barres. À basse vitesse, le sous-marin est mou ; il faut alors jouer sur la "pesée" (pomper ou chasser de l'eau) pour changer d'altitude, comme un aviateur jetterait du lest.



Un poste de pilotage de sous-marin

La recherche de la "zone de discrétion"

Le pilotage ne consiste pas seulement à aller d'un point A à un point B. C'est une traque perpétuelle de l'environnement favorable. Le commandant cherche sans cesse à placer son bâtiment dans une zone où sa propre détection est minimale tout en maximisant sa capacité d'écoute. C'est ce qu'on appelle la "lutte pour l'immersion". On ajuste la profondeur non pas pour le paysage, mais pour trouver le silence ou l'opacité thermique.

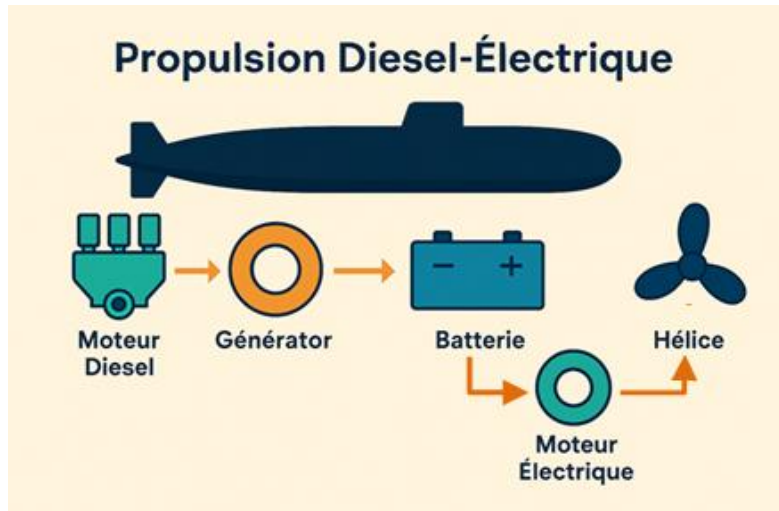
Chapitre 2 : Sous-marin conventionnel (SSK) – L'art de l'énergie et de la discrétion

Bien que les grandes puissances misent largement sur la propulsion nucléaire, le sous-marin conventionnel (SSK) n'a rien d'un bâtiment de seconde zone. Plus abordable à l'achat comme à l'entretien, il impose en revanche à son équipage une discipline et une gestion de l'énergie d'une rigueur extrême : chaque déplacement se mesure en ampères consommés, chaque heure passée en plongée dépend de l'oxygène disponible et de la sobriété énergétique du bord.

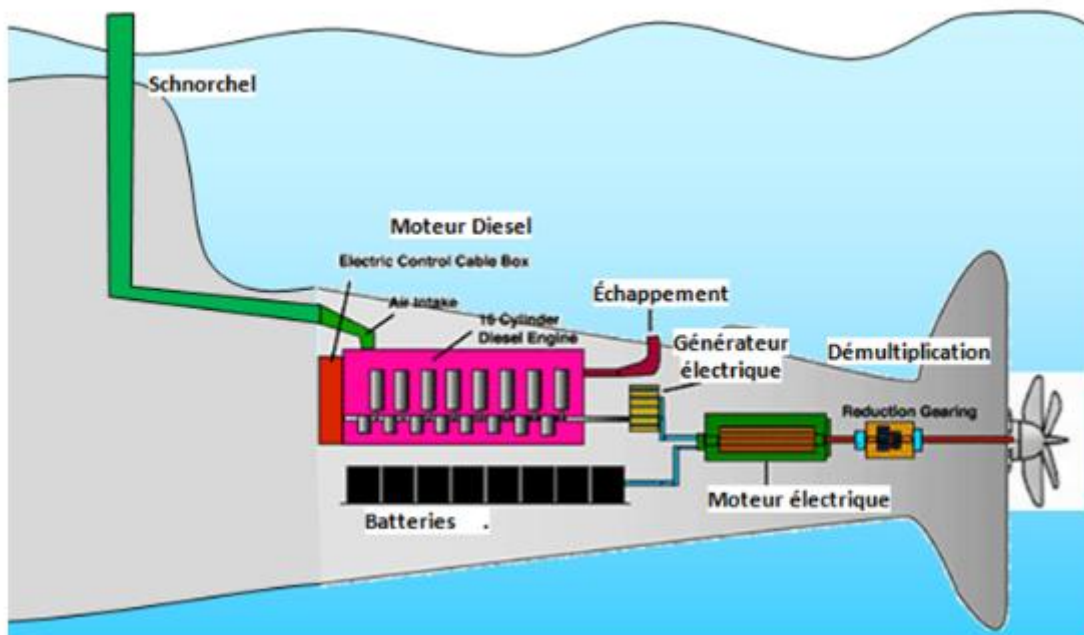
Là où le sous-marin nucléaire incarne le sprinteur d'endurance, capable de filer à grande vitesse pendant des semaines, le SSK — désigné par le code OTAN *Sub-Surface Killer* — joue le rôle du prédateur patient. Silencieux, discret, optimisé jusqu'au moindre watt, il excelle dans l'attente, l'embuscade et l'approche furtive. Sa conception relève de l'art de l'efficacité : chaque kilowatt est compté, chaque choix technique vise à prolonger l'immersion, réduire la signature acoustique et maximiser l'effet de surprise.

2.1 L'architecture énergétique : le cœur électrique

Le SSK repose sur un système de propulsion hybride. Contrairement à une idée reçue, ce n'est pas le moteur Diesel qui fait tourner l'hélice en plongée, mais exclusivement le moteur électrique de propulsion (MEP).



Principe de la propulsion Diesel-électrique



Implantation du système Diesel-électrique dans le sous-marin


Le stockage : les batteries

Le fond de la coque épaisse est tapissé de centaines d'éléments de batteries (souvent au plomb, désormais de plus en plus au lithium-ion). Ces batteries sont le réservoir de vie du navire. Elles alimentent tout : de l'hélice aux systèmes de survie (régénération de l'oxygène), en passant par les consoles de combat.

La génération : les groupes électrogènes Diesel

Les moteurs Diesel ne servent qu'à une seule tâche : entraîner des alternateurs pour transformer le gasoil en électricité afin de remplir les batteries. Ce processus, appelé la charge, est la contrainte absolue du commandant de SSK.

2.2 Le Schnorchel : le cordon ombilical et vulnérabilité

1920 	Le sous-marin qui a inventé... le schnorkel moderne On croit souvent que le schnorchel — ce mât permettant aux sous-marins diesel de respirer en immersion périscopique — est une invention allemande de la Seconde Guerre mondiale. En réalité, les premiers prototypes datent des années 1920 aux Pays-Bas. Les ingénieurs néerlandais, fascinés par les baleines, avaient imaginé un “tuyau respiratoire” inspiré du souffle des cétacés. L'Allemagne l'a perfectionné, mais l'idée venait d'ailleurs.
--	---

Pour faire fonctionner ses moteurs Diesel, le sous-marin a besoin d'une quantité massive d'oxygène et d'un exutoire pour ses gaz d'échappement. C'est le rôle du schnorchel (*Illustration*).

Le fonctionnement technique

Lorsqu'il arrive à l'immersion périscopique (environ 12 à 15 mètres sous la surface), le sous-marin hisse un tube télescopique. Ce tube possède un clapet de tête à flotteur : si une vague recouvre le tube, le clapet se ferme hermétiquement pour éviter d'inonder les moteurs.

L'effet de dépression : Si le clapet se ferme alors que les moteurs tournent, ces derniers aspirent l'air à l'intérieur du bord. La pression atmosphérique chute brutalement dans le sous-marin, provoquant des douleurs aux tympans pour l'équipage.

La signature physique

Le schnorchel est le "talon d'Achille" du SSK. Bien que recouvert de matériaux absorbant les ondes radar (RAM), il crée un sillage visuel et thermique (gaz d'échappement chauds) détectable par les avions de patrouille maritime équipés de radars à haute résolution ou de capteurs de molécules de carbone (renifleurs).



2.3 Le taux d'indiscrétion : le calcul de survie

La gestion d'un SSK est une partie d'échecs contre le temps. Les officiers de navigation et de propulsion surveillent en permanence le taux d'indiscrétion.

Définition : c'est le ratio entre le temps passé en exposition (schnorchel sorti pour la charge) et le temps total de la mission.

$$\text{Taux d'indiscrétion} = \frac{\text{Temps de charge}}{\text{Temps de patrouille}}$$

Un sous-marin moderne cherche à maintenir ce taux sous la barre des 10 à 15%. Si le bâtiment doit naviguer vite pour rejoindre une zone de tir, il vide ses batteries rapidement et doit naviguer au schnorchel plus souvent, augmentant le risque d'être repéré. À l'inverse, à basse vitesse (3-4 nœuds), il peut rester totalement invisible pendant plusieurs jours.

2.4 L'équilibre physique : Pesée et Assiette

Pour rester entre deux eaux sans utiliser ses moteurs (ce qui ferait du bruit), le sous-marin doit être en équilibre statique parfait.

La pesée : il s'agit d'ajuster le poids du sous-marin pour qu'il soit rigoureusement égal à la poussée d'Archimède. On utilise pour cela des caisses de réglage situées au centre du navire, que l'on remplit ou vide d'eau.

L'assiette : pour que le sous-marin soit bien horizontal, on transfère de l'eau entre les caisses d'assiette situées à l'avant et à l'arrière.

La compression de la coque : en descendant en profondeur, la pression écrase légèrement la coque épaisse. Le volume du sous-marin diminue, donc la poussée d'Archimède baisse. Le sous-marin devient "plus lourd" et a tendance à couler plus vite. Il faut alors chasser un peu d'eau pour compenser.

Le saviez-vous ?

Pesée du sous-marin

Le sous-marin ne flotte pas toujours : contrairement à ce qu'on imagine, un sous-marin ne "nage" pas comme un bateau. Il ajuste sa flottabilité en remplissant ou vidant ses ballasts. En plongée, il est en équilibre instable, suspendu dans l'eau comme un dirigeable dans l'air.

Le contrôle de la flottabilité, une danse avec la physique : la flottabilité d'un sous-marin est ajustée en temps réel grâce à des ballasts et des réservoirs de compensation. Un système de pompes et de valves permet de gérer le poids de l'eau embarquée avec une précision de l'ordre du kilogramme, essentiel pour maintenir une profondeur stable.

Un sous-marin peut "tomber" comme une pierre : si un sous-marin perd sa flottabilité (par exemple à cause d'une fuite), il peut couler verticalement à une vitesse folle, jusqu'à 100 km/h. Les équipages s'entraînent à réagir en quelques secondes pour éviter le pire.

L'eau douce est un obstacle : un sous-marin pèse plus lourd dans l'eau douce que dans l'eau salée ! L'eau de mer est plus dense ; elle offre donc une meilleure poussée d'Archimède. En passant d'un océan à un fleuve (comme l'Amazone), le sous-marin doit vider ses ballasts pour ne pas couler comme une pierre.

2.5 L'AIP (Air Independent Propulsion) : la révolution silencieuse

Pour pallier la faiblesse du schnorchel, les innovations récentes intègrent des systèmes de propulsion anaérobie (AIP).

Ces systèmes (piles à combustible ou moteurs à cycle fermé) permettent de produire de l'électricité sans air extérieur. Grâce à des réserves d'oxygène liquide et d'hydrogène stockées à bord, le SSK peut rester en immersion totale, sans jamais remonter au périscope, pendant deux à trois semaines. Cela transforme le SSK en un quasi-nucléaire pour la phase d'approche tactique.

2.6 La vie à bord : une promiscuité programmée

La physique du SSK impose un volume restreint. La majeure partie de l'espace est occupée par les machines et les armes.

L'eau douce : produite en quantité limitée, elle est réservée à la cuisine et à la propulsion. Les douches sont rares, voire interdites en mission longue.

L'atmosphère : en plongée, le taux de O_2 augmente. On utilise des "chandelles à oxygène" ou des absorbeurs chimiques pour maintenir l'air respirable, mais la fatigue physique liée au confinement est un paramètre que le commandement doit gérer.

2.7 La position de la France : l'excellence conventionnelle

Bien que la Marine Nationale française soit passée au "tout nucléaire" pour ses propres besoins, la France reste l'un des leaders mondiaux de la construction de SSK via Naval Group qui est un des leaders mondiaux de la vente aux marines étrangères.

Le savoir-faire français se distingue par :

1. **L'hydrodynamisme** : des coques en "goutte d'eau" limitant les bruits d'écoulement.
2. **La discrétion acoustique** : l'utilisation de suspensions élastiques pour tous les moteurs, afin qu'aucune vibration ne se propage à la coque et donc à la mer.
3. **L'intégration système** : la capacité à loger des missiles de croisière (SM39) dans des tubes de torpilles de 533mm, donnant à un petit navire une puissance de frappe stratégique.

Conclusion

Le SSK est l'arme du pauvre contre le riche, et l'arme de l'élite contre le puissant. Sa capacité à se transformer en "caillou" acoustique, immobile et silencieux sur le fond de la mer, en fait le cauchemar des plus grandes flottes de surface. Mais cette efficacité reste suspendue à un fil : la jauge d'énergie de ses batteries.

Chapitre 3 : Les géants de l'atome – SNA et SNLE

1955

ANECDOTE

Le premier sous-marin nucléaire : un monstre sous les mers

En 1955, les États-Unis lâchent un monstre silencieux dans les océans : le **USS Nautilus**. Premier sous-marin à propulsion nucléaire, il bouleverse à jamais l'équilibre militaire mondial. Là où les anciens submersibles devaient remonter régulièrement à la surface, le Nautilus pouvait rester des mois entiers sous l'eau.

Son réacteur nucléaire lui offrait une autonomie quasi illimitée. En 1958, il franchit l'impensable : il passe sous la banquise du pôle Nord, là où aucun navire n'était jamais allé.

Pour les stratèges, c'est une révolution. Pour les ennemis potentiels, un cauchemar. Désormais, des armes capables de détruire des villes entières peuvent rôder sous les océans, sans être détectées.

Le Nautilus inaugurerait une ère où la guerre ne se voyait plus... mais pouvait frapper à tout moment.

Si le sous-marin conventionnel est un prédateur à l'affût, le sous-marin nucléaire est le souverain des profondeurs. L'introduction de la propulsion nucléaire dans les années 1950 (avec le *USS Nautilus*) a marqué la rupture la plus radicale de l'histoire navale : pour la première fois, un navire devenait véritablement "sous-marin" et non plus un simple navire "submersible".

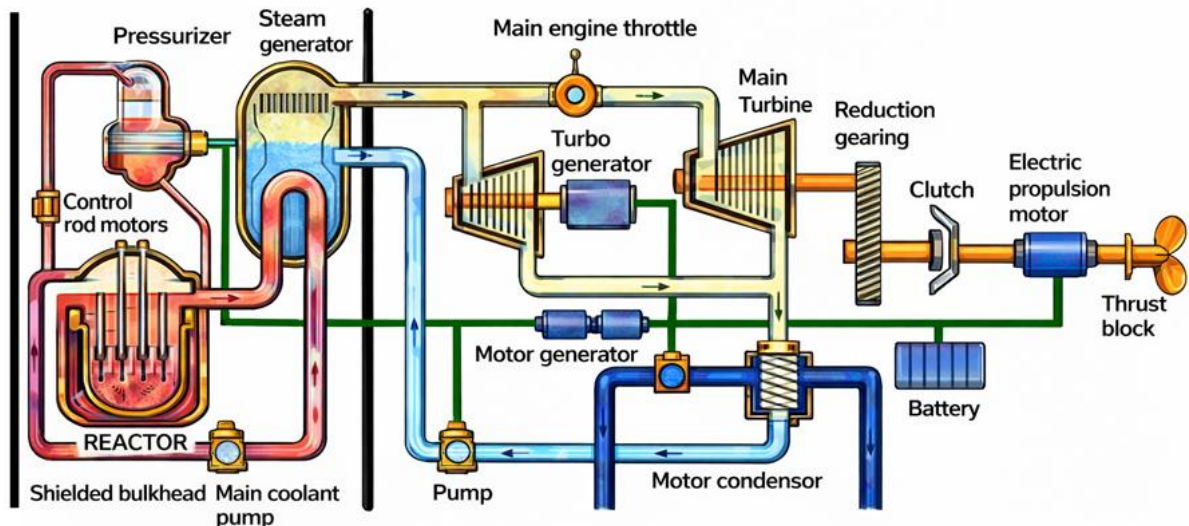
3.1 La révolution de l'énergie : le réacteur nucléaire

Le cœur du navire est sa chaufferie nucléaire. Contrairement au moteur diesel qui brûle du gasoil et de l'oxygène, le réacteur utilise la fission de l'uranium pour générer une chaleur intense.

Le cycle de l'énergie

1. **Le circuit primaire** : l'eau circule autour du cœur du réacteur pour capter la chaleur.
2. **L'échangeur** : cette chaleur est transférée à un circuit secondaire (sans contact radioactif).
3. **La turbine** : l'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur et fait tourner de gigantesques turbines.
4. **La propulsion et l'électricité** : ces turbines entraînent l'arbre d'hélice (directement ou via un moteur électrique) et produisent toute l'électricité du bord.

L'indépendance atmosphérique : ce processus ne consommant pas d'oxygène, le sous-marin est totalement affranchi de la surface. Il peut rester immergé pendant toute la durée de sa mission (souvent 70 à 90 jours). La seule limite réelle est la quantité de vivres et la fatigue nerveuse de l'équipage.



Réacteur nucléaire à eau pressurisée pour sous-marin

3.2 Le SNA : le chasseur agile

Le **Sous-marin Nucléaire d'Attaque (SNA)** — *SSN* en anglais — est le bras armé de la supériorité navale.



Les classes de sous-marins d'attaque français : 2 conventionnels (SSK) et 2 nucléaires (SNA)

Ses missions

- **Protection** : il escorte le porte-avions (le Groupe Aéronaval) pour détecter et neutraliser les menaces sous-marines ennemies.
- **Renseignement** : grâce à son endurance, il peut naviguer discrètement jusqu'aux côtes adverses pour écouter les communications ou observer des mouvements de flotte.
- **Projection de puissance** : les SNA modernes (comme la classe *Suffren* française) peuvent tirer des missiles de croisière navals (MdcN) pour frapper des cibles à terre à plus de 1000 km.
- **Infiltration** : ils servent de vecteurs aux forces spéciales (nageurs de combat) via des hangars de pont appelés *Dry Deck Shelters*.

3.3 Le SNLE : le sanctuaire de la dissuasion

Le **Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins (SNLE)** — *SSBN* en anglais — est un navire bien plus imposant, dont le rôle est purement stratégique. Sa mission se résume en un mot : **l'invulnérabilité**.

La force de frappe

Le SNLE transporte entre 12 et 24 missiles balistiques intercontinentaux (comme le **M51** français). Chaque missile porte plusieurs têtes nucléaires indépendantes. Le SNLE ne cherche pas le combat. Au contraire, il "disparaît" dans l'immensité océanique. S'il est détecté, sa mission est un échec. Il est le garant de la "frappe en second" : même si le territoire national était dévasté par une attaque nucléaire, le SNLE survivant pourrait déclencher une riposte apocalyptique.



Les classes de sous-marins nucléaires lanceurs d'engins français (SNLE)

3.4 Le Silence : le défi du "trou noir" vs bruits de pompe

L'un des plus grands défis technologiques du nucléaire est le bruit. Un réacteur nucléaire nécessite des pompes de circulation pour refroidir le cœur en permanence. Ces pompes peuvent générer une signature acoustique.

- **La convection naturelle** : l'innovation française (sur les classes *Rubis* et *Le Triomphant*) a consisté à permettre au réacteur de fonctionner par convection naturelle (sans pompes) à basse vitesse, rendant le navire presque aussi silencieux qu'un SSK sur batteries.
- **Le "Trou Noir"** : à l'arrêt ou à très faible vitesse, un SNLE moderne est plus silencieux que le bruit de fond de la mer (le bruit des vagues et de la vie marine). Il devient alors indétectable, même pour les sonars les plus sensibles.

3.5 La vie à bord : un monde de fer et de cycles

Dans un SNA ou un SNLE, la notion de temps s'efface. L'équipage vit au rythme de "quarts" (souvent 4h de travail, 8h de repos/entretien).

- **Régénération** : Le sous-marin fabrique son propre oxygène par électrolyse de l'eau de mer et recycle l'air via des décarbonateurs. L'eau douce est produite à volonté par distillation grâce à la chaleur du réacteur.

- **La "banette chaude"** : Sur les anciens SNA, l'espace était si réduit que deux marins partageaient la même couchette (l'un y dort pendant que l'autre travaille), d'où le terme de banette qui n'a pas le temps de refroidir. Les nouveaux bâtiments (classe *Suffren*) offrent désormais une couchette individuelle.
- **Double équipage** : Pour maximiser la disponibilité, les sous-marins nucléaires français fonctionnent avec deux équipages (le "Bleu" et le "Rouge") qui se relaient tous les 4 mois environ.

1945 ANECDOTE	<p>Le sous-marin qui a inventé la climatisation moderne</p> <p>Les premiers sous-marins américains de la Seconde Guerre mondiale utilisaient un système de refroidissement de l'air si efficace qu'il inspira directement les ingénieurs civils.</p> <p>Les fabricants de climatiseurs modernes reconnaissent que plusieurs innovations — notamment la circulation forcée d'air déshumidifié — proviennent des contraintes extrêmes imposées par la vie en plongée.</p>
--------------------------------	--

1945 ANECDOTE	<p>Quand les toilettes coulent un U-Boat !</p> <p>C'est l'histoire la plus absurde de la Seconde Guerre mondiale. Le capitaine du <i>U-1206</i> a mal utilisé le nouveau système de toilettes haute pression ultra-complexe. Résultat : une fuite massive d'eau de mer a atteint les batteries, créant un gaz toxique. Le sous-marin a dû faire surface et a été immédiatement détruit par les Alliés. Une chasse d'eau fatale !</p>
--------------------------------	---

3.6 La France : un savoir-faire unique

La France est l'un des rares pays au monde (avec les USA, la Russie, la Chine et le Royaume-Uni) à maîtriser l'intégralité de la chaîne nucléaire sous-marine.

L'innovation française : le Réacteur compact "K15"

La France a fait le choix technologique de réacteurs compacts utilisant de l'uranium faiblement enrichi (proche du combustible civil), contrairement aux Américains qui utilisent de l'uranium militaire très enrichi. Cela impose une maintenance plus régulière mais assure une souveraineté technologique totale.

La Force Océanique Stratégique (FOST)

Basée à l'Île Longue (Brest), la FOST assure qu'à chaque instant, au moins un SNLE est à la mer, quelque part dans le monde, prêt à exécuter l'ordre du Président de la République. Les SNA, basés à Toulon, protègent ce départ en mission et assurent la souveraineté dans les zones d'intérêt.

3.7 Tableau comparatif : SSK vs SNA / SNLE

Caractéristique	Sous-marin Conventionnel (SSK)	Sous-marin Nucléaire (SNA/SNLE)
Autonomie en plongée	Quelques jours (ou 3 semaines avec AIP)	Illimitée (plusieurs mois)
Vitesse de transit	Faible (risque de détection au schnorchel)	Très élevée (25+ nœuds en permanence)
Discrétion	Maximale à l'arrêt sur batteries	Excellente (mais pompes de refroidissement)
Taille / Volume	Compact (facile à cacher en eaux peu profondes)	Imposant (difficile en zones côtières)
Coût	Abordable (exportation possible)	Extrêmement onéreux (technologie souveraine)

Conclusion du chapitre

Le passage au nucléaire a transformé le sous-marin en un outil de domination globale. Tandis que le SNA est le "félin" qui chasse et protège, le SNLE est le "temple" silencieux de la survie nationale. Ensemble, ils constituent la colonne vertébrale de la puissance maritime moderne, capables de projeter une force dévastatrice depuis l'obscurité totale des abysses.

Chapitre 4 : Le SM à propulsion AIP – L'hybride des profondeurs

Le sous-marin à propulsion anaérobie, ou AIP (*Air Independent Propulsion*), représente le chaînon manquant entre le sous-marin conventionnel classique et le sous-marin nucléaire. Sa raison d'être est simple : briser la servitude du schnorchel sans pour autant recourir à la complexité d'un réacteur nucléaire.

4.1 Le concept : s'affranchir de l'air de surface

Le défi historique du sous-marin diesel-électrique est son besoin vital d'oxygène pour brûler son carburant. L'AIP résout cette équation en emportant à bord son propre comburant (généralement de l'oxygène liquide) ou en utilisant des réactions chimiques directes.

Les trois grandes technologies

On distingue aujourd'hui trois familles principales de systèmes AIP :

- **Les Piles à Combustible (Fuel Cells)** : c'est la technologie la plus silencieuse et la plus répandue (systèmes allemands et suédois). Elle produit de l'électricité par la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène. Le seul résidu est de l'eau pure.

- **Le MESMA (Module d'Énergie Sous-Marine Autonome)** : une innovation française (Naval Group) qui utilise une turbine à vapeur alimentée par la combustion d'éthanol et d'oxygène liquide. Bien que plus bruyant que la pile à combustible, il est très puissant.
- **Le Moteur Stirling** : un moteur à combustion externe utilisé par la Suède et le Japon, où la chaleur est fournie par un brûleur de gazoil et d'oxygène liquide.

Le multiplicateur de force tactique

L'AIP change radicalement la donne lors d'une mission de combat. Un SSK classique doit recharger ses batteries toutes les 48 à 72 heures. Un sous-marin AIP peut rester en immersion totale pendant 15 à 21 jours.

L'avantage du "Silence Absolu"

Contrairement au nucléaire, l'AIP (particulièrement la pile à combustible) n'a quasiment aucune pièce mobile. En patrouille lente (environ 4 nœuds), le navire ne produit aucune vibration mécanique. Il devient une « mine intelligente » capable de rester tapis dans une zone de passage pendant des semaines, rendant toute détection par sonar passif virtuellement impossible.

Les contraintes : un équilibre fragile

L'AIP n'est pas une solution miracle. C'est un système de basse puissance, conçu pour la patrouille et non pour la haute vitesse.

- **Le danger de l'hydrogène** : le stockage de l'hydrogène est le point critique. Les Allemands utilisent des hydrures métalliques (stockage solide) pour plus de sécurité, mais cela alourdit considérablement le navire.
- **L'oxygène liquide (LOX)** : stocké à -180°C, l'oxygène liquide est un produit dangereux. Sa manipulation nécessite des infrastructures portuaires spécifiques, limitant le nombre de bases capables d'accueillir ces bâtiments.
- **L'encombrement** : un module AIP nécessite souvent d'allonger la coque du sous-marin de 6 à 10 mètres, ce qui modifie son hydrodynamisme et sa maniabilité.

1960

ANECDOTE

Le sous-marin fantôme qui apparaît tous les 20 ans

Au large de la Suède, des pêcheurs affirment depuis les années 1960 voir régulièrement un "sous-marin fantôme" remonter brièvement à la surface avant de disparaître. Les autorités ont longtemps suspecté un espionnage soviétique, mais aucune preuve n'a jamais été trouvée.

Certains océanographes pensent qu'il s'agit d'un phénomène optique lié à des bancs de poissons compacts. D'autres évoquent des épaves déplacées par des poches de gaz. Le mystère reste entier.

4.2 L'héritage AIP : de la pile à combustible à l'hégémonie du lithium

En 2004, la pile à combustible (AIP) promettait de briser le monopole nucléaire de l'endurance. Vingt ans plus tard, en 2026, cette promesse s'est métamorphosée en une réalité opérationnelle qui redéfinit la hiérarchie navale mondiale.

L'Allemagne et l'éclosion de la "Classe de Fer"

Pionnière avec ses types 212/214, l'Allemagne a imposé le standard de la propulsion anaérobie via les modules PEM (Proton Exchange Membrane) de Siemens. En 2026, cette technologie a atteint sa pleine maturité : ces bâtiments peuvent désormais se tapir dans les zones côtières ou les mers fermées (Baltique, Méditerranée) pendant plus de trois semaines sans émission thermique ni sonore notable. Le sous-marin conventionnel n'est plus un second couteau, mais un chasseur patient quasi indétectable par les sonars actifs les plus modernes.

La France : du scepticisme à la domination du lithium

Longtemps prudente et concentrée sur le nucléaire (*Suffren*), la France a opéré un virage stratégique majeur. Naval Group a dépassé le simple stade de l'AIP classique (MESMA) pour proposer des Batteries Lithium-Ion (Li-Ion) sur ses derniers *Scorpène* et le nouveau *Blackword Barracuda*.

- L'avantage : contrairement à la pile à combustible qui exige une logistique complexe en hydrogène, le Lithium-Ion offre une puissance immédiate et une vitesse de transit bien plus élevée, tout en conservant le silence absolu.
- Complémentarité : l'AIP est devenu un multiplicateur de force pour l'export, offrant aux marines moyennes une capacité de disparition stratégique autrefois réservée aux puissances atomiques.

Les nouveaux enjeux de 2026 : patience et discrétion

1970 ANECDOTE	Opération Ivy Bells : Le micro sous la mer Pendant la Guerre froide, les USA ont envoyé des plongeurs de combat depuis le <i>USS Halibut</i> pour poser des bandes d'enregistrement sur un câble militaire soviétique à 120 mètres de fond. Ils travaillaient dans une eau glaciale, risquant l'écrasement, pour voler les secrets les plus intimes du bloc de l'Est. Un acte de piratage physique inouï.
--------------------------------	---

La valeur stratégique de l'endurance silencieuse a explosé. Les sous-marins AIP/Li-Ion excellent désormais dans de nouvelles missions :

- Guerre des infrastructures : surveillance des câbles sous-marins et des pipelines.
- Déploiement de commandos : infiltration de forces spéciales sans aucune signature thermique trahissant la position.
- Vaisseau-mère : capacité à rester immergé pour piloter des essaims de drones sous-marins (UUV).

Conclusion : l'océan transparent vs le silence absolu

En 2026, la pile à combustible a tenu sa promesse : elle a rendu la guerre sous-marine plus silencieuse et plus imprévisible. Si elle ne remplace toujours pas la puissance brute du nucléaire pour les missions hauturières, elle a créé une génération de prédateurs des profondeurs capables de paralyser une flotte de surface par leur seule présence invisible.

L'AIP est l'arme de la défense côtière par excellence. Pour une marine comme celle de l'Australie, de l'Inde ou du Brésil, c'est un moyen d'obtenir une capacité d'interdiction océanique redoutable à une fraction du coût d'un sous-marin nucléaire, tout en exigeant une rigueur technique et une maintenance de haut vol.

Chapitre 5 : La Diversité des abysses – du Midget au drone



Juillet 1983: les traces de chenilles relevées par les Suédois au fond de leurs eaux territoriales font penser à un sous-marin à chenilles.

Le monde sous-marin ne se limite pas aux léviathans de 100 mètres de long. Une faune de submersibles plus petits, mais tout aussi sophistiqués, opère dans des domaines variés où la discrétion, la résistance à la pression ou l'autonomie robotique sont les maîtres-mots.

1939

ANECDOTE

Le plus petit sous-marin militaire jamais construit

Il tenait presque dans un garage. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Allemagne nazie développa des **sous-marins miniatures**, dont le plus célèbre : le *Biber*. Long de quelques mètres, piloté par un seul homme, il emportait pourtant des torpilles capables de couler des navires de guerre.

Ces engins étaient conçus pour des missions suicides. Mauvaise visibilité, instruments rudimentaires, fiabilité douteuse. Beaucoup de pilotes moururent avant même d'avoir vu l'ennemi. Certains *Biber* sombraient simplement... parce qu'ils étaient mal équilibrés.

Ces micro-sous-marins n'ont pas changé le cours de la guerre, mais ils incarnent jusqu'où un régime acculé était prêt à aller : réduire la machine de guerre à la taille d'un cercueil individuel.

1969

ANECDOTE

Le NR-1 : Le jouet nucléaire de la marine américaine

C'est le plus petit sous-marin nucléaire jamais construit par les Américains. Long de seulement 45 mètres, il possédait... des roues ! Il pouvait littéralement rouler sur le fond marin pour récupérer des débris d'avions ou de missiles. Son existence même est restée quasi-secrète pendant des décennies.

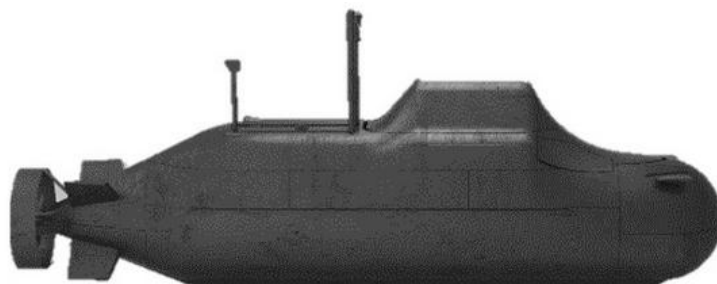
Lancé le 25 janvier 1969 et entré en service le 27 octobre 1969.

Il a ensuite effectué des opérations pendant presque 40 ans avant d'être désactivé le 21 novembre 2008.

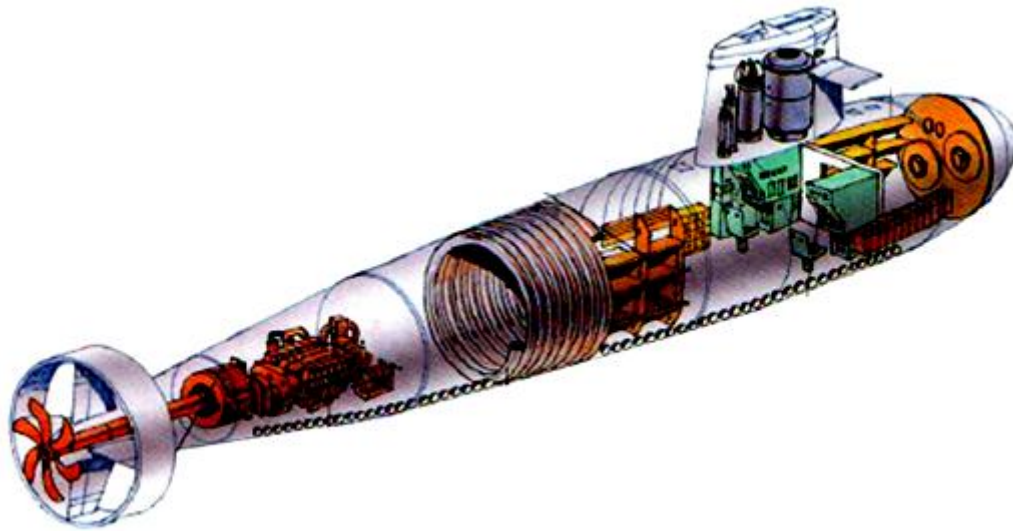
5.1 Les sous-marins de poche ou mini sous-marin ou midgets

Héritiers des *X-Craft* britanniques de la Seconde Guerre mondiale, les "midgets" sont des unités de très petite taille (souvent moins de 30 mètres).

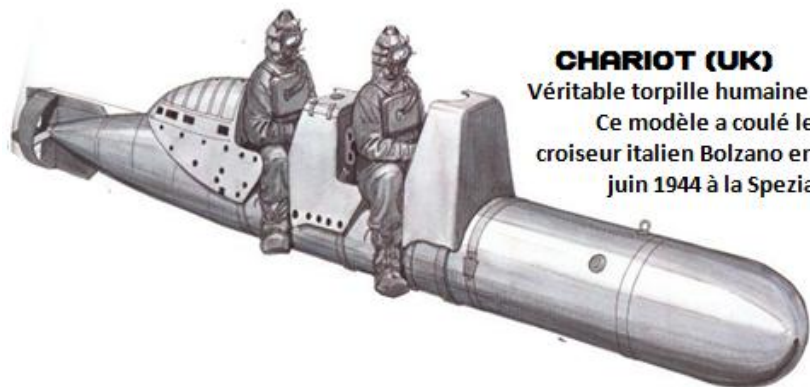
- **Mission** : conçus pour infiltrer des ports protégés ou des zones peu profondes inaccessibles aux gros SNA.
- **Usage moderne** : ils servent principalement au transport de nageurs de combat. Certains pays les utilisent pour la surveillance côtière discrète, car leur petite taille les rend quasiment indétectables aux sonars actifs dans les eaux encombrées.



Midget italien de 120 tonnes, 21m de long – Équipage : 4 + 4



Sous-marin de poche typique – Vue interne



CHARIOT (UK)
Véritable torpille humaine.
Ce modèle a coulé le
croiseur italien Bolzano en
juin 1944 à la Spezia

5.2 L'exploration scientifique et les records (bathyscaphes)

C'est ici que l'on repousse les limites de la physique. Le but n'est plus de se cacher, mais de résister à des pressions colossales.

- **Le Nautilus et le Shinkai** : ces engins (comme le *Nautilo* français de l'IFREMER) sont capables de descendre à 6 000 mètres pour cartographier les fonds ou étudier les dorsales océaniques.
- **Les "Deepsea Challengers"** : pour atteindre le point le plus profond du globe (la fosse des Mariannes à -11 000 mètres), les ingénieurs conçoivent des sphères en acier spécial ou en titane, où l'habitacle est réduit au strict minimum pour maximiser la solidité.

1950

Les sous-marins civils, pionniers des abysses

1950-1960 – La conquête des profondeurs extrêmes

Les premiers sous-marins civils, comme les bathyscaphes, ont été conçus pour explorer les profondeurs inatteignables par les militaires. En moins de dix ans, ils ont repoussé les limites, passant de 4 000 à 11 000 mètres de profondeur. Ces

ANECDOTE

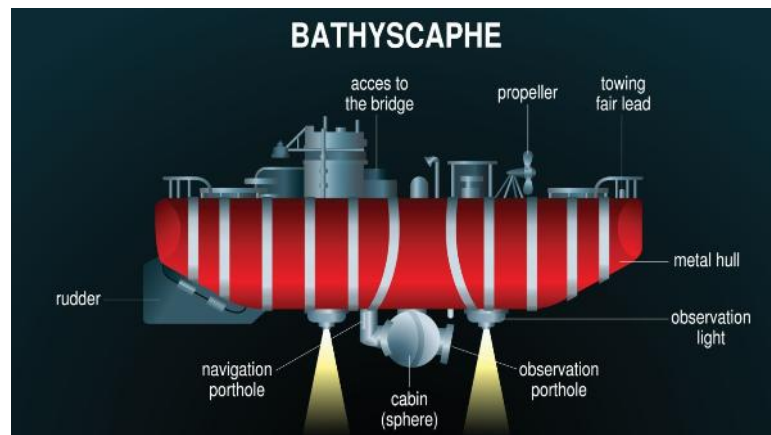
engins ont ouvert la voie à l'exploration scientifique des océans, révélant des mondes inconnus et des espèces insoupçonnées.

1960

ANECDOTE

L'incroyable record du "Trieste"

En 1960, Jacques Piccard et Don Walsh sont descendus là où personne n'était jamais allé : le fond de la fosse des Mariannes, à environ 10 911 mètres de profondeur. La pression était telle que l'une des vitres a craqué, mais ils ont tenu bon. Ils y ont découvert la vie là où on pensait qu'elle était impossible.



5.3 Travaux sous-marins et industrie

L'exploitation des ressources (pétrole, gaz) et la pose de câbles de télécommunication nécessitent des engins de travail.

- **Maintenance des pipelines** : on utilise des submersibles capables de manipuler des bras articulés pour souder ou réparer des infrastructures, les ROV (Remotely Operated Vehicle).
- **Câbliers** : des engins spécialisés "marchent" sur le fond pour creuser une tranchée et y enterrer les fibres optiques qui relient les continents.

Le saviez-vous ?

Nous connaissons mieux la Lune que nos propres océans

L'état actuel de la cartographie des fonds marins est étonnamment limité : à **peine 25 %** des océans ont été cartographiés avec une résolution fine comparable à celle des surfaces terrestres. Le reste n'est connu qu'à travers des mesures satellites approximatives, incapables de révéler les reliefs détaillés, les canyons, les dorsales ou les zones abyssales. À titre de comparaison, 100 % de la surface de la Lune et de Mars ont été cartographiés avec une précision bien supérieure.

Cette méconnaissance s'explique par la difficulté technique : l'eau absorbe les ondes électromagnétiques, empêchant l'usage du radar ou du lidar. Seuls les

sonars multifaisceaux embarqués sur des navires ou des drones peuvent produire des cartes précises, mais leur progression est lente face à l'immensité des océans.

Le programme international Seabed 2030 vise à cartographier l'intégralité des fonds marins d'ici 2030, mais même avec les progrès des drones autonomes, la tâche reste titanesque.

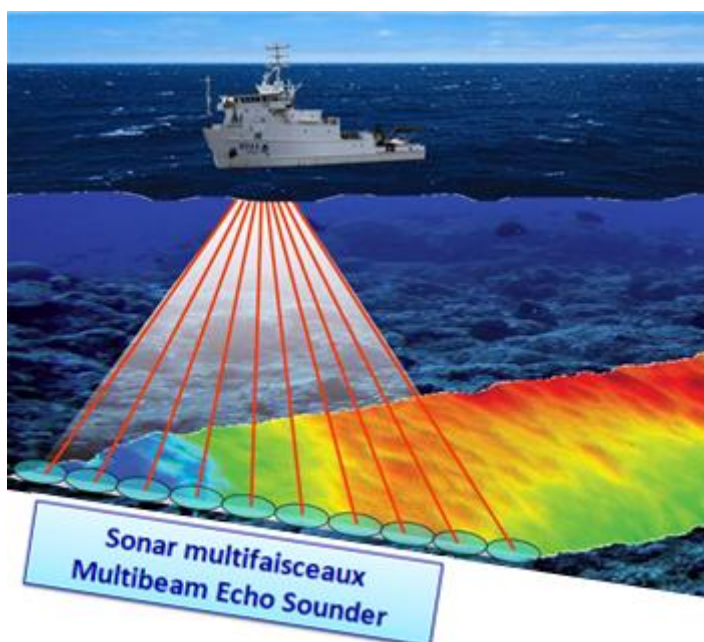
En résumé, sous nos pieds s'étend encore un monde largement inconnu — un territoire immense, essentiel à la science, à la sécurité et à la compréhension de notre planète.

Cartographie des fonds marins

Les sonars multifaisceaux, ou MBES (Multibeam Echo Sounder), émettent simultanément des dizaines à des centaines de faisceaux acoustiques pour cartographier le fond marin avec une grande précision.

Cette technologie permet d'obtenir en un seul passage une image 3D détaillée du relief sous marin, bien plus riche qu'avec un sonar monofaisceau classique.

Le saviez-vous ?



5.4 Le loisir et le tourisme

Il existe enfin un marché pour les particuliers fortunés ou les complexes hôteliers.

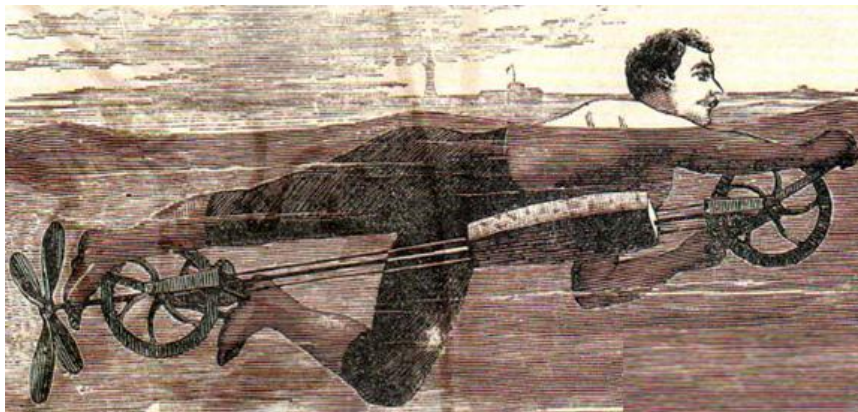
- **Submersibles de croisière** : capables d'emporter 20 à 50 passagers à quelques dizaines de mètres de profondeur pour observer les récifs coralliens à travers de larges baies vitrées en acrylique.
- **Sous-marins personnels** : petites "bulles" biplaces permettant à des yachtmen d'explorer les fonds marins avec une prise en main simplifiée, proche d'un jeu vidéo.

2025

ANECDOTE

Le futur est là : Le sous-marin de tourisme

Saviez-vous que vous pouvez louer un sous-marin ? Des entreprises comme Triton proposent des sphères de verre ultra-résistantes pour explorer les récifs coralliens ou les épaves célèbres comme le Titanic. Le luxe ultime n'est plus dans les airs, il est sous l'océan !



Une idée ! Le vélo sous-marin ...

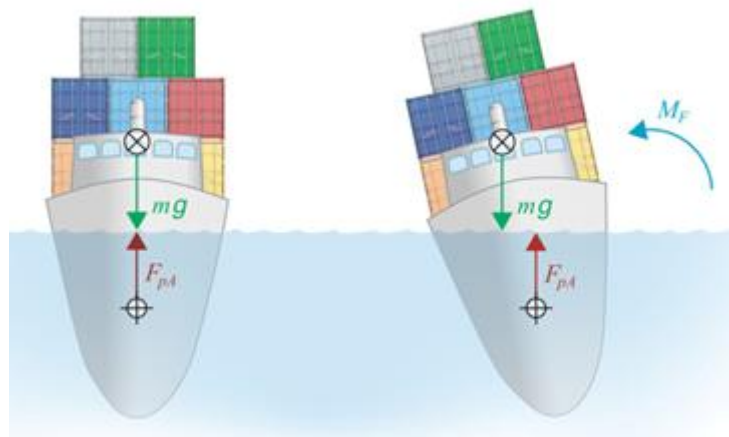
Chapitre 6 : Les points critiques de l'architecture navale sous-marine

L'architecture d'un sous-marin est un défi d'ingénierie unique au monde : il s'agit de construire un navire capable de résister à des pressions écrasantes, de naviguer dans une totale obscurité et de rester parfaitement silencieux pour assurer sa survie. Contrairement à un navire de surface, le sous-marin évolue dans un milieu tridimensionnel hostile où chaque choix architectural est un compromis entre hydrodynamisme, résistance structurelle et discrétion acoustique.

Voici une analyse détaillée des éléments critiques qui occupent l'esprit des architectes navals lors de la conception de ces "monstres des profondeurs".

6.1 Le centre de gravité et la stabilité du sous-marin

Dans l'univers très particulier de l'architecture sous-marine, peu de notions sont aussi déterminantes — et aussi délicates — que celle du centre de gravité. Pour un navire de surface, une erreur de quelques dizaines de centimètres peut déjà poser problème. Pour un sous-marin, c'est une question de vie ou de mort. L'équilibre longitudinal et transversal conditionne la capacité à plonger, à remonter, à tenir une assiette stable, à manœuvrer silencieusement et à éviter les variations d'inclinaison qui trahiraient sa présence. Le centre de gravité est donc l'un des points les plus surveillés, calculés, recalculés et instrumentés de tout le processus de conception.



Une idée du problème du centre de gravité d'un navire – Ici, avec un porte-containers

Un équilibre à la précision chirurgicale

Un sous-marin est un objet paradoxal : il doit être lourd pour résister à la pression, mais suffisamment équilibré pour flotter et se déplacer dans un milieu tridimensionnel. Le centre de gravité (CG) doit se situer dans une zone extrêmement contrainte, en relation avec le centre de poussée. Quelques dizaines de centimètres d'écart suffisent à modifier l'assiette, à provoquer une gîte permanente ou à rendre instable une plongée rapide. Les ingénieurs parlent souvent de « budget de masse » comme d'un compte bancaire : chaque kilogramme ajouté ou déplacé doit être compensé ailleurs.

Cette sensibilité extrême s'explique par la géométrie même du sous-marin. Long, cylindrique, dense, il réagit comme une poutre flottante. Un déplacement de masse à l'avant ou à l'arrière agit comme un bras de levier. Une batterie déplacée de 30 cm peut entraîner une variation d'assiette de plusieurs dixièmes de degré — imperceptible pour un marin de surface, mais critique pour un bâtiment qui doit rester parfaitement horizontal pour éviter de perdre de la vitesse, de fatiguer ses barres de plongée ou de générer du bruit.

La difficulté d'évaluer ce centre de gravité

Dans un monde idéal, le centre de gravité serait calculé une fois pour toutes sur plan. Dans la réalité, il évolue en permanence. Un sous-marin embarque des centaines d'équipements : moteurs, turbines, pompes, systèmes électroniques, batteries, torpilles, vivres, eau douce, carburant, pièces de rechange, outils, matériel scientifique, sans oublier l'armement. Chacun de ces éléments possède une masse, une position, une incertitude. Certains sont fixes, d'autres mobiles, d'autres encore consommables.

Les architectes doivent donc composer avec un système dynamique. À chaque modification de configuration — ajout d'un radar, remplacement d'un convertisseur, changement de modèle de batterie — il faut recalculer. Les chantiers navals tiennent des bases de données de masse d'une précision impressionnante, parfois au gramme près pour les petits équipements. Les ingénieurs parlent de « chasse au kilo » comme d'une discipline à part entière.

Le saviez-vous ?

Centre de gravité (G)

Point unique où l'on peut considérer que l'ensemble des masses du sous-marin est concentré. En théorie, posé exactement sur ce point, le sous-marin tiendrait en équilibre sur une aiguille. La position du centre de gravité conditionne l'assiette, la stabilité et la capacité à plonger ou remonter. Un déplacement de quelques dizaines de centimètres suffit à modifier le comportement du sous-marin, d'où la nécessité d'un suivi extrêmement précis des masses embarquées.

Centre de carène (C)

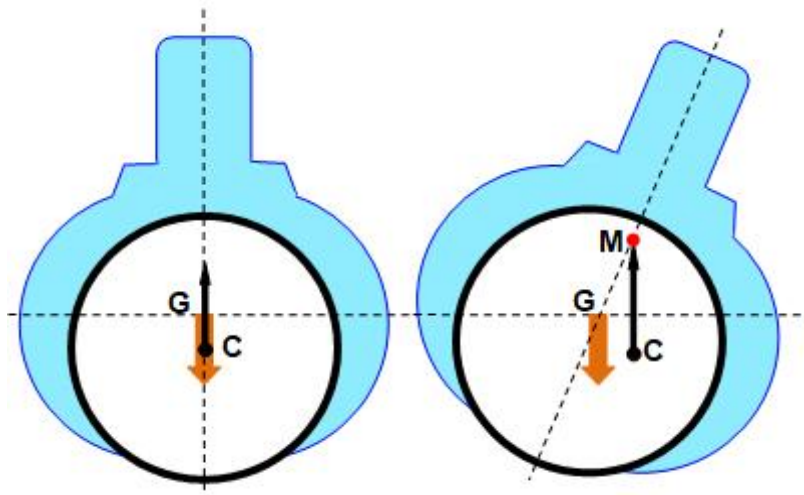
Point d'application de la poussée d'Archimède lorsque le sous-marin flotte en surface. Il correspond au centre géométrique du volume immergé. Sa position varie selon l'enfoncement et l'assiette du bâtiment. L'équilibre longitudinal et transversal résulte de la relation entre centre de carène et centre de gravité.

Centre de poussée (P)

Point où s'applique la force de poussée verticale exercée par l'eau sur le sous-marin, que celui-ci soit en surface ou en plongée. Il coïncide avec le centre de carène lorsque le bâtiment est immobile. L'écart entre centre de poussée et centre de gravité détermine l'assiette et la stabilité du sous-marin.

Métacentre (M)

Point théorique situé au-dessus du centre de carène, utilisé pour évaluer la stabilité d'un corps flottant. Si le centre de gravité est en dessous du métacentre, le sous-marin retrouve son équilibre après une inclinaison. C'est un repère essentiel pour juger de la stabilité transversale du bâtiment.



L'effet, souvent sous-estimé, de l'équipage

L'équipage lui-même fait partie de l'équation. Un sous-marin de 70 hommes représente plusieurs tonnes de masse vivante, réparties dans des espaces étroits, se déplaçant en permanence. Lorsqu'un groupe se rassemble dans le poste avant pour un briefing, l'assiette peut légèrement varier. Les sous-mariniers expérimentés savent que l'on ne traverse pas tous en même temps un couloir étroit lors d'une manœuvre délicate. Sur certains bâtiments anciens, les cuisiniers devaient même anticiper l'effet de la distribution des repas : un afflux soudain vers l'arrière pouvait modifier la stabilité.

Une anecdote célèbre raconte qu'à bord d'un sous-marin américain des années 1960, l'installation d'un nouveau four plus lourd que prévu avait provoqué une légère gîte permanente. Les ingénieurs, perplexes, mirent plusieurs jours à identifier la cause. Depuis, les cuisines sont systématiquement intégrées dans les calculs de masse comme n'importe quel équipement critique.

Les aides à la conception et au contrôle

Pour maîtriser cette complexité, les architectes disposent de plusieurs outils. Historiquement, les calculs se faisaient à la main, avec des abaques et des maquettes en bois. Les ingénieurs déplaçaient des petits poids sur une maquette lestée pour simuler l'effet d'un changement de configuration. Cette méthode, rudimentaire en apparence, permettait une intuition physique très fine.

Aujourd'hui, les logiciels de calcul de stabilité et de gestion de masse ont pris le relais. Ils permettent de simuler des milliers de configurations, de tester l'impact d'un déplacement de quelques centimètres, de prévoir l'évolution du centre de gravité au fil d'une mission. Certains outils intègrent même des modèles comportementaux de l'équipage ou des consommations de fluides.

Mais malgré ces progrès, l'expérience humaine reste irremplaçable. Les architectes navals savent que la théorie ne capture jamais totalement la réalité d'un bâtiment vivant. Lors des essais à la mer, les mesures de stabilité sont scrutées avec une attention quasi religieuse. On ajuste, on corrige, on compense. Un sous-marin n'est jamais « fini » : il est en équilibre permanent entre la physique, la technique et l'usage.

Un sujet technique, mais riche en curiosités

Le centre de gravité, malgré son apparente austérité, recèle de nombreuses histoires. Certains sous-marins historiques ont dû être modifiés en urgence parce qu'un nouveau sonar, plus massif que prévu, avait déséquilibré l'avant. D'autres ont vu leur autonomie réduite parce que les vivres, mal répartis, modifiaient l'assiette en fin de mission. Sur les premiers sous-marins nucléaires, les ingénieurs découvrirent que la chaleur dégagée par le réacteur modifiait la densité de l'air dans certaines zones, influençant légèrement la répartition des masses.

Ces anecdotes rappellent que, dans un sous-marin, rien n'est anodin. Chaque objet, chaque déplacement, chaque kilogramme compte. Le centre de gravité n'est pas seulement une donnée technique : c'est le cœur invisible de l'équilibre du bâtiment, la clé de sa discrétion, de sa sécurité et de sa performance.

6.2 Les aides à la conception du sous-marin

La conception d'un sous-marin est l'un des exercices les plus complexes de l'ingénierie moderne. Il s'agit de penser simultanément deux coques — la coque épaisse, résistante à la pression, et la coque légère, hydrodynamique — ainsi que le massif, les appendices, les ballasts, les équipements, les réseaux, les espaces de vie, les zones de maintenance, les systèmes d'armes, les dispositifs de sécurité. Le tout dans un

volume restreint, sous contrainte de masse, de silence, de résistance mécanique, de furtivité et de secret industriel. Aucun autre véhicule ne concentre autant de disciplines dans un espace aussi réduit.

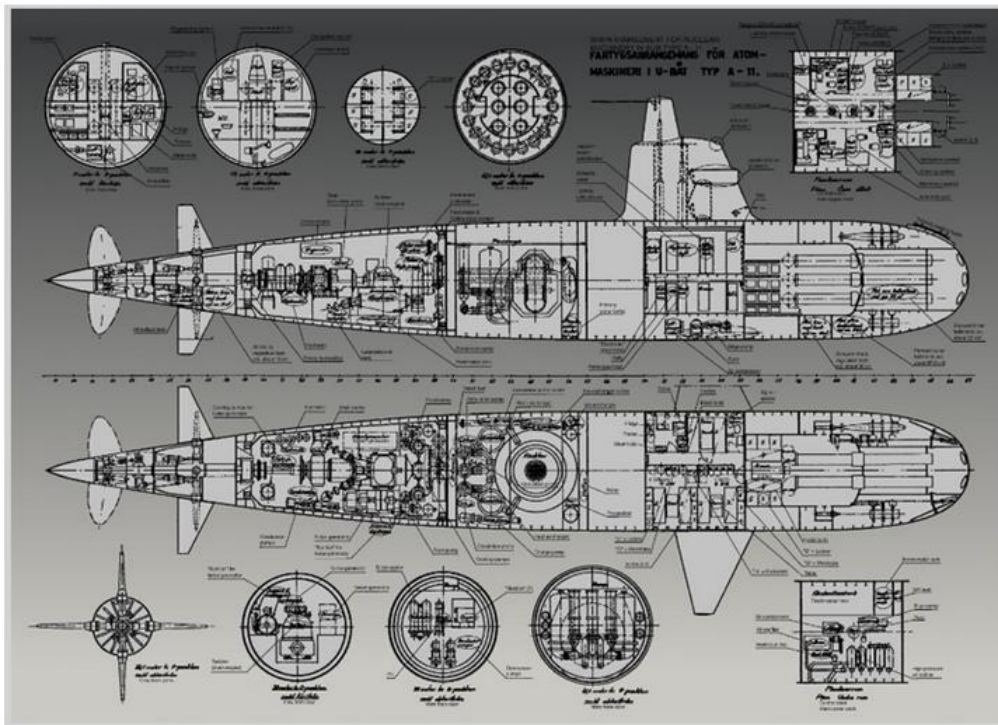
La planche à dessin : l'âge héroïque

Jusqu'aux années 1970, la conception se faisait essentiellement sur planche à dessin. Les ingénieurs traçaient les couples, les sections, les volumes, les réseaux, les équipements, à l'échelle 1/20 ou 1/50. Les bureaux d'études étaient de véritables cathédrales de papier, où s'alignaient des dizaines de mètres de plans. Chaque modification nécessitait de reprendre plusieurs feuilles, parfois de tout redessiner.

Cette méthode avait un avantage : elle obligeait à une vision globale. Les ingénieurs développaient une intuition très fine des volumes, des contraintes, des interférences. Ils savaient « sentir » un sous-marin avant même qu'il ne soit construit.

Pour valider certaines zones complexes, on réalisait des maquettes en bois ou en métal. Certaines étaient de simples tronçons, d'autres des reproductions complètes. Les chantiers navals construisaient parfois des maquettes à l'échelle 1 de sections entières — notamment les locaux techniques ou les zones de maintenance — afin de vérifier l'accessibilité, la possibilité de démonter une pompe, de remplacer un moteur, de faire passer un câble.

Ces maquettes grandeur nature étaient souvent l'occasion de découvertes inattendues. On se rendait compte qu'un opérateur ne pouvait pas atteindre une vanne sans contorsions dangereuses, ou qu'un panneau de visite s'ouvrait du mauvais côté. Les sous-marinières eux-mêmes étaient invités à tester les espaces, à ramper, à manipuler, à simuler des interventions. Leur retour était précieux : ils savaient mieux que quiconque ce que signifiait travailler dans un volume exigu, en plongée, parfois dans l'urgence.



Plans typiques d'un sous-marin - Vue d'ensemble

L'arrivée de la CAO : une révolution progressive



Bureau d'études de sous-marins modernes – Fictif

À partir des années 1980, la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) a commencé à transformer le métier. Les premiers logiciels permettaient de tracer des plans en 2D, plus rapidement et avec moins d'erreurs. Puis vinrent les modèles 3D, capables de représenter la coque, les structures internes, les réseaux, les équipements.

La CAO a apporté plusieurs révolutions :

- La maîtrise des interférences : un logiciel peut détecter automatiquement qu'un câble traverse une cloison ou qu'une pompe empiète sur un conduit d'air.
- La gestion des masses : chaque pièce est associée à une masse, une position, un volume, ce qui permet de suivre en temps réel l'évolution du centre de gravité.
- La simulation : on peut tester virtuellement une opération de maintenance, vérifier qu'un moteur peut être extrait sans démonter la moitié du compartiment.
- La collaboration : plusieurs équipes peuvent travailler simultanément sur le même modèle, chacune dans son domaine (propulsion, électricité, hydraulique, acoustique).

Les chantiers navals ont progressivement adopté des environnements numériques complets, où le sous-marin existe virtuellement avant même que la première tôle ne soit découpée. Certains programmes modernes comptent plusieurs millions de pièces modélisées.

Les maquettes physiques : toujours indispensables

Malgré la puissance de la CAO, les maquettes physiques n'ont pas disparu. Elles ont simplement changé de rôle. On construit encore des tronçons à l'échelle 1 (grandeur réelle), notamment pour valider l'ergonomie,

la maintenance, la circulation de l'équipage. Rien ne remplace l'expérience physique d'un opérateur qui tente d'atteindre une vanne dans un espace confiné.

Ces maquettes servent aussi à la formation. Les futurs sous-marinières y apprennent à intervenir dans des conditions proches du réel, sans risquer d'endommager un équipement coûteux.

Le routage des réseaux : un casse-tête permanent

L'un des défis majeurs de la conception est le routage des réseaux : eau, air, électricité, signaux, hydraulique, fluides techniques, systèmes de refroidissement, câbles de communication, conduites de sécurité. Un sous-marin moderne peut contenir plusieurs centaines de kilomètres de câbles et de tuyauteries.

Le routage doit respecter des règles strictes :

- éviter les interférences électromagnétiques,
- séparer les réseaux critiques des réseaux secondaires,
- garantir l'accessibilité pour la maintenance,
- minimiser les longueurs pour réduire les pertes,
- préserver la discrétion acoustique,
- respecter les cloisons étanches et les zones de sécurité.

La CAO permet de visualiser ces réseaux en 3D, de les superposer, de détecter les conflits. Mais la décision finale reste humaine : il faut arbitrer, optimiser, parfois renoncer à une solution élégante pour une solution plus robuste.

L'IA : la nouvelle frontière

Depuis quelques années, l'intelligence artificielle s'invite dans la conception. Elle ne remplace pas les ingénieurs, mais elle les assiste dans des tâches complexes :

- optimisation des réseaux,
- recherche de configurations minimisant la masse,
- détection automatique d'erreurs,
- simulation de scénarios de maintenance,
- génération de variantes de conception.

Certaines IA sont capables de proposer des routages alternatifs en quelques minutes, là où un ingénieur aurait passé plusieurs jours. D'autres analysent des milliers de configurations pour identifier celle qui minimise les vibrations ou le bruit.

Cette évolution ouvre des perspectives fascinantes, mais elle s'accompagne d'un impératif absolu : le secret industriel. Les modèles numériques d'un sous-marin sont parmi les données les plus sensibles qui existent. Ils révèlent la structure, les faiblesses, les capacités, les signatures acoustiques. Les chantiers navals mettent donc en place des environnements numériques hermétiques, isolés, contrôlés, parfois totalement déconnectés du monde extérieur.

Un métier où l'humain reste au centre

Malgré la sophistication des outils, la conception d'un sous-marin reste un art profondément humain. Les logiciels calculent, simulent, optimisent. Mais ce sont les ingénieurs, les techniciens, les sous-marinières qui comprennent l'usage réel, les contraintes du terrain, les gestes de maintenance, les imprévus d'une mission longue.

Un sous-marin n'est pas seulement un objet technique : c'est un espace de vie, un outil militaire, un environnement extrême. Sa conception exige une vision globale, une intuition, une expérience que la machine ne possède pas.

6.3 La coque : l'enveloppe de survie et de pénétration

L'architecture d'un sous-marin repose sur une dualité fondamentale : la coque épaisse (résistance) et la coque mince hydrodynamique (forme).

La Coque Épaisse : le sanctuaire

La coque épaisse est le cylindre d'acier ou de titane qui protège l'équipage de la pression hydrostatique. À 300 mètres de profondeur, chaque mètre carré de la coque subit une pression d'environ 300 tonnes.

- **Matériaux et soudure** : on utilise des aciers à très haute limite élastique (comme le HLES 80 en France ou le HY-80/100 aux USA). La soudure est l'étape la plus critique : chaque centimètre de soudure est radiographié, car la moindre bulle d'air ou impureté deviendrait, sous la pression, l'amorce d'une déchirure catastrophique.
- **La géométrie** : la forme idéale est la sphère, mais pour des raisons d'habitabilité, on utilise des sections cylindriques fermées par des calottes hémisphériques.

L'hydrodynamisme et la tranche avant

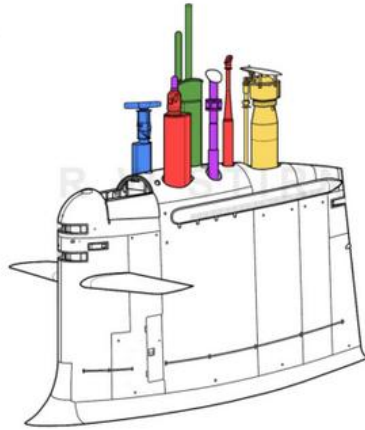
La partie avant du sous-marin ne se contente pas de "fendre l'eau". Elle doit diriger le flux vers l'arrière avec le moins de turbulences possible.

- **Courbure de l'étrave** : autrefois pointue (pour la navigation en surface), l'étrave est aujourd'hui arrondie (« goutte d'eau ») pour optimiser les performances en plongée. C'est ici que se loge le dôme sonar, souvent en composite ou en titane, qui doit être "transparent" au son.
- **Le paradoxe des ouvertures** : chaque trou dans la coque épaisse est une faiblesse potentielle. Pourtant, elles sont indispensables pour :
 - **L'arbre porte-hélice** : un défi d'étanchéité mobile colossal.
 - **Les tubes lance-torpilles et silos de missiles** : qui nécessitent des systèmes de double porte complexes.
 - **Le sondeur bathythermique** : qui mesure la température de l'eau pour prédire la propagation du son.
 - **Les écoutilles** : portes d'accès au sous-marin.

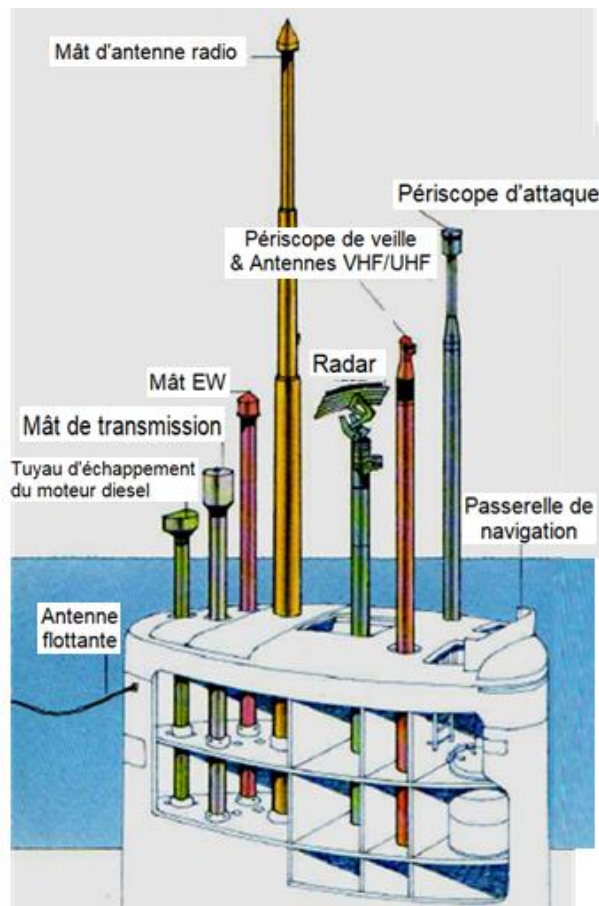
6.4 Le massif et les sorties de mâts

Le massif (ou kiosque) est cette protubérance caractéristique sur le dos du sous-marin. Contrairement aux idées reçues, sur les modèles modernes, il n'est pas "étanche" et ne fait pas partie de la coque épaisse.

Il sert de carénage pour les mâts rétractables : périscopes optiques ou optroniques, antennes radar, mâts de communication satellite et le schnorkel (l'arrivée d'air pour les moteurs diesel).



Massif et ses mâts ; taille du massif d'un SNA français comparé à un marin



Les mâts classiques d'un sous-marin

Architecture critique : le massif crée une traînée importante et des tourbillons qui peuvent interférer avec l'hélice à l'arrière. Les architectes travaillent sur son profilage (souvent avec des congés de raccordement à la coque) pour réduire le bruit de sillage.

Pour compléter sa vision acoustique (améliorer les détections sonores lointaines), l'architecte doit intégrer une antenne linéaire remorquée (ALR) : une flûte sonar (tuyau de 5 à 10 cm de diamètre bourré de composants acoustiques et électroniques) de plusieurs centaines de mètres qui, selon la classe du navire, est soit stockée dans une gouttière fixe le long de la coque, soit logée sur un treuil interne complexe permettant de la déployer et de la rétracter selon les besoins tactiques.

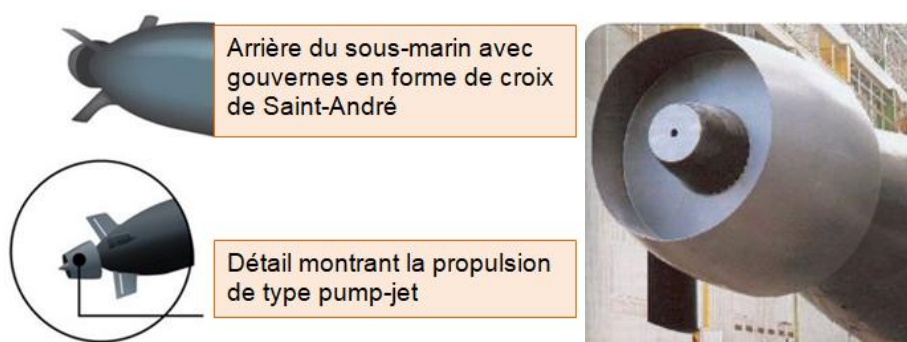
6.5 La propulsion : du mouvement au murmure

La propulsion est le cœur battant du navire, mais elle est aussi sa principale source de bruit.

- **L'hélice classique** : elle possède souvent un nombre impair de pales (souvent 7) en forme de "sabre" pour éviter les phénomènes de résonance et retarder la cavitation (formation de bulles de vapeur d'eau qui éclatent bruyamment).

Anecdote : Dans les années 80, l'affaire "Toshiba-Kongsberg" a fait scandale : ces entreprises avaient vendu illégalement à l'URSS des fraiseuses à commande numérique ultra-précises, permettant aux Soviétiques de fabriquer des hélices bien plus silencieuses, faisant perdre aux USA leur avantage acoustique.

- **Le pump-jet (pompe à hélice carénée)** : devenu la norme sur les sous-marins nucléaires d'attaque modernes (Classe Suffren, Seawolf). L'hélice est placée dans un conduit qui redresse le flux d'eau, réduisant considérablement le bruit et permettant des vitesses élevées sans cavitation.



6.6 Silence et discrétion : l'art de l'invisibilité

Dans la guerre sous-marine, "entendre sans être entendu" est la règle d'or.

La suspension des appareils : tout ce qui vibre à l'intérieur (moteurs, pompes, même une armoire électrique) est monté sur des plots élastiques (silent-blocs) ou des plateformes suspendues. Sur les sous-marins les plus modernes, on utilise des "berceaux" massifs désolidarisés de la coque épaisse par des suspensions pneumatiques. Ainsi, la vibration d'une pompe ne se transmet pas à la coque, laquelle ne fait pas "haut-parleur" dans la mer.

Le traitement de la coque : la coque est recouverte de tuiles anéchoïques. Ce sont des plaques de caoutchouc ou de polymères contenant des cavités d'air.

1. Elles absorbent les ondes des sonars ennemis (principe de l'avion furtif).

2. Elles étouffent les bruits provenant de l'intérieur du sous-marin.

6.7 Gouvernes : croix droite (+) vs croix de Saint-André (X)

L'architecture des barres arrière est un sujet de débat intense entre architectes navals.

La disposition en Croix droite (+) : traditionnelle. Les barres horizontales gèrent l'immersion, les verticales gèrent le cap. C'est simple à piloter manuellement.

La disposition en Croix de Saint-André (X) : plus complexe, elle nécessite des calculateurs pour coordonner les quatre surfaces.



- **Avantages** : les quatre barres travaillent ensemble pour chaque mouvement, ce qui les rend plus efficaces. De plus, elles ne dépassent pas du gabarit de la coque, permettant au sous-marin de se "poser" sur le fond sans briser ses gouvernes.
- **Inconvénient** : en cas de panne informatique, la reprise manuelle est extrêmement difficile pour un humain.

6.8 Les SAS : les interfaces avec le monde extérieur

Un sous-marin ne peut pas être une simple bulle scellée ; il doit pouvoir échanger des hommes, des véhicules ou du matériel avec l'extérieur, tout en étant immergé. Chaque sas est une rupture critique de la coque épaisse qui nécessite des renforts d'acier massifs.

Le sas de Plongeurs (Commandos)


Pour les forces spéciales, l'architecture prévoit un sas de sortie. Il permet aux nageurs de combat de quitter le bord alors que le sous-marin est à l'immersion périscopique ou légèrement plus bas.


Défi critique : Le sas doit être capable de s'équilibrer avec la pression extérieure avant l'ouverture de la porte, puis d'être vidangé (l'eau est transférée dans des ballasts internes) pour permettre le retour des plongeurs sans alourdir le navire.

Les dispositifs de secours : le sas d'éjection et l'interface DSRV

La survie de l'équipage en cas de naufrage repose sur deux éléments architecturaux :

- **Le sas d'éjection** : souvent situé dans le massif ou aux extrémités, il permet une remontée individuelle en "bulle" d'air.
- **L'assiette d'arrimage DSRV** : c'est un anneau d'acier parfaitement plat et usiné, situé autour d'une écrouille supérieure. Il permet au mini-sous-marin de secours (*Deep Submergence Rescue Vehicle*) de venir se "ventouser" sur la coque. La précision de l'usinage de cette surface est vitale : une simple rayure empêcherait l'étanchéité sous la pression, rendant le sauvetage impossible.

1918 	Les sous-marins et le Triangle des Bermudes 1918 – L'USS Cyclops, disparu sans laisser de trace L'USS Cyclops, un navire ravitailleur de la marine américaine, a disparu en 1918 dans le Triangle des Bermudes, avec 300 hommes à bord. Aucune épave n'a jamais été retrouvée, alimentant les théories les plus folles : tempêtes magnétiques, méthane, ou même intervention extraterrestre. Une énigme qui rappelle que, malgré les progrès technologiques, l'océan garde encore bien des secrets.
--	--

1934 	Le Surcouf : Le croiseur sous-marin français maudit C'était le plus grand sous-marin de son époque (1934 - France). Véritable croiseur des mers, il possédait une tourelle avec deux canons de 203 mm et même un hydravion dans un hangar ! Mais le <i>Surcouf</i> a disparu mystérieusement en 1942 dans les Caraïbes. Accident, abordage ou complot ? Le mystère reste entier sur la tombe de ce géant.
---	---

L'Interface avec les drones et le hangar de pont (DDS)

L'architecture moderne intègre désormais des hangars amovibles (appelés *Dry Deck Shelter* ou DDS). Ce sont des caissons étanches fixés sur le dos du sous-marin, derrière le massif. Ils permettent de transporter des drones sous-marins ou des propulseurs de plongeurs sans encombrer l'espace de vie intérieur.

6.9 Autres éléments critiques : la gestion des fluides et des masses

L'architecte naval doit également résoudre deux problèmes invisibles mais vitaux :

Le "pesage" (Trim) : un sous-marin doit avoir une flottabilité nulle. Mais s'il tire une torpille de 1,5 tonne, il devient soudainement plus léger et risque de remonter comme un bouchon. L'architecture inclut donc des caisses de réglage (ou compensateurs) qui aspirent instantanément le poids d'eau exact correspondant à l'arme tirée pour maintenir l'équilibre.

L'usine à air et à eau : le sous-marin est un écosystème autonome. Les architectes doivent caser :

- Des **électrolyseurs** pour produire de l'oxygène à partir de l'eau de mer.
- Des **bouilleurs** pour dessaler l'eau de mer.
- Des **absorbants de CO₂** (chaux sodée ou amines) pour purifier l'atmosphère.

La signature magnétique : L'acier de la coque est une masse magnétique que les avions "chasseurs de sous-marins" peuvent détecter. Les architectes prévoient des boucles d'immunisation (câbles électriques

entourant la coque) pour générer un champ magnétique opposé et rendre le navire "magnétiquement transparent".

Chapitre 7 : Le cycle de vie du géant – de l'acier au silence

Le sous-marin est bien plus qu'une machine de guerre ; c'est l'un des objets industriels les plus complexes jamais conçus par l'homme, rivalisant avec les stations spatiales. Sa vie, de sa conception dans les bureaux d'études jusqu'à son dernier souffle dans les chantiers de déconstruction, est une épopée technologique et humaine.

7.1 Le défi des abysses : la lutte contre l'érosion et l'usure marine

Dès l'instant où la coque d'acier d'un géant des mers quitte la cale sèche pour épouser l'eau salée, une guerre invisible et totale commence. La mer, sous son apparente sérénité, est un milieu d'une agressivité chimique et physique redoutable. Pour le navire, survivre n'est pas un état passif, mais une lutte active de chaque seconde contre la dissolution, l'écrasement et la colonisation.

L'alchimie de la survie : le sacrifice du zinc : le premier assaut est électrochimique. L'eau de mer agit comme un électrolyte parfait, transformant la coque en une immense pile dont l'acier est le combustible. Sans protection, le navire se dissoudrait littéralement, atome par atome, dans l'océan. Pour contrer ce phénomène, l'ingénierie navale utilise un stratagème presque rituel : les anodes sacrificielles. Ces blocs de zinc ou d'aluminium sont boulonnés à des endroits stratégiques de la coque. Par leur nature plus réactive, ils acceptent de se désintégrer à la place de l'acier. Une anecdote bien connue des plongeurs de bord raconte que l'on peut juger de l'âge d'un navire à la maigreur de ses anodes : quand le bloc de zinc n'est plus qu'un moignon informe et rongé, c'est que le géant a épuisé son bouclier et qu'il est temps de regagner le bassin.

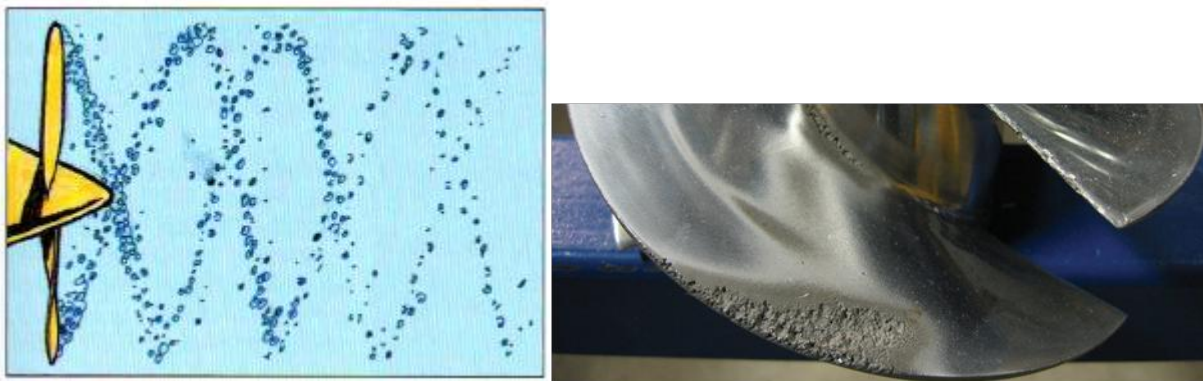
La peau du géant et l'ennemi biologique : mais la mer ne se contente pas de dévorer le métal, elle cherche à l'alourdir. C'est le phénomène du biofouling. Une simple pellicule de micro-organismes, suivie par des algues et des colonies de balanes (coquillages fixés), peut transformer une coque lisse en une surface rugueuse comme du papier de verre. Les conséquences sont immédiates : la résistance à l'avancement grimpe en flèche. Un navire « sale » peut consommer jusqu'à 40 % de carburant supplémentaire pour maintenir sa vitesse. Pour lutter contre cette invasion, on applique des peintures antifouling d'une technologie spatiale, capables de libérer des biocides de manière contrôlée. Aujourd'hui, par exemple, des robots sous-marins télécommandés (ROV) parcourent les flancs des super-tankers pour brosser les algues sans même que le navire ne s'arrête.

Le martellement des flots et la fatigue de l'acier : au-delà de la chimie, il y a la force brute. En pleine tempête, le navire subit le pilonnement (slamming) : la proue se soulève hors de l'eau avant de retomber avec la force d'un marteau-pilon sur la surface. À cet instant, les panneaux de coque subissent des pressions hydrodynamiques colossales capables de tordre l'acier de plusieurs centimètres. Le danger n'est pas seulement la rupture nette, mais la fatigue. Comme un trombone que l'on plie de manière répétée, l'acier finit par cristalliser et se fissurer. Les officiers de pont racontent souvent que, dans le silence de la nuit en mer, on peut entendre le navire « gémir » : ce sont les ajustements de la structure qui encaisse des

torsions permanentes. Évidemment les sous-marins sont moins soustraits à ce phénomène que les bâtiments de surface.

La violence de l'écoulement : l'arrachement des structures de flanc : Un aspect souvent sous-estimé par le néophyte, mais redouté par l'architecte naval, est la puissance de succion et de cisaillement générée par le simple déplacement de la masse d'eau le long de la coque. L'expérience montre que même des éléments solidement boulonnés ou collés, tels que les antennes latérales de flanc ou les tuiles anéchoïques, peuvent être littéralement scalpés par la force du courant relatif. À grande vitesse, l'eau ne se contente pas de glisser ; elle exerce une traction dynamique si intense qu'une simple imperfection dans la fixation d'un panneau peut transformer ce dernier en une proie pour l'océan. Si l'eau s'engouffre sous une arrête, l'effet de levier hydraulique devient irrésistible, arrachant des plaques de plusieurs quintaux comme s'il s'agissait de simples feuilles de papier. Cela démontre que la force développée lors de la navigation dépasse l'imagination : elle ne se contente pas de s'opposer au navire, elle tente de le déshabiller de ses composants les plus sophistiqués. L'architecte doit alors ruser, non plus seulement pour la solidité, mais pour l'hydrodynamisme absolu, sachant que la moindre aspérité peut devenir le point de départ d'une amputation structurelle.

L'érosion invisible : la cavitation : enfin, il existe une forme d'usure plus subtile mais dévastatrice située à la poupe : la cavitation. Au bout de l'arbre d'hélice, les pales tournent avec une telle vitesse qu'elles créent des zones de basse pression où l'eau bout instantanément, formant des bulles de vapeur. Lorsque ces bulles implosent contre le métal, elles génèrent des ondes de choc si puissantes qu'elles arrachent des fragments d'acier. Une hélice mal conçue peut se retrouver criblée de minuscules cratères, comme si elle avait été la cible d'un sablage intensif, perdant toute son efficacité en quelques mois de navigation.



Phénomène de cavitation provoqué par une hélice conventionnelle et effet sur l'hélice.

L'hélice est conçue pour réduire au maximum la cavitation : nombre impair de pales, géométrie soigneusement optimisée et usinage réalisé sur des machines-outils spécialisées.

Entretenir un géant, c'est donc orchestrer un ballet permanent entre chimie, biologie et mécanique. C'est accepter que le navire soit un organisme vivant, constamment agressé par son propre élément, et dont la longévité dépend entièrement de la vigilance de ceux qui, dans l'ombre des cales ou l'eau glacée des ports, veillent sur sa peau d'acier.

2023

Quand l'URSS acheta le silence

Au début des années 1980, les sous-marins soviétiques étaient si bruyants qu'ils étaient repérés dès leur passage au large de la Norvège. Le réseau d'écoute de l'OTAN enregistrait sans effort leurs hélices mal usinées, dont la cavitation

ANECDOTE

trahissait chaque mouvement. Puis, presque du jour au lendemain, certains bâtiments devinrent nettement plus discrets. Les analystes furent stupéfaits : comment l'URSS avait-elle soudain rattrapé des années de retard acoustique ?

L'explication apparut plus tard : les Soviétiques avaient acquis clandestinement des machines outils japonaises Toshiba et des systèmes de contrôle norvégiens Kongsberg, normalement interdits d'exportation. Ces équipements permettaient d'usiner des hélices de très haute précision, réduisant fortement la cavitation et donc la signature acoustique.

Ce « bond silencieux » alarma l'OTAN et déclencha un scandale international. L'affaire Toshiba-Kongsberg reste un exemple frappant de l'impact stratégique d'une simple technologie d'usinage.

7.2 Une existence sous haute surveillance : le MCO

Contrairement à un navire de surface, le sous-marin subit une usure structurelle invisible mais terrible. À chaque plongée, la pression des profondeurs comprime la coque épaisse, tandis que la corrosion saline attaque les systèmes externes. Pour garantir la sécurité de l'équipage, le Maintien en Condition Opérationnelle (MCO) est une discipline de fer.

La vie opérationnelle est rythmée par deux types d'arrêts techniques :

- **L'IE** (Intervention d'Entretien) : réalisée entre deux missions, elle permet de vérifier les systèmes critiques et de régénérer le potentiel du bâtiment pour son prochain départ.
- **L'IPER** (Indisponibilité Périodique pour Entretien et Réparation) : véritable renaissance, ce "grand carénage" survient tous les 10 ans environ. Le sous-marin est mis en cale sèche, ouvert, et littéralement mis à nu. On inspecte les soudures de la coque, on recharge le cœur nucléaire et on remplace l'intégralité du système de combat par des technologies plus modernes. Ce chantier de deux ans est un défi logistique colossal, dont le coût se chiffre en centaines de millions d'euros.

7.3 Le crépuscule d'un guerrier : le destin final

Après 35 à 40 ans de services silencieux, la structure métallique finit par atteindre sa limite de fatigue. Le navire est alors retiré du service actif. Pour un sous-marin nucléaire, cette fin de vie engage une responsabilité environnementale de long terme.

1. **Le désarmement et le décourage** : la première étape, hautement sécurisée, consiste à extraire le combustible nucléaire usagé du réacteur. C'est le moment où le navire perd son "énergie vitale".
2. **Le démantèlement** : la coque est découpée en sections. La "tranche réacteur", contenant la cuve et les circuits primaires, est isolée et transportée vers des sites de stockage spécialisés où elle restera sous surveillance pendant des décennies.
3. **La déconstruction** : le reste du navire, constitué d'aciers spéciaux de très haute qualité et de métaux précieux (cuivre, titane), est recyclé.

Dans de rares cas, un navire d'exception échappe à la fonderie pour devenir un témoin de l'histoire. C'est le destin prestigieux du **Redoutable**, premier SNLE français, qui trône aujourd'hui à la Cité de la Mer de

Cherbourg, offrant aux visiteurs l'occasion unique de toucher du doigt le quotidien des "oreilles d'or" et des commandants.

7.4 Construction et vie du navire (coque et structure)

La naissance monumentale : de l'acier à la mise à l'eau La construction d'un sous-marin (comme les classes Suffren à Cherbourg) s'étale sur plus de dix ans. Elle commence par la découpe de la première tôle et l'assemblage de "blocs" ou "anneaux" de coque épaisse. Contrairement aux navires de surface qui glissent sur une rampe, les sous-marins modernes sont trop denses pour un lancement classique. On utilise des engins de transport spéciaux (marcheurs ou lignes de remorques automotrices) comptant des centaines de roues pour déplacer la masse de 5 000 à 12 000 tonnes vers une forme de radoub ou un élévateur à bateaux (comme l'ascenseur géant de Cherbourg).



Le sous-marin Suffren (SNA), sur le site de Naval Group à Cherbourg,

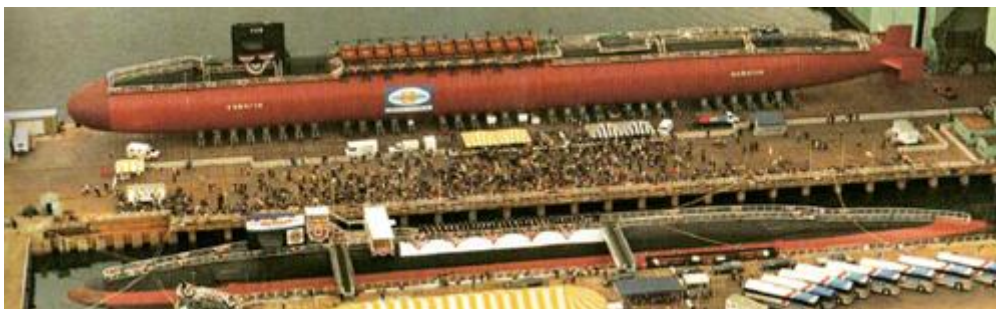


Autres sous-marins en construction

Inauguration et validation physique : le baptême est un moment fort où la marraine brise une bouteille sur la coque. S'ensuivent les essais à la mer : la plongée statique, puis la plongée grande profondeur. La Mise en Service Active (MSA) n'intervient qu'après la validation de toutes les capacités de combat. L'architecture

d'un sous-marin est un équilibre précaire entre une forteresse d'acier indestructible et une machine d'une fragilité acoustique extrême. Chaque ouverture est un défi à la physique des hautes pressions.

Maintenance et "système D" en opération en opération, loin de toute base, la réparation devient un acte de combat. Le choix des pièces embarquées est un calcul de probabilités complexe (optimisation du lot de bord). Le récit de la vie à bord est parsemé d'anecdotes où l'ingéniosité des mécaniciens d'armes a permis de réparer une fuite hydraulique sur un tube lance-torpilles avec les moyens du bord, garantissant ainsi la poursuite de la patrouille.



Lancement d'un SSBN Ohio – Electric Boat à Croton (É-U)

Conclusion

Naviguer sous les mers est une aventure humaine et scientifique qui commence par le tracé d'une courbe hydrodynamique et s'achève dans le fracas maîtrisé des chantiers de déconstruction.

Entre ces deux points, le sous-marin est un organisme vivant, une cité de fer autonome portée par des équipages d'élite. Protégé par une science acoustique de pointe, il agit comme l'ultime rempart de la souveraineté nationale, une ombre indétectable capable de garantir la paix par la menace d'une riposte invisible. Dans ce monde de fer et de pression, le silence n'est pas seulement une contrainte tactique : c'est une religion, une signature et la plus grande fierté de ceux qui servent dans les profondeurs.



Partie 4: **LE CERVEAU – Senseurs, Combat et IA**

*Pour comprendre comment le sous-marin "voit" et combat :
sonars, périscopes, systèmes de combat et futur de l'IA.*

Dans l'obscurité totale des profondeurs, la lumière n'existe pas ; le son devient l'unique vecteur de connaissance. Passé cent mètres de profondeur, l'océan est un monde de ténèbres absolues où les ondes électromagnétiques s'écrasent et s'éteignent. Pour le sous-marinier, "voir" ne signifie pas ouvrir les yeux, mais interpréter les vibrations qui parcourent la masse liquide.

Chapitre 1 : L'enjeu : sonder l'environnement sans se révéler

L'enjeu de la détection sous-marine est régi par une règle d'or : celui qui détecte l'autre en premier gagne le combat. Naviguer en immersion, c'est évoluer dans un milieu tridimensionnel complexe où les obstacles sont nombreux : relief sous-marin (montagnes, canyons), épaves, câbles sous-marins, et bien sûr, les autres navires. La difficulté réside dans le fait que la plupart des outils de détection classiques (radar, laser, caméras) sont inopérants sous l'eau. Le sous-marin doit donc exploiter toutes les anomalies physiques du milieu — principalement acoustiques, mais aussi électromagnétiques et visuelles — pour se construire une "image tactique" de ce qui l'entoure.



Un peu d'humour !

L'image tactique : bien plus qu'une simple carte

À bord d'un sous-marin, le mot *tactique* peut prêter à confusion. L'« image tactique » n'est pas seulement une carte indiquant où se trouve le bâtiment et comment naviguer. C'est une représentation dynamique et constamment mise à jour de tout ce qui peut influencer la sécurité ou la mission : positions probables des navires, routes estimées, zones de bruit, risques de détection, contacts sonar incertains, ou encore contraintes géographiques.

Cette image n'est donc pas un décor, mais un outil d'évaluation. Elle permet d'identifier les dangers, de hiérarchiser les menaces et d'anticiper les réactions adverses. À partir d'elle, l'équipage décide d'esquiver, de se dissimuler, de changer de profondeur ou, si la mission l'exige, d'engager. L'« image tactique » est ainsi la conscience du sous-marin : une synthèse de perception, d'analyse et d'intention, indispensable pour évoluer dans un environnement où l'invisible règne.

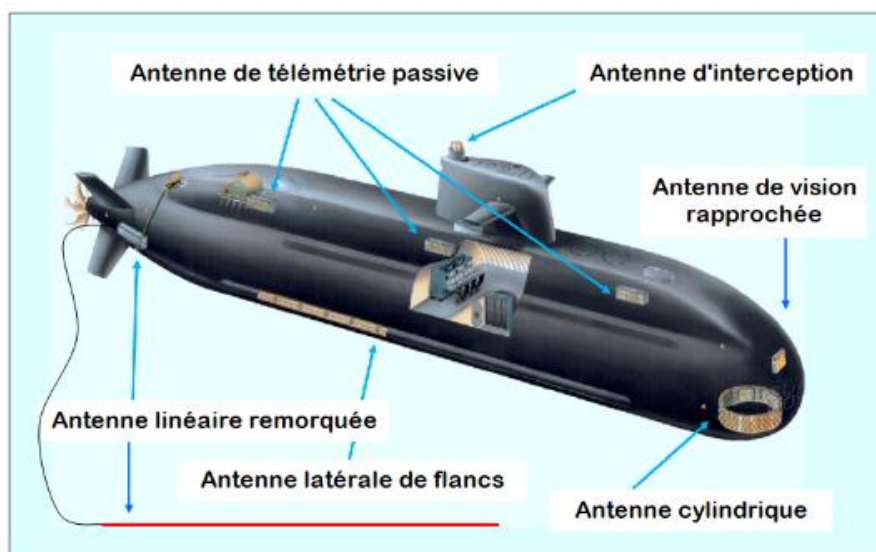
Chapitre 2 : La panoplie des senseurs : une approche multi-spectrale

2.1 La Suite Sonar : une panoplie sensorielle sur mesure

C'est le cœur névralgique du bâtiment. Le mot **SONAR** (Sound Navigation and Ranging) désigne l'équivalent du radar pour le milieu aquatique. Le son se propageant particulièrement bien et loin dans l'eau (environ 1500 m/s, soit plus de quatre fois plus vite que dans l'air), il est le vecteur principal de détection.

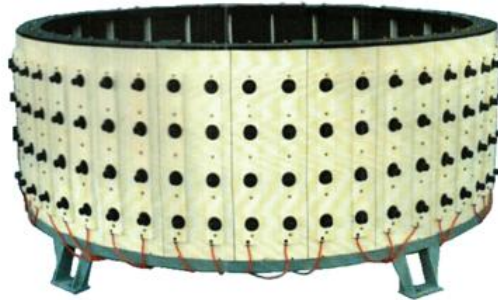
Pour l'architecte, le défi consiste à intégrer une "suite" de plusieurs antennes réparties sur toute la coque. Ce choix est dicté par une loi physique simple : la gamme de sons à capter est immense, allant de quelques Hertz (sons très graves) à des centaines de kHz (sons très aigus). Or, si les sons aigus s'atténuent vite, les sons graves (basses fréquences) se propagent sur des centaines de milles marins. Pour détecter ces sons lointains, la physique impose une antenne de grande taille : plus la fréquence est basse, plus la surface d'écoute doit être large.

C'est pourquoi le sous-marin dispose d'une panoplie adaptée à chaque type d'écoute :



Exemple typique d'une suite de sonars de sous-marin

- **L'antenne d'étrave (sphérique ou cylindrique)** : Située à l'avant dans un dôme dédié, elle offre une vue panoramique et capte une large gamme de fréquences moyennes.



Antenne cylindrique et sphérique pour étrave de sous-marins



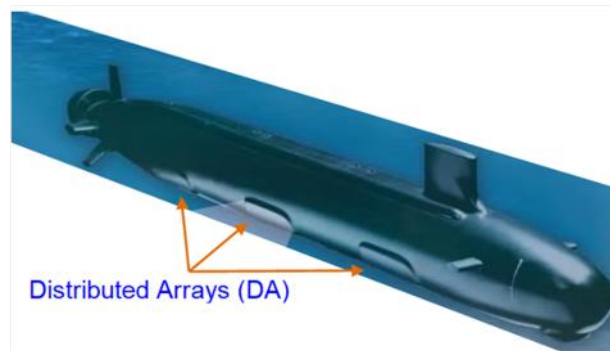
Antennes combinées dans l'étrave du sous-marin américain Seawolf

- **Les antennes latérales (de flanc)** : Ce sont de grandes antennes linéaires courant sur les côtés de la coque. Leur immense surface permet de "voir" loin avec une grande précision de gisement (direction).

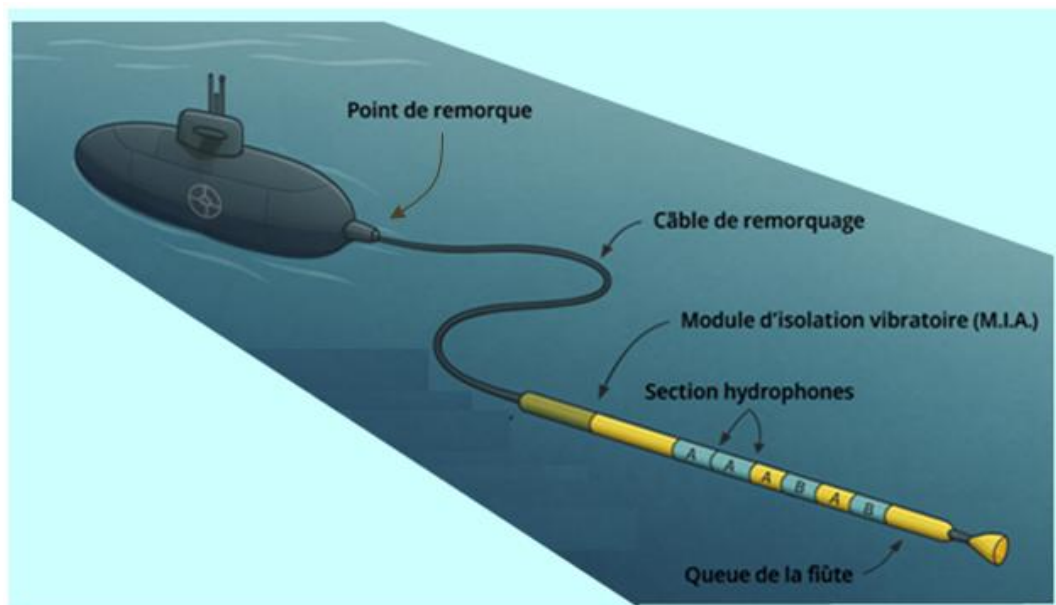


Antenne Latérale de flanc sur sous-marin anglais – Fournisseur Thalès

- **Le sonar de télémétrie acoustique (distributed arrays)** : Généralement composé de trois panneaux passifs disposés de chaque côté de la coque. Pour mesurer la distance d'une cible par triangulation sans émettre de son, l'architecte doit maximiser l'écartement entre ces panneaux sur la longueur du navire ; c'est la "base de calcul" qui définit la précision de la mesure.



- **L'antenne linéaire remorquée (la "flûte")** : Un tuyau souple de 5 à 10 cm de diamètre, bourré de composants acoustiques et électroniques, pouvant mesurer plusieurs centaines de mètres. Déployée loin derrière le sillage, elle s'affranchit des bruits propres du sous-marin pour écouter les très basses fréquences (les sons les plus graves et les plus lointains). Selon la classe du navire, au repos, elle est soit logée dans une gouttière fixe, soit enroulée sur un treuil interne.



Sous-marin avec son antenne linéaire remorquée de plusieurs centaines de mètres

- **Le sonar actif** : Bien que présent, il est facultatif et rarement utilisé en mission. En émettant un "ping" sonore, le sous-marin révèle immédiatement sa position exacte à tout l'océan. On ne l'utilise qu'en dernier recours pour un tir de torpille ou pour la navigation de sécurité.
- **Le sonar de sécurité nautique (ou sonar de vision rapprochée)** : À l'inverse, ce petit sonar utilise des hautes fréquences (sons aigus) pour obtenir une image très précise mais à courte portée, indispensable pour la sécurité nautique. C'est effectivement le seul moment où le sous-marin accepte de "voir" son environnement immédiat de manière active, car à ces fréquences très élevées (sons très aigus), la portée est courte et le signal se dissipe vite, ce qui limite le risque d'être détecté par un ennemi lointain.

- **Évitement de mines** : capable de détecter de petits objets sphériques ou cylindriques entre deux eaux.
- **Navigation sous les glaces** : indispensable pour les sous-marins opérant en Arctique, afin de repérer les "quilles de glace" (les parties immergées des icebergs) qui peuvent descendre très profondément.
- **Passages resserrés** : pour naviguer dans des goulets rocheux, des fjords ou des détroits encombrés, il permet de vérifier la distance réelle aux parois avec une précision centimétrique, là où les cartes marines pourraient manquer de détails.

Le saviez-vous ?

L'échographe est un sonar

Un sonar de vision rapprochée fonctionne pour un sous-marin un peu comme un échographe pour un humain : tous deux émettent des ondes acoustiques et reconstruisent une image de l'environnement immédiat à partir de leur écho. Mais leurs échelles sont très différentes :

Un **échographe médical** utilise des ultrasons très élevés, typiquement entre 2 et 15 MHz, ce qui permet une résolution fine mais limite la portée à quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres dans les tissus.

Un **sonar de vision rapprochée** de sous-marin travaille au contraire dans des fréquences bien plus basses, souvent entre 100 et 300 kHz, parfois jusqu'à 500 kHz pour les modèles à très haute résolution. Ces fréquences offrent une portée de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, adaptée à la détection d'obstacles, à la navigation fine ou à l'approche silencieuse.

Même principe physique, donc, mais des fréquences et des portées adaptées à deux mondes radicalement différents.

MHz : méga (million) de vibrations par seconde ; **kHz** : kil(mille) vibrations par seconde

Le saviez-vous ?

Acoustique

Les sonars actifs et passifs : des oreilles sous l'eau : les sonars modernes utilisent des réseaux de capteurs piézoélectriques pour détecter des bruits jusqu'à des milliers de kilomètres. Les sonars passifs écoutent les vibrations des hélices ou des machines ennemies, tandis que les sonars actifs envoient des impulsions acoustiques pour "illuminer" les cibles, comme un radar sous-marin.

La furtivité acoustique : l'art de disparaître : pour réduire leur signature acoustique, les sous-marins sont équipés de revêtements anéchoïques, des matériaux composites absorbant les ondes sonores. Les hélices sont conçues avec des profils spéciaux pour minimiser la cavitation, une source majeure de bruit.

Le saviez-vous ?

Détection

Le sous-marin peut écouter sans bouger: grâce aux antennes remorquées, un sous-marin peut rester immobile et capter les sons sur des dizaines de kilomètres. Ces antennes souples, déployées derrière le navire, filtrent les bruits parasites et offrent une écoute passive ultra-précise. L'immobilité devient une tactique d'observation.

Des "oreilles" à l'arrière: un sous-marin est sourd juste derrière ses hélices à cause du bruit de sa propre propulsion (la "zone d'ombre"). Pour y remédier, il déroule une flûte : une antenne sonar remorquée de plusieurs centaines de mètres. C'est le seul moyen d'écouter ce qui se passe dans ses "six heures" (le "12 heures" étant vers l'avant).

Le sonar peut voir derrière: certains sonars modernes utilisent des techniques de réverbération et de traitement numérique pour "voir" derrière des obstacles. En analysant les échos indirects, ils peuvent reconstituer la forme d'un objet caché. Ce n'est pas de la magie, mais de l'acoustique avancée.

Un sonar actif n'est pas toujours synonyme de détection efficace. En certaines conditions, il peut révéler davantage la position de l'émetteur que celle de la cible, surtout face à un adversaire entraîné. Le silence reste souvent l'arme la plus performante.

Note : Les détails techniques de la propagation du son et le traitement du signal sonar seront abordés en détail dans un chapitre suivant.

2.2 Les senseurs optiques et optroniques

Dès que le sous-marin remonte à l'immersion périscopique, il peut utiliser ses senseurs "aériens" logés dans le massif (la "voile").

Histoire du périscope sous-marin

L'ère du périscope optique : le commandant "à la poignée"

On raconte que, dans les premiers sous-marins, le périscope était presque un personnage à part entière. Un tube d'acier qui traversait le bâtiment de haut en bas, grinçant parfois dans sa gaine, et que le commandant venait embrasser du front en collant son œil à l'oculaire. Il fallait le voir, planté là, les deux mains sur les poignées, tournant lentement sur lui-même comme un phare humain. La vision était entièrement optique : un ballet de lentilles, de prismes et de miroirs qui renvoyait la lumière depuis la tête émergée jusqu'au poste de commandement.

Une mécanique splendide, mais capricieuse : le moindre choc pouvait dérégler l'alignement, et le tube imposait sa tyrannie au plan du sous-marin. Le PCNO devait être juste sous le mât, le plus haut possible, comme si tout l'aménagement intérieur orbitait autour de ce long œil de verre.

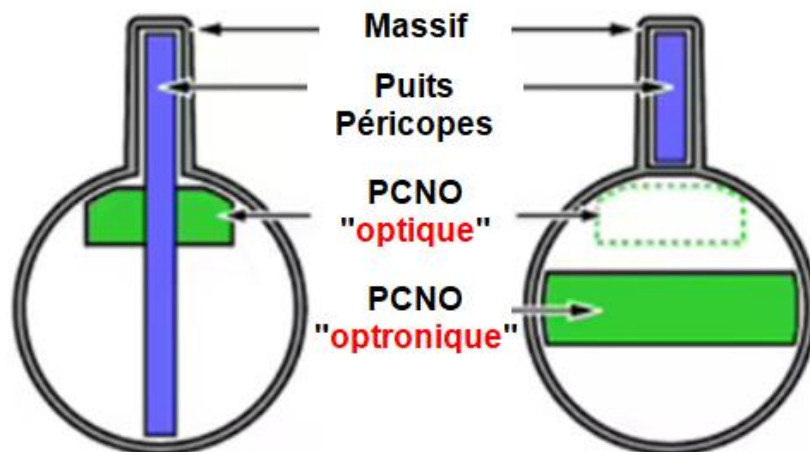
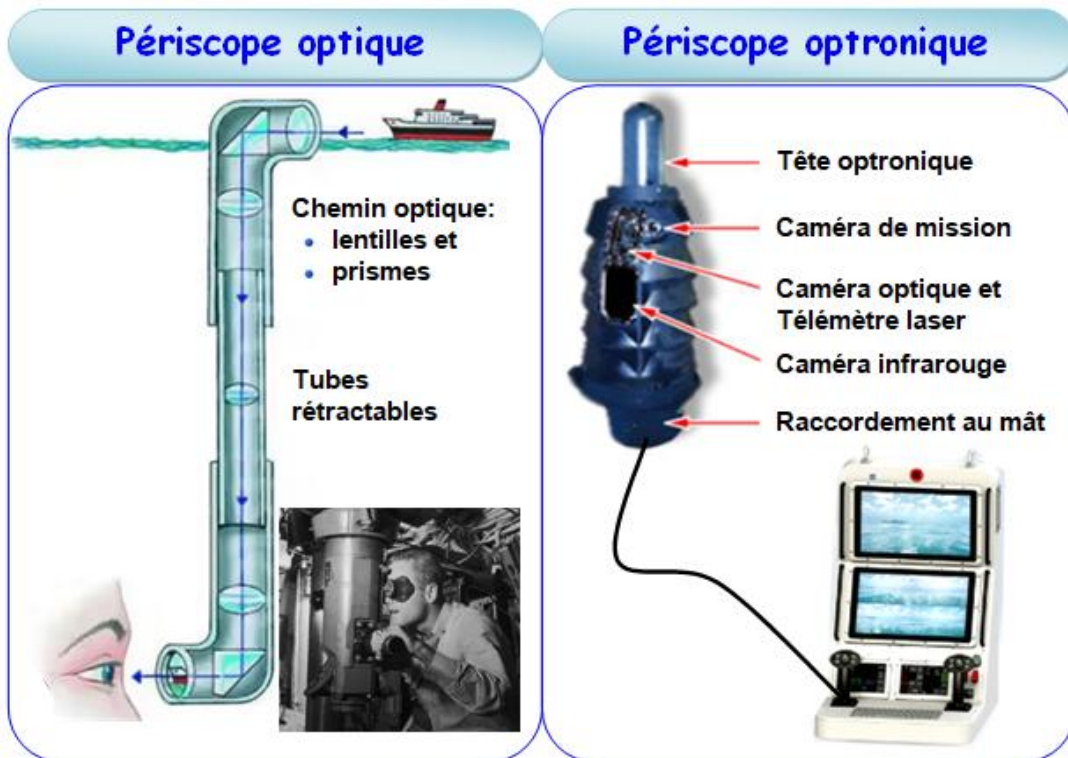
L'avènement des mâts optroniques : la révolution numérique

Puis, presque du jour au lendemain, le périscope a cessé d'être un tube. L'arrivée des mâts optroniques a fait disparaître la colonne optique, remplacée par une tête bardée de capteurs : caméras haute définition,

infrarouge, télémètre laser, parfois même des capteurs capables de travailler dans des conditions de lumière ridiculement faibles.

La lumière n'était plus guidée par des lentilles, mais convertie en données. Un simple câble — un cordon ombilical numérique — reliait désormais la tête au PCNO (Poste de commandement). Plus besoin d'un puits vertical, plus besoin de placer le poste de commandement sous le mât. On pouvait enfin dessiner l'intérieur du sous-marin sans se battre contre un tube de plusieurs mètres.

Et surtout, la tête pouvait sortir quelques secondes, capturer une image panoramique complète, puis disparaître aussitôt. Une sorte de clin d'œil furtif à la surface.



Notez l'importance du puits (bleu) nécessaire pour un périscopie optique

Le futur : vers la tête optronique déportée et flottante

Aujourd'hui, certains ingénieurs rêvent déjà de la prochaine étape — et peut-être que quelques prototypes dorment dans des hangars anonymes. L'idée est simple et audacieuse : détacher complètement l'œil du sous-marin.

Imagine une petite boule flottante, presque anodine, qui dépasse à peine de la surface. À l'intérieur, une tête optronique complète. Sous l'eau, un câble fin descend jusqu'au sous-marin resté en immersion profonde. La boule peut dériver, se laisser porter par la houle, ou même être légèrement propulsée pour se placer au meilleur endroit.

Le sous-marin, lui, reste invisible. Il observe la surface comme un fantôme, sans jamais rompre sa discrétion. Une sorte de périscope sans périscope, un œil détaché, presque un éclairer.

Ainsi va l'histoire du périscope : d'un tube massif que l'on tournait à la force des bras, à un mât numérique qui ne montre sa tête que quelques secondes, jusqu'à l'idée d'un œil flottant, libre, presque indépendant. Une évolution qui raconte, en filigrane, la quête constante des sous-marinières : voir sans être vu. On peut imaginer des versions encore plus avancées : têtes optroniques autonomes, mini-drones de surface ou aériens lancés depuis le sous-marin, réseaux de capteurs déployés temporairement autour du bâtiment...

Conclusion

En un siècle, le périscope est passé :

- d'un tube optique massif manipulé à la force des bras,
- à un mât optronique numérique compact et polyvalent,
- et bientôt à une tête déportée, flottante ou drone, permettant une observation discrète sans jamais rompre l'immersion.

Cette évolution reflète la transformation globale des sous-marins : moins de mécanique, plus d'optronique, plus de discrétion, plus de liberté d'aménagement — et une capacité croissante à "voir sans être vu".

Les périscope de sous-marin : leurs missions

Le périscope de veille et d'attaque : surveiller, identifier, décider

C'est l'outil tactique par excellence. Il sert à tout ce qui concerne la situation en surface :

- Surveiller l'horizon : repérer un navire, un avion, une côte, un danger.
- Identifier une cible : silhouette, pavillon, type de bâtiment, comportement.
- Évaluer une menace : trajectoire, vitesse, distance, intentions.
- Préparer une action : approche discrète, calcul de tir, estimation des relèvements.
- Contrôler la sécurité de la zone avant de faire surface ou de lancer un engin.

C'est l'œil du commandant lorsqu'il doit comprendre la scène tactique et prendre une décision immédiate. Il est utilisé lors des phases les plus sensibles : montée au périscope, reconnaissance, attaque, ou simple veille discrète.

Le périscope de visée astrale : garantir la navigation autonome

Celui-ci n'a rien de tactique : il est stratégique. Sa mission est de permettre au sous-marin de se localiser avec précision, même après des jours ou des semaines en immersion.

Il sert à :

- Observer les étoiles pour recalibrer la centrale à inertie.
- Corriger la dérive naturelle des systèmes de navigation internes.
- Maintenir une position fiable sans jamais dépendre d'un signal extérieur.
- Assurer la continuité de mission même en environnement contesté, brouillé ou dégradé.

C'est un outil de navigation souveraine, utilisé à intervalles réguliers, souvent de nuit, lorsque les conditions le permettent. Il garantit qu'un sous-marin peut traverser un océan sans jamais demander son chemin.

Les têtes optroniques déportées (futur) : observer sans s'exposer

Leur mission serait d'offrir une observation de surface ultra-discrète, tout en laissant le sous-marin en immersion profonde.

Elles pourraient servir à :

- Surveiller une zone sans remonter le bâtiment.
- Observer un port, un mouillage, un convoi depuis plusieurs kilomètres.
- Collecter du renseignement en restant totalement invisible.
- Dissocier l'observation du risque : si la tête est repérée, le sous-marin ne l'est pas.
- Créer un poste d'écoute avancé, dérivant naturellement ou se plaçant à distance.

C'est l'idée d'un éclaireur discret, un œil extérieur qui travaille pour le sous-marin sans compromettre sa position.

En synthèse

Chaque périscope répond à une mission bien distincte :

Veille / attaque : comprendre la situation tactique, identifier, surveiller, décider.

Visée astrale : garantir la navigation autonome et la précision stratégique.

Tête déportée (futur) : observer la surface sans jamais exposer le sous-marin.

Une véritable boîte à outils visuelle, où chaque instrument a son rôle dans la survie, la discrétion et l'efficacité du bâtiment.

2.3 Les senseurs électromagnétiques : ESM et Radar

Le sous-marin surveille également le spectre électromagnétique pour détecter les émissions adverses.

- **L'ESM (Electronic Support Measures)** : c'est une antenne qui écoute les ondes radar et radio environnantes. Si un avion de patrouille maritime allume son radar, l'ESM du sous-marin le détecte instantanément, souvent bien avant que le radar de l'avion ne reçoive un écho du périscope. C'est l'outil de veille de sécurité par excellence.

- **Le Radar** : le sous-marin possède son propre radar de navigation, mais il ne l'utilise quasiment jamais au combat. Émettre au radar, c'est comme allumer une lampe torche dans une forêt sombre : on voit, mais on est vu par tout le monde. Il n'est utilisé qu'en surface, pour les entrées au port ou en cas de nécessité absolue de sécurité nautique.
- **Anomalie magnétique** : certains capteurs permettent de détecter les variations du champ magnétique terrestre causées par la masse d'acier d'un autre bâtiment. C'est une méthode de détection à très courte portée mais indécélable par la cible. Ce moyen de détection est plutôt l'apanage des avions de patrouille maritime,

2.4 Les communications : le lien avec le monde

Bien qu'elles ne soient pas des senseurs de détection au sens strict, les antennes de communication permettent de recevoir des données de détection provenant d'autres sources (avions, satellites, autres navires).

- **Antennes satellite (SATCOM)** : pour les transmissions de données à haut débit à l'immersion périscopique.
- **Remorques VLF (Very Low Frequency)** : des fils traînants qui permettent au sous-marin de recevoir des messages d'ordre stratégique tout en restant à grande profondeur, l'eau étant perméable aux ondes très basses fréquences.

Le saviez-vous ?

Discrétion

La discrétion acoustique d'un sous-marin dépend de sa gestion vibratoire interne. Pompes, ventilateurs et convertisseurs sont montés sur des systèmes d'isolement complexes. Une défaillance mineure peut générer une signature détectable à des dizaines de kilomètres.

Le fond marin est un labyrinthe: les reliefs sous-marins — canyons, dorsales, failles — influencent la propagation du son. Un sous-marin peut se cacher dans une vallée acoustique, où les ondes se dispersent. Les cartes bathymétriques sont aussi précieuses que les cartes stratégiques : elles révèlent les refuges invisibles.

Vitesse du sous-marin : un sous-marin moderne est souvent plus discret à grande vitesse qu'à petite allure. À très basse vitesse, certaines vibrations mécaniques deviennent audibles, alors qu'à une vitesse légèrement supérieure, l'écoulement hydrodynamique se stabilise et masque mieux les bruits internes. Les régimes de rotation lents des auxiliaires et de la propulsion génèrent des raies discrètes stables, plus faciles à identifier qu'un bruit hydrodynamique légèrement accru mais plus large en fréquence.

On peut "sentir" un sous-marin à des kilomètres: les sous-marins laissent derrière eux une traînée de bulles, de chaleur et de perturbations magnétiques. Les sonars modernes et les satellites peuvent détecter ces signatures, même si le sous-marin lui-même reste invisible.

Chapitre 3 : Le système tactique : le cerveau du sous-marin



Le PCNO (Poste Central Navigation Opérations) d'un sous-marin moderne (imaginaire)

Le système tactique, souvent appelé **CMS** (*Combat Management System*), est le centre nerveux où convergent toutes les informations. Son rôle est de fusionner les données des senseurs (sonars, radars, optronique) pour créer une image fidèle de l'environnement et permettre au commandement de prendre les décisions vitales.

Plan de ce Chapitre :

- **3.1 La construction de la situation tactique** : De l'écho à la cartographie.
- **3.2 La navigation stratégique** : Sécurité, évitement et "reprise de vue".
- **3.3 L'engagement militaire** : Identifier, classifier et frapper.
- **3.4 L'Interface Homme-Machine (IHM)** : Consoles, Table de Plot et rôle du Commandant.
- **3.5 L'Intelligence Artificielle (IA)** : L'avenir de la guerre sous-marine.

Le saviez-vous ?

Mission principales du sous-marin

La dissuasion nucléaire : une mission permanente : les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) sont au cœur de la stratégie de dissuasion. En France, un SNLE est toujours en patrouille, prêt à riposter en cas d'attaque contre le pays. Leur localisation est secrète, même pour le président... jusqu'au moment critique.

Les sous-marins influencent les négociations : lors de tensions internationales, un État peut discrètement "sortir" un sous-marin en patrouille pour envoyer un message implicite. Aucun communiqué officiel n'est nécessaire : les services de renseignement adverses comprennent très bien le signal.

Les sous-marins, acteurs de la diplomatie : la présence d'un sous-marin dans une zone disputée (comme la mer de Chine méridionale) envoie un message politique fort. Sans agressivité ouverte, il rappelle la capacité d'un pays à projeter sa puissance, même loin de ses bases.

Les sous-marins, sentinelles invisibles des océans : les sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) patrouillent en silence pour surveiller les mouvements de navires ennemis, protéger les porte-avions ou collecter des renseignements. Leur discrétion en fait les "yeux et oreilles" des marines modernes, capables d'opérer sans être détectés pendant des mois.

Les sous-marins, chasseurs de sous-marins : la mission principale des SNA est de traquer... d'autres sous-marins. Équipés de sonars ultra-performants et de torpilles intelligentes, ils peuvent neutraliser une menace sous-marine avant même qu'elle ne soit détectée par les forces de surface.

Autre missions du sous-marin

Les sous-marins peuvent escorter... sans être vus: un sous-marin peut protéger un groupe aéronaval en restant à distance, prêt à intercepter une menace sous-marine. Le groupe ne le voit pas, l'ennemi ne le détecte pas, mais sa présence change complètement la posture défensive.

Un sous-marin peut lancer des opérations spéciales : les sous-marins sont capables de déployer discrètement des commandos ou des drones sous-marins pour des missions de renseignement ou de sabotage. Leur capacité à infiltrer des zones hostiles en fait un outil privilégié des opérations clandestines.

Un sous-marin peut bloquer un détroit : en temps de crise, un seul sous-marin peut contrôler un point stratégique comme le détroit de Gibraltar ou d'Ormuz. En plongeant discrètement, il peut interdire le passage à des navires ennemis sans tirer un seul coup de feu, simplement par sa présence dissuasive.

La guerre des câbles sous-marins : les sous-marins jouent un rôle clé dans la protection (ou la menace) des câbles sous-marins, qui transportent 99 % des communications mondiales. En cas de conflit, couper ces câbles pourrait paralyser un pays entier. Certains sous-marins sont équipés pour les réparer... ou les saboter. Plus de 95 % du trafic Internet mondial passe par des câbles sous-marins. Certains sous-marins spécialisés peuvent les inspecter, les réparer... ou les surveiller. Leur protection est devenue un enjeu géopolitique majeur.

Les sous-marins cartographient le monde : les fonds marins sont encore largement inconnus. Les sous-marins militaires contribuent à les cartographier avec une précision inégalée : reliefs, canyons, zones volcaniques, routes acoustiques. Ces données sont stratégiques pour la navigation... et pour la guerre.

Les missions peuvent durer des mois : certains sous-marins nucléaires restent en patrouille plus de 70 jours sans remonter. Leur endurance n'est limitée ni par le carburant ni par l'oxygène, mais par la nourriture... et la résistance psychologique de l'équipage.

Le saviez-vous ?



Exemples de centres des opérations d'un sous-marin (PCNO)

3.1 La construction de la situation tactique : de l'écho à la cartographie

La finalité du système tactique est de passer du "bruit" à la "connaissance". Contrairement à un navire de surface qui voit son environnement grâce au radar, le sous-marin évolue dans un brouillard acoustique.

La fusion de données

Le système reçoit en temps réel des flux provenant de la panoplie de sonars (étrave, flancs, antenne remorquée), mais aussi des données de navigation internes (centrale inertielle pour la position et loch pour la vitesse). Le premier défi est la fusion de données : si l'antenne latérale et l'antenne remorquée détectent toutes deux un bruit d'hélice dans le même secteur, le système doit comprendre qu'il s'agit d'un seul et même "mobile" (une cible) et non de deux objets différents.

Le report sur la carte (Mapping)

Chaque mobile est reporté sur une cartographie numérique dynamique. On cherche à fixer deux types de positions :

1. **La position propre** : Où sommes-nous exactement ? En plongée, sans GPS, le système calcule la position par estime (vitesse + direction) corrigée par des cartes bathymétriques (relief du fond).

2. **La position des mobiles** : Pour chaque objet détecté, le système calcule son gisement (angle par rapport au sous-marin), sa distance, son immersion, sa vitesse et sa route.

Le saviez-vous ?

Cartographie

Le système peut "écouter" la mer entière: grâce aux antennes remorquées et aux antennes de flancs, le système tactique peut suivre des contacts à des dizaines de kilomètres. Le système affiche ces pistes comme on le ferait avec un radar... mais chaque point est un son interprété, pas un écho lumineux sur l'écran.

Aveugle ! Un sous-marin « voit » rarement sa cible : il la reconstruit mentalement. Cap, vitesse, type et intentions sont déduits à partir de quelques indices acoustiques fragmentaires. La situation tactique est donc souvent une hypothèse probabiliste, affinée en permanence, et non une image nette.

Le sonar peut dessiner des images: les sonars à haute fréquence peuvent produire des images si précises qu'ils révèlent les détails d'une épave, d'un câble... ou d'un plongeur. Certains modèles militaires peuvent même identifier un type de sous-marin à partir de sa signature acoustique, comme une empreinte vocale. Oui, mais, la portée n'est que d'une centaine de mètres.

Le système tactique connaît les fonds mieux que les cartes: les sonars de fond et les capteurs inertiels permettent de détecter des reliefs non cartographiés. Le PCNO met à jour en temps réel une carte bathythermique locale, essentielle pour déterminer la vitesse du son et naviguer dans des zones complexes ou peu profondes.

3.2 La navigation stratégique : sécurité et "reprise de vue"



Faire naviguer un sous-marin, c'est l'art de se déplacer sans jamais devenir une proie. Le système tactique offre des outils de simulation essentiels pour ce "jeu d'échecs" en trois dimensions.

Le saviez-vous ?

Navigation

La navigation inertielle, une précision atomique : les sous-marins utilisent des systèmes de navigation inertielle (SINS) couplés à des gyroscopes laser ou à fibre optique. Ces systèmes, combinés à des accéléromètres ultra-précis, permettent de déterminer la position avec une erreur de moins de 1 mile nautique après 24 heures de plongée, même sans GPS.

La remontée, un moment magique : quand le sous-marin refait surface après des semaines en plongée, l'air frais et la lumière du soleil sont une véritable récompense. Ce moment, appelé "la remontée", est souvent célébré avec enthousiasme par l'équipage. Un souvenir inoubliable pour votre premier embarquement !

Un sous-marin n'est jamais parfaitement immobile. Même posé dans l'eau, il subit courants, dérives internes et micro-mouvements. Maintenir une position tactique stable demande une gestion fine de la flottabilité et une anticipation constante de l'environnement.

Les fonds mouvants: Les cartes bathymétriques peuvent être trompeuses. Le fond marin évolue : sédiments, glissements, épaves et reliefs mobiles modifient la propagation acoustique. Un commandant prudent considère toujours le fond comme un acteur dynamique, jamais comme un décor figé.

Il existe des "lacs" sous-marins: dans certaines zones des océans, comme le golfe du Mexique, des poches d'eau hypersalée forment des "lacs" sous l'eau. Si un sous-marin y pénètre, il peut couler comme dans du sable mouvant, car cette eau est si dense qu'elle ne se mélange pas avec le reste.

Les mers peu profondes sont les plus dangereuses : les zones côtières, riches en reliefs et en bruits parasites, sont un cauchemar acoustique. Pourtant, ce sont souvent les zones les plus stratégiques. Les sous-marins modernes doivent y évoluer silencieusement, parfois à quelques mètres du fond.

Définir et tenir une route

Le système ne se contente pas d'indiquer le cap. Il aide à choisir une route en sécurité selon l'objectif :

- **Discrétion** : calculer si la route prévue passe par des zones où la propagation du son est favorable à l'ennemi (couches thermiques).
- **Abri des prédateurs** : se positionner dans des zones "d'ombre" acoustique où le sous-marin devient indétectable.
- **Évitement et Fuite** : en cas de détection d'une menace (une torpille ou un avion de patrouille maritime), le système calcule instantanément des routes de fuite optimales pour rompre le contact acoustique.

L'évaluation des risques : La "reprise de vue"

L'un des moments les plus critiques pour un sous-marin est la reprise de vue en surface (remontée à l'immersion périscopique). Le système tactique utilise des outils de simulation et de prédiction :

- Il analyse les dernières positions connues de tous les navires de surface.
- Il vérifie s'il existe des "zones d'ombre" où un navire rapide pourrait se cacher.

- Il prévient le risque de collision : avant de remonter, le commandant doit être certain que le secteur est "clair".

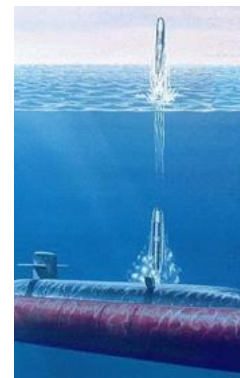
Le saviez-vous ?

Communications

Les sous-marins communiquent... avec des lasers: à grande profondeur, les ondes radio ne passent pas. Les sous-marins utilisent des systèmes de communication par laser ou par ondes acoustiques ultra-basses, capables de traverser des milliers de kilomètres d'eau.

Le monde extérieur disparaît: pas de réseau, pas de nouvelles, pas de ciel. Le sous-marin est une bulle coupée du monde. Les messages sont rares, filtrés, parfois retardés. On vit dans un temps suspendu, où l'extérieur n'existe plus... jusqu'à la remontée.

3.3 L'engagement militaire : identifier, classifier et frapper



Tir de torpille et tir de missile

Une fois les mobiles détectés, le système passe en mode "guerrier". C'est ici que la puissance de calcul remplace l'intuition.

Évaluer et Classifier

Le système tactique compare les signatures acoustiques reçues avec une immense base de données (la "bibliothèque de bruits").

- **Identification** : est-ce un cargo, une frégate ou un autre sous-marin ?
- **Classification** : est-ce une menace immédiate ? Le système évalue la dangerosité en fonction du type de bâtiment et de son comportement (s'il accélère vers nous, il devient une menace prioritaire).

Le saviez-vous ?

Système de combat et situation tactique

Pas de fenêtres: à l'exception de quelques modèles de recherche, les sous-marins militaires n'ont aucun hublot. La structure serait trop fragilisée par la pression. Le commandant ne "voit" jamais l'extérieur avec ses yeux, mais uniquement via les écrans des sonars et le périscope (qui est aujourd'hui souvent un mât optronique).

Les systèmes de combat, un cerveau numérique : les sous-marins modernes sont équipés de systèmes de combat intégrés. Ces systèmes fusionnent les données des sonars, radars et capteurs pour fournir une image tactique en temps réel, permettant de suivre des dizaines de cibles simultanément.

Le centre de commandement est un cerveau collectif : contrairement à un cockpit d'avion, ce centre n'est pas un poste individuel : c'est un espace où plusieurs opérateurs, autour du commandant, travaillent ensemble. Chacun gère une partie du puzzle — sonar, navigation, armes, guerre électronique — et le système tactique assemble le tout.

Les systèmes de simulation tactique permettent à la fois de créer des scénarios pour la prise de décision et de générer des situations d'entraînement réalistes. En mission, ils injectent des "fantômes" tactiques — faux contacts, faux échos, faux événements — offrant à l'équipage un entraînement complet sans jamais révéler la position du sous-marin ni interrompre l'opération

Le système tactique, cœur du système de combat, prend des décisions... mais ne tire jamais: les algorithmes peuvent proposer une manœuvre, une classification ou une solution de tir, mais la décision finale appartient toujours au commandant. Le système tactique est un conseiller, jamais un déclencheur.

La Maîtrise de l'Engagement

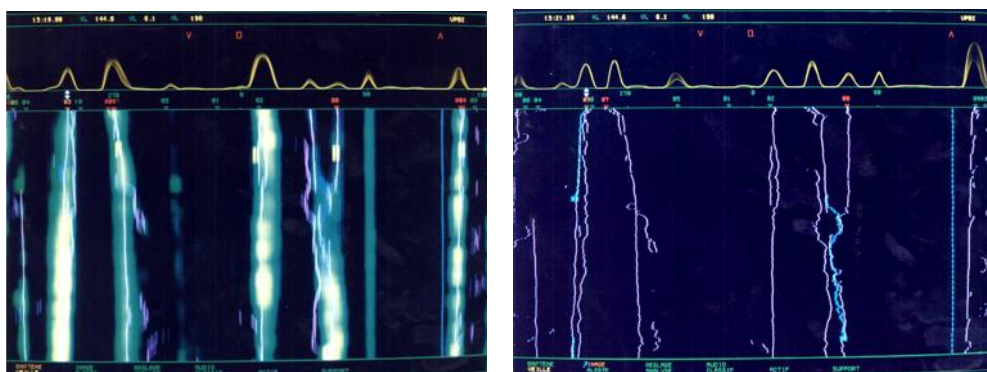
Lorsqu'une attaque est décidée, le système devient un outil de conduite de tir :

- **Simulation avant mise en œuvre :** on simule la trajectoire de la torpille pour vérifier qu'elle ne risque pas de perdre sa cible ou, pire, de revenir vers le lanceur.
- **Suivi des projectiles :** une fois la torpille lancée, elle reste souvent reliée au sous-marin par un fil de cuivre ou une fibre optique (filoguidage). Le système tactique "pilote" la torpille en temps réel en fonction des manœuvres d'évitement de la cible.
- **Évaluation de la performance :** le système analyse le bruit de l'impact ou de l'explosion pour confirmer la destruction ou la neutralisation de la menace.

3.4 L'Interface Homme-Machine (IHM) : l'opérateur au cœur de la tâche

Le Poste Central Navigation Opérations (PCNO) – parfois abrégé en Centre Opérations (CO) – d'un sous-marin moderne se présente comme un alignement de 5 à 10 consoles doubles multifonctions (*Illustration*). Chaque poste est constitué de deux écrans verticaux haute résolution permettant une manipulation fluide d'une masse colossale de données.





Exemple d'écran de veille sonar : information brute (cascades) et information filtrée

La Révolution SUBTICS : de l'équipement à la fonction

Jusque dans les années 1990, l'organisation au sein du CO était centrée sur l'équipement : il y avait l'opérateur du sonar d'étrave, l'opérateur des flancs, etc. Chaque marin était le "serveur" d'une machine précise.

La révolution introduite par le système français **SUBTICS** (*Submarine Tactical Integrated Combat System*) a radicalement changé ce paradigme. Désormais, le système fusionne toutes les sources en amont et l'opérateur n'est plus lié à un capteur, mais à une tâche opérationnelle. Cette approche permet une concentration d'expertise bien plus efficace :

- **La détection (longue et courte distance)** : des opérateurs sont dédiés à la veille. Ils scrutent les "cascades" (waterflow) sonars (données brutes) pour extraire le moindre signal du bruit de fond ambiant, que ce signal provienne de la flûte remorquée ou du sonar de flanc.
- **La classification** : un opérateur spécialisé (souvent appelé "l'oreille d'or" ou l'analyste acoustique) se concentre sur l'identification précise du mobile. À l'aide de bibliothèques de données, il détermine s'il s'agit d'un navire de commerce, d'un bâtiment de guerre ou d'un autre sous-marin.
- **La détermination de distance et analyse de mouvement** : une tâche critique consistant à calculer, par l'analyse des variations de gisement (Target Motion Analysis - TMA), la distance exacte, la vitesse et la route d'une cible (le "triangle de tir").

Cette dualité d'écrans permet à chaque spécialiste de garder sur un moniteur la réalité du signal sonore (données brutes pour vérification) tout en gérant sur l'autre la situation tactique intégrée (le résultat de son analyse reporté sur la carte).

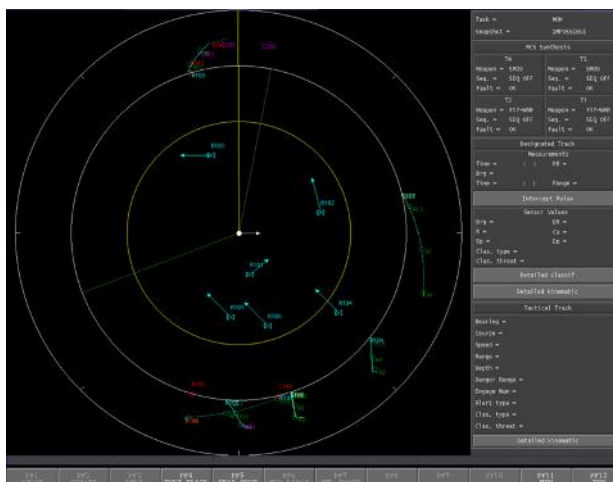
La Table de Plot : le carrefour de la décision

Au centre de ce dispositif se trouve la Table de Plot. Autrefois véritable meuble où l'on traçait manuellement les routes au crayon sur des calques papier, elle est devenue une vaste table à écran électronique horizontal.

C'est l'outil de synthèse par excellence. Le Commandant et l'Officier de Garde s'y tiennent pour embrasser d'un seul regard l'intégralité du théâtre d'opérations. Elle permet de superposer la cartographie marine, les zones de menaces et les trajectoires prédites des mobiles. C'est ici que la stratégie prend vie : on y décide des manœuvres d'évitement, des routes d'approche silencieuse ou des séquences de tir.

Le Rôle du Commandant : l'arbitre de l'incertain

Malgré la puissance des algorithmes, le Commandant reste le pivot central. Le système tactique lui fournit une vision optimisée, mais le Commandant apporte l'interprétation de l'intention. Il doit juger si un changement de cap d'un mobile est une manœuvre de routine ou une réaction agressive. Son rôle est de transformer l'information consolidée par ses opérateurs en une décision de combat, tout en gérant le risque ultime : la survie de son bâtiment.



Allure d'un écran de tenue de situation tactique

Chapitre 4 : L'engagement : de la mission à la frappe

L'engagement est l'aboutissement de tout le travail de détection et d'analyse de la situation tactique. C'est le moment où le sous-marin passe de l'ombre à l'action. Cette phase est régie par une doctrine stricte qui dépend de la nature de la mission confiée au bâtiment.

Le saviez-vous ?	<p>Engagement</p> <p>Le sous-marin peut tirer... sans se dévoiler</p> <p>Certains systèmes permettent de lancer une torpille en mode "silencieux", avec une mise en route du moteur à distance de sécurité. Le sous-marin reste alors difficile à localiser, même juste après un tir.</p> <p>Les armes sous-marines sont limitées par la physique.</p> <p>La densité de l'eau freine tout : torpilles, drones, projectiles. Une torpille rapide est un exploit technologique, car l'eau oppose une résistance bien plus forte que l'air. Chaque nœud gagné coûte des années de recherche.</p>
-------------------------	--

4.1 Les missions du sous-marin : un spectre large

L'engagement ne signifie pas toujours la destruction. Selon son type (SNA - Sous-marin Nucléaire d'Attaque ou SNLE - Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins), ses missions varient :

- **L'attaque (ASW et ASuW)** : la lutte anti-sous-marine ou anti-navire. C'est l'engagement classique pour neutraliser une menace ou interdire une zone.
- **La dissuasion** : mission spécifique aux SNLE. Ici, l'engagement est paradoxal : le succès de la mission réside dans le fait de ne jamais avoir à tirer, tout en restant prêt à une riposte nucléaire massive.
- **L'action de forces spéciales** : l'engagement consiste ici à mettre en œuvre des commandos (nageurs de combat) pour des missions de sabotage ou de renseignement.
- **La riposte** : réagir à une menace détectée (une torpille adverse en approche) par des contre-mesures ou un tir d'autodéfense.

Le saviez-vous ?

Lutte anti sous-marins

La chasse aux sous-marins, un jeu de chat et de souris : les marines utilisent des avions de patrouille maritime, des sonars remorqués et des satellites pour traquer les sous-marins. Mais ces derniers, grâce à leur discrétion et leur mobilité, restent l'une des cibles les plus difficiles à localiser... et à neutraliser.

Le sous-marin sait se défendre: les leurre acoustiques, les contremesures et les torpilles anti-torpilles font partie de l'arsenal. Un sous-marin peut brouiller, tromper ou neutraliser une arme ennemie sans jamais révéler sa position exacte.

Un sous-marin peut survivre à une attaque nucléaire : conçus pour résister à des pressions extrêmes, les SNLE sont aussi blindés contre les effets d'une explosion nucléaire (onde de choc, radiations). Leur autonomie leur permet de rester opérationnels même après une frappe ennemie, garantissant une capacité de riposte.

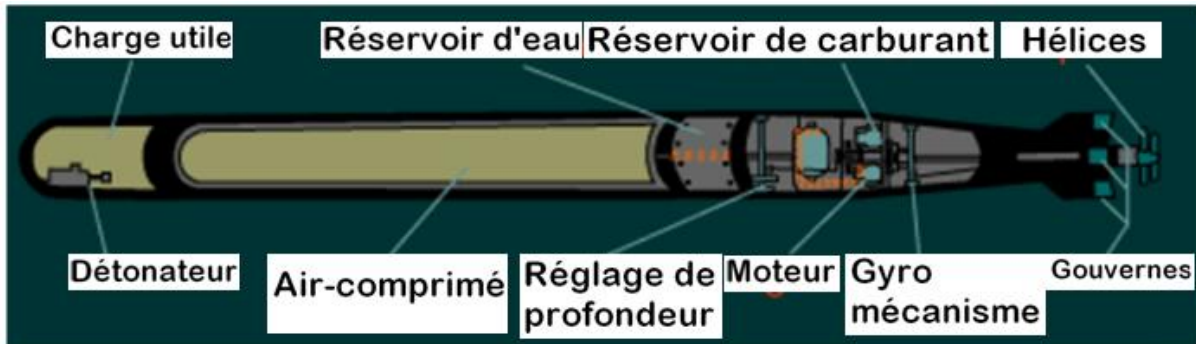
Détection inattendue : certains sous-marins ont déjà été trahis par la bioluminescence du plancton : en traversant un banc de microorganismes lumineux, leur sillage peut briller dans l'obscurité. En 1918, l'U-34 allemand fut repéré puis coulé parce que ces organismes ont illuminé sa trace sous l'eau.

4.2 Le processus de décision et simulation

Une fois la situation tactique stabilisée, le système de combat (CMS) permet de simuler l'engagement avant toute action réelle. L'officier de garde et le commandant évaluent :

- **La faisabilité du tir** : la cible est-elle à portée ? L'angle est-il favorable ?
- **La sécurité du lanceur** : le tir risque-t-il de révéler notre position ? La torpille risque-t-elle, par une erreur de programmation, de revenir vers le sous-marin (phénomène de "circular run") ?
- **La probabilité de succès (Pk - Probability of Kill)** : le système calcule les trajectoires optimales en fonction des capacités d'évasion supposées de la cible.

4.3 Le cas des torpilles : le fil d'Ariane sous-marin



Anatomie d'une torpille classique

La torpille moderne est une arme complexe, véritable petit sous-marin autonome. Son emploi suit une séquence critique :

1. **Préparation du tir** : on injecte les données tactiques (vitesse, immersion, distance de la cible) dans le cerveau de la torpille. On programme son mode de recherche (acoustique passif ou actif).
2. **Ouverture des portes** : c'est un moment critique pour la discrétion. L'ouverture des tubes lance-torpilles crée une perturbation hydrodynamique et un bruit métallique que l'adversaire peut détecter.
3. **Mise à feu (le lancement)** : contrairement aux anciens systèmes à air comprimé bruyants, les sous-marins modernes utilisent souvent des systèmes de "piston d'eau" (water ram) beaucoup plus silencieux.
4. **Suivi de trajectoire (le filoguidage)** : c'est la grande force des torpilles lourdes modernes. Un fil de cuivre ou une fibre optique se déroule entre le sous-marin et l'arme, permettant aux opérateurs de piloter la torpille en temps réel.
 - Un détail technique critique : pour que ce lien ne rompe pas malgré les mouvements des deux mobiles, le câble ne doit subir aucune tension. Pour ce faire, il est stocké sur deux dévidoirs : l'un situé dans le tube lance-torpille du sous-marin et l'autre à l'arrière de la torpille. Immobilité dans l'eau : à mesure que la torpille avance et que le sous-marin manœuvre, chaque dévidoir libère exactement la longueur de câble nécessaire à la progression de l'un ou de l'autre. Le câble reste ainsi parfaitement immobile dans la masse d'eau, évitant tout frottement, toute vibration parasite qui pourrait être détectée par l'ennemi, et surtout tout risque de rupture dû à la vitesse.

Grâce à ce système, les opérateurs peuvent modifier la trajectoire de l'arme, changer son mode de recherche ou même désigner une nouvelle cible après le lancement si la situation tactique évolue sur leurs consoles.

5. **Impact et retour d'informations** : le système tactique analyse les bruits captés par la tête chercheuse de la torpille (transmis par le fil). À l'impact, le changement brutal de signature acoustique confirme la réussite.

6. **Dispositions de navigation** : immédiatement après le tir, le sous-marin doit souvent manœuvrer (changer d'immersion et de cap à grande vitesse) pour s'extraire de la zone, car le point de lancement a révélé sa position approximative.

1914

ANECDOTE

Le sous-marin qui a attaqué... et disparu dans la légende

1914 – L'U-21, le chasseur silencieux de la Royal Navy

Le 5 septembre 1914, le sous-marin allemand U-21 a coulé le croiseur britannique HMS Pathfinder en mer du Nord, marquant la première victoire à la torpille de l'histoire. En quelques minutes, 259 marins britanniques ont péri, ne laissant que onze survivants. Cet exploit a marqué le début d'une révolution militaire : les sous-marins devenaient une arme redoutable, capable de frapper sans être vue. L'U-21, lui, a continué à semer la terreur avant de disparaître dans les brumes de l'histoire, devenant une légende de la guerre sous-marine.

Le saviez-vous ?

Engagement torpilles

Une torpille n'est pas une "bombe sous-marine"

Contrairement à l'image populaire, une torpille moderne est un robot autonome. Elle analyse son environnement, suit une cible, évite les leurres et ajuste sa trajectoire. C'est un véritable chasseur sous-marin miniature.

Une torpille peut écouter... mais aussi parler

Certaines torpilles peuvent transmettre des informations au sous-marin via un câble ou un lien acoustique. L'équipage peut alors modifier sa trajectoire ou changer de cible en temps réel.

Les torpilles n'explosent pas forcément au contact

Beaucoup d'armes sous-marines explosent **sous** la cible, pas dessus. L'onde de choc crée une bulle de cavitation qui soulève puis brise la structure du navire. C'est la physique, plus que l'explosif, qui fait le travail.

Une torpille peut être plus silencieuse qu'un plongeur

Les torpilles modernes utilisent des moteurs électriques, des hélices carénées et des matériaux absorbants. À faible vitesse, elles deviennent presque indétectables, se glissant dans le bruit ambiant comme une ombre.

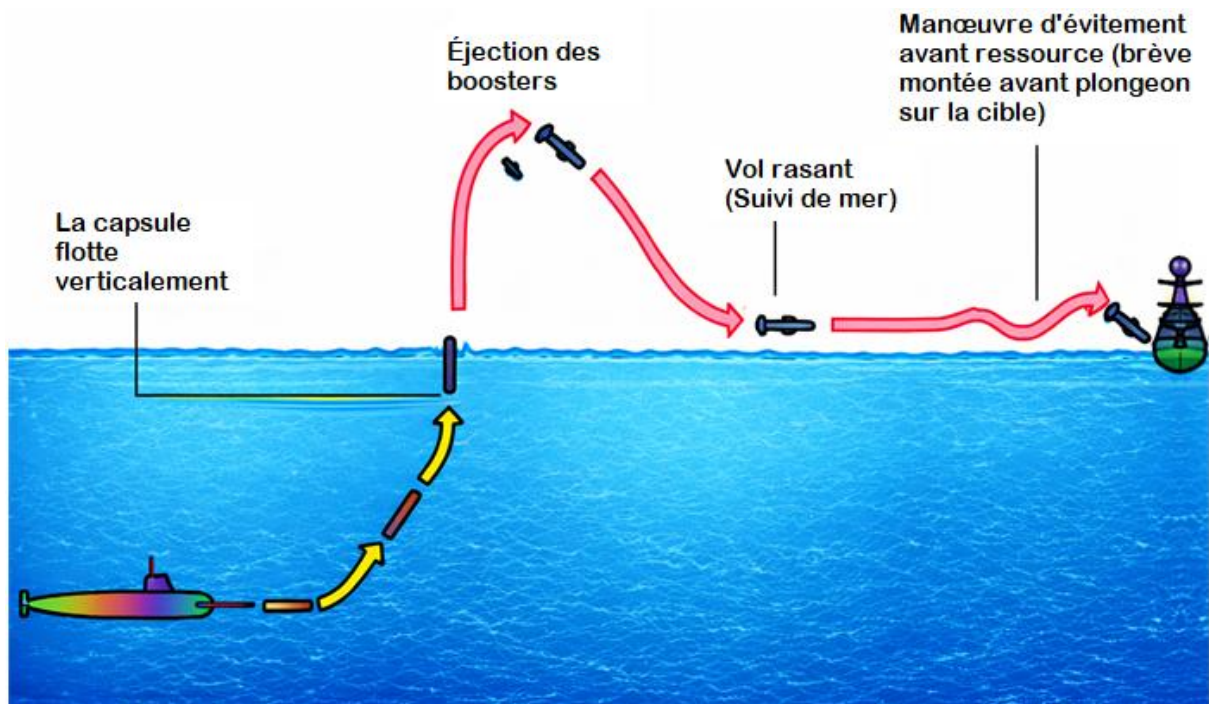
4.4 Le cas des missiles : la surface franchie



Tubes de lancement des missiles



Lancement de missiles



Exemple typique de la trajectoire d'un missile

L'engagement par missile (missile de croisière naval MdCN, antinavire type Exocet ou stratégique M51) répond à une autre logique :

- **Le lancement** : Le missile est expulsé du tube (souvent verticalement) dans une capsule étanche. Une fois à la surface, la capsule s'ouvre et le moteur-fusée s'allume.
- **La signature** : C'est l'engagement le plus risqué pour la survie du sous-marin. Contrairement à la torpille qui reste sous l'eau, le missile crée un panache de fumée et une signature infrarouge visibles par les satellites et les radars de l'ennemi.
- **L'autonomie** : Une fois sorti de l'eau, le missile est autonome (ou guidé par satellite). Le sous-marin n'a plus d'action sur lui et doit disparaître au plus vite.

Le saviez-vous ?

Engagement missiles

Les tubes lance-torpilles ne servent pas qu'aux torpilles

Ils peuvent lancer des drones sous-marins, des leurres acoustiques, des mines intelligentes, voire des équipements de reconnaissance. Le tube devient un "portail polyvalent" vers l'extérieur.

Les missiles sous-marins ne sortent pas de l'eau comme des fusées

Un missile lancé depuis un sous-marin est d'abord éjecté par pression ou gaz froid, puis il allume son moteur après avoir quitté l'eau. Cette séquence évite d'endommager le navire et réduit la signature acoustique.

Les missiles de croisière changent la mission

Un sous-marin équipé de missiles de croisière peut frapper loin à l'intérieur des terres. Cette capacité transforme un navire discret en plateforme stratégique, capable d'influencer une crise sans jamais être vu.

4.5 Évaluation et maîtrise des risques

L'engagement se termine par le BDI (*Battle Damage Indication*). Les analystes acoustiques écoutent les bruits d'implosion ou de cassure de la coque adverse. Le système tactique évalue alors le risque résiduel : y a-t-il d'autres menaces dans la zone ? Faut-il engager une deuxième munition ? La maîtrise de l'engagement, c'est savoir s'arrêter dès que l'objectif est atteint pour préserver ses propres munitions et, surtout, sa discrétion.

Chapitre 5 : Les technologies critiques du système de combat

Si les sonars sont les oreilles du sous-marin, le système de traitement du signal en est le cortex cérébral. Dans un océan saturé de bruits, la supériorité ne vient plus seulement de la puissance des capteurs, mais de la capacité algorithmique à extraire une information infime d'un chaos sonore.

5.1 L'architecture à deux étages : de la masse à l'intelligence

L'architecture d'un sonar moderne ne repose pas sur une unité de calcul unique, mais sur deux étages aux philosophies radicalement opposées, fonctionnant en série pour transformer le chaos sonore en décision tactique.

L'étage de traitement massif (Le "Front-End")

Le premier étage est celui de la force brute. Les milliers de capteurs (hydrophones, fibres optiques, PVDF) délivrent un flux ininterrompu de signaux analogiques qui sont immédiatement numérisés. Ces données sont injectées dans des "Number Crunchers" (croqueurs de nombres), des unités de calcul massivement parallèles capables de traiter toutes les entrées simultanément.

- **La mesure de puissance** : ici, on calcule en GigaFlops (milliards d'opérations en virgule flottante par seconde).
- **Le rôle** : effectuer les opérations complexes de traitement du signal (filtrage, formation de voies, transformées de Fourier) sur des volumes de données colossaux.

L'étage de traitement conditionnel (Le "Back-End")

Une fois ce premier tri effectué, on entre dans l'étage de l'intelligence. Ce second bloc ne traite plus la "masse" mais analyse et trie les signaux pré-formatés pour en extraire la substantifique moelle : les données utiles à la situation tactique. C'est ici que l'on sépare le bruit d'une baleine de celui d'une pompe appartenant un engin ennemi.

- **La mesure de puissance** : on parle ici en MIPS (millions d'instructions par seconde), car la complexité ne réside plus dans le volume de calcul, mais dans la logique algorithmique et les tests de conditions ("Si... Alors...").
- **Le rôle** : classification, corrélation des pistes et aide à la décision.

L'Analogie de la Distillerie : Pour imaginer ce processus, on peut comparer le sonar à une distillerie :

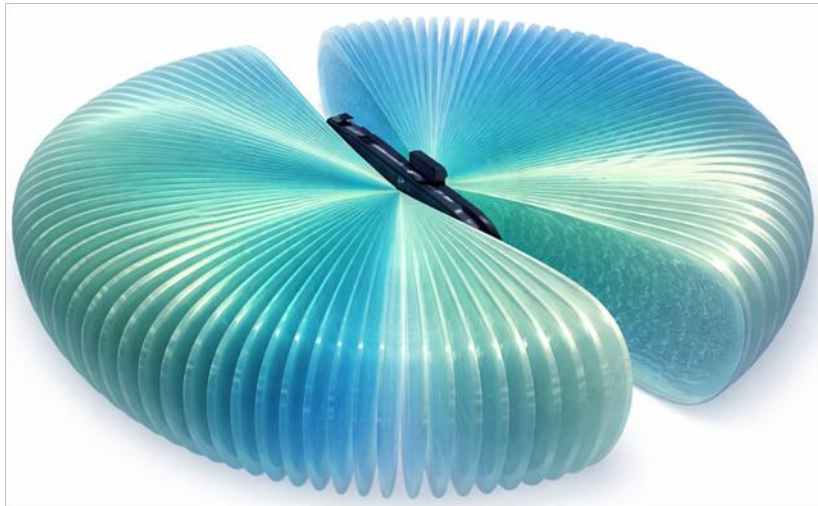
- Le premier étage est la **bouilleuse massive** : on y déverse des tonnes de fruits (les milliers de signaux bruts) pour en extraire une vapeur diffuse.

- Le second étage est le **serpentin de précision** : c'est un conduit fin et complexe où la vapeur se condense et s'affine pour ne laisser couler, goutte à goutte, que l'alcool pur (l'information tactique vitale).

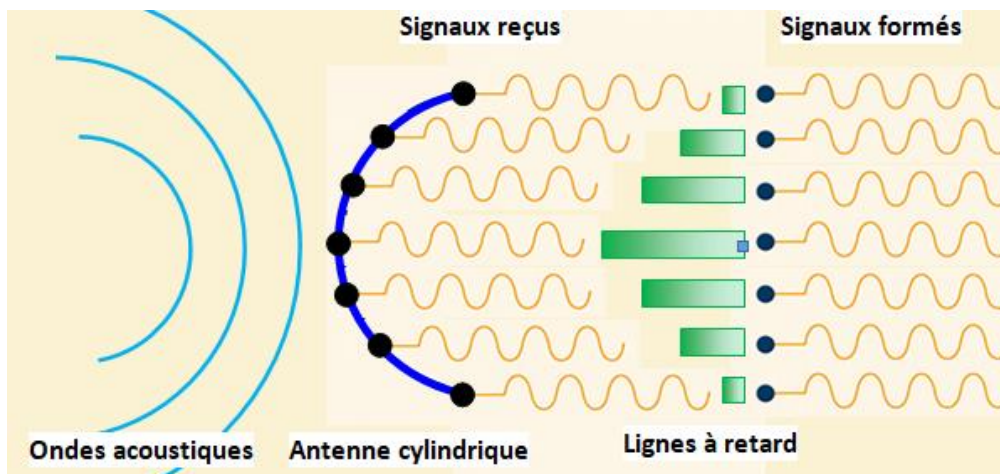
5.2 La formation de voies : redresser la courbe

Le sonar capte des ondes qui se propagent de manière sphérique. Or, les capteurs sont souvent disposés sur une antenne cylindrique (à l'avant du SM). La courbure de l'antenne est donc inverse à celle de l'onde reçue.

Pour obtenir un signal exploitable, le calculateur doit effectuer un lourd traitement de signal appelé "Formation de Voies" (Beamforming). Il s'agit d'appliquer des retards temporels artificiels à chaque capteur de l'antenne pour synchroniser la réception de l'onde et reconstituer virtuellement un signal "droit" et directionnel. C'est cette opération qui permet de dire avec précision : "Le bruit vient du gisement 125".



Formation des voies en réception passive sur sous-marin



Principe des retards à appliquer pour corriger les formes inversées de l'onde et de l'antenne cylindrique

5.3 La détection adaptative : "l'optique adaptative" de l'acoustique

Comme le font les télescopes modernes qui corrigent les turbulences de l'atmosphère pour voir les étoiles lointaines, la détection adaptative révolutionne l'écoute sous-marine.

Le milieu marin n'est jamais silencieux. Il possède une Densité Spectrale de Puissance (DSP) — une signature statistique du bruit ambiant (vagues, pluie, biologie).

- **Le principe** : le système évalue en temps réel les propriétés aléatoires du bruit environnant la cible.
- **Le traitement** : par un processus de soustraction dynamique, l'algorithme "gomme" ce bruit de fond statistique pour mettre en relief la manifestation cohérente de la cible. C'est ainsi qu'on parvient à détecter un contact dont le niveau sonore est pourtant inférieur au bruit de l'océan : c'est le triomphe des mathématiques sur le chaos.

5.4 La discrimination et le phénomène d'éclipse

L'un des moments les plus critiques pour un sonar est le lancement d'une arme. Lorsqu'un sous-marin tire sa propre torpille, le bruit de l'hélice de celle-ci, située à quelques mètres seulement, sature immédiatement les capteurs (c'est "l'éblouissement").

- **L'éclipse et l'adaptation du gain** : pour pallier cela, le système tactique utilise des algorithmes de discrimination spatiale. On crée une "éclipse" électronique dans la direction de la torpille en adaptant le gain de réception uniquement sur ce secteur. On fait prendre un chemin latéral à la torpille pour laisser libre la direction du but visé et conserver l'espoir de conserver la détection (faible) de la cible.
- **Le défi** : il faut être capable de continuer à "écouter" la cible et le reste de l'horizon pour s'assurer qu'un autre prédateur ne profite pas du vacarme de notre propre tir pour nous attaquer. C'est une gestion complexe de la dynamique du signal.

5.5 La mesure de distance : télémétrie vs TMA

Le saviez-vous ?	<p>Localiser un bruit</p> <p>Savoir d'où vient un bruit est relativement facile : notre cerveau compare ce que perçoivent nos deux oreilles et déduit la direction.</p> <p>Mais estimer la distance d'un objet bruyant est bien plus délicat. Un avion dans le ciel, par exemple, peut sembler proche alors qu'il est à plusieurs kilomètres. Le son, déformé par l'atmosphère, arrive avec un retard et une intensité trompeuse.</p> <p>Sous l'eau, le problème est similaire pour le sonariste : il entend un bruit, mais sa provenance exacte reste floue tant que la distance n'est pas estimée. C'est un défi fondamental de l'écoute sous-marine, où le repérage spatial ne va pas de soi.</p>
-------------------------	---

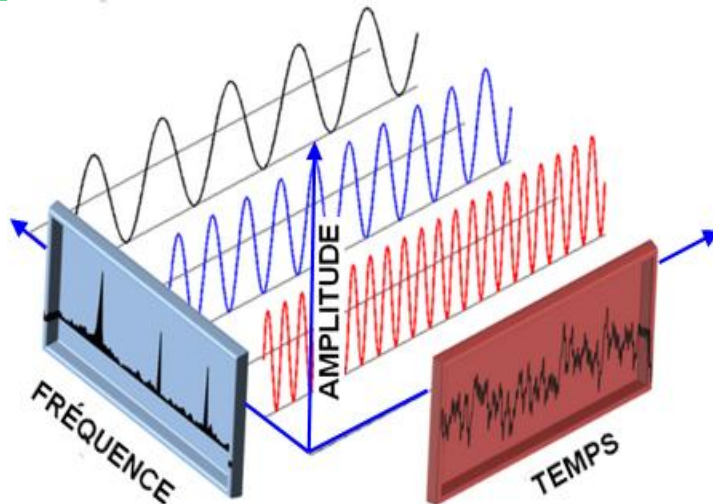
Connaître le gisement (la direction) d'une cible est relativement facile ; connaître sa distance exacte est un défi physique majeur. Le système utilise deux méthodes complémentaires :

1. **Le sonar de télémétrie (instantané)** : il utilise trois panneaux acoustiques répartis sur la longueur du sous-marin. En mesurant la courbure du front d'onde arrivant sur ces trois points distants, le système calcule la distance par triangulation. C'est une mesure directe, mais elle perd en précision dès que la cible s'éloigne (la courbure de l'onde devenant trop faible).
2. **La TMA (Target Motion Analysis)** : c'est le véritable bijou du traitement de signal. En utilisant la route propre du sous-marin et l'évolution temporelle du gisement de la cible, le système résout des équations différentielles complexes pour estimer la position, la route et la vitesse du mobile. Ce module nécessite souvent que le sous-marin effectue des "changements de cap" (des zigs) pour lever les ambiguïtés mathématiques.

5.6 La classification par analyse spectrale (FFT)

Une fois le signal isolé, il faut l'identifier. C'est ici qu'intervient la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

Le saviez-vous ?	<p>Loupe en fréquences</p> <p>La transformée de Fourier est un outil mathématique qui décompose un signal en ses composantes fréquentielles. Elle agit comme une loupe spectrale : au lieu d'observer le signal dans le temps, on l'analyse selon ses fréquences.</p> <p>Chaque bruit, chaque machine, chaque navire possède une « empreinte » unique dans le domaine des fréquences. En appliquant cette transformée, le sonariste peut extraire cette signature et l'utiliser pour identifier le type de bâtiment détecté.</p> <p>Même si le signal est complexe ou noyé dans le bruit, sa structure fréquentielle reste révélatrice. C'est une clé essentielle pour la classification acoustique en milieu sous-marin.</p>
-------------------------	--



Une manière de visualiser comment un signal peut se "déplier" dans le temps et dans les fréquences. À chaque instant, le signal possède une amplitude — sa "voix", celle qu'on entend — et une véritable empreinte digitale : son spectre, composé d'une multitude de composantes élémentaires de diverses fréquences qui coexistent et évoluent au fil du temps.

- **Du temps à la fréquence** : on ne regarde plus le signal en fonction de son amplitude (le volume), mais on le décompose en fréquences.
- **Le spectre de raies** : chaque machine (pompe, moteur, réducteur) produit des vibrations à des fréquences très précises. Le résultat est un "spectre de raies" qui constitue la véritable empreinte digitale du bâtiment.
- **La bibliothèque** : en comparant ce spectre aux bases de données, le système peut dire : "C'est un moteur diesel de type X, tournant à 1200 tours/minute, monté sur un destroyer de classe Y".

5.7 Le calcul des zones de menace : polygones d'indéfectabilité

C'est sans doute le module le plus stratégique et le plus jalousement gardé (souvent protégé par des brevets d'État). Ce logiciel calcule en temps réel deux zones critiques :

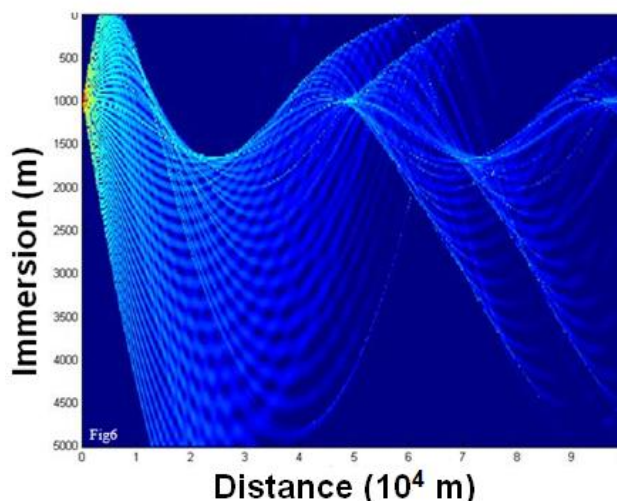
1. **La zone où je détecte l'autre.**
2. **La zone où l'autre peut me détecter.**

Ce calcul intègre la puissance supposée des sonars ennemis, les conditions de propagation de l'eau (température, salinité) et le bruit propre actuel du sous-marin.

L'intérêt tactique : Le commandant voit apparaître sur sa carte une zone "rouge" (danger de détection) et une zone "verte" (sécurité). C'est cet outil qui permet de décider s'il faut accélérer ou s'il faut changer d'immersion pour passer sous une couche thermique et devenir instantanément invisible.

5.8 Autre technologie critique : la modélisation de propagation (ray tracing)

Pour que tous les calculs précédents soient justes, le système doit comprendre comment le son voyage dans l'eau en fonction du temps. L'ordinateur de bord effectue du tracé de rayons acoustiques : il simule des milliers de trajectoires de sons pour voir s'ils vont se courber vers la surface ou vers le fond (à cause des variations de température). Cela permet de prédire l'existence de "zones d'ombre" où le sous-marin peut se cacher, même s'il est physiquement proche de l'ennemi.



*Allure du tracé de champ sonore (propagation des ondes acoustiques) pour une immersion à 100 m.
Il est patent que les ondes sonores n'envahissent pas tout l'espace marin.*

Chapitre 6 : Système électronique et intelligence embarquée

6.1 La genèse opérationnelle : du laboratoire à la mer

Avant même que le système de combat ne soit déclaré "bon pour le service", il subit une batterie de tests qui commence à terre, dans des laboratoires d'intégration (Shore Integration Facilities). On procède à la levée de doutes : on simule des milliers de cibles pour vérifier que le cerveau du navire ne sature pas. Les essais à la mer (Sea Trials) sont le moment de vérité où l'on vérifie que les tirs réels ou les lancements de leurres s'interfaçent parfaitement avec les capteurs sous les contraintes physiques (vibrations, inclinaisons) du sous-marin.

L'auto-surveillance : le système BITE : le premier rempart contre la panne est le BITE (Built-In Test Equipment). Dans un système moderne, chaque carte électronique, chaque antenne et chaque processeur s'auto-surveille en permanence. Le système de combat effectue des tests "silencieux" en arrière-plan sans interrompre la mission. En cas de défaillance, le BITE isole le composant défectueux (LRU - Line Replaceable Unit). L'objectif est de réduire le temps de dépannage MTTR (Mean Time To Repair) : un technicien doit pouvoir identifier et remplacer le module en quelques minutes.

Concevoir pour l'exigüité et l'ergonomie : dans un sous-marin, chaque centimètre cube est disputé, imposant des contraintes strictes à l'architecte :

- **L'ergonomie de maintenance** : les baies électroniques sont conçues sur des glissières télescopiques pour extraire un rack complet dans un couloir étroit.
- **La maintenance "en aveugle"** : les connecteurs sont souvent placés à l'arrière des machines ; la conception doit permettre au technicien de manipuler les câbles uniquement au toucher, sans risque d'inversion.
- **L'évacuation des composants** : n'importe quelle pièce du système de combat doit pouvoir sortir par les panneaux d'embarquement des armes ou les écoutes de secours, évitant ainsi d'avoir à découper la coque épaisse pour un changement de calculateur.

6.2 Résilience, sécurité incendie et reconfiguration automatique

Dans le sanctuaire clos qu'est un sous-marin, le système de combat n'est pas seulement l'arme du bord ; c'est aussi une concentration massive de câblages, de puissances électriques et de processeurs dégageant une chaleur intense. Sa conception doit donc répondre à deux impératifs absolus : ne pas être la cause d'un sinistre et rester opérationnel même si une partie de ses entrailles est dévastée.

Le feu est l'ennemi le plus redouté de l'équipage. Pour le système de combat, la prévention commence dès le choix des matériaux : chaque kilomètre de câble est gainé de composés LSZH (*Low Smoke Zero Halogen*), conçus pour ne pas propager les flammes et, surtout, pour ne pas dégager de fumées opaques ou toxiques en cas de surchauffe.

L'architecture physique elle-même participe à cette lutte. Les baies électroniques sont compartimentées et dotées de capteurs de fumée ultra-sensibles, capables de couper l'alimentation d'un rack spécifique avant même l'apparition d'une flamme. Le refroidissement est un autre défi : pour éviter l'accumulation de chaleur dans l'exigüité du bord, on utilise des échangeurs à eau glacée intégrés aux baies, isolant ainsi

thermiquement le matériel du reste de la tranche. En cas d'incident, des dispositifs d'extinction automatique par gaz inerte permettent d'étouffer un départ de feu électrique sans noyer — et donc détruire — les composants sains environnants.

6.3 La prouesse des automatismes de reconfiguration

La véritable révolution des systèmes de combat modernes réside dans leur intelligence logicielle. Autrefois, la perte d'une console ou d'un ordinateur signifiait la perte définitive de la fonction associée (sonar, tir ou navigation). Aujourd'hui, grâce à une architecture distribuée et virtualisée, le système fait preuve d'une gestion logicielle qui constitue une véritable prouesse technique.

En cas d'avarie majeure ou de destruction physique d'un nœud de calcul, le système déploie des mécanismes de reconfiguration automatique. En quelques millisecondes, sans intervention humaine, le "cerveau" du navire analyse les ressources restantes et applique une hiérarchisation critique :

- **Sacrifice des fonctions secondaires** : le système coupe automatiquement les fonctions non vitales, telles que les outils d'entraînement, l'archivage de confort ou certaines analyses acoustiques à long terme.
- **Préservation du cœur de mission** : les ressources de calcul ainsi libérées sont immédiatement réallouées aux fonctions essentielles, notamment la détection immédiate des menaces, la conduite du navire et la mise en œuvre des armes.

Cette capacité de « résilience élastique » permet au commandant de conserver son avantage tactique même avec un système partiellement dégradé. Développer un logiciel capable de se réorganiser de manière autonome, tout en garantissant que les données critiques ne soient jamais corrompues lors de la bascule, constitue l'un des plus grands défis de l'ingénierie moderne. Tel un organisme numérique, le système est capable d'amputer ses propres membres pour sauver ses organes vitaux.

6.4 L'Intelligence Artificielle (IA) : L'avenir du combat et de la navigation

Pour clore ce chapitre, il est essentiel d'aborder la rupture technologique de l'IA. Dans un environnement où le volume de données (Big Data acoustique) explose, l'humain arrive à saturation.

L'IA comme aide à la classification (l'oreille d'or augmentée)

Le rôle actuel de l'IA est d'abord celui d'un assistant ultra-performant. Elle est capable de comparer en quelques millisecondes une signature sonore reçue avec des dizaines de milliers d'enregistrements en bibliothèque.

- Elle aide à distinguer, dans un vacarme de bruits biologiques (baleines, crevettes) ou météo, la signature infime d'une pompe de refroidissement ou d'une pale d'hélice endommagée.
- Elle réduit drastiquement le "taux de fausse alarme" pour les opérateurs de veille.

1997

Le "Bloop" : Le monstre qui faisait trembler les sonars

En 1997, des hydrophones de la marine américaine ont capté un son d'une puissance colossale, baptisé le "Bloop". Plus fort que n'importe quel cri de

ANECDOTE

baleine bleue, il a alimenté les théories les plus folles sur des monstres marins géants. La vérité ? Il s'agissait du fracas d'un gigantesque iceberg se brisant, un son capable de voyager sur des milliers de kilomètres.

L'IA tactique et la gestion de la charge mentale

Dans le futur, l'IA passera du statut de conseiller à celui d'acteur de la simulation :

- **Aide à la décision en combat** : Face à une torpille ennemie arrivant à 50 nœuds, l'IA peut calculer et suggérer instantanément la manœuvre d'évasion optimale (cap, immersion, vitesse) et le moment exact du lancement des leurres (contre-mesures).
- **Maintenance prédictive** : L'IA surveille la signature acoustique du sous-marin lui-même. Si un roulement à billes commence à fatiguer à l'intérieur du navire, l'IA alerte le commandant que le bâtiment devient "bruyant" dans une certaine fréquence avant même que l'oreille humaine ne puisse le percevoir.

Vers le "Combat de Systèmes"

Enfin, l'IA permettra au sous-marin de devenir le vaisseau-mère d'un essaim de drones. Piloter plusieurs drones sous-marins tout en naviguant le bâtiment principal est impossible pour un seul équipage. L'IA gèrera la coordination de ces drones pour étendre la "vision" du système tactique à des dizaines de kilomètres au-delà de la portée des propres capteurs du bord.



Partie 5: L'INTELLIGENCE ACOUSTIQUE – Le monstre de calcul au cœur du sonar

Pour plonger dans le numérique : du traitement du signal brut à la classification par IA, là où la physique devient information

1872
1946

BIOGRAPHIE

Paul Langevin – Pionnier français du sonar

Il est un physicien français dont les travaux ont jeté les bases de l'acoustique sous-marine moderne. Pendant la Première Guerre mondiale, confronté à la menace des sous-marins, Langevin met au point avec l'ingénieur Constantin Chilowski l'un des premiers dispositifs de détection acoustique des sous-marins en utilisant des ondes ultrasonores réfléchies sur les coques immergées — ce qui constitue l'origine de ce que l'on appellera plus tard le SONAR.



La solution expérimentale de Langevin repose sur l'utilisation de transducteurs piézoélectriques (triplet acier/quartz/acier) capables d'émettre et de recevoir des ondes ultrasonores avec une sensibilité suffisante pour détecter des cibles sous-marines à des distances significatives. Ce principe d'écholocalisation, bien qu'encore en développement opérationnel à la fin de la guerre, est rapidement intégré après le conflit dans les équipements ASW (anti-submarine warfare) des marines militaires.

Langevin ne se limite pas à ce seul domaine : il contribue également à la physique théorique (équation de Langevin sur le mouvement brownien) et à la diffusion de la théorie de la relativité en France. Son rôle de pédagogue et de scientifique engagé complète un héritage technique et intellectuel qui influence durablement l'ingénierie acoustique maritime.

Dans la continuité de cet héritage scientifique et industriel, le développement des technologies sonar modernes en France s'est structuré au sein de sociétés spécialisées. Thales Underwater Systems est aujourd'hui l'un des principaux acteurs mondiaux dans la conception de suites sonar pour sous-marins et navires de surface, développant des systèmes intégrés d'écoute passive, d'émission active et de traitement du signal.

À ce titre, **Pierre Sabathé** est une figure française contemporaine connue pour avoir assuré une continuité d'expertise acoustique et sous-marine au sein du groupe Thales, intervenant en particulier comme expert sur les problématiques de sonar et de systèmes embarqués sous-marins. Son expérience est reconnue comme une aide précieuse dans les démarches d'ingénierie avancée et les contacts à l'exportation des technologies sonar françaises, renforçant l'implantation internationale des systèmes développés par Thales.

Chapitre 1 : La science des ondes et du signal

1.1 Duel de physiques : ondes électromagnétiques vs ondes acoustiques

Si la ressemblance entre les termes **Radar** et **Sonar** laisse présager des technologies de détection similaires, leurs principes de fonctionnement s'opposent radicalement en raison de la nature physique des ondes qu'ils exploitent : l'une électromagnétique, l'autre acoustique.

La vitesse : le lièvre et la tortue

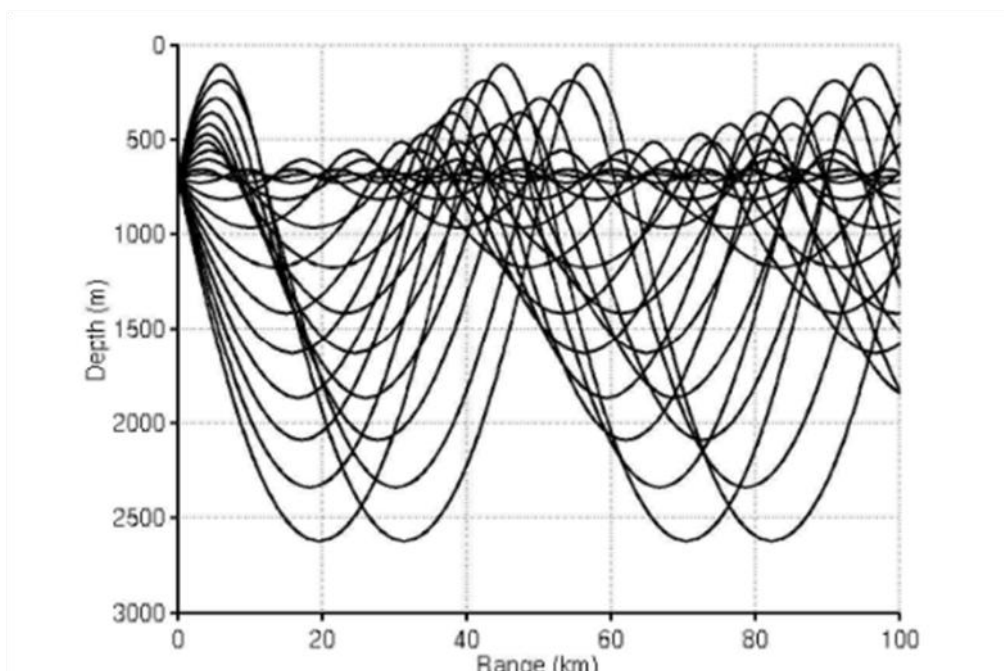
- **Radar (Lumière)** : les ondes se propagent à environ 300 000 000 m/s. Le temps de trajet est quasi instantané. Pour une cible à 30 km, l'écho revient en 0,0002 seconde.
- **Sonar (Son)** : la célérité moyenne dans l'eau est de 1 500 m/s (soit 200 000 fois plus lente). Pour la même cible à 30 km, l'écho met 40 secondes à revenir (20s aller, 20s retour).

Conséquence stratégique : Là où le radar peut balayer le ciel plusieurs fois par seconde, le sonar doit composer avec une information "vieille" de plusieurs dizaines de secondes. Le sous-marinier écoute un passé récent, tandis que l'opérateur radar observe un présent immédiat.

Propagation : ligne droite contre lignes courbes

Dans l'air, le radar "voit" presque toujours en ligne droite. Dans l'océan, c'est l'inverse :

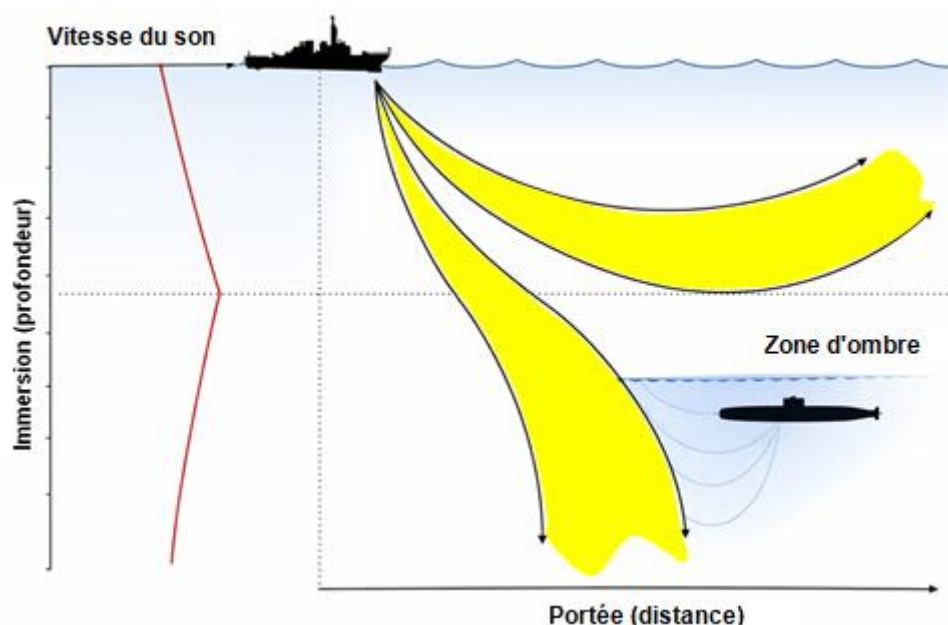
- Le son est un "esclave" des conditions du milieu. Sa trajectoire est courbée par les variations de température, de pression et de salinité.



La trajectoire typique des sons dans l'eau (Range = distance ; Depth = Immersion)

- Le son est systématiquement dévié vers les zones où sa vitesse est la plus faible (phénomène de réfraction). Cela crée des zones d'ombre (où un sous-marin peut se cacher à quelques kilomètres

d'un sonar sans être vu) et des canaux de propagation (où un son peut voyager sur des milliers de kilomètres en rebondissant).



Exemple simplifié de trajectoire des rayons sonores en fonction de la vitesse du son dans l'eau (en rouge à gauche)

Le saviez-vous ?

Propagation du son dans l'eau

La **propagation acoustique** dépend fortement du profil vitesse du son. Une thermocline marquée peut créer des zones d'ombre sonar complètes. Deux bâtiments séparés de quelques centaines de mètres, mais de part et d'autre de cette couche, peuvent devenir mutuellement indétectables. La **thermocline** est une couche de l'océan où la température chute brusquement avec la profondeur, séparant les eaux chaudes de surface des eaux froides profondes.

La **bathymétrie** influence directement la performance sonar. La nature du fond (roche, sable, vase) modifie l'absorption et la réflexion acoustique. Un fond meuble peut absorber une grande partie de l'énergie sonore, réduisant fortement la portée de détection.

Le **son voyage plus vite en profondeur** : à grande profondeur, la pression augmente la vitesse du son. Résultat : un écho peut revenir plus tôt que prévu, donnant l'impression qu'un objet est plus proche. Les opérateurs doivent constamment corriger ces illusions acoustiques.

Le **"Deep Sound Channel"** : il existe dans l'océan une couche d'eau appelée canal SOFAR (vers 1000 m de fond). À cette profondeur, la température et la pression créent un guide d'onde : un son émis à cet endroit peut voyager sur des milliers de kilomètres sans perdre sa puissance. Idéal pour les communications secrètes.

L'**eau chaude est un piège** : les couches d'eau plus chaudes à la surface peuvent réfléchir les ondes sonores, créant des "canaux" où les sons voyagent plus loin... ou pas du tout. Un sous-marin peut se cacher sous une thermocline, invisible aux sonars de surface, comme un fantôme sous une nappe.

Les océans ne sont pas acoustiquement homogènes: la thermocline agit comme un miroir sonore : un sous-marin peut s'y cacher, car les ondes acoustiques y sont déviées. Un capteur placé au mauvais côté de cette couche peut devenir presque aveugle, même à courte distance.

Un sous-marin peut entendre un navire... avant de l'entendre lui-même : grâce à la propagation du son dans l'eau, un sous-marin peut détecter un bâtiment de surface bien avant que celui-ci ne perçoive quoi que ce soit. L'avantage acoustique appartient presque toujours à celui qui est en immersion.

1.2 Puissance de calcul : le balayage vs la formation de voies

La différence la plus spectaculaire réside dans la manière dont les machines "regardent" l'espace.

Le Radar : l'exploration séquentielle

Le radar classique fonctionne comme un phare côtier. L'antenne tourne physiquement et interroge chaque direction l'une après l'autre.

- **Mode :** "Je regarde ici, puis là, puis là."
- **Calcul :** Le processeur traite un flux de données correspondant à un seul pinceau (faisceau) à la fois.

Le Sonar : l'écoute omnidirectionnelle et les "number crunchers"

Parce que le son est lent, un sonar ne peut pas se permettre d'attendre 40 secondes pour chaque pas de rotation (il lui faudrait des heures pour faire un tour complet). Il doit écouter partout, tout le temps.

- **La formation de voies (beamforming) :** le sonar utilise une antenne fixe composée de centaines de capteurs (hydrophones). Un ordinateur ultra-puissant combine mathématiquement les signaux de tous les capteurs en appliquant des micro-retards temporels.
- **Calcul parallèle massif :** cela permet de créer numériquement des dizaines de "voies d'écoute" (pinceaux virtuels) pointant dans toutes les directions simultanément.
- **Les "number crunchers" :** cette opération nécessite une puissance de calcul colossale (souvent des processeurs dédiés et haut de gamme). Le sonar traite en temps réel une matrice de données multidimensionnelle pour "former" l'image sonore de l'océan à 360°.

1.3 Tableau des différences de conception

Caractéristique	Radar (Aérien)	Sonar (Sous-marin)
<i>Vitesse d'onde</i>	3 10 ⁸ m/s (Lumière)	1 500 m/s (Son)
<i>Milieu</i>	Homogène (air)	Hétérogène (stratification d'eau)
<i>Trajectoire</i>	Rectiligne	Courbe (Réfraction)
<i>Mode d'exploration</i>	Balayage rotatif (souvent)	Formation de voies (Beamforming)
<i>Complexité Calcul</i>	Élevée (temps réel rapide)	Extrême (traitement spatial parallèle)
<i>Sensibilité au milieu</i>	Faible (météo)	Totale (température, sel, pression)

Conclusion

Le sonar est au radar ce que la composition d'un orchestre symphonique est à un métronome. Là où le radar brille par sa vitesse, le sonar triomphe par son intelligence de calcul. La supériorité sous-marine ne dépend plus seulement de la qualité des hydrophones, mais de la capacité des calculateurs dédiés à démêler le chaos acoustique de l'océan pour en extraire une trajectoire de cible.

Le saviez-vous ?

Radar et sonar: chacun son truc!

Le radar, comme un métronome, fonctionne de manière très rythmée, rapide, régulière : il envoie une impulsion, attend l'écho, recommence. C'est un système où la cadence et la vitesse dominent.

Le sonar, lui, ressemble davantage à la composition d'un orchestre symphonique : il doit analyser une multitude de sons superposés, comprendre qui joue quoi, reconnaître des motifs, extraire une mélodie dans un brouhaha. Cela demande une intelligence d'analyse, pas seulement du rythme.

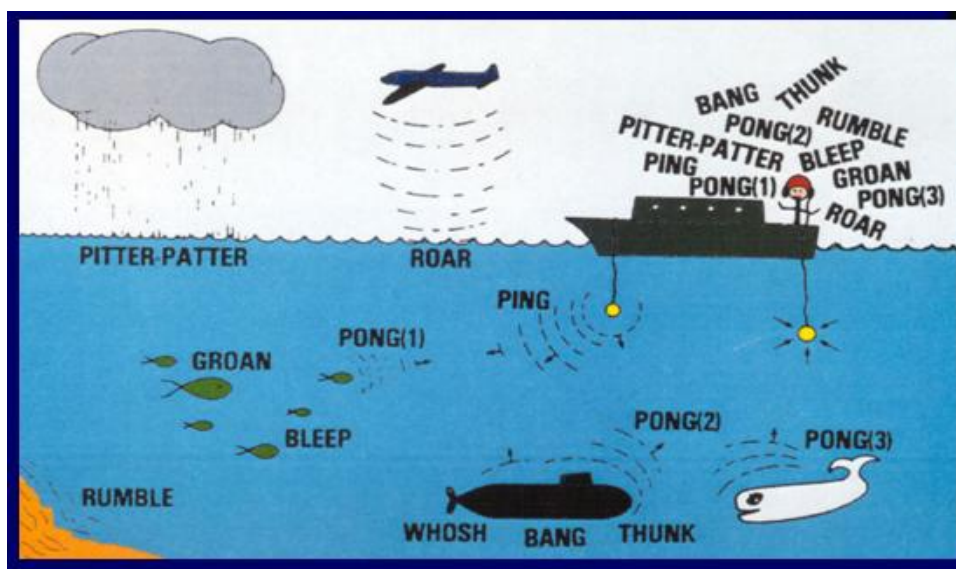
Autrement dit :

Radar = rapidité et simplicité.

Sonar = complexité et finesse d'interprétation

Chapitre 2 : La grammaire du silence : typologie et caractérisation des bruits

Écouter au sonar, ce n'est pas simplement "entendre", c'est interpréter. Pour l'oreille d'or (l'analyste acoustique), l'océan est une cacophonie où il faut isoler le signal faible du vacarme ambiant. On classe généralement ces sons en trois catégories distinctes, selon leur impact sur la mission: intéressants, embêtants et gênants.



Vous avez dit : le monde du silence !

Le saviez-vous ?

Bruits environnants

Le bruit ambiant océanique est dominé par des phénomènes physiques bien identifiés : agitation de surface, pluie, trafic maritime, biologie. Même en pleine nuit, loin de tout navire, l'océan bourdonne : crevettes, microbulles, pluie, craquements thermiques. Les sonars doivent filtrer ce chaos naturel. Parfois, un banc de crevettes peut masquer un sous-marin mieux qu'un brouilleur électronique.

Le bruit de fond de l'océan n'est pas naturel : il provient en grande partie du vent, de la pluie et de la vie marine. Une pluie fine peut masquer un sous-marin, tandis qu'une mer d'huile peut paradoxalement rendre l'environnement acoustique plus favorable à la détection.

Les sous-marins évitent parfois les zones « calmes ». Les détroits, plateaux continentaux et zones biologiquement actives offrent un bruit ambiant élevé qui complique la détection. Un environnement chaotique est souvent plus protecteur qu'un océan profond et silencieux.

Les zones côtières sont acoustiquement complexes. Réflexions multiples, fonds hétérogènes et bathymétrie variable induisent des multi-trajets et des interférences. Dans ces environnements, un sonar très performant en haute mer peut voir ses performances fortement dégradées.

2.1 Les bruits « intéressants » : la signature de la cible

Ce sont les bruits d'origine humaine que le sous-marin cherche à détecter pour identifier et pister une menace ou une cible.

- **Bruits de propulsion** : le chant des hélices (phénomène de cavitation) et le "chant de pale". Chaque hélice possède une signature unique qui permet souvent d'identifier la classe du navire, voire son nom.
- **Bruits de machines** : le ronronnement des pompes, des alternateurs ou des réducteurs. Ces sons sont souvent des "raies fréquentielles" pures, très stables, qui servent de carte d'identité acoustique.
- **Bruits transitoires** : un choc sur une coque, l'ouverture d'un tube lance-torpille, ou le passage en immersion périscopique. Ils sont brefs mais trahissent une intention tactique immédiate.

Un « transitoire » est un bruit bref, isolé, qui surgit au milieu du paysage acoustique comme une éclaboussure dans un lac calme. Sur l'écran, c'est un point clair perdu entre les oscillations régulières ; dans le casque, une anomalie qui fait immédiatement tendre l'oreille de l'analyste sonar, l'« oreille d'or ». Ces sons soudains — un choc métallique, un coup sourd, un claquement étouffé — peuvent évoquer aussi bien un outil qui tombe qu'un coup porté dans un sac de frappe. Leur origine est souvent mystérieuse : activité biologique, travaux sous-marins, phénomène naturel, ou présence d'un autre sous-marin opérant discrètement. Dès qu'un transitoire apparaît, il est enregistré puis écouté en boucle, disséqué seconde par seconde. L'analyste le compare aux milliers de signatures répertoriées dans la banque acoustique du bord, véritable grimoire sonore où chaque bruit

identifié est soigneusement classé. Cette base de données, jalousement protégée par chaque marine, constitue un atout stratégique majeur. Pourtant, malgré l'expérience, malgré les recoupements, certains transitoires demeurent indéchiffrables. Ils rappellent que, dans les profondeurs, même les meilleurs capteurs ne captent qu'une part du réel, et que le silence de la mer garde encore ses secrets.

2.2 Les bruits « embêtants » : le vacarme de l'océan

Ce sont les bruits environnementaux. Ils ne sont pas dirigés contre le sous-marin, mais ils constituent un "bruit de fond" qui peut masquer les cibles.

- **La vie marine** : les cliquetis des crevettes claqueuses (un véritable mur sonore dans certaines zones), le chant des cétacés ou les bancs de poissons.
- **La météo de surface** : le martèlement de la pluie sur la surface ou le fracas des vagues. Par tempête force 8, la portée des sonars est drastiquement réduite par ce brouillage naturel.
- **Le trafic commercial** : dans les zones comme la Manche ou Malacca, le bruit des cargos est si dense qu'il crée un "brouillard" acoustique permanent.

Le saviez-vous ?	<p>Bruits biologiques</p> <p>Le cliquetis des crevettes: le pire ennemi des opérateurs sonar ? La crevette claqueuse. En faisant claquer sa pince, elle crée une bulle de cavitation qui explose avec un bruit sec. Des milliers de crevettes ensemble génèrent un vacarme tel qu'elles peuvent masquer totalement le bruit d'un sous-marin en approche.</p> <p>La faune marine interagit parfois avec les capteurs. Certains cétacés génèrent des signatures acoustiques comparables à celles de machines. Les analystes sonar doivent apprendre à distinguer un mammifère curieux... d'un bâtiment militaire discret</p> <p>Les mammifères marins utilisent des bandes de fréquences proches de celles des sonars militaires. Le traitement du signal doit donc discriminer des signatures biologiques non stationnaires, parfois plus complexes que celles d'un bâtiment mécanique.</p> <p>Les animaux marins écoutent aussi. Les biologistes utilisent des hydrophones similaires à ceux des sous-marins pour étudier les chants des baleines et les clics des dauphins. Certains sons marins sont si puissants qu'ils peuvent perturber les sonars militaires. La mer est un champ de bataille... et un orchestre.</p>
-------------------------	--

2.3 Les bruits « gênants » : le bruit propre du navire

C'est le défi majeur de l'ingénieur : le bruit que le sous-marin génère lui-même et qui vient saturer ses propres capteurs. C'est ce qu'on appelle le bruit propre, une sorte d'acouphène.

- **Écoulement hydrodynamique** : le frottement de l'eau sur la coque et les antennes (bruit d'écoulement). Plus le sous-marin va vite, plus il devient "sourd".

- **Bruit machine interne** : les vibrations des auxiliaires de bord (ventilation, pompes) qui se propagent par la structure jusqu'aux antennes sonar.
- **Bruit de l'antenne remorquée**: les turbulences générées par l'antenne elle-même lorsqu'elle se déplace dans l'eau.

Le saviez-vous ?	<p>Bruit propre au sous-marin</p> <p>Le bruit, un ennemi invisible: même si les sous-marins modernes sont silencieux, certains bruits (pompes, climatisation, conversations) peuvent devenir omniprésents. Les bouchons d'oreille deviennent vite vos meilleurs alliés pour dormir ou vous concentrer.</p> <p>Le silence est stratégique: le bruit d'un boulon mal serré peut trahir un sous-marin. Les équipages traquent les moindres vibrations : un ventilateur trop bruyant ou une pompe mal calée peut être détecté à des kilomètres par des hydrophones ennemis. Le silence est une arme aussi redoutable que les torpilles.</p> <p>Le silence absolu sous l'eau : dans un sous-marin nucléaire, le silence est si total que l'équipage entend parfois... son propre sang circuler. En patrouille silencieuse, le moindre son est contrôlé. On apprend vite à marcher doucement, à chuchoter... et à retenir ses étternuements. Les moteurs et systèmes sont conçus pour minimiser les vibrations, créant un environnement presque surnaturellement calme.</p> <p>Le bruit du sous-marin est surveillé en temps réel : le système affiche la signature acoustique du navire en continu. Si une pompe devient trop bruyante ou si une vibration apparaît, l'équipe peut ajuster la vitesse, la profondeur ou la configuration pour rester furtive.</p>
-------------------------	---

2.4 La caractérisation : l'art de la différenciation

Pour différencier un banc de thons d'un destroyer, ou un bruit de moteur d'un chant de baleine, l'analyste utilise plusieurs outils de caractérisation :

- **L'analyse spectrale (LOFAR)** : on décompose le son en fréquences. Les machines humaines produisent des raies verticales très nettes et discernables, tandis que les bruits biologiques sont plus diffus et "sales".
- **La démodulation (DEMON)** : cette technique permet d'isoler la fréquence de rotation de l'hélice adverse et de compter le nombre de pales sans même voir le navire. C'est l'outil ultime pour estimer la vitesse de la cible.
- **La base de données "Intelligence Acoustique"** : le système de combat compare en temps réel le signal reçu avec une bibliothèque de milliers de signatures enregistrées lors de missions précédentes.

Chapitre 3 : Les paradoxes du son sous la mer

3.1 La vitesse du son : une variable capricieuse

Contrairement à la lumière dans le vide, la vitesse du son dans l'eau (la célérité) n'est pas constante. Historiquement, c'est en 1826, sur le lac Léman, que Jean-Daniel Colladon et Charles Sturm mesurent pour la première fois avec précision cette vitesse (environ 1 435 m/s à l'époque).

Expérience pour mesurer la vitesse du son dans l'eau. Ces mesures ont été effectuées en 1841 sur le lac de Genève par Jean Daniel Colladon (1802-1893) et Charles Sturm (1803-1855). Gravure dans "Les Nouvelles conquêtes de la science" par Louis Figuier, Paris, c1880.



La cloche est frappée et la poudre s'enflamme. Le signal lumineux est immédiatement observable par l'autre expérimentateur.



Cet expérimentateur mesure le temps qui s'écoule jusqu'à entendre le son transmis dans l'eau

Aujourd'hui, nous savons que cette vitesse dépend de trois facteurs critiques mesurés par le bathythermographe, appareil permettant de mesurer la température de l'eau en fonction de la profondeur :

- **La température** : le son voyage plus vite dans l'eau chaude.
- **La pression (profondeur)** : la vitesse augmente avec la profondeur.
- **La salinité** : plus l'eau est salée, plus le son est rapide.

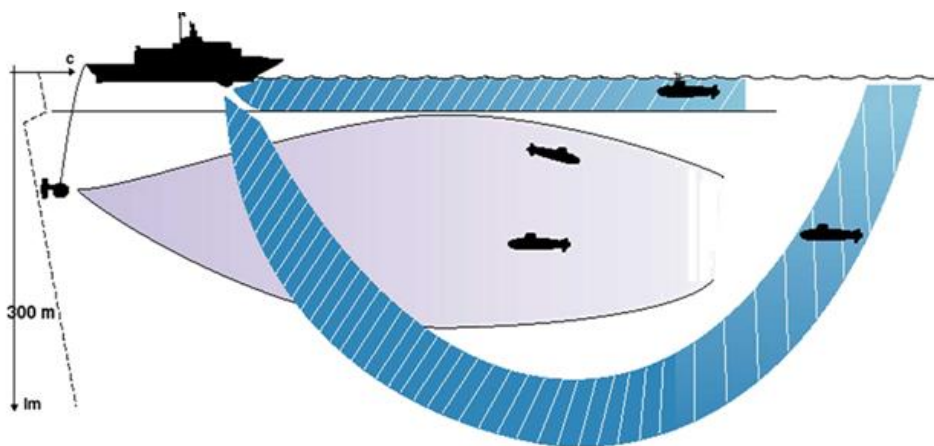
3.2 Le phénomène de réfraction continue

Ces variations de température et de pression ne sont pas seulement des données météo ; elles modifient profondément les propriétés physiques de l'eau en changeant son indice de réfraction acoustique.

Contrairement à l'air où le son voyage souvent en ligne droite, l'océan se comporte comme une lentille géante et hétérogène.

Le son subit alors un phénomène de réfraction continue : à mesure qu'elle progresse, l'onde sonore se courbe systématiquement vers les zones où la vitesse du son est la plus faible (les zones de moindre célérité). Cette courbure permanente des trajectoires redéfinit totalement la visibilité sous-marine :

- **Zones d'ombre** : en se courbant, les rayons sonores peuvent délaissier des pans entiers de la colonne d'eau. Un sous-marin peut ainsi se trouver à proximité immédiate d'un sonar ennemi, mais rester totalement indétectable car il est "caché" dans une zone que les rayons ne pénètrent jamais.
- **Canaux sonores (Canal SOFAR)** : à une certaine profondeur, il existe un minimum de célérité vers lequel les rayons sont piégés par réfractions successives (vers le haut puis vers le bas). Ce canal SOFAR (*Sound Fixing and Ranging*) agit comme un véritable guide d'onde : le son n'y rencontre ni la surface, ni le fond, ce qui limite sa déperdition et lui permet de voyager sur des milliers de kilomètres. Les sonars à très basse fréquence exploitent ce phénomène pour réaliser des prouesses de détection à très longue distance,



Une idée des canaux sonores : en surface et en profondeur

3.3 L'influence de la salinité et des couches thermiques : les "murs" invisibles

Si la température et la pression sont les facteurs dominants en haute mer, d'autres paramètres viennent complexifier la réfraction continue dans des environnements spécifiques :

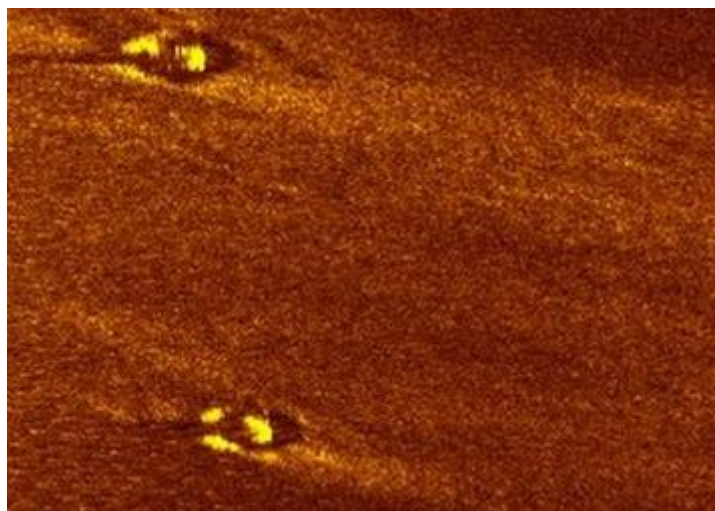
- **L'influence de la salinité (Haliocline)** : près de l'embouchure des grands fleuves ou dans les zones de fonte des glaces, l'arrivée d'eau douce modifie brutalement l'indice de réfraction. L'eau douce, moins dense, flotte sur l'eau salée. Pour le son, cette variation de salinité crée une discontinuité d'indice si marquée qu'elle peut agir comme un miroir, réfléchissant les ondes sonores et isolant acoustiquement ce qui se trouve au-dessus ou au-dessous de cette "frontière".
- **La Thermocline** : c'est la couche d'eau où la température chute brusquement. Pour un commandant de sous-marin, la thermocline est un atout tactique majeur. En se plaçant juste en dessous de cette couche, le sous-marin profite d'un effet de "bouclier" : les sons émis en surface par des navires ou des hélicoptères sont déviés par le changement d'indice, tandis que le sous-marin reste invisible dans sa zone d'ombre.

- **Les zones de mélange** : dans ces secteurs, le milieu devient si hétérogène que le signal sonore se fragmente. Le traitement du signal doit alors être extrêmement robuste pour ne pas perdre la cible dans ce que l'on appelle le "fouillis" acoustique.

3.4 Fréquence et portée : le dilemme du sonariste

La propagation du son obéit à une règle simple mais contraignante :

- **Les Hautes Fréquences (sons aigus)** : elles offrent une résolution très précise (permettant de voir les détails d'une mine, par exemple) mais sont rapidement absorbées par l'eau. Leur portée est courte.



Mines sous-marines vues par un sonar à balayage latéral

- **Les Basses Fréquences (sons graves)** : elles ne sont quasiment pas absorbées et voyagent sur de très longues distances. Cependant, pour capter ces ondes dont la longueur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, il est impératif d'utiliser des antennes de très grande taille (comme l'antenne linéaire remorquée de plusieurs centaines de mètres).

Le saviez-vous ?

Détection sonar

Les sonars passifs "reconnaissent" les signatures : chaque navire possède une signature acoustique unique : vibrations, hélice, turbines, circulation d'eau. Les bases de données acoustiques permettent d'identifier un bâtiment comme on reconnaît une voix. Certains opérateurs expérimentés y parviennent même à l'oreille.

Le sous-marin écoute en 3D : un sonar moderne ne capte pas seulement la direction d'un son, mais aussi sa profondeur apparente. Grâce aux antennes cylindriques et aux flancs, il reconstruit un véritable "volume acoustique", permettant de situer une cible dans l'espace comme un radar... mais dans l'eau.

Une signature acoustique vaut une empreinte digitale : chaque sous-marin possède un "accent sonore" unique : vibrations, hélice, circulation d'eau. Les grandes puissances collectent ces signatures pour identifier un navire à des dizaines de kilomètres. Un changement de pièce peut suffire à modifier cette

signature.

Les flancs "voient" mieux que l'étrave : les antennes de flanc, étendues sur plusieurs dizaines de mètres le long de la coque, offrent une résolution bien supérieure à celle de l'antenne d'étrave. Elles permettent de distinguer deux cibles très proches, ou de séparer un écho réel d'un simple reflet du relief.

Les antennes remorquées sont des oreilles géantes : une antenne remorquée peut mesurer plusieurs centaines de mètres. Plus elle est longue, plus elle "écoute bas", captant des fréquences que la coque ne peut pas percevoir. Elle transforme le sous-marin en hydrophone géant, capable d'entendre des navires très lointains.



Vue éclatée (sans sa peau) d'une section de flûte (antenne linéaire remorquée)

Chapitre 4 : Science des capteurs acoustiques

Si la coque est le corps du sous-marin, les capteurs acoustiques en sont le système nerveux. La détection sous-marine repose sur une transformation physique simple mais technologiquement complexe : la conversion d'une onde de pression mécanique (le son) en un signal électrique exploitable. Cependant, nous sommes passés de l'ère de l'écoute passive à celle de la "perception globale".

4.1 L'évolution des capteurs : de l'hydrophone à la "peau intelligente"

Le principe fondamental : l'effet piézoélectrique (PTZ)

Au cœur de chaque capteur se trouve l'hydrophone, nom donné à l'écouteur dans l'eau. Son fonctionnement repose majoritairement sur la piézoélectricité : certains matériaux (cristaux ou céramiques) génèrent une tension électrique lorsqu'ils sont comprimés par l'onde sonore.

- **L'hydrophone élémentaire** : C'est un petit cylindre ou disque qui "traduit" la pression acoustique en volts (*Illustration*).
- **Le défi de la sensibilité** : Un hydrophone moderne doit être capable de détecter une variation de pression inférieure à celle d'un murmure à plusieurs kilomètres, tout en résistant à la pression hydrostatique écrasante de l'immersion profonde.
- **Le principe mécanique (masse-ressort)** : À l'instar d'un écouteur ou d'un microphone, l'hydrophone est structurellement composé d'une masse bien inerte (une base lourde restant quasi-immobile par inertie) et d'une partie mobile (pavillon ou face avant)



sensible au passage de l'onde sonore. Entre ces deux éléments, "en sandwich", se trouve la céramique piézoélectrique. Lorsque l'onde de pression frappe la partie mobile, la céramique se retrouve comprimée contre la masse inerte ; c'est ce pincement mécanique qui produit la tension électrique proportionnelle au son reçu.



Exemples d'hydrophones (société Neptune Sonar – GB)

Bref historique des innovations

1. **Première Guerre mondiale** : Tubes acoustiques simples (stéthoscopes géants) puis premiers tubes à vide.
2. **Seconde Guerre mondiale** : Apparition du quartz et des premières céramiques synthétiques.
3. **Guerre Froide** : Développement des réseaux d'antennes massives et début du traitement numérique.
4. **Ère moderne (2020-2026)** : Passage aux polymères souples et à la fibre optique.

4.2 L'architecture des antennes : formes et fonctions

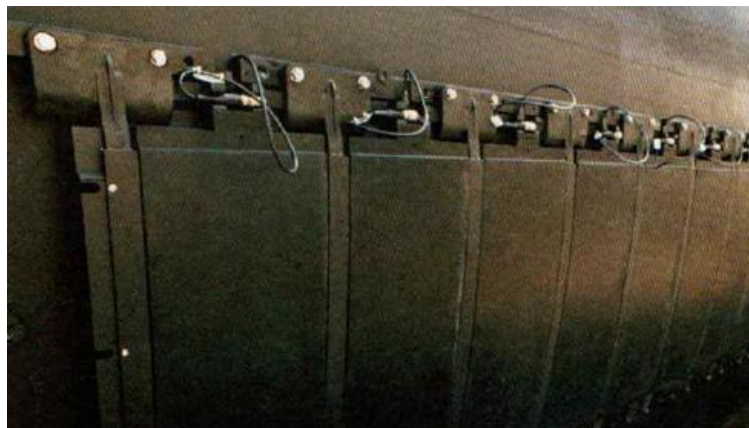
Pour "voir" dans toutes les directions et à toutes les distances, l'architecte naval dispose les capteurs en réseaux organisés, appelés antennes.

- **L'Antenne de dôme (Sphérique ou Cylindrique)** : située à l'étrave. Sa forme géométrique permet de couvrir un large secteur angulaire. La sphère est privilégiée car elle offre une symétrie parfaite pour les calculs de gisement, permettant une écoute panoramique vers l'avant, le haut et le bas.



Antenne cylindrique située dans l'étrave (bow) du sous-marin

- **Les Antennes de flanc (Plates) :** ces immenses panneaux de plusieurs mètres de long sont plaqués sur la coque épaisse. Leur grande surface est indispensable pour capter les basses fréquences (sons graves) qui voyagent très loin.

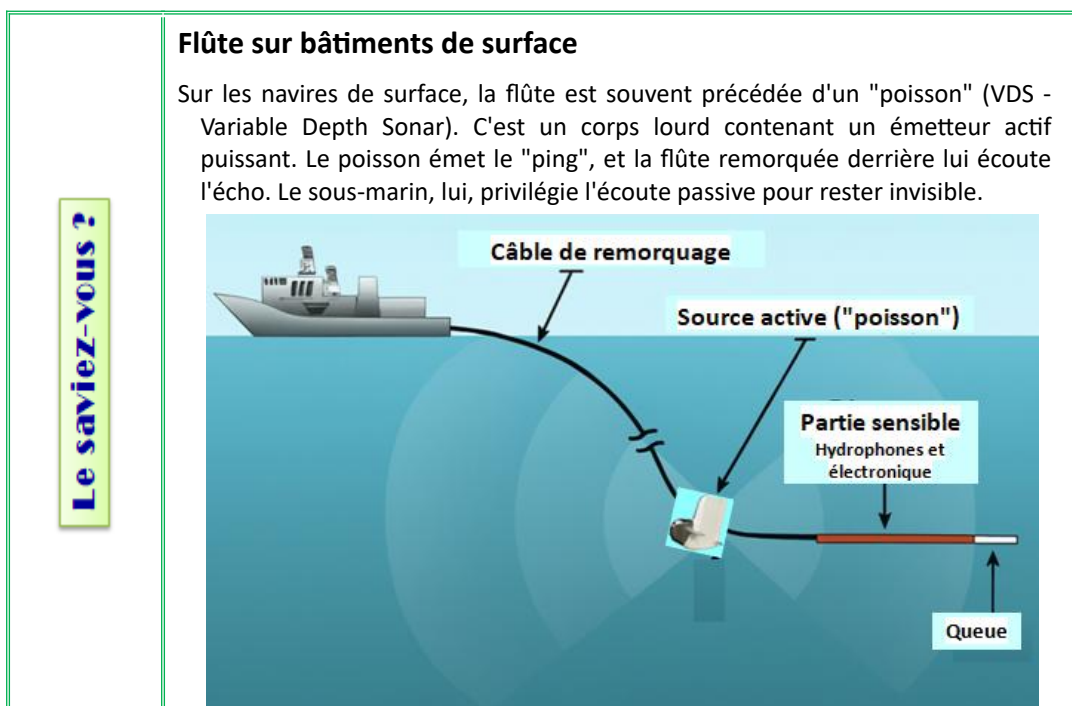


Vue partielle des antennes latérales de flanc

- **La Flûte (Antenne Linéaire Remorquée – ALR) :**

Structure : elle se compose d'un câble de remorquage (non sensible) de plusieurs centaines de mètres, suivi de la "section active".

Raison d'être : s'éloigner du bruit de sillage et des moteurs du sous-marin pour écouter dans un environnement "calme". La section sensible (parfois dite "active", à tort) est un tube souple rempli d'huile (pour la flottabilité neutre) contenant des dizaines d'hydrophones espacés régulièrement.



4.3 La révolution du PVDF : vers une peau sensorielle continue

Le saviez-vous ?

PVDF et ses applications

Le PVDF (fluorure de polyvinylidène) est un polymère reconnu pour ses propriétés piézoélectriques et ferroélectriques exceptionnelles, issues de sa structure moléculaire. Il génère une charge électrique lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique ou à une vibration, ce qui le rend particulièrement adapté aux capteurs, actionneurs et transducteurs.

Utilisé dans les capteurs de pression, tactiles et acoustiques, le PVDF offre une grande sensibilité aux variations mécaniques. Il sert également dans les actionneurs de précision, capables de convertir l'énergie électrique en mouvement.

En collecte d'énergie, ses films peuvent transformer les vibrations en électricité pour alimenter de petits dispositifs. Dans le domaine médical, sa biocompatibilité le rend utile pour les transducteurs à ultrasons et les dispositifs portables.

En industrie, il permet la surveillance de structures, la détection de contraintes et les essais non destructifs.

Depuis sa découverte comme matériau piézoélectrique organique en 1969, le PVDF a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment sur les films photovoltaïques. Toutefois, les procédés de fabrication optimisant son rendement piézoélectrique restent confidentiels.

L'entrée dans l'ère de la "**peau intelligente**" repose sur l'utilisation de polymères de pointe, au premier rang desquels le **PVDF** (Polyfluorure de vinylidène / Anglais : *PolyVinylidene Fluoride*). La piézoélectricité dans le PVDF est due à la présence d'atomes de fluor hautement électronégatifs dans la chaîne polymère. Si la composition exacte de ces films tient souvent du secret industriel ou militaire (notamment concernant les additifs permettant d'optimiser leur réponse acoustique), leur principe change radicalement la donne.

- **Un matériau "film"** : contrairement aux hydrophones traditionnels à base de céramiques piézoélectriques, qui sont des blocs rigides, épais et ponctuels, le PVDF se présente sous la forme d'un film polymère souple et extrêmement fin.
- **La compression directe** : ce film émet une tension électrique dès qu'il subit une micro-compression. Sa finesse lui permet d'être appliqué directement contre la coque ou intégré dans les couches de matériaux anéchoïques (tuiles).
- **Avantage de la continuité** : l'atout majeur réside dans la répartition continue de la détection. Là où les hydrophones classiques créent un maillage de points séparés, le PVDF permet de tapisser des surfaces entières. Pour l'architecte naval, cela signifie transformer chaque mètre carré de la coque en un récepteur géant.



- **Gain de discrétion** : sa très faible épaisseur évite les protubérances hydrodynamiques et permet une intégration "conforme" (qui épouse parfaitement les courbes du navire), réduisant ainsi les bruits de sillage générés par les capteurs eux-mêmes.

Cette technologie permet d'atteindre une résolution spatiale inédite : le sous-marin ne se contente plus d'écouter, il "ressent" la pression acoustique sur l'intégralité de son enveloppe, permettant à l'IA de bord de distinguer avec une précision chirurgicale la provenance d'un signal, même dans un environnement saturé.

L'industriel français Thales (Underwater Systems) s'est imposé comme un pionnier mondial de cette technologie. En développant des antennes basées sur le PVDF, Thales a permis de passer de la détection ponctuelle à la détection surfacique "conforme" (= qui épouse la forme), équipant notamment les sous-marins les plus modernes pour leur donner une capacité d'écoute sans précédent, tout en optimisant l'hydrodynamisme et la discrétion. Les sous-marins français de dernière génération (comme le SNA Classe Suffren / programme Barracuda) ainsi que les futurs SNLE 3G intègrent ces avancées pour leurs antennes latérales.

4.4 Tableau comparatif des technologies de détection (Horizon 2026)

Technologie	État de l'art (2026)	Avantage majeur	Futur probable
Céramique PZT	Standard industriel actuel	Sensibilité très élevée et robuste	Remplacement progressif par des polymères
PVDF (Polymère)	Déploiement sur sous-marins avancés	Souple, épouse la coque à 360°	"Peau sensorielle" intégrale continue
Fibre Optique	Utilisation sur flûtes de nouvelle génération	Pas de composants électriques immergés, portée extrême	Antennes intégrées directement dans la structure
IA & MEMS*	Recherche avancée / Prototypes	Capteurs microscopiques filtrant le bruit de sillage	Sous-marins "auto-analystes" traitant le signal localement

* Les microsystèmes électromécaniques (MEMS) sont des systèmes de taille micrométrique, des hybrides de dispositifs électroniques et mécaniques.

4.5 Synthèse : la fin de l'invisibilité ?

Cette évolution crée un équilibre instable. D'un côté, les matériaux absorbants (tuiles anéchoïques) cherchent à rendre le sous-marin "noir" acoustiquement. De l'autre, les peaux piézoélectriques et les fibres optiques rendent les capteurs si sensibles qu'ils peuvent détecter des signaux autrefois considérés comme du bruit de fond négligeable.

Avec la fibre optique (interférométrie), l'antenne n'est plus une suite de points, mais un fil continu où chaque millimètre est sensible. Si l'on tapisse un bâtiment de ces "feuilles" sensibles, l'océan devient un réseau de surveillance global où chaque vibration est analysée.

La technologie des capteurs ne cherche plus seulement à entendre "plus fort", mais à entendre "plus intelligemment". L'enjeu de 2026 n'est plus le capteur lui-même, mais la capacité de l'IA embarquée à traiter ces milliers de voies simultanées pour extraire une signature ennemie d'un environnement saturé.

Pour le sous-marin, l'invisibilité ne dépend plus seulement de son silence, mais de sa capacité à se fondre dans la texture acoustique de l'océan.

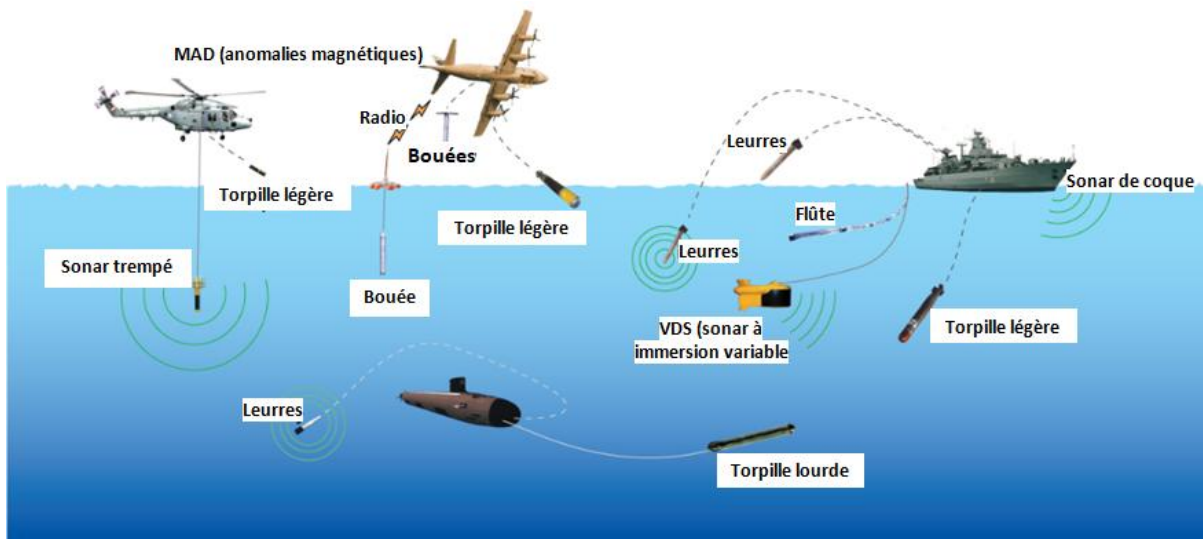


Partie 6: LA TRAQUE – L'art de la Lutte Sous-Marine (ASM)

Pour les amateurs de stratégie : comment les avions, les frégates et les autres sous-marins traquent la proie



Un sous-marin pourchassé par une frégate, un hélicoptère et un avion



Les Moyens mis en œuvre pour chasser les sous-mains (Lutte Anti Sous-Marine : LASM)

Le silence est l'armure du sous-marin. Pour les forces de surface et aériennes, la traque consiste à briser ce silence ou à détecter la moindre trace physique laissée par ce "fantôme des abysses". C'est un jeu du chat et de la souris à l'échelle d'un océan.

1918

ANECDOTE

Leurrer les goélands pour repérer les U-boats

L'idée folle de la Royal Navy

Pendant la Première Guerre mondiale, les sous-marins allemands terrifiaient les mers. Et c'est là que la Royal Navy eut une idée... complètement farfelue : utiliser des goélands comme détecteurs de sous-marins.

Le plan ? Attirer les oiseaux avec de la nourriture placée autour de périscoopes factices, pour qu'ils associent ces "tiges métalliques" à un festin. Ensuite, les oiseaux, en survolant la mer, s'agglutinaient autour de véritables périscoopes ennemis, signalant la présence des U-boats.

Certains récits vont encore plus loin : on aurait espéré que les oiseaux, attirés par la nourriture, se posent sur les périscoopes ennemis et les rendent inutilisables en les maculant de fientes, aveuglant ainsi les sous-mariniens allemands.

Un projet digne d'un roman de Jules Verne, jamais mis en service, mais qui prouve que la guerre pousse parfois à l'absurde pour surveiller les profondeurs.



Chapitre 1 : Les sentinelles du ciel et de la surface

La lutte sous-marine est une discipline d'une complexité rare, car elle se heurte à l'opacité physique de l'océan. Pour débusquer un intrus, les forces navales déploient un écosystème de capteurs travaillant en réseau.

1.1 L'Avion de Patrouille Maritime (Patmar) : le prédateur longue distance

L'avion de patrouille maritime est la plateforme de recherche par excellence. En France, ce rôle est dévolu à l'Atlantique 2 (ATL2), un avion de conception robuste, véritable poste de combat volant, actuellement modernisé au standard 6.

Moyens à bord et technologie

Un ATL2 dispose d'une panoplie de capteurs qui se complètent :

- **Le radar (searchmaster)** : capable de détecter un périscope sortant de l'eau à plusieurs dizaines de milles nautiques, même par mer formée.
- **La boule optronique (wescam)** : une caméra thermique haute définition permettant l'identification visuelle de jour comme de nuit.
- **Le MAD (Magnetic Anomaly Detector)** : situé dans la longue pointe à l'arrière de l'avion, il détecte les déformations du champ magnétique terrestre causées par la masse métallique d'un sous-marin.
- **Le système acoustique** : le système acoustique : le cœur du métier. L'avion peut larguer des dizaines de bouées acoustiques (actives qui émettent un "ping", ou passives qui écoutent simplement). Chaque bouée est constituée de deux parties : une section hydrophonique qui s'enfonce dans l'eau pour capter les signaux sous-marins, et une tête flottante en surface qui transmet les données recueillies à l'avion de patrouille.
- **Lidar** : bien que l'océan soit globalement opaque à la lumière, certains patrouilleurs modernes commencent à intégrer des systèmes LIDAR aéroportés, capables de percer la surface jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur pour détecter des silhouettes de sous-marins ou des champs de mines, palliant ainsi les limites du radar dans les couches très superficielles. En France, sur l'Atlantique 2, on utilise davantage l'imagerie hyperspectrale ou la boule optronique ultrasensible, mais le LIDAR est effectivement en phase de test ou de déploiement chez plusieurs grandes puissances (notamment les États-Unis avec le système AN/ASQ-242) pour la détection de mines et de sous-marins évoluant à l'immersion périscopique.



Centre des opérations à bord d'un avion de patrouille maritime (Breguet Atlantic)

La méthode de traque : le circuit et la tactique

La Patmar opère selon un schéma rigoureux. Lorsqu'une zone est suspectée, l'avion effectue un maillage de la surface de l'eau :

1. **Le circuit horizontal** : L'avion vole à basse altitude (environ 100 à 200 mètres) pour scruter la surface et, éventuellement, larguer ses bouées avec précision. Il suit des trajectoires en "hippodrome" ou en "peigne" pour couvrir la zone.
2. **La reprise d'altitude** : Une fois ce circuit basse altitude terminé, l'avion reprend de l'altitude (plusieurs milliers de pieds). Cela lui permet de rester à portée radio des bouées qui flottent en surface et de capter leurs signaux, tout en élargissant son horizon radar.
3. **L'analyse** : À bord, les "oreilles d'or" (analystes acoustiques) visualisent sur leurs écrans les fréquences reçues (les "LOFAR"). Ils cherchent une signature, un bruit de pompe, une rotation d'hélice.

La flotte française

La Marine Nationale s'appuie principalement sur :

- **18 à 22 Atlantique 2 (ATL2)** : basés à Lann-Bihoué.
- **Le Falcon 50 et Falcon 2000 Albatros** : davantage dédiés à la surveillance maritime et l'intervention rapide, mais essentiels pour le blanchiment de zone.

1915 ANECDOTE	Le sous-marin français qui a survécu à la capture 1915 – Le Turquoise, pris au piège des Dardanelles Pendant la Première Guerre mondiale, le sous-marin français Turquoise a été capturé par les Turcs après s'être échoué dans les Dardanelles. Les Alliés ont perdu dix sous-marins dans cette zone minée et dangereuse, mais le Turquoise a survécu... du moins, son équipage a été fait prisonnier. Son épave, aujourd'hui disparue, reste un symbole de la lutte acharnée pour le contrôle des détroits stratégiques.
--------------------------------	---

1.2 L'hélicoptère de lutte ASM : le sonar agile

L'hélicoptère est le prolongement armé de la frégate. En France, le NH90 Caïman Marine est la référence absolue dans ce domaine.

Le Sonar Trempé (Dipping Sonar)

La tactique de l'hélicoptère est radicalement différente de celle de l'avion. Il pratique le vol stationnaire tactique.

- L'appareil se stabilise à environ 15 mètres au-dessus de l'eau.
- Il descend au bout d'un treuil le FLASH (Folding Light Acoustic System for Helicopters), un sonar actif et passif.
- L'avantage majeur : Le sonar peut être descendu sous la thermocline (couche d'eau où la température change



brusquement et dévie les ondes sonores). En "cassant" cette barrière, l'hélicoptère voit ce que les navires de surface ne voient pas.

La Flotte Française

- **27 NH90 Caïman Marine** : dotés du sonar FLASH et de torpilles MU90.
- **Le Panther** : plus léger, principalement utilisé pour la surveillance et l'éclairage de la force navale.

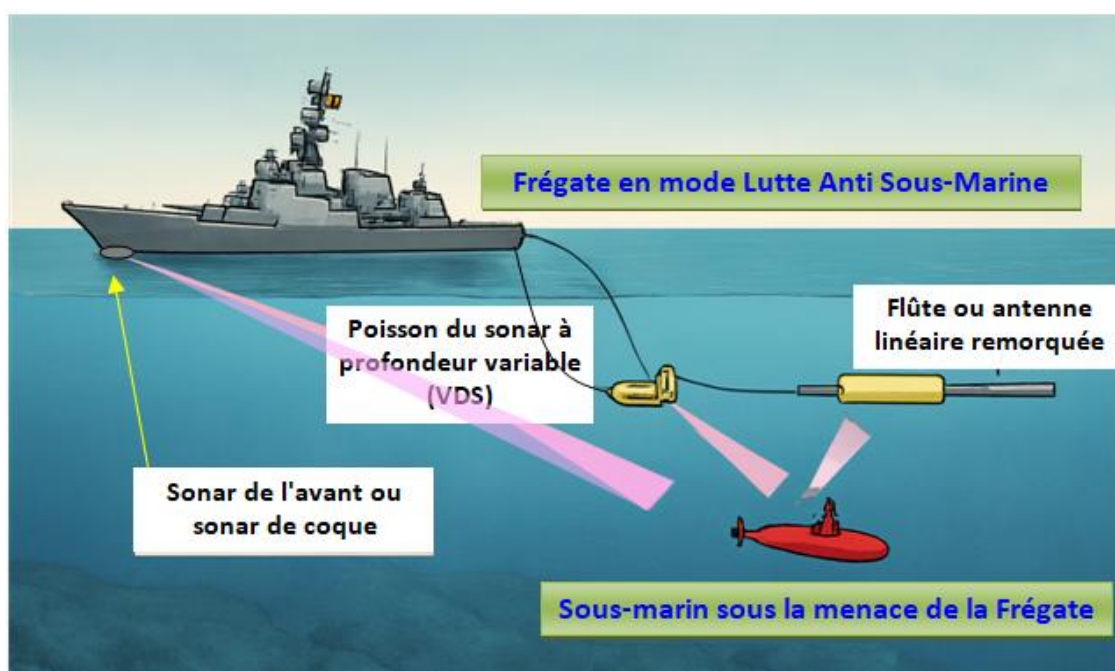
1.3 Le Bâtiment de Surface : ses moyens acoustiques

Les Frégates Multi-Missions (FREMM) constituent l'épine dorsale de la protection des côtes et des groupes aéronavals (comme le porte-avions Charles de Gaulle).

Moyens de détection

Une frégate ASM est un navire "silencieux" conçu pour ne pas polluer ses propres capteurs :

1. **Le sonar de coque** : fixé sous l'étrave, il permet une détection frontale.
2. **Le sonar remorqué (Captas-4)** : c'est l'arme fatale. Une énorme antenne de plusieurs tonnes est mise à l'eau à l'arrière. Elle peut descendre à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Étant loin des moteurs de la frégate, elle capte des sons extrêmement faibles à de très grandes distances.
3. **Le SURTASS** (Surveillance Towed Array Sensor System)



La Frégate dispose de trois moyens pour détecter le sous-marin.

Méthode de travail

La frégate travaille souvent en "poutre" : elle définit une zone de progression et utilise son sonar remorqué en mode basse fréquence. Si un écho suspect apparaît, elle projette son hélicoptère pour confirmer le contact (le "lever de doute").

Le saviez-vous ?

Travailler en "poutre"

Cela signifie que la frégate adopte une trajectoire perpendiculaire à l'axe de la zone qu'elle souhaite surveiller ou sécuriser. Autrement dit, elle progresse en travers de la zone, comme une poutre qui la coupe latéralement.

Cette configuration est particulièrement adaptée à l'utilisation du sonar remorqué (TASS) en mode basse fréquence. En effet, ce type de sonar est plus performant lorsque la frégate avance lentement ou reste stable, avec l'antenne bien déployée à l'arrière. En travaillant "en poutre", la frégate maximise la couverture latérale de son sonar, balayant efficacement une large bande de mer de part et d'autre de sa route.

Si un écho suspect est détecté dans cette bande, la frégate peut alors lancer son hélicoptère ASM (anti-sous-marin) pour effectuer un "lever de doute" : l'hélicoptère largue ses propres bouées acoustiques ou utilise son sonar trempé pour confirmer la présence d'un sous-marin. C'est une tactique classique en lutte ASM, combinant détection passive à longue portée et investigation active ciblée.

Cas du SURTASS

Le SURTASS est le système d'écoute le plus puissant au monde, conçu pour la surveillance à très longue distance (plusieurs centaines de kilomètres).

- **Description** : Il se compose d'une antenne linéaire remorquée (un câble de plusieurs kilomètres de long truffé d'hydrophones) couplée à un "poisson" émetteur de basse fréquence. Ce dernier agit comme une source sonore monumentale qui "illumine" des bassins océaniques entiers, permettant de détecter les sous-marins les plus silencieux par réflexion d'ondes.
- **Mise en œuvre** : Ce système est trop encombrant pour les frégates classiques. Il est installé sur des navires dédiés à la surveillance acoustique, souvent des catamarans de type STALWART ou VICTORIOUS, qui naviguent à très faible vitesse pour maximiser la sensibilité des capteurs.
- **Marines utilisatrices** :
 - **US Navy (États-Unis)** : Pionnière et principale utilisatrice avec sa flotte de navires du *Military Sealift Command*.
 - **JMSDF (Japon)** : Pour surveiller les passages stratégiques en mer de Chine.
 - **Royal Navy (Royaume-Uni)** : Avec l'acquisition récente de navires de surveillance multi-missions (MROSS).
 - **Marine Chinoise (PLAN)** : Qui déploie désormais ses propres versions pour contrecarrer la supériorité sous-marine américaine.

Cas du CAPTAS

La marine nationale française n'utilise pas de système SURTASS, même si les industriels français ont la capacité de les produire (Thalès).

- **Une doctrine particulière** : La France a fait le choix de la polyvalence avec ses frégates FREMM. Plutôt que d'avoir des navires lents et spécialisés uniquement dans l'écoute (comme les navires T-AGOS américains), la France utilise le sonar Captas-4.
- **La performance du Captas-4** : Bien que remorqué par une frégate de combat, le Captas-4 est considéré comme l'un des meilleurs sonars au monde. Il est si performant que l'US Navy a fini par l'acheter à l'industriel français Thalès pour équiper ses propres nouvelles frégates (classe *Constellation*).
- **Le rôle des SNA** : Pour la surveillance stratégique à très longue distance et "l'éclairage" de l'océan, la France compte davantage sur ses Sous-marins Nucléaires d'Attaque (SNA) de classe *Suffren*, qui agissent comme des capteurs mobiles et indétectables, plutôt que sur des antennes traînées par des navires de surface vulnérables.

En résumé :

Le **SURTASS** est l'outil des "superpuissances" (USA, Chine) pour la surveillance de zones fixes, tandis que la France privilégie la **mobilité tactique** avec le binôme Frégate/Captas-4 et SNA.

Chapitre 2 : Contrôle et affrontements dans l'espace sous-marin

2.1 Le Sous-marin contre le Sous-marin : le duel invisible

1945

ANECDOTE

Quand un sous-marin s'est battu contre un autre... sous l'eau

En 1945, le HMS *Venturer* coule un U-Boot allemand alors que les deux sont immergés.

Sans ordinateur. Sans sonar moderne. Juste un calcul humain en trois dimensions.

Un duel invisible. Silencieux. Mortel.

La première véritable bataille sous-marine de l'Histoire.



C'est la forme la plus pure et la plus angoissante de la traque. Un SNA (Sous-marin Nucléaire d'Attaque), comme ceux de la classe Suffren (France), est le meilleur chasseur de sous-marins.

L'approche tactique

Le sous-marin n'utilise pratiquement jamais son sonar actif (le "ping"), car cela reviendrait à allumer une lampe torche dans une forêt sombre : on voit, mais on est vu immédiatement.

- **L'écoute passive** : Le SM avance à vitesse réduite (vitesse de patrouille) pour être le plus silencieux possible. Il utilise ses antennes de flanc pour écouter l'océan sur 360°.
- **Le profil bathymétrique** : Le pacha (commandant) utilise les variations de salinité et de température de l'eau pour se cacher. Il cherche des "zones d'ombre" acoustiques créées par le relief ou les couches thermiques.

Difficultés de détection

- **Le bruit de fond** : L'océan est bruyant (crevettes claqueuses, chants de baleines, trafic marchand). Isoler le bruit d'un sous-marin moderne, qui est plus silencieux que le bruit de la mer, relève de l'exploit.
- **La convergence** : Le son ne voyage pas en ligne droite dans l'eau ; il fait des courbes. Un sous-marin peut être entendu à 30 km, puis disparaître totalement à 40 km, pour réapparaître à 60 km grâce aux phénomènes de "zones de convergence".

La tactique du "Trou dans l'eau"

Le but est de se placer dans les secteurs aveugles du sous-marin adverse, généralement dans ses "6 heures" (derrière ses hélices), là où son propre bruit masque l'arrivée d'un intrus. C'est une partie d'échecs en trois dimensions où le premier qui augmente sa vitesse perd son invisibilité et devient la cible d'une torpille.

<p>1940</p> <p>ANECDOTE</p>	<p>Le sous-marin qui s'est fait passer pour un rocher</p> <p>Pour échapper aux radars et aux avions, certains sous-marins ont utilisé des techniques de camouflage extrêmes. Pendant la guerre, des commandants faisaient volontairement reposer leur bâtiment sur le fond marin.</p> <p>Immobile, silencieux, couvert d'algues et de sédiments, le sous-marin devenait invisible. Des heures. Parfois des jours.</p> <p>Une ruse géniale... mais mortelle. Si le navire s'enfonçait trop dans la vase, il ne remontait jamais. L'art de disparaître avait un prix.</p>
<p>2020</p>	<p>Le dernier mystère : combien de sous-marins reposent encore au fond des mers ?</p> <p>Personne ne le sait vraiment. Des centaines, peut-être des milliers de sous-marins jonchent les fonds marins. Certains conventionnels. D'autres nucléaires. Beaucoup avec leurs équipages à bord.</p> <p>Chaque épave est une capsule temporelle. Une tombe. Un secret.</p> <p>Les océans couvrent plus de 70 % de la planète. Et dans ce monde englouti,</p>

ANECDOTE

dorment encore des armes, des corps, et des histoires que personne ne racontera jamais.

La guerre sous-marine ne s'achève pas toujours avec un traité. Parfois, elle s'enfoncé simplement dans l'obscurité.



Épaves de sous-marins

2.2 La guerre dans les abysses : satellites, drones et réseaux

La technologie moderne ajoute des dimensions invisibles à la traque.

- **Réseaux acoustiques fixes** : posés sur le fond marin (type SOSUS), ces réseaux de microphones permanents surveillent les points de passage obligés (détroits, sorties de ports).
- **Les drones sous-marins (UUV)** : autonomes et silencieux, ils peuvent patrouiller pendant des mois, rendant la détection omniprésente sans risquer de vies humaines.
- **La surveillance spatiale** : bien que l'eau soit opaque pour les satellites classiques, certains radars à synthèse d'ouverture (SAR) ou capteurs laser peuvent détecter la "bosse" infime créée à la surface par le déplacement d'une masse imposante en immersion.

2.3 La protection des points sensibles (anti-intrusion)

Pour protéger une base navale ou une zone stratégique, on utilise des moyens physiques et de proximité :

- **Filets et barrières physiques** : dispositifs fixes pour bloquer l'accès aux rades.
- **Plongeurs de combat** : chargés de la détection de mines ou de l'interception de nageurs de combat ennemis.
- **Dauphins de combat** : certains pays utilisent des mammifères marins dressés pour repérer les intrus impossibles à voir au sonar.



Chapitre 3 : L'engagement : du contact à l'assaut

Une fois le sous-marin localisé et identifié, la traque bascule dans sa phase létale. L'objectif n'est plus de voir, mais de détruire ou de neutraliser. Pour le sous-marin, c'est le moment où le silence ne suffit plus : il faut survivre à l'attaque.

3.1 Les armes de destruction : le marteau et l'enclume

La torpille lourde et la torpille légère : les robots prédateurs

La torpille moderne n'est plus un simple projectile simple, c'est un drone sous-marin intelligent.

- **La torpille légère (type MU90)** : lancée depuis une frégate ou un hélicoptère, elle est conçue pour la chasse. Elle "plane" dans l'eau avant d'allumer son propre sonar actif. Elle est capable de poursuivre sa cible à plus de 50 nœuds (90 km/h) et de résister aux contre-mesures les plus sophistiquées.
- **La torpille lourde (type F21)** : exclusivement lancée par des sous-marins. Filoguidée par une fibre optique, elle permet au sous-marin lanceur de la diriger jusqu'au dernier moment. Sa charge explosive est conçue pour créer une bulle de gaz sous la quille du navire adverse, brisant sa structure par la force de la gravité.

La grenade sous-marine : l'onde de choc

Bien que de conception plus ancienne, la grenade reste utilisée pour saturer une zone. Lancée en chapelet, elle explose à une profondeur prédéfinie. Même si elle ne touche pas directement la coque, l'onde de choc peut endommager les systèmes sensibles (sonars, joints d'étanchéité, électronique) et forcer le sous-marin à la faute ou à la remontée.

3.2 La tactique de l'esquive : le duel de survie

Lorsqu'un sous-marin détecte le lancement d'une torpille adverse (souvent par le bruit caractéristique de l'ouverture des tubes ou du démarrage du moteur de l'engin), il entre en manœuvre de survie.

La rupture de contact

Le commandant ordonne immédiatement une accélération maximale pour créer de la distance. Cette phase est paradoxale : pour s'échapper, le sous-marin doit faire du bruit (cavitation des hélices), renonçant ainsi définitivement à sa discrétion.

Le changement d'immersion : Le sous-marin plonge vers ses limites de sécurité ou cherche à passer sous une couche thermique pour briser le guidage sonar de la torpille.

Les contre-mesures (leures)

Le sous-marin lance des éjecteurs de leures (canisters). Ces dispositifs génèrent :

- **Des leures acoustiques** : Ils simulent le bruit du moteur du sous-marin pour tromper l'autodirecteur de la torpille.
- **Des rideaux de bulles** : Ils créent un mur d'air qui réfléchit les ondes sonores, masquant la position réelle du sous-marin.

Le "Trou dans l'eau" et l'esquive finale

Le but est d'amener la torpille à "perdre" son accrochage. Si la torpille passe à côté sans exploser, le sous-marin effectue un virage brutal pour se placer hors de son cône de détection. C'est un moment de tension extrême où chaque bruit à bord (chute d'une clé, parole) est proscrit.

3.3 Moyens Anti-Intrusion : la protection des points sensibles

Dans les zones portuaires ou les accès aux bases de sous-marins nucléaires (comme l'Île Longue en France), la défense est fixe et préventive.

- **Filets anti-torpilles et anti-sous-marins** : De lourds maillages d'acier barrent les rades pour stopper les engins ou les plongeurs.
- **Moyens de proximité** : Utilisation de grenades de faible puissance (grenades de défense de coque) pour dissuader les nageurs de combat ou les mini-drones sous-marins de s'approcher des navires à l'ancre.

Chapitre 4 : Conclusion de la traque : une question de patience

La lutte sous-marine est la seule forme de guerre où la technologie la plus avancée peut être mise en échec par une simple couche d'eau plus froide ou un relief sous-marin accidenté. C'est une guerre d'usure psychologique où le gagnant est celui qui commet l'erreur de faire le premier bruit.

Le paradoxe du silence : La traque d'un sous-marin est un combat asymétrique. Des milliards d'euros de technologie (avions, satellites, frégates) sont déployés pour vaincre une seule arme dont la force réside dans son absence de signal. Dans cette guerre, l'information est la munition la plus précieuse. Celui qui voit l'autre en premier a déjà gagné 90 % de la bataille.



Partie 7: LES COULISSES DE LA PUISSANCE – Industrie et Géopolitique

Pour comprendre le "Grand Jeu" mondial, les géants industriels (Naval Group, TKMS) et les secrets des grands contrats

1914

ANECDOTE

Le sous-marin qui a servi de coffre-fort mobile

Pendant la Première Guerre mondiale, un sous-marin allemand transporte secrètement des lingots d'or destinés à financer des opérations diplomatiques.

L'or est dissimulé dans des compartiments techniques. L'épave, retrouvée en 1999, contenait encore plusieurs lingots, confirmant la rumeur.

Chapitre 1 : Les maîtres de l'acier : le paysage industriel mondial

La construction de sous-marins est le sommet de la pyramide industrielle navale. Elle exige des compétences uniques en métallurgie (acier à haute limite élastique, soudure de haute technicité), en acoustique, en gestion d'énergie et en intégration de systèmes complexes. Outre, France et Allemagne (abordés plus loin), on trouve :

1.1 Le paysage industriel et les risques

Le sous-marin est l'objet industriel le plus complexe jamais construit par l'homme. Cette section met en lumière l'excellence des chantiers navals, avec un focus sur l'écosystème français, leader mondial du secteur. Mais cette prouesse a un prix : la sécurité plongée. Nous aborderons ici la gestion des risques permanents — incendie, voie d'eau, avarie — et rendrons hommage, à travers l'étude des catastrophes passées, à la rigueur de fer nécessaire pour opérer ces monstres d'acier sur plusieurs décennies.

1.2 Le panorama mondial des constructeurs

On distingue deux catégories d'acteurs : ceux qui produisent pour leur souveraineté nationale (souvent nucléaire) et ceux qui dominent le marché de l'exportation (conventionnel).

- **États-Unis** : le duopole **General Dynamics Electric Boat** et **Huntington Ingalls Industries** produit exclusivement des sous-marins nucléaires (Virginia, Columbia) pour l'US Navy. Ils ne pratiquent pas l'exportation de navires complets.
- **Russie** : **Sevmash** et les **Chantiers de l'Amirauté** produisent une vaste gamme (Boreï, lassen, Kilo). Ils sont des acteurs majeurs à l'export vers l'Asie et l'Algérie.

- **Chine** : les chantiers de **Bohai** et **Wuchang** montent en puissance avec une production massive pour la marine chinoise et des contrats récents à l'export (Pakistan, Thaïlande).
- **Suède (Saab Kockums)** : spécialiste du conventionnel très silencieux (classe Gotland/A26).
- **Asie** : le Japon (**Mitsubishi/Kawasaki**) et la Corée du Sud (**Hanwha Ocean**) produisent des bâtiments conventionnels de très haute technologie, principalement pour leurs besoins nationaux.

<p>1945</p> <p>ANECDOTE</p>	<p>Les Sous-marins porte-avions japonais</p> <p>Pendant la Seconde Guerre mondiale, le Japon a lancé la classe <i>I-400</i>. Ces monstres pouvaient transporter trois bombardiers pliés dans un tube étanche sur le pont.</p> <p>Leur mission secrète ? Remonter la côte américaine et bombarder le canal de Panama pour paralyser la flotte US. Le projet a échoué de justesse.</p>
---	---

1.3 Focus : ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS) et l'héritage HDW

En bref : L'Allemagne est historiquement le leader mondial de l'exportation de sous-marins conventionnels.

- **L'héritage HDW** : ce chantier mythique de Kiel a conçu le **Type 209**, le sous-marin le plus exporté au monde (plus de 60 unités dans 13 pays).
- **Le succès des Types 212/214** : sous l'égide de **TKMS**, l'Allemagne a imposé ses standards en matière de propulsion anaérobie (AIP) par piles à combustible. Ils sont les principaux concurrents de la France sur les marchés internationaux.

Un peu plus d'explications : Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW), aujourd'hui intégré à ThyssenKrupp Marine Systems, a produit plus de 160 sous-marins depuis les années 1960, principalement des modèles de type 209, 212, 214 et Dolphin. Ces unités ont été exportées vers plus de 20 marines à travers le monde.

Aperçu des productions de HDW

Type de SM	Quantité	Pays clients principaux
Type 209	Environ 60 à 70 unités	Grèce, Turquie, Brésil, Afrique du Sud, Pérou, Indonésie...
Type 212	Environ 12 à 16 unités	Allemagne, Italie, Norvège
Type 214	Environ 20 à 30 unités	Corée du Sud, Grèce, Turquie, Portugal
Classe Dolphin	6 unités	Israël

Typiquement :

- **Type 209** : modèle exporté le plus largement, réputé pour sa fiabilité et sa modularité.
- **Type 212** : équipé de propulsion anaérobie (AIP), utilisé par les marines européennes.
- **Type 214** : évolution du 209 avec AIP, destiné à l'export.
- **Classe Dolphin** : version modifiée du 209, adaptée aux besoins spécifiques de la marine israélienne.

HDW a également participé à la construction de sous-marins pour la marine allemande pendant les deux guerres mondiales sans que l'on sache vraiment dénombrer la quantité de sous-marins fabriqués depuis sa création en 1838.



Le sous-marin allemand conventionnel (SSK) de type 212

1.4 Focus France : l'écosystème Naval Group et Thales

Dans le club très fermé des nations capables de concevoir, construire et maintenir des sous-marins de pointe, la France occupe une place singulière. Elle est l'une des rares à maîtriser l'intégralité du spectre technologique, de la propulsion conventionnelle diesel-électrique aux monstres de technologie que sont les Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins (SNLE). Cette souveraineté repose sur un binôme industriel indissociable : **Naval Group** et **Thales**.

Naval Group : l'Architecte Intégrateur

Anciennement DCNS, Naval Group est le maître d'œuvre, le chef d'orchestre de cet acier qui plonge. Son métier est celui de la synthèse extrême : concevoir une coque capable de résister à des pressions colossales tout en garantissant la sécurité de plongée, un défi d'ingénierie où l'erreur n'est pas permise. En collaboration étroite avec TechnicAtome pour les chaufferies nucléaires, Naval Group transforme des milliers de tonnes de métal en une plateforme furtive et autonome.

Cette expertise s'exporte avec un succès éclatant. La gamme Scorpène est devenue une référence mondiale, naviguant sous les drapeaux du Chili, de la Malaisie, de l'Inde et du Brésil. Plus récemment, c'est le modèle "Blackword Barracuda" (dérivé de la technologie du Barracuda nucléaire français mais à propulsion conventionnelle) qui a remporté la compétition aux Pays-Bas, confirmant la supériorité de la conception française sur le marché international.



Un sous-marin Scorpène à la mer

Thalès : le "Systémier" des sens

Si Naval Group façonne le corps, Thales fournit l'âme sensible et les capteurs vitaux du sous-marin. Sous l'eau, là où la lumière ne pénètre pas, la survie et la supériorité tactique dépendent quasi exclusivement du son. Thales, leader mondial des suites sonars, déploie son expertise depuis ses centres d'excellence de Brest et de Sophia-Antipolis.

Le sonar n'est pas un simple équipement, c'est une architecture monumentale qui occupe une place prépondérante à bord. L'entreprise conçoit des antennes d'une complexité inouïe : les antennes de coque, les imposantes antennes de flanc qui tapissent les flancs du navire, et les antennes linéaires remorquées, ces longs "serpents" acoustiques déployés loin derrière le bâtiment pour écouter au-delà du bruit de ses propres machines. L'empreinte physique de Thales à bord est massive, s'étendant des dômes acoustiques extérieurs jusqu'aux nombreuses baies électroniques de traitement du signal et aux consoles de visualisation où les analystes traquent l'ennemi.

Mais le savoir-faire de Thales ne s'arrête pas à l'acoustique. Le groupe fournit l'ensemble des systèmes de perception et de liaison du géant :

- **L'optronique** : les systèmes de veille périscopique de haute précision.
- **L'ESM (Electronic Support Measures)** : pour intercepter et identifier les émissions radars adverses.
- **Les communications** : garantissant le lien vital avec le commandement à terre.
- **Les radars de navigation** : pour les phases de surface ou d'accès aux ports.

Bien que Naval Group reste le maître d'œuvre du Système de Combat (le cerveau qui fusionne toutes ces données pour la décision du tir), Thales est le fournisseur incontournable de toute la chaîne sensorielle. Sans cette capacité à voir, entendre et communiquer, le géant d'acier serait aveugle et sourd dans l'immensité des abysses.

1.5 Les autres grands systémiers internationaux

Le "cerveau" du sous-marin peut parfois être fourni par des entreprises spécialisées, indépendamment du constructeur de la coque :

- **KAE (Atlas Elektronik, Allemagne)** : fournit des systèmes de combat (ISUS) et des torpilles lourdes (SeaHake).
- **Lockheed Martin / Rockwell (USA)** : fournissent les systèmes de combat des sous-marins australiens (classe Collins) et américains.
- **Saab (Suède)** : propose des suites intégrées de gestion de combat et de capteurs.

Les autres acteurs de l'écosystème français

Derrière Naval Group et Thales, des centaines de PME et ETI maintiennent le savoir-faire :

- **TechnicAtome** : conception des réacteurs nucléaires compacts.
- **Safran** : mâts optroniques, centrales à inertie de haute précision.
- **ECA Group (Exail)** : drones sous-marins et robots de déminage.
- **Jeumont Electric** : moteurs électriques de propulsion ultra-silencieux.

1.6 La taille des SNLE : une comparaison internationale

La taille d'un **SNLE** (Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins) ou **SSBN** en anglais (*Ship Submersible Ballistic Nuclear*) est principalement dictée par le nombre et la dimension des missiles balistiques qu'il transporte. Les puissances nucléaires adoptent des philosophies de conception différentes, ce qui se reflète dans le gabarit de leurs navires.

Voici une comparaison des dimensions des classes actuelles en service pour la France, les États-Unis et la Russie.

Tableau comparatif des dimensions

Caractéristique	Classe Le Triomphant (France)	Classe Ohio (États-Unis)	Classe Boreï-A (Russie)
Longueur	138 m	170 m	170 m
Diamètre (Maître-bau)	12,5 m	13 m	13,5 m
Déplacement (en plongée)	~14 300 tonnes	~18 750 tonnes	~24 000 tonnes
Nombre de missiles	16 (M51)	20 (Trident II D5)*	16 (Bulava)

Note : Les sous-marins de la classe Ohio transportaient initialement 24 missiles, mais ce nombre a été réduit à 20 pour respecter les traités de désarmement (New START).

Analyse des différences par pays

France : La compacité optimisée

Les SNLE français de la classe Le Triomphant sont les plus "petits" du trio. Cette taille plus modeste ne signifie pas une puissance moindre, mais une optimisation poussée pour la discrétion acoustique. Le diamètre de 12,5 m est précisément calibré pour le missile M51, qui est l'un des plus volumineux au monde par rapport à la taille du porteur.

États-Unis : L'endurance et le volume

La classe Ohio est restée pendant longtemps la référence mondiale. Plus longs que les navires français, ils ont été conçus pour emporter un grand nombre de vecteurs (24 à l'origine). Leur successeur, la classe Columbia (en construction), conservera une longueur similaire (environ 171 m) mais sera plus large et beaucoup plus lourd (20 800 tonnes) pour intégrer des technologies de furtivité encore plus avancées.

946

ANECDOTE

Le sous-marin qui a survécu à une explosion atomique

1946 – L'USS Pilotfish, témoin des essais nucléaires du Pacifique

Après la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis ont mené des essais nucléaires dans le Pacifique. Plusieurs sous-marins, dont l'USS Pilotfish, ont été placés à proximité des explosions pour tester leur résistance. Contre toute attente, certains ont survécu, prouvant la robustesse de leur conception. Ces tests ont marqué un tournant dans la course aux armements et dans la compréhension des effets des radiations sur les matériaux.

Russie : La puissance brute et la double coque

La Russie détient historiquement les records de taille avec la classe Typhoon (aujourd'hui retirée du service stratégique), qui déplaçait 48 000 tonnes (40 600 pour le porte-avions Charles de Gaulle). La nouvelle classe Boreï-A est plus "raisonnable" mais reste un colosse de 24 000 tonnes. Cette différence de tonnage s'explique souvent par l'utilisation d'une double coque (une coque extérieure hydrodynamique et une coque intérieure résistante), une signature de l'ingénierie navale russe qui offre une meilleure survie et une réserve de flottabilité supérieure.

En résumé : Pourquoi de telles différences ?

- **Le tonnage** : les Russes privilégient la robustesse et la capacité à opérer sous la glace (double coque), ce qui augmente le volume.
- **La longueur** : les Américains ont longtemps privilégié le nombre de missiles par navire.
- **Le diamètre** : il est conditionné par la taille du missile balistique. Un missile plus large impose une coque plus épaisse pour maintenir l'intégrité structurelle à grande profondeur.

Le plus **grand** sous-marin du monde : K-329 Belgorod – Russie et ses cousins



Les plus grands sous-marins du monde - Belgorod : 184 m, 30 00 tonnes ; 110 membres d'équipage

Synthèse industrielle

Le marché du sous-marin est aujourd'hui marqué par une compétition féroce entre le bloc européen (Naval Group, TKMS, Saab) et la montée en puissance de l'Asie. La survie de ces industries dépend de leur capacité à innover sans cesse dans deux domaines clés : l'intelligence artificielle pour le traitement sonar et la propulsion par batteries Lithium-Ion pour prolonger l'immersion des bâtiments conventionnels.

Chapitre 2 : La géopolitique des abysses : un nouveau grand jeu

En 2026, la mer n'est plus seulement une zone de transit, c'est un théâtre de compétition directe où le sous-marin est l'acteur principal. La géopolitique sous-marine s'articule désormais autour de trois axes de tension majeurs.

2.1 Le sous-marin, pivot immuable de la puissance au XXe siècle

L'histoire de la guerre navale a prouvé que la maîtrise des profondeurs est souvent le facteur décisif des conflits majeurs. Au terme de cette étude, il apparaît que le sous-marin n'est plus seulement un outil de combat parmi d'autres, mais le sanctuaire ultime de la souveraineté nationale. Alors que le ciel et la surface deviennent de plus en plus transparents sous l'œil des satellites, l'océan reste l'opaque dernier refuge.

L'intérêt stratégique et tactique : un bilan de l'existant

Le sous-marin demeure l'unique plateforme capable de combiner trois fonctions critiques : la dissuasion, l'interdiction et la projection.

Le sanctuaire de la dissuasion : pour les puissances dotées de l'atome, le Sous-marin Lanceur d'Engins (SNLE) est la garantie de la "seconde frappe". Sa capacité à disparaître pendant des mois assure qu'aucune attaque surprise ne peut annihiler la capacité de riposte d'une nation.

L'asymétrie tactique : même pour de plus petites nations, le sous-marin de combat (SNA ou conventionnel) est l'arme du pauvre contre le riche, et du riche contre le plus fort. Il oblige tout adversaire à une dépense colossale en moyens de lutte anti-sous-marine (ASM), immobilisant des flottes entières par la simple *incertitude* de sa présence.

1985 ANECDOTE	<p>Le sous-marin qui a transporté... un trésor englouti</p> <p>1622 – Le Nuestra Señora de Atocha, un galion coulé et redécouvert</p> <p>Le Nuestra Señora de Atocha, un galion espagnol chargé d'or, d'argent et de pierres précieuses, a sombré en 1622 au large de la Floride. Pendant des siècles, son trésor est resté introuvable, jusqu'à ce qu'un chasseur de trésors, Mel Fisher, le découvre en 1985.</p> <p>Aujourd'hui, des sous-marins touristiques permettent d'explorer des épaves comme celle-ci, offrant un voyage dans le temps aux amateurs d'histoire et d'aventure.</p>
--------------------------------	---

L'élargissement du club : la prolifération des technologies anaérobies

L'avenir du secteur est marqué par une démocratisation de la performance. Jusqu'ici, le fossé était immense entre le diesel-électrique (devant faire surface souvent) et le nucléaire. Ce fossé se comble.

La Révolution de l'AIP (Air Independent Propulsion) : l'AIP permet aux sous-marins classiques de rester en plongée plusieurs semaines sans "transpirer" (remonter le périscope pour recharger les batteries).

- **Piles à combustible** : utilisation de l'hydrogène pour une discrétion acoustique absolue.
- **Moteurs Stirling ou cycles fermés** : des solutions robustes pour les marines régionales (Singapour, Suède, Japon).

Le nucléaire de "poche" et les batteries lithium-ion : On observe une tendance vers des réacteurs nucléaires plus compacts et sûrs, mais aussi l'arrivée massive des batteries Lithium-Ion (initiée par le Japon avec la classe *Taigei*). Ces dernières offrent des taux de décharge élevés pour des sprints de vitesse, auparavant impossibles pour les sous-marins conventionnels.


La course à la discrétion : l'invisibilité comme arme absolue

La détection acoustique progresse, donc la furtivité doit muter. L'avenir ne se joue plus seulement sur la forme de la coque, mais sur les matériaux.

Au-delà des tuiles anéchoïques : le futur appartient aux métamatériaux. Au lieu de simplement absorber les ondes sonar, ces structures complexes pourraient les "guider" autour de la coque, rendant le sous-marin littéralement invisible aux sonars actifs (le concept d'invisibilité acoustique).

La signature magnétique et thermique : avec les magnétomètres cryogéniques et l'imagerie satellite thermique, le sous-marin doit maintenant masquer sa trace de sillage et son rejet de chaleur. La recherche s'oriente vers une gestion active des flux thermiques pour se fondre dans la température de l'eau environnante.

2.2 Le sanctuaire des glaces : l'avantage du sous-marin

1969 	<p>Le sous-marin qui a livré du courrier sous la glace</p> <p>En 1969, un sous-marin américain en mission sous la banquise arctique reçoit un ordre insolite : récupérer un sac postal déposé par un avion sur la glace.</p> <p>L'équipage perce un trou, fait surface juste assez pour saisir le sac, puis replonge. Une opération logistique digne d'un roman d'espionnage.</p>
---	--

Sous la banquise, aucun satellite ne peut voir, aucun drone aérien ne peut surveiller, et aucun navire de surface (à l'exception des brise-glaces, très bruyants) ne peut manœuvrer.

- **L'opacité acoustique** : la glace crée une acoustique complexe (bruits de craquements, réflexions d'ondes) qui favorise le sous-marin le plus silencieux. C'est le terrain de chasse idéal pour les SNA (Sous-marins Nucléaires d'Attaque) qui peuvent s'y dissimuler pour traquer les SNLE adverses.
- **Le tir sous la glace** : les sous-marins modernes sont conçus avec des massifs renforcés pour briser plusieurs mètres de glace afin de faire surface et lancer leurs missiles, ou pour communiquer en urgence.

2.3 La guerre des infrastructures : câbles et pipelines

L'épisode du sabotage de Nord Stream a ouvert une nouvelle ère : celle de la "guerre des fonds marins" (*Seabed Warfare*).

- **L'Internet mondial est sous-marin** : 98 % des données mondiales transitent par des fibres optiques posées au fond des océans. Celui qui contrôle les profondeurs peut non seulement espionner, mais aussi paralyser l'économie d'un adversaire en sectionnant ces câbles.
- **La France et le "maîtrise des grands fonds"** : des puissances comme la France investissent massivement dans des drones capables d'opérer jusqu'à 6 000 mètres de profondeur pour protéger ces infrastructures critiques et surveiller les navires espions russes ou chinois spécialisés dans la manipulation des câbles.

1950 ANECDOTE	<p>Le sous-marin espion qui écoutait le monde</p> <p>Pendant la guerre froide, certains sous-marins ne tiraient pas : ils écoutaient. Câbles sous-marins, communications secrètes, secrets militaires.</p> <p>L'opération Ivy Bells permet aux États-Unis d'espionner l'URSS pendant des années... jusqu'à une trahison humaine.</p> <p>Sous l'océan, l'information valait plus que les missiles.</p>
--------------------------------	--

2020 ANECDOTE	<p>Le sous-marin qui a exploré... le lac Titicaca</p> <p>2020 – Une archéologie sous-marine à 3 800 mètres d'altitude</p> <p>L'archéologie sous-marine ne se limite pas aux océans. Dans le lac Titicaca, à la frontière entre le Pérou et la Bolivie, des plongeurs et des sous-marins légers ont exploré des vestiges engloutis, révélant des trésors et des mystères des civilisations précolombiennes. Une preuve que les sous-marins sont aussi des outils pour percer les secrets des lacs et des rivières.</p>
--------------------------------	--

2.4 Le pivot Indo-Pacifique et le défi chinois

Le basculement stratégique vers l'Asie est consommé. La Chine dispose désormais de la première flotte de sous-marins d'attaque au monde en volume (environ 70 unités).

- **Déni d'accès (A2/AD)** : Pékin utilise ses sous-marins conventionnels (classe *Yuan*) comme un rempart pour interdire l'accès de la Mer de Chine méridionale aux porte-avions américains.
- **Sanctuarisation des SNLE** : la Chine cherche à transformer ses eaux littorales en "bastions" où ses sous-marins lanceurs d'engins (classe *Jin*) peuvent opérer à l'abri des chasseurs occidentaux.
- **L'Alliance AUKUS** : en réaction, le partenariat entre l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis vise à doter Canberra de sous-marins nucléaires (SNA) pour patrouiller loin et longtemps, brisant ainsi l'avantage numérique chinois (*l'épisode France-Australie sera abordé plus loin*).

1962 ANECDOTE	<p>Le sous-marin qui a sauvé un village sans tirer un seul coup</p> <p>En 1962, un sous-marin britannique détecte une tempête gigantesque se formant au large de l'Islande. Grâce à ses instruments, il transmet une alerte précoce qui permet l'évacuation d'un village côtier.</p> <p>Un exploit discret, longtemps classé secret, qui montre que les sous-marins ne sont pas que des armes.</p>
--------------------------------	---

2.5 Le cadre juridique : la Convention de Montego Bay

Signée en 1982, la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM), dite de Montego Bay, est la "Constitution des océans". Elle découpe l'espace marin en plusieurs zones où les droits de souveraineté varient.

Les Eaux Territoriales (jusqu'à 12 milles marins)

C'est le prolongement direct du territoire national. L'État y exerce une souveraineté totale.

Le cas des sous-marins : Pour franchir ces eaux, un sous-marin étranger a l'obligation de naviguer en surface et d'arborer son pavillon. La plongée y est considérée comme un acte hostile ou une violation de souveraineté.

La Zone Économique Exclusive ou ZEE (jusqu'à 200 milles)

C'est la zone la plus stratégique pour l'exploitation (pêche, pétrole, nodules). L'État possède les ressources, mais pas la colonne d'eau pour la navigation. À ce titre, la France possède la deuxième plus vaste ZEE mondiale, au coude-à-coude avec les États-Unis, avec plus de 10,2 millions de km² (et près de 11 millions en incluant le plateau continental étendu). Cette présence colossale sur tous les océans du globe se justifie par l'éparpillement stratégique de nos territoires d'Outre-mer.

Le cas des sous-marins : Ils ont le droit de naviguer en plongée (liberté de navigation), mais ils ne doivent pas interférer avec les activités économiques de l'État côtier ni mener d'activités de recherche scientifique sans autorisation.

Le Plateau Continental

Il concerne le sol et le sous-sol marin. Un État peut demander l'extension de sa ZEE jusqu'à 350 milles s'il prouve géologiquement que son socle terrestre se prolonge sous l'eau.

Enjeu : c'est là que se joue la surveillance des câbles et des ressources minières.

La Haute Mer (La Zone)

Au-delà de la ZEE, c'est un espace de liberté totale. Le fond marin (la Zone) est déclaré "Patrimoine mondial de l'humanité". Aucune nation ne peut se l'approprier, mais les tensions augmentent car les grandes puissances y déploient des capteurs fixes pour surveiller les mouvements adverses.

Résumé des enjeux pour le sous-marinier

Zone	Distance	Droit du sous-marin
Eaux intérieures	Côte	Interdiction (sauf escale autorisée)
Eaux territoriales	12 milles	Surface uniquement , pavillon visible
Zone Contiguë	24 milles	Droit de contrôle douanier/sanitaire
ZEE	200 milles	Plongée autorisée , liberté de navigation
Haute Mer	> 200 milles	Liberté totale (dissuasion et patrouille)

Pourquoi est-ce crucial ?

Le respect de ces zones est le "jeu de chat et de la souris" quotidien des marines. Un sous-marin qui pénètre en plongée dans la ZEE d'un pays tiers pour écouter ses câbles internet commet une intrusion discrète mais illégale. La technologie (drones, capteurs de coque) permet désormais aux pays côtiers de mieux surveiller ces zones, rendant les violations de Montego Bay plus risquées diplomatiquement.

1917

Le sous-marin qui a sauvé des vies... en coulant

1917 – Les U-Boots allemands et la bataille de l'Atlantique

Pendant la Première Guerre mondiale, les sous-marins allemands (U-Boots) ont

ANECDOTE

failli faire basculer le cours de la guerre en coulant des milliers de tonnes de navires alliés. Leur tactique de guerre sous-marine à outrance a poussé les Alliés à développer des contre-mesures, comme les convois et les patrouilles aériennes. Un jeu du chat et de la souris qui a coûté la vie à des milliers de marins, mais qui a aussi sauvé des vies en forçant l'innovation.

Chapitre 3 : Prix du silence : risques, avaries et catastrophes

Être sous-marinier, c'est accepter de vivre avec un danger multidimensionnel : la pression écrasante de l'eau, le risque d'incendie dans un milieu clos, les avaries nucléaires et les collisions. L'histoire des sous-marins est jalonnée de tragédies qui ont marqué les mémoires.

1939

ANECDOTE

Les sous-marins fantômes de la Seconde Guerre mondiale

1939-1945 – Des tombes flottantes et des disparitions inexplicables

Pendant la Seconde Guerre mondiale, des dizaines de sous-marins ont disparu sans laisser de trace, emportant avec eux leurs équipages et, parfois, des ogives nucléaires. Les Américains ont perdu plus de soixante-dix sous-marins, et les Soviétiques, cinq. Certains reposent encore au fond des océans, transformés en cimetières sous-marins. Ces épaves, souvent introuvables, continuent de hanter les mémoires et d'alimenter les légendes des profondeurs.

1968

ANECDOTE

Le sous-marin qui a disparu avec un secret atomique

Avril 1968. Le USS Scorpion, sous-marin nucléaire américain, cesse soudainement toute communication en plein Atlantique. À son bord : 99 hommes et des torpilles nucléaires.

Officiellement, on parle d'un accident. Officieusement, les rumeurs explosent : collision avec un sous-marin soviétique ? Explosion interne ? Sabotage ?

L'épave est retrouvée à plus de 3 000 mètres de profondeur. Coque brisée. Rapports classifiés. Certaines pages sont encore noircies aujourd'hui.

Le Scorpion repose toujours au fond de l'océan, avec ses armes nucléaires. Un tombeau d'acier radioactif... et un secret d'État.

3.1 Incidents

La destruction des habitats par les robots miniers

Les drones et robots d'exploitation ne se contentent pas de naviguer ; ils "moissonnent" le plancher océanique.

- **Panaches de sédiments** : L'extraction soulève des nuages de poussière sous-marine qui peuvent dériver sur des centaines de kilomètres. Ces panaches étouffent la faune benthique (qui vit sur le fond) et bloquent les capacités de filtrage des organismes marins.

- **Bruit permanent** : Contrairement à un sous-marin militaire qui cherche le silence, une flotte de drones miniers génère un bourdonnement constant. Cela crée une "barrière acoustique" qui peut couper les routes migratoires des grandes espèces.

Collisions et "incidents" de l'ombre

Le silence absolu a un revers : si deux sous-marins sont parfaitement indétectables, ils risquent de se percuter.

- **Le Triomphant et le HMS Vanguard (2009)** : en plein milieu de l'Atlantique, le SNLE français et son homologue britannique sont entrés en collision à basse vitesse. Aucun des deux n'avait détecté l'autre, prouvant de manière ironique leur extrême discrétion acoustique.
- **L'USS San Francisco (2005)** : heurt d'un mont sous-marin à pleine vitesse (30 nœuds) car la carte bathymétrique n'était pas à jour. La coque épaisse a tenu, mais le choc a été d'une violence inouïe.

3.2 Le sauvetage sous-marin (DSRV)



Le sauvetage d'un équipage de sous-marin en détresse est une opération d'une complexité extrême.

Le DSRV (Deep Submergence Rescue Vehicle) : ce petit sous-marin est conçu pour être transporté par avion puis par un navire mère. Sa mission est de s'amarrer au sas de secours d'un sous-marin posé au fond, de transférer les rescapés sous pression et de les remonter à la surface. La précision de l'amarrage, par plusieurs centaines de mètres de fond, est une prouesse de pilotage.

Dans le monde, seuls quelques pays disposant de marines technologiquement avancées possèdent des DRSV : les États-Unis, le Royaume-Uni, la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, les Pays-Bas, la Norvège, le Japon, la Corée du Sud, l'Australie, l'Inde et la Chine.

3.3 Le drame de la marine française : la classe Vénus

La France a été durement frappée à la fin des années 60 par la perte de deux sous-marins de type *Daphné*, réputés pourtant très performants :

- **La Minerve (1968)** : disparue au large de Toulon avec 52 hommes. Son épave n'a été retrouvée qu'en 2019 par 2 370 mètres de fond. L'hypothèse principale reste une avarie de snorkel couplée à une météo exécrable, provoquant une immersion brutale.
- **L'Eurydice (1970)** : perdue corps et biens au large de Saint-Tropez.

Ces deux drames ont conduit à des modifications radicales des systèmes de sécurité et de remontée d'urgence sur tous les bâtiments français.

3.4 L'hécatombe soviétique et russe

La course aux armements de la Guerre froide a poussé l'URSS à mettre en service des bâtiments parfois peu fiables, entraînant des catastrophes nucléaires et structurelles :

- **Le K-19 (1961)** : surnommé "Hiroshima", il subit une fuite majeure du circuit de refroidissement de son réacteur. Des marins se sacrifièrent dans des niveaux de radiation mortels pour bricoler une réparation et éviter une explosion.

1961 ANECDOTE	Le K-19 : "L'Hiroshima" flottant En 1961, ce sous-marin nucléaire soviétique subit une fuite radioactive majeure. Pour éviter une explosion thermique qui aurait pu déclencher la Guerre Mondiale, les marins se sont relayés dans la chambre du réacteur sans protection adéquate pour souder des tuyaux. Ils se sont sacrifiés dans des conditions atroces pour sauver la planète.
--------------------------------	--

- **Le K-278 Komsomolets (1989)** : ce sous-marin en titane, capable de plonger à plus de 1 000 mètres, fut perdu suite à un incendie.
- **Le K-141 Kursk (2000)** : Le naufrage du K-141 *Koursk*, en août 2000, demeure l'une des catastrophes sous-marines les plus marquantes de l'histoire navale contemporaine. Ce géant de la flotte du Nord, fleuron de la marine russe, sombra à la suite de l'explosion accidentelle d'une torpille défectueuse dans son tube de lancement. La déflagration initiale, suivie d'une seconde explosion bien plus puissante, dévasta l'avant du bâtiment et précipita le sous-marin au fond de la mer de Barents. Pourtant, dans l'obscurité glaciale de l'épave, vingt-trois marins survécurent à l'impact. Réfugiés dans le compartiment arrière, ils organisèrent une résistance désespérée, rédigeant même des notes pour leurs proches, convaincus que les secours finiraient par arriver. Mais c'est précisément là que se joue l'un des aspects les plus tragiques de l'affaire : l'attentisme obstiné des autorités russes. Pendant de longues heures, puis de longs jours, Moscou refusa l'aide internationale proposée par plusieurs marines occidentales, persuadé de pouvoir « régler l'affaire en interne ». Cette volonté de préserver le secret militaire, de ne pas exposer les failles techniques de la flotte, pesa lourdement sur le destin des survivants. Les équipes russes, insuffisamment équipées et mal préparées à une opération de sauvetage aussi complexe, multiplièrent les

tentatives infructueuses. Pendant ce temps, l'oxygène s'épuisait dans le compartiment 9, et l'eau glacée gagnait du terrain. Lorsque la Russie accepta finalement l'assistance étrangère, il était trop tard. Les plongeurs norvégiens, arrivés en quelques heures seulement, ouvrirent l'écouille arrière et ne trouvèrent que des corps. Les vingt-trois marins, qui avaient attendu avec une ténacité bouleversante, étaient morts asphyxiés. Le *Koursk* devint alors le symbole d'une tragédie humaine aggravée par l'inaction, la fierté et la lenteur d'un appareil d'État incapable de reconnaître l'urgence.

Analyse des défaillances des sous-marins nucléaires soviétiques

La flotte sous-marine nucléaire soviétique, développée dans un contexte de compétition stratégique intense, a longtemps souffert d'un écart entre l'ambition technologique et la maturité industrielle réelle. Les accidents majeurs qui ont jalonné son histoire révèlent des défaillances systémiques touchant la conception, la sûreté nucléaire, la gestion des incendies, la redondance des systèmes et la culture de sécurité.

Le cas du **K-19 (Projet 658)** illustre les limites des premiers réacteurs à eau pressurisée soviétiques. La rupture du circuit primaire, due à un défaut de soudure et à l'absence de système de secours indépendant, a entraîné une montée en température du cœur. L'improvisation d'un circuit de refroidissement de fortune, réalisée sous irradiation extrême, a évité une fusion du cœur en mer. L'incident a mis en évidence l'insuffisance des contrôles non destructifs (CND) sur les soudures, l'absence de confinement secondaire et la faible résistance des matériaux sous flux neutronique.

Le **K-8 (Projet 627A)**, perdu en 1970, a révélé la vulnérabilité chronique des installations électriques et des systèmes de ventilation. L'incendie initial, déclenché par un court-circuit, s'est propagé en raison de l'absence de compartimentage efficace et de matériaux ignifugés. La perte de puissance a entraîné l'arrêt des pompes primaires, rendant impossible le maintien du refroidissement du réacteur.

Le **K-278 Komsomolets (Projet 685)**, fleuron technologique capable d'atteindre 1 000 m de profondeur, a sombré en 1989 après un incendie dans le compartiment arrière. Malgré une coque en titane et des systèmes de sécurité avancés, l'incapacité à isoler le foyer initial a conduit à une perte progressive de flottabilité. Le sous-marin repose aujourd'hui à 1 680 m avec un réacteur OK-650 et deux torpilles nucléaires, posant un risque de relargage de radionucléides en cas de corrosion avancée des enveloppes.

Le **K-141 Koursk (Projet 949A)**, bien que post-soviétique, illustre la persistance de problèmes structurels. L'explosion d'une torpille à peroxyde d'hydrogène (Type 65-76) a déclenché une détonation secondaire, révélant des défauts dans la gestion des oxydants instables et l'absence de systèmes automatiques d'inertage des soutes à torpilles.

Sur le plan environnemental, plusieurs épaves soviétiques — K-27, K-159, K-278, K-8, K-219 — constituent des sources potentielles de contamination radioactive. Les risques identifiés incluent :

- corrosion des gaines de combustible,
- relargage progressif de césium-137 et strontium-90,
- dispersion dans des zones arctiques à faible renouvellement hydrologique,
- perturbation durable des chaînes trophiques*.

* Une chaîne trophique (ou chaîne alimentaire) représente l'ensemble des relations inter-espèces eu égard à leur façon de se nourrir dans leur milieu. Le niveau trophique est la position tenue par un organisme dans une chaîne trophique donnée.

Ces accidents témoignent d'une flotte poussée à ses limites, où la pression stratégique a souvent primé sur la sûreté nucléaire et la résilience des systèmes. Ils constituent aujourd'hui un corpus d'étude essentiel pour la compréhension des risques liés à la propulsion nucléaire en environnement sous-marin.

3.5 Les risques permanents : incendie et voie d'eau

- **La voie d'eau** : À 300 mètres de profondeur, une brèche de la taille d'une pièce de monnaie projette un jet d'eau si puissant qu'il peut couper du métal (et des membres humains).
- **L'incendie** : C'est la hantise absolue. Dans un volume d'air clos, la fumée devient mortelle en quelques secondes et la chaleur peut faire fondre les joints d'étanchéité. On se souvient de l'incendie du **Perle** (2020) à Toulon, qui a brûlé pendant 14 heures alors que le navire était en maintenance.

L'arroseur arrosé : Leçon de fumée et d'humilité

La rigueur liée au risque incendie donne parfois lieu à des trajectoires singulières. Alors que l'auteur était responsable des systèmes sous-marins chez Thalès, il fut convoqué sans motif au 2 rue Royale, siège de l'État-major à Paris. Il y reçut un savon mémorable de la part d'un capitaine de corvette : des fumées suspectes avaient été détectées dans l'une de nos armoires électroniques. La leçon sur la fiabilité des composants fut entendue.

Le destin réserve pourtant des surprises : une dizaine d'années plus tard, cet officier décida de rejoindre l'industrie. Par un pur hasard, l'auteur devint son patron. Cette rencontre orageuse au ministère fut le point de départ d'une excellente relation de travail, illustrant la proximité et la continuité nécessaire entre marins et ingénieurs.

Le cas du sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) Perle (2020)

L'incendie est la terreur absolue à bord d'un sous-marin, surtout lorsqu'il survient en cale sèche, au milieu d'un labyrinthe de câbles, de matériaux composites et de volumes confinés. Le 12 juin 2020, c'est le SNA *Perle* qui en a fait la démonstration tragique. En pleine période d'entretien majeur à Toulon, alors que son réacteur était déchargé et que le navire était ouvert comme un patient sur une table d'opération, un feu s'est déclaré dans la partie avant. Les enquêteurs ont rapidement privilégié l'hypothèse d'un travail à chaud mal maîtrisé, probablement une opération de soudure ou de meulage ayant enflammé des matériaux résiduels dans un compartiment difficile d'accès.

Ce qui n'aurait dû être qu'un incident localisé s'est transformé en brasier incontrôlable. Dans un sous-marin en maintenance, les systèmes de détection et d'extinction automatiques sont souvent neutralisés, les cloisons ouvertes, les câbles à nu. Le feu a trouvé là un terrain idéal pour se propager. Pendant plus de quatorze heures, les équipes de la Marine et des pompiers ont lutté contre une chaleur infernale, dans un nuage de fumée dense qui s'échappait par les ouvertures du massif. Lorsque les flammes ont enfin été maîtrisées, l'avant du *Perle* n'était plus qu'une coque calcinée, structurellement irrécupérable.

La Marine Nationale s'est alors retrouvée face à un dilemme inédit : perdre un sous-marin encore jeune, ou tenter une opération jamais réalisée dans l'histoire navale. La décision fut audacieuse : il s'agissait de greffer l'avant du *Saphir*, un autre SNA de la même classe récemment désarmé. Cette section devait être

assemblée sur l'arrière du *Perle*, resté intact après l'incendie. Une transplantation industrielle d'une complexité extrême, impliquant un alignement millimétrique des tronçons, la reprise complète des réseaux, et la requalification de l'ensemble des systèmes.

Le coût de cette renaissance hors norme a été estimé à 110 millions d'euros, un investissement colossal mais jugé indispensable pour préserver le format opérationnel de la flotte sous-marine française. Le *Perle* ainsi reconstruit a finalement repris la mer, symbole d'une résilience technique rare et d'un savoir-faire industriel unique.

Mais l'incendie de 2020 reste un rappel brutal : dans l'univers clos d'un sous-marin, même à quai, le feu n'est jamais un simple incident. C'est un ennemi total, capable en quelques minutes de mettre à genoux une machine conçue pour survivre aux abysses.

La voie d'eau du K-159 (2003) : un drame annoncé

Le 28 août 2003 en Russie, le vieux sous-marin nucléaire **K-159**, un bâtiment de la classe November mis en service dans les années 1960, était remorqué vers le chantier de démantèlement de Polyarny. Il n'était plus qu'une coque fatiguée, rongée par la corrosion, maintenue à flot par des flotteurs extérieurs soudés à la hâte. À bord, huit marins avaient été embarqués pour surveiller les pompes et les alarmes, comme si l'on pouvait encore surveiller quelque chose dans ce cercueil d'acier.

La mer de Barents était mauvaise, mais rien d'exceptionnel pour la région. Pourtant, dans la nuit, les flotteurs tribord commencèrent à vibrer sous les coups de boutoir des vagues. Les soudures, déjà fragilisées, cédèrent les unes après les autres. L'eau s'engouffra dans les compartiments avant du K-159, alourdissant brutalement la coque. Le remorqueur sentit la tension du câble augmenter, puis se relâcher soudainement : le sous-marin venait de prendre une gîte irréversible.

À bord, les marins luttèrent désespérément pour ralentir l'envahissement. Les pompes, alimentées par un réseau électrique improvisé, perdaient la bataille. Les cloisons étanches, déjà perforées par des décennies de corrosion, ne jouaient plus leur rôle. En quelques minutes, la voie d'eau devint incontrôlable. Le K-159 se cabra, bascula, puis disparut dans la nuit noire, emportant sept des huit hommes présents à bord.

Le sous-marin coula par 238 mètres de fond, avec deux réacteurs nucléaires encore chargés en combustible. Une épave instable, posée sur un fond meuble, susceptible de libérer des radionucléides en cas de rupture des enveloppes de confinement. Les experts russes et norvégiens surveillent encore aujourd'hui ce tombeau radioactif, considéré comme l'un des risques environnementaux les plus sérieux de l'Arctique.

Le drame du K-159 n'est pas seulement celui d'une voie d'eau. C'est celui d'un sous-marin trop vieux, trop abîmé, trop longtemps laissé à l'abandon. Celui d'une décision précipitée, prise pour économiser quelques millions de roubles. Celui de marins envoyés au front contre la mer, sans moyens, sans chance, sans véritable raison.

Chapitre 4 : Le processus de passation d'un contrat majeur

Le cas d'un programme de sous-marins

La passation d'un contrat de défense de premier rang, tel qu'un programme de sous-marins, représente l'un des processus contractuels les plus complexes au monde. Engageant des milliards d'euros sur plusieurs décennies, il mêle enjeux technologiques, souveraineté nationale et diplomatie de haut niveau.

4.1 La phase de genèse et d'expression du besoin (Années 1 à 3)

Tout commence par un mûrissement lent au sein des instances militaires et gouvernementales du pays client. Avant même de consulter l'industrie, l'État doit définir sa doctrine navale et valider le financement d'un tel saut capacitaire.

Une fois la décision politique actée, le processus se formalise :

- **L'émission de l'ITR (Invitation to Register Interest)** : le client sonde le marché mondial pour identifier les chantiers navals et les systémiers capables de répondre au besoin.
- **La qualification des fournisseurs** : en réponse, l'industriel doit soumettre un dossier de pré-qualification volumineux (souvent plus d'un millier de pages). Il doit y démontrer sa solidité financière, ses certifications (ISO, contrôle qualité), sa logistique et sa capacité humaine à gérer un projet d'une telle envergure.

4.2 La consultation et la mise en concurrence (années 3 à 5)

Après avoir sélectionné les candidats potentiels, le client entre dans le vif du sujet technique.

- **Rédaction de la Spécification** : la Marine et ses services techniques rédigent un cahier des charges de plusieurs centaines de pages détaillant les performances attendues (furtivité, autonomie, armement).
- **Émission du Tender (appel d'offres)** : le client sollicite officiellement des offres détaillées.
- **Réponse de l'industriel** : c'est le moment du montage de consortiums si nécessaire : association d'industriels ayant les compétences pour couvrir tous les besoins du client. L'offre doit coller au plus près au cahier des charges tout en restant compétitive.

4.3 La liste restreinte et l'étude de définition (années 5 à 8)

Le client dépouille les offres et établit un comparatif rigoureux. À l'issue de cette phase, une liste restreinte — la short-list, généralement composée de deux fournisseurs — est annoncée, regroupant les industriels présélectionnés. Généralement, un projet d'études détaillée (PDS) de l'offre est lancé.

- **La PDS (Project Definition Study)** : c'est la phase critique. Le client subventionne une étude préliminaire approfondie. Bien que l'étude soit financée, l'effort réel de l'industriel dépasse souvent largement le budget alloué, car c'est ici que se gagne le contrat.

- **L'équipe intégrée** : le fournisseur désigne un maître d'œuvre et rassemble une équipe de projet dont le noyau travaille dans un même espace, condition essentielle lorsque les acteurs proviennent d'entités industrielles internationales. Le rythme est soutenu et la créativité indispensable pour élaborer les meilleurs compromis coûts-performances, mais aussi pour identifier les atouts réellement différenciants face à la concurrence. C'est un exercice d'équilibriste : les industriels s'engagent sur des performances proches des limites, qu'il faudra pourtant démontrer lors des essais en mer.
- **Le suivi client** : le client délègue souvent des représentants en immersion chez l'industriel afin d'orienter les travaux en temps réel. Ces personnes sont parfois redoutées, car elles incarnent l'œil du client : elles observent les éventuelles difficultés techniques, les retards, ou les promesses trop ambitieuses. Mais elles jouent aussi un rôle précieux de conseil, en recadrant le fournisseur lorsque nécessaire pour garantir que le projet reste fidèle à l'esprit exact de la demande initiale.

Note sur la notoriété : Pendant toute cette période, l'industriel mène une stratégie de "soft power" : conférences, visites de haut niveau et démonstrations techniques (prototypes) pour ancrer sa crédibilité auprès des décideurs politiques.

4.4 Sélection finale et réalisation (années 8 à 20+)

Après l'analyse comparative des PDS, le gagnant est désigné. Cette phase, qui s'étend sur plusieurs mois, permet d'établir une matrice de comparaison — la *scorecard* ou *decision matrix*, dans le vocabulaire anglo-saxon — afin d'évaluer objectivement les offres. Une fois cette étape achevée, s'ouvre alors la phase contractuelle de réalisation.

- **La construction** : il faut compter environ quatre ans pour la sortie du premier exemplaire ("tête de série"), suivis de livraisons cadencées (par exemple tous les six mois).
- **Coopération et Transfert de Technologie (ToT)** : si le contrat prévoit une contre-partie industrielle (*Industry Participation*), l'industriel organise la formation du personnel local et le transfert de compétences pour permettre au client d'entretenir, voire de construire une partie des unités sur son propre sol.

4.5 Le verrou étatique : l'autorisation d'exporter

Avant même de répondre à l'ITR ou à l'appel d'offre ou de monter un consortium, l'industriel doit franchir une étape juridique et politique réalisable uniquement avec l'accord de son propre gouvernement concrétisé par l'octroi d'une autorisation de la CIEMG (Commission Interministérielle pour l'Étude des Exportations de Matériels de Guerre).

En France, cette instance est le gardien des technologies critiques. Elle est placée sous l'autorité du Premier ministre et son secrétariat est assuré par le SGDSN (Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale).

- **Une décision interministérielle** : elle réunit les ministères des Armées, des Affaires Étrangères et de l'Économie.
- **Le contrôle de la souveraineté** : l'État vérifie que la vente du sous-marin ne risque pas d'exposer des technologies sensibles — acoustique, systèmes de combat, propulsion nucléaire ou anaérobie

— à des acteurs indésirables ou à des risques de copie. Il s'assure également que, parmi les membres du consortium éventuel, chacun présente toutes les garanties nécessaires en matière de secret militaire comme de secret industriel.

Note : naturellement, tous les collaborateurs amenés à intervenir sur le projet et sa réalisation doivent disposer de l'habilitation adéquate (confidentiel défense, voire secret défense).

- **La dimension diplomatique** : la CIEMG s'assure que l'exportation est cohérente avec les alliances de la France et respecte les traités internationaux.

Conséquence pour le fournisseur : ce n'est pas une simple formalité administrative. C'est un processus de filtrage qui détermine ce que l'industriel a le droit de mettre dans son offre. Si la CIEMG refuse ou impose des restrictions (une version "dégradée" de certains capteurs, par exemple), l'industriel doit adapter toute sa stratégie commerciale.

Cette validation renforce l'idée que le fournisseur de sous-marins est un ambassadeur de son pays. S'il gagne, c'est aussi parce que son État a accepté de partager une part de son secret défense avec le pays client. Cela renforce le "climat de confiance" : le client n'achète pas seulement une machine, il achète une alliance politique validée au plus haut niveau de l'État fournisseur.

1968

ANECDOTE

PROJET AZORIAN : le casse du siècle au barbe du Kremlin !

C'est le casse le plus audacieux — et le plus coûteux — de la Guerre froide. En 1968, le sous-marin nucléaire soviétique K-129 sombre mystérieusement dans le Pacifique Nord, emportant avec lui des missiles balistiques et, surtout, ses précieux codes de chiffrement. Tandis que l'URSS abandonne les recherches, incapable de localiser l'épave, la CIA flairait l'opportunité du siècle.

Un mensonge à 350 millions de dollars

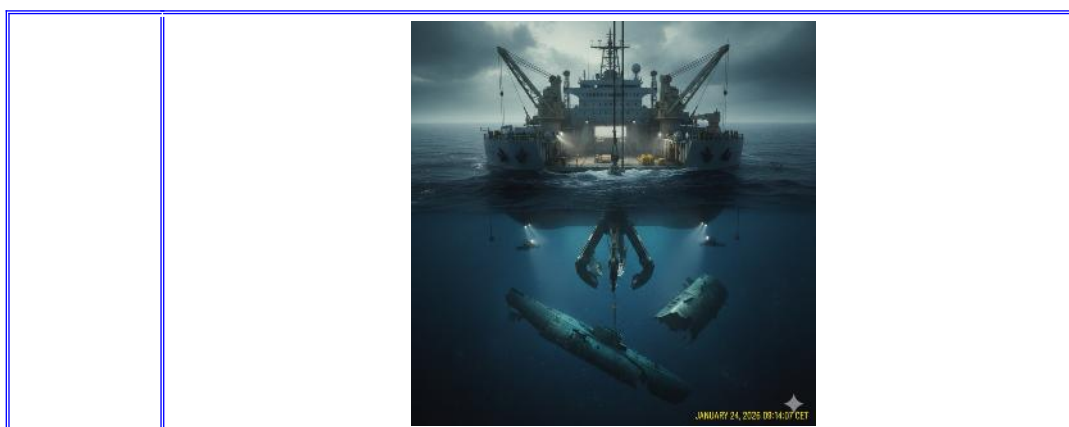
Pour récupérer ce trésor technologique gisant à 5 000 mètres de profondeur, Washington imagine une couverture digne d'Hollywood. La CIA fait appel au milliardaire excentrique Howard Hughes. Officiellement, celui-ci fait construire un navire titanesque, le Hughes Glomar Explorer, pour extraire des nodules de manganèse au fond de l'océan. En réalité, le navire cache un puits central géant et une pince articulée colossale surnommée « Clementine ».

Le drame à 5 km sous la surface

À l'été 1974, l'opération est lancée dans un secret absolu. La pince descend dans les abysses, saisit le monstre d'acier de 2 000 tonnes et commence la remontée. Mais à mi-chemin, le drame survient : une griffe de la pince cède sous la pression. La majeure partie du sous-marin se brise et retombe dans l'abîme. Seule la section avant est récupérée.

Un demi-succès, un triomphe d'ingénierie

Si les codes secrets n'ont jamais été retrouvés dans les débris, la CIA met la main sur deux torpilles nucléaires et des équipements de renseignement capitaux. Le scandale n'éclatera qu'en 1975, forçant le gouvernement américain à inventer la célèbre formule de déni : « Nous ne pouvons ni confirmer, ni infirmer ces informations ». Un braquage abyssal qui reste, à ce jour, l'une des prouesses techniques les plus folles de l'histoire maritime.



4.6 Le "Livret du décideur" : l'art de convaincre en un coup d'œil

Si l'offre technique et commerciale s'apparente à une encyclopédie de plusieurs milliers de pages, le Livret du Décideur (*Executive Summary*) en est la clé de voûte.

On peut comparer ce document au CV d'un candidat de haut niveau. Un décideur politique ou un amiral ne lira pas les détails des calculs de structure ou les schémas électriques complexes. Il a besoin d'une vision claire, directe et attrayante.

- **Format** : moins de 100 pages, une mise en page soignée et richement illustrée.
- **Objectif** : permettre une lecture "en diagonale" tout en laissant une impression de maîtrise totale et de sécurité.
- **Enjeu** : c'est ce document qui circule dans les cabinets ministériels. Sa qualité esthétique et la clarté de son argumentation sont des conditions *sine qua non* pour figurer sur le podium des finalistes. Négliger ce livret, c'est prendre le risque que l'excellence technique reste invisible aux yeux de ceux qui signent le contrat.

1962

ANECDOTE

Quand un sous-marin a failli déclencher la 3^e Guerre mondiale

Octobre 1962. Crise des missiles de Cuba. Le monde retient son souffle. Au fond de l'Atlantique, un sous-marin soviétique est traqué par la marine américaine. Bombardé de grenades sous-marines d'avertissement, l'équipage pense que la guerre a déjà commencé.

À bord : une torpille nucléaire. Pour la lancer, un seul homme manque à l'appel. Il s'appelle Vassili Arkhipov. Contre l'avis de ses supérieurs, il refuse l'ordre de tir.

S'il avait cédé, une explosion nucléaire aurait très probablement déclenché une riposte américaine. La Troisième Guerre mondiale aurait pu commencer... à 100 mètres sous la surface.

Un homme, enfermé dans un "tube d'acier" surchauffé, a peut-être sauvé le monde.

4.7 L'art de la visite de chantier — « l'effet vitrine »

Dans la perspective d'une offre, la visite des installations industrielles est un moment de vérité. Ce n'est pas qu'une inspection technique, c'est une opération de séduction et de création de confiance. Pour impressionner une délégation de haut rang, l'organisation doit être millimétrée :

- **Le « showroom » industriel** : les ateliers ne doivent pas seulement être productifs, ils doivent être scénographiés. Une propreté clinique dans les zones de haute technologie (salles blanches, intégration électronique) projette une image de rigueur absolue.
- **La mise en scène du savoir-faire** : présenter des compagnons et des ingénieurs fiers de leur travail, capables d'expliquer leur geste avec précision, humanise la technologie et prouve la pérennité des compétences.
- **Le parcours de visite** : il doit être fluide et sécurisé, évitant tout signe de désordre ou de confusion. Chaque étape doit illustrer un point clé du « Livret du Décideur ».
- **L'accueil protocolaire** : le respect des usages diplomatiques du pays client (gastronomie, langues, préséances) démontre que le fournisseur est prêt à s'adapter à la culture de son partenaire.

4.8 Focus : La maîtrise des risques politiques

Un contrat de sous-marins est, par nature, un contrat d'État à État. L'industriel doit naviguer dans un environnement où les paramètres peuvent changer indépendamment de la qualité de son offre :

- **L'alignement géostratégique** : le choix d'un fournisseur engage souvent la politique étrangère du client pour les 50 prochaines années. L'industriel doit s'assurer que son gouvernement soutient activement l'offre au plus haut niveau (diplomatie de défense).
- **L'anticipation des alternances** : un processus de dix ans traverse forcément des cycles électoraux. Le fournisseur doit établir des ponts tant avec la majorité en place qu'avec l'opposition, pour garantir que le programme ne sera pas remis en cause en cas de changement de gouvernement.
- **La souveraineté et les "boîtes noires"** : le client craint par-dessus tout d'être dépendant du bon vouloir du fournisseur pour l'utilisation de son arme. La clarté sur les transferts de technologie et l'autonomie de maintenance est le meilleur rempart contre les réticences politiques.

4.9 Conclusion : Au-delà de la technique, le facteur humain

La victoire dans un appel d'offres de plusieurs milliards d'euros ne repose pas uniquement sur le prix ou la performance brute du sous-marin. Elle est le résultat d'une alchimie complexe entre crédibilité industrielle et confiance relationnelle.

Les piliers du succès :

1. **L'excellence technique et l'innovation** : le fournisseur doit évidemment démontrer ses atouts technologiques et sa capacité à innover pour garantir une supériorité opérationnelle sur le long terme.
2. **La posture et l'attitude** : la manière de se présenter est capitale. Chaque interaction (conférences de haut niveau, réponses aux questions techniques) doit transpirer le sérieux, la profondeur et la réactivité.

3. **L'image industrielle** : lors des visites du Client, l'aspect "posé et ordonné" de l'organisation, la propreté des installations et la discipline apparente des équipes sont des messages subliminaux puissants. Une usine impeccable est le reflet d'une gestion de projet sans faille.
4. **Le climat de confiance** : un contrat de sous-marins est un "mariage" pour 30 ou 40 ans. Le client cherche des partenaires avec qui il peut travailler dans la durée. Créer un climat de confiance réciproque entre les hommes et les femmes du consortium et ceux de la Marine cliente est souvent l'élément décisif qui fait pencher la balance.
5. **L'importance du prix et de l'offre commerciale** : au-delà des aspects techniques, le client reste un acheteur soumis à des contraintes budgétaires, politiques et industrielles. Le prix n'est jamais le seul critère, mais il demeure un marqueur de sérieux, de maturité et de transparence. Une offre commerciale claire, structurée et cohérente rassure le décideur et crédibilise l'ensemble de l'offre.
6. **Le poids déterminant des relations intergouvernementales** : dans le domaine de la défense, aucun contrat majeur ne se signe sans un alignement politique solide. Accords de défense, partenariats stratégiques, coopération navale, engagements diplomatiques : ces dimensions dépassent largement le cadre industriel. Elles créent un environnement de confiance étatique qui sécurise le client et renforce la légitimité du fournisseur.

En somme, si le sous-marin est le produit, la confiance — industrielle, humaine, commerciale et politique — est le véritable contrat.



Partie 8: **HORIZONS ET DÉFIS – Le futur de la Guerre Sous-Marine**

Prospective : les drones sous-marins, la bataille de l'Arctique et la place de la France en 2030-2050

Chapitre 1 : **L'horizon technologique**

1917 ANECDOTE	Le sous-marin qui a disparu... puis réapparu 100 ans plus tard Le sous-marin français <i>Faraday</i> , perdu en 1917, est retrouvé en 2018 par un robot sous-marin. La coque est intacte, figée dans un silence presque sacré. Les experts pensent que l'épave pourrait encore contenir des documents techniques précieux.
--------------------------------	--

1.1 **L'aube des drones sous-marins (UUV et XLUUV)**

C'est la révolution actuelle du domaine. Comme pour l'aviation, l'absence d'équipage permet de changer radicalement la donne.

- **UUV** (Unmanned Underwater Vehicle) : petits drones utilisés pour la chasse aux mines ou la surveillance de port.
- **XLUUV** (Extra-Large Unmanned Underwater Vehicle) : véritables sous-marins robots de grande taille (comme l' *Oceanic* de Naval Group). Ils peuvent rester en mer des mois pour patrouiller, poser des capteurs ou servir de "leurre" pour détourner l'attention des forces adverses.

1.2 **L'Espace de bataille futur : drones et cybersécurité**

Le domaine évolue vers une approche multi-milieux.

- Drones Sous-marins (UUV) : les futurs SNA déploieront des drones pour explorer des zones dangereuses ou servir de capteurs déportés.
- Guerre des câbles : la protection des infrastructures sous-marines (fibres optiques) devient une mission critique pour les forces sous-marines.
- Signature Numérique : le traitement massif des données (Big Data) permet de mieux isoler le bruit d'un sous-marin du bruit de fond de l'océan, obligeant les constructeurs à une quête permanente du silence absolu.

1.3 Le sous-marin "vaisseau-mère" : l'ère des drones et de la robotique

C'est ici que réside la plus grande mutation. Le sous-marin ne sera plus une unité isolée, mais le centre d'un réseau sous-marin.

Le Déploiement d'UUV (Unmanned Underwater Vehicles)

Le sous-marin devient un porte-avions des profondeurs. Il largue des drones pour :

- **L'investigation** : aller là où c'est trop dangereux : champs de mines (*Illustration*), ports adverses.
- **L'attaque déportée** : tirer une torpille depuis un drone à 50 km du sous-marin pour ne pas trahir sa position.
- **Le leurre** : simuler la signature acoustique d'un gros bâtiment pour tromper l'ennemi.



La Surveillance des Infrastructures Critiques

Avec le sabotage des pipelines et des câbles sous-marins (ex: Nord Stream), le futur sous-marin aura des sections modulaires pour transporter des mini-robots capables d'intervenir sur les grands fonds (Abysses).

1.4 Technologies révolutionnaires : capteurs et intelligence artificielle

L'électronique et l'informatique redéfinissent la "vue" sous-marine.

Capteurs hydroponiques plats et peaux piézoélectriques

L'utilisation de feuilles plastifiées piézoélectriques (PVDF) permet de transformer la coque entière en une oreille géante.

Avantage : Contrairement aux antennes flûtes traînées derrière le navire, ces "peaux" sensibles offrent une détection à 360° sans angles morts et sans traînée hydrodynamique.

La fibre optique et l'optronique

Le remplacement des mâts périscopiques physiques par des mâts optroniques (qui ne pénètrent pas la coque épaisse) renforce la structure. De plus, les sonars à fibre optique permettent une sensibilité accrue aux très basses fréquences.

1.5 L'Intelligence Artificielle (IA) et le Big Data Acoustique

L'océan est bruyant (crevettes claqueuses, baleines, trafic civil). L'IA est désormais capable de :

- **Classifier instantanément** : isoler le bruit d'une hélice spécifique parmi des milliers de sons.
- **Maintenance prédictive** : détecter une micro-vibration dans une pompe avant qu'elle ne devienne un bruit décelable par l'ennemi.
- **Aide à la décision** : simuler des milliers de trajectoires d'évasion en quelques millisecondes.

Nouvelles frontières de recherche : l'inattendu

Quelques pistes de recherche de pointe souvent ignorées :

1. **La communication par neutrinos ou blue-green laser** : communiquer avec la base sans avoir à remonter une antenne à la surface, ce qui est aujourd'hui le moment de plus grande vulnérabilité.
2. **La supercavitation** : bien que limitée aux torpilles (comme la *Shkval* russe), la recherche continue pour appliquer ce principe à des drones ou des parties de sous-marins pour atteindre des vitesses dépassant les 200 nœuds.
3. **Biomimétisme** : des sous-marins qui se déplacent non plus avec une hélice (source de bruit et de cavitation), mais par ondulation de la coque ou nageoires bioniques, imitant les grands cétacés.

Conclusion : l'océan, ultime rempart de la liberté

Intérêt du sous-marin

Le sous-marin ne connaîtra pas le déclin des cuirassés. Au contraire, il s'adapte, s'automatise et se complexifie. Il reste l'investissement le plus rentable pour une nation : il offre le silence, la surprise et la puissance.

Dans un monde où les tensions géopolitiques se déplacent vers l'Indo-Pacifique et les ressources abyssales, posséder une force sous-marine n'est plus une option, c'est une condition de survie. Le sous-marin de demain sera invisible, interconnecté et intelligent, mais il restera, au fond, ce qu'il a toujours été : le prédateur alpha des mers.

Synthèse : le sous-marin, symbole du "hard power" de demain

Le sous-marin n'est plus un outil de guérilla navale comme en 1914 ou 1940. Il est devenu la plateforme multi-milieu par excellence. En 2026, posséder une force sous-marine, c'est :

1. **Garantir sa survie** (Dissuasion).
2. **Protéger ses poumons économiques** (Câbles et hydrocarbures).
3. **Projeter sa puissance** de manière invisible (Drones et forces spéciales).

Résumé stratégique

Pays	Dominante Stratégique	Type de Flotte
USA	Domination globale / Projection	100% Nucléaire (SNA/SNLE)
Chine	Déni d'accès / Sanctuarisation	Mixte (Nucléaire & AIP performant)
Russie	Menace asymétrique / Arctique	Spécialisation "Grands Fonds" et missiles hypersoniques
France	Souveraineté / Dissuasion	Puissance d'équilibre (SNA/SNLE de pointe)

Chapitre 2 : L'impact environnemental : le dilemme de la transparence acoustique

La quête de discrétion absolue des sous-marins modernes (SM) force les forces de surface à utiliser des sources d'énergie sonore de plus en plus massives. C'est une véritable "pollution invisible" qui bouleverse l'écosystème.

1960 ANECDOTE	<p>Le sous-marin qui a fait le tour du monde sans voir la lumière du jour</p> <p>En 1960, l'USS <i>Triton</i> réalise la première circumnavigation entièrement en plongée.</p> <p>L'équipage passe 60 jours sans voir le soleil, dans un huis clos métallique où la discipline psychologique est aussi cruciale que la technologie.</p> <p>Une prouesse qui marque l'entrée dans l'ère des sous-marins nucléaires</p>
--------------------------------	--

2.1 Le Sonar Actif Basse Fréquence (LFAS) : une arme de choc

Pour débusquer un sous-marin de nouvelle génération dont le bruit propre est inférieur au bruit de fond de l'océan, les navires de surface utilisent des sonars actifs.

- **Le mécanisme** : ces systèmes émettent des ondes dépassant les 230 décibels. À titre de comparaison, cela équivaut à l'onde de choc d'une explosion à proximité immédiate.
- **Impact sur les cétacés** : les baleines et dauphins, qui dépendent de leur propre sonar biologique pour chasser et s'orienter, subissent des dommages irréparables : hémorragies internes, désorientation menant à des échouages massifs, et abandon des zones de reproduction.
- **Le paradoxe stratégique** : plus le sous-marin est silencieux, plus la puissance d'émission nécessaire pour le "faire résonner" augmente, transformant les zones de conflit en déserts biologiques.

2.2 La pollution des navires de surface vs sous-marins

Bien que le sous-marin nucléaire soit, par nature, une unité "propre" en termes d'émissions de CO₂ (grâce à l'absence de combustion), le risque lié au démantèlement des réacteurs en fin de vie et à la gestion des déchets radioactifs reste une préoccupation majeure, particulièrement dans les eaux russes de l'Arctique.

À l'inverse, la flotte de surface d'escorte et les brise-glaces consomment des quantités massives de fioul lourd, rejetant des particules fines et des oxydes d'azote dans des zones auparavant vierges.

2.3 L'exploitation des grands fonds : drones, robots et dommages collatéraux

L'avenir du sous-marin est aussi intimement lié à l'exploitation des nodules polymétalliques et des terres rares. Mais cette convergence entre militaire et industriel pose des défis écologiques sans précédent.

Le risque de militarisation de l'écologie

On peut imaginer qu'à l'avenir, la protection de l'environnement serve de prétexte géopolitique. Une nation pourrait interdire l'accès à une zone sous-marine stratégique sous couvert de "réserve naturelle", tout en y déployant des réseaux de capteurs hydroponiques pour surveiller les mouvements adverses.

2.4 Vers une "éco-conception" de la guerre sous-marine ?

Face à la pression des opinions publiques et des traités internationaux (comme le traité BBNJ sur la haute mer), les marines commencent à intégrer des contraintes environnementales :

- **Détection passive augmentée** : investir davantage dans l'IA et le traitement de signal (détection passive) pour éviter d'utiliser le sonar actif polluant.
- **Biomimétisme de propulsion** : développer des drones dont la propulsion imite le mouvement des poissons, réduisant la cavitation (bulles de gaz qui éclatent) et les vibrations nocives.
- **Surveillance environnementale intégrée** : les futurs sous-marins seront équipés de capteurs pour mesurer l'acidification et la température des océans, transformant chaque patrouille militaire en une opportunité de collecte de données scientifiques pour le climat.

2.5 La course aux ressources et la souveraineté

Avec l'épuisement des ressources terrestres, les métaux rares des plaines abyssales (nodules polymétalliques) deviennent un enjeu de souveraineté.

Le sous-marin assure la surveillance des Zones Économiques Exclusives (ZEE). Sans une capacité sous-marine crédible, un pays ne peut garantir le respect de son territoire maritime face à des incursions de forage ou de pêche illégale protégées par des flottes étrangères.

2000

ANECDOTE

Les "Narco-Sous-marins" artisanaux

Aujourd'hui, les cartels de la drogue construisent leurs propres submersibles dans la jungle colombienne. Faits de fibre de verre et de moteurs de camion, ils transportent des tonnes de cocaïne vers les USA. Ils ne sont pas totalement submersibles, mais naviguent à ras de l'eau, les rendant presque invisibles aux radars.



2.6 Synthèse finale : l'ombre et la lumière sous les mers

En définitive, le sous-marin du futur est un objet de contradictions. Il est l'outil de la destruction potentielle la plus totale, mais aussi le protecteur des veines vitales de notre civilisation (câbles, ressources, climat).

Sa survie passera par une intégration technologique poussée : l'Intelligence Artificielle pour traiter des milliards de données, les drones pour étendre son bras armé sans risquer de vies humaines, et des matériaux révolutionnaires pour rester invisible. Mais le plus grand défi ne sera peut-être pas technique. Il sera de naviguer dans un océan devenu trop bruyant, trop surveillé et écologiquement fragile. Le maître des profondeurs de 2050 ne sera pas seulement celui qui a les meilleures armes, mais celui qui saura

fusionner avec l'environnement marin sans le détruire, faisant de la mer non pas un champ de bataille dévasté, mais le sanctuaire préservé de sa puissance.

Chapitre 3 : L'arctique : le nouveau champ de bataille de la guerre froide 2.0

Si l'Indo-Pacifique est le cœur économique de la géopolitique navale, l'Arctique en est le cœur stratégique le plus froid et le plus opaque. Avec la fonte des glaces accélérée par le changement climatique, cette région passe d'un sanctuaire glacé impénétrable à un espace de friction directe entre les grandes puissances. Cette nouvelle donne territoriale a d'ailleurs été illustrée par l'ambition de Donald Trump de racheter le Groenland, soulignant l'importance critique de cette zone pour le contrôle des routes polaires et des ressources sous-marines.

3.1 La Russie : le bastion du grand nord

Pour Moscou, l'Arctique est une priorité existentielle. La flotte du Nord, basée à Mourmansk, sanctuarise la mer de Barents.

- **La protection des SNLE** : la Russie utilise l'Arctique comme une forteresse naturelle. Leurs sous-marins de la classe *Boreï* y sont protégés par la géographie et par des "tapis" de capteurs acoustiques posés sur le fond.
- **Le projet "Poseidon"** : c'est ici que la Russie teste ses technologies les plus disruptives, comme le drone-torpille nucléaire à propulsion océanique, capable de traverser l'Atlantique sous la glace pour frapper une côte adverse.

1977 ANECDOTE	<p>Le sous-marin qui a été éclairé par une aurore boréale sous l'eau</p> <p>En 1977, un sous-marin norvégien observe un phénomène rarissime : une aurore boréale si intense qu'elle illumine la mer en profondeur. Les marins décrivent une lumière verte diffuse filtrant à travers la surface, donnant à la salle des machines une ambiance "fantomatique".</p>
--------------------------------	--

3.2 L'OTAN et le GIUK Gap : le retour de la surveillance

L'entrée de la Suède et de la Finlande dans l'OTAN redessine la carte. Le contrôle du passage **GIUK** (*Greenland-Iceland-UK gap*) redevient une priorité absolue pour empêcher les sous-marins russes de déboucher en Atlantique Nord.

- Les États-Unis ont réactivé leur 2e Flotte et multiplient les patrouilles de SNA de classe *Virginia* sous les glaces, souvent épaulés par les futurs sous-marins de l'alliance AUKUS.
- Le rôle des pays scandinaves : La Norvège et la Suède développent des sous-marins spécialisés pour les eaux peu profondes et froides (eaux saumâtres), optimisés pour détecter les intrusions dans les fjords et les zones côtières arctiques.

3.3 La Chine, puissance "Proche-Arctique"

1958 ANECDOTE	Le sous-marin qui a défié les glaces de l'Arctique 1958 – L'USS Nautilus, premier sous-marin sous la banquise En 1958, l'USS Nautilus est devenu le premier sous-marin à traverser l'océan Arctique sous la banquise, prouvant que rien ne pouvait arrêter ces géants d'acier. Cet exploit a ouvert la voie à l'exploration polaire et a montré que les sous-marins étaient capables de naviguer dans les environnements les plus hostiles de la planète.
--------------------------------	--

Pékin ne cache plus ses ambitions pour une "Route de la Soie Polaire".

L'intérêt chinois est double : sécuriser une route commerciale plus courte vers l'Europe et placer ses propres SNLE dans le Grand Nord. Un missile tiré depuis l'Arctique vers les États-Unis ou l'Europe a une trajectoire beaucoup plus courte et difficile à intercepter qu'un tir depuis le Pacifique.

3.4 Synthèse technologique de l'arctique

Opérer sous la glace impose des innovations technologiques :

- **Navigation inertielle de haute précision** : le GPS ne fonctionne pas sous la glace. Les sous-marins utilisent des centrales inertielles à gyrolasers et des cartographies bathymétriques (du relief marin) extrêmement précises pour se repérer sans émettre de sonar.
- **Communications "À travers la glace"** : recherche sur des bouées largables qui percent la glace pour déployer une antenne satellite, ou sur des communications acoustiques longue distance entre drones sous-marins de surveillance.

Conclusion du chapitre sur l'Arctique

Dans cette région, le sous-marin est bien plus qu'une arme : c'est l'unique vecteur de souveraineté. Celui qui possède les meilleurs senseurs sous-glaciaires et la propulsion la plus endurante (le nucléaire restant ici indétrônable face à l'AIP à cause de l'autonomie illimitée nécessaire sous la banquise) dominera les routes maritimes du futur.



Partie 9: FRANCE & SOUS-MARINS

Chapitre 1 : Situation de la France

1.1 Historique

Au fil des décennies, la flotte sous-marine française s'est structurée autour de classes successives qui ont façonné les pratiques, les réflexes et la culture des équipages. Chaque génération a apporté une manière différente de patrouiller, de se cacher, d'écouter et d'agir, au point que les marins parlent souvent de leurs sous-marins comme de « familles » distinctes.

Après les *Narval*, *Aréthuse* et *Daphné*, qui ont formé l'essentiel des équipages de l'après-guerre, une étape décisive est franchie avec l'arrivée de la classe *Agosta*. Plus endurants, plus marins, capables de missions prolongées loin des bases, les *Agosta* ouvrent la voie à une pratique opérationnelle plus ambitieuse : patrouilles océaniques, opérations discrètes en zone sensible, coopération avec les forces de surface. Pour beaucoup de sous-marinières, l'*Agosta* reste la première plateforme « moderne », celle où l'on apprend la gestion fine de la discrétion, la tenue de plongée sur de longues durées et la coordination tactique avec d'autres unités.

L'arrivée des sous-marins nucléaires d'attaque — *Rubis* puis *Améthyste* — transforme ensuite profondément le quotidien des équipages. Les missions deviennent plus longues, plus lointaines, plus silencieuses encore. Les marins y découvrent une autre temporalité : immersion continue, endurance mentale, opérations de renseignement au plus près des zones d'intérêt.

En parallèle, la force océanique stratégique se construit autour des SNLE, du *Redoutable* au *Triomphant*. Les patrouilles de dissuasion imposent un rythme unique : des semaines d'immersion totale, une routine réglée au cordeau, une vigilance permanente. Cette mission forge une culture opérationnelle à part, faite de rigueur absolue et de sobriété.

Ainsi, l'histoire sous-marine française est indissociable des classes qui se sont succédé et des marins qui les ont fait vivre. Le chapitre suivant examinera comment cet héritage se traduit dans la flotte et la doctrine de la Marine nationale en 2026.

1967

LE REDOUTABLE : Le géant de l'atome devenu star de musée !

C'est le pionnier de la dissuasion nucléaire française. Lancé en 1967 (photo) par le Général de Gaulle à Cherbourg, **Le Redoutable** a marqué l'entrée de la France dans le club très fermé des puissances capables de frapper depuis les abysses. Ce monstre de technologie était capable de rester immergé pendant des mois, devenant totalement invisible pour protéger la nation.

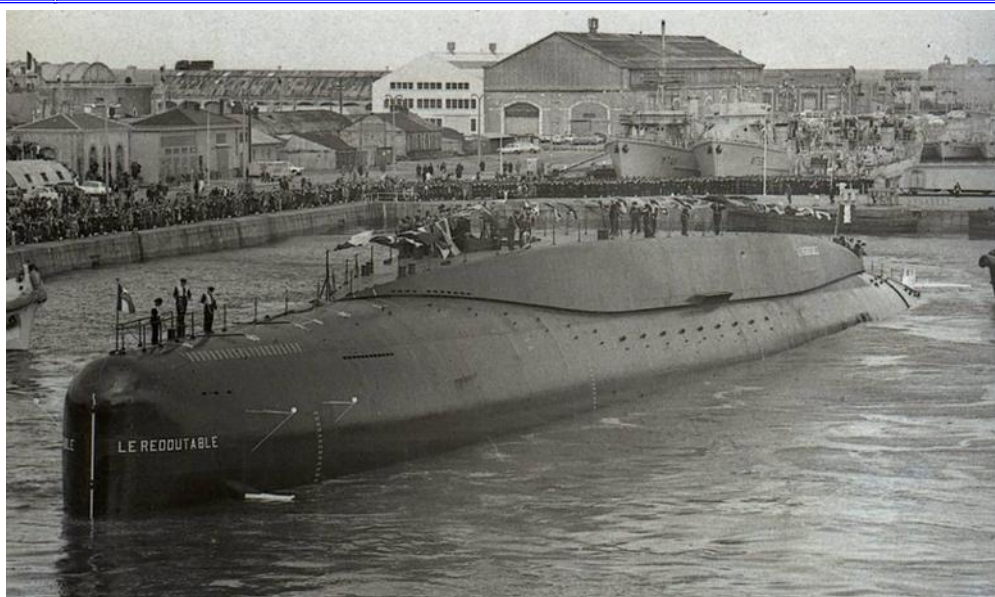
20 ans de patrouilles silencieuses

ANECDOTE

Le Redoutable a mené une carrière exemplaire de **20 ans** (de 1971 à 1991). Durant ces deux décennies, il a effectué 51 patrouilles, passant près de **90 000 heures** sous l'eau. Pour l'équipage, la vie à bord était une prouesse psychologique : vivre sans voir le jour, dans un espace confiné, tout en gérant la puissance de 16 missiles nucléaires.

Une retraite sous les projecteurs

Aujourd'hui, Le Redoutable ne se cache plus. Depuis 2002, il est la pièce maîtresse de **La Cité de la Mer à Cherbourg**. C'est une opportunité unique au monde : il est le plus grand sous-marin nucléaire ouvert au public. Les visiteurs peuvent déambuler dans ses couloirs étroits, explorer le poste de commande et imaginer le quotidien des marins qui ont assuré la paix dans le silence le plus total.



Le 29 mars 1967, le Général de Gaulle préside le lancement du Redoutable, le premier sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) français.

1.2 L'évolution de la flotte française : la transition technologique

La France opère actuellement un renouvellement complet de ses deux composantes sous-marines.

La fin de l'ère Rubis et l'avènement de la classe Suffren

Les SNA de la classe Rubis (mis en service dans les années 1980) ont été les plus petits SNA au monde. Leur compacité était une prouesse d'ingénierie, mais limitait leur capacité d'emport d'armes et leur discrétion acoustique par rapport aux standards modernes.

Le programme Barracuda (classe Suffren) marque une rupture :

- **Tonnage** : passage de 2 700 tonnes (Rubis) à plus de 5 000 tonnes.
- **Armement** : introduction du Missile de Croisière Naval (MdCN) permettant des frappes à plus de 1 000 km de distance.
- **Discrétion** : utilisation d'une pompe-hélice (pump-jet) au lieu d'une hélice classique pour réduire le bruit à haute vitesse.

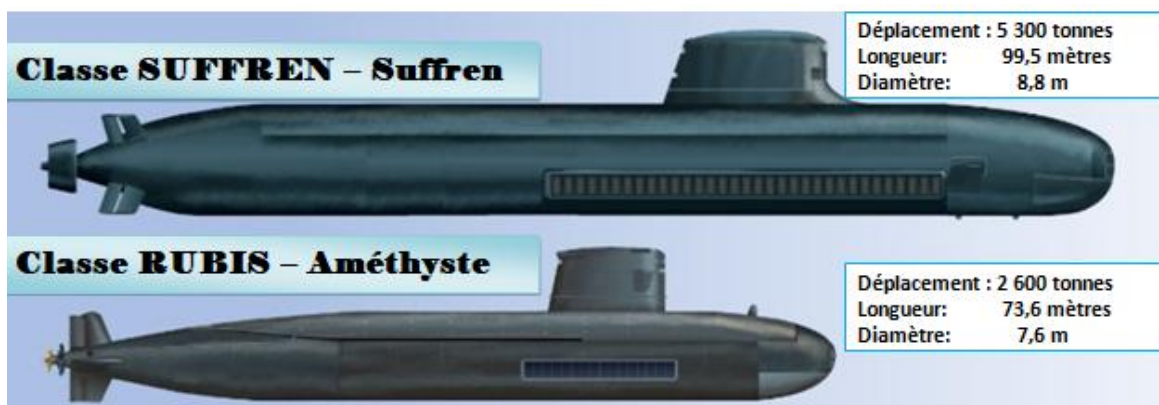
Le maintien de la dissuasion : du Triomphant au SNLE 3G

La classe Le Triomphant constitue l'actuelle Force Océanique Stratégique (FOST). Ces quatre navires sont parmi les plus silencieux au monde. Cependant, pour contrer les progrès des moyens de détection ennemis (traitement du signal, drones sous-marins), la France a lancé le programme SNLE 3G (3ème Génération).

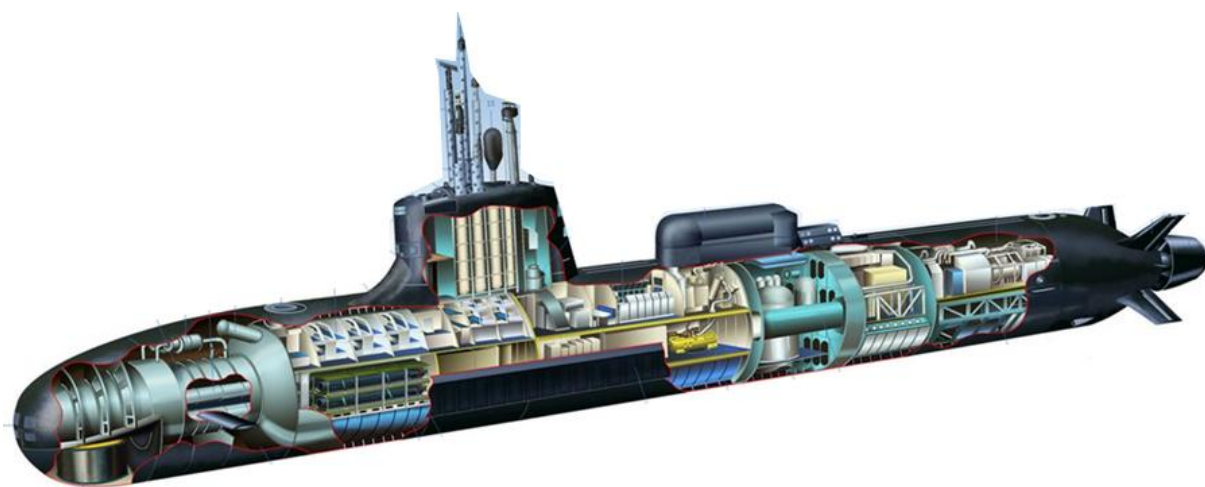
Le premier de série est attendu pour 2035. Ces futurs navires seront plus longs, dotés d'une discrétion acoustique accrue et de capteurs sonar de nouvelle génération couvrant des surfaces de coque plus vastes.

1.3 Flotte française de sous-marin en 2025

ENA		ENLE	
Nom	Service	Nom	Service
Classe Rubis		Classe Le Redoutable	
Rubis	1983 – 2022	Le Redoutable	1971 – 1991
Saphir	1984 – 2019	Le Terrible	1973 – 1996
Casabianca	1987 – 2023	Le Foudroyant	1974 – 1998
Émeraude	1988 – 2024	L'Indomptable	1976 – 2005
Améthyste	1992 –	Le Tonnant	1980 – 1999
Perle	1993 –	L'Inflexible	1985 – 2008
Classe Suffren		Le Redoutable	1971 – 1991
Suffren	2022 –	Classe Le Triomphant	
Duguay-Trouin	2024 –	Le Triomphant	1997 –
Tourville	2025 –	Le Téméraire	1999 –
De Grasse	En construction	Le Vigilant	2004 –
Rubis	"	Le Terrible	2010 –
Casabianca	"		
5 en service en 2025		4 en service en 2025	



Comparaison entre les deux générations (les deux classes)



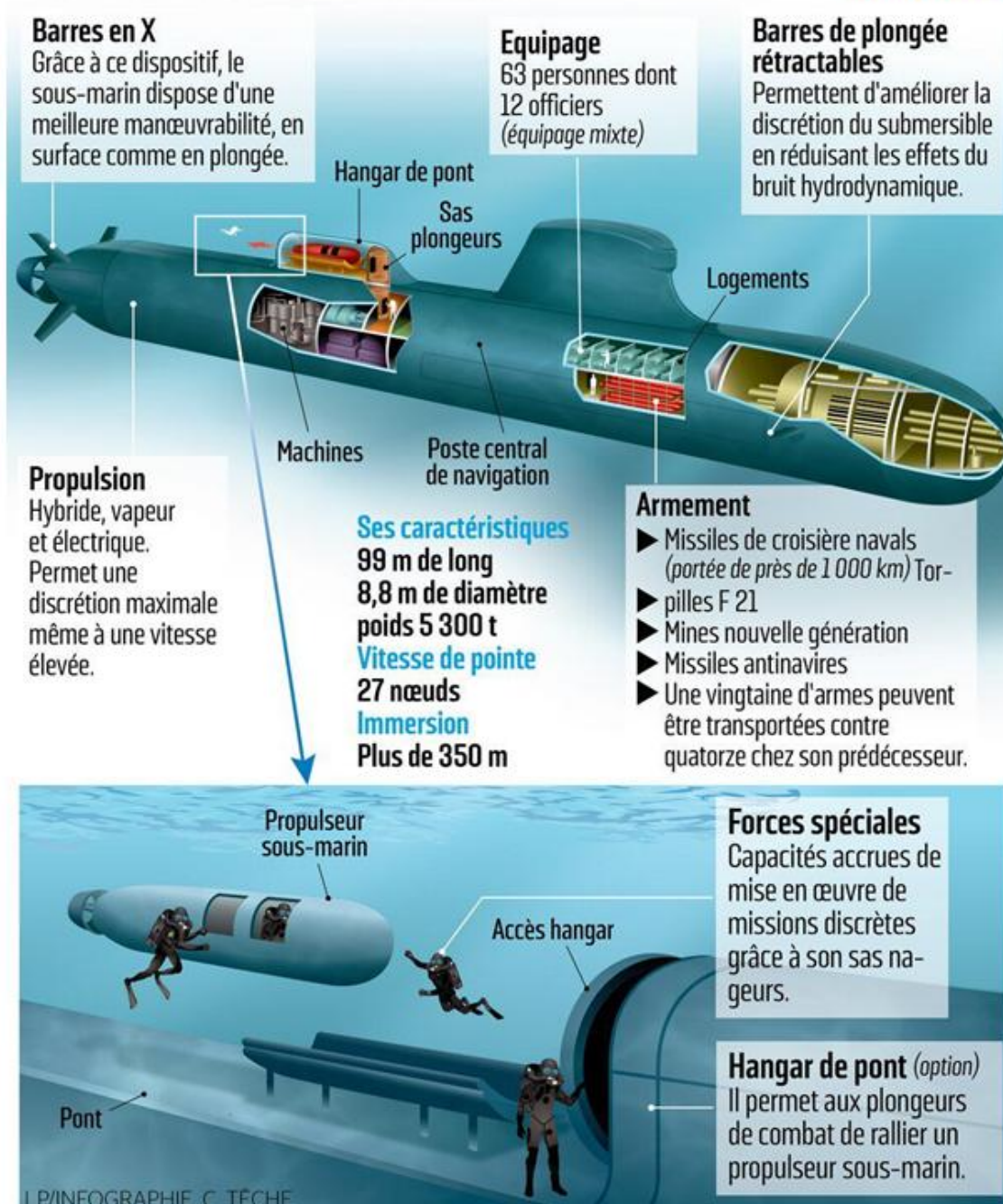
Sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) SUFFREN



Le Suffren lors de sa mise à l'eau en 2019

Les atouts du Suffren

Le Parisien



Un encart publié par le journal [Le Parisien](#) le 12 juillet 2019

Conclusion sur la stratégie française

La France maintient une avance technologique souveraine, étant l'un des rares pays au monde à concevoir l'intégralité de ses sous-marins et de leurs réacteurs. La transition actuelle entre les classes Rubis et Suffren, couplée au développement du SNLE 3G, assure la validité de la posture de défense française pour les cinquante prochaines années.

Chapitre 2 : L'écosystème sous-marin français : entre souveraineté et rayonnement

2.1 Marine Nationale, DGA et les mécanismes de souveraineté

La conception et la circulation de la technologie sous-marine française ne relèvent pas du simple commerce industriel ; elles sont le fruit d'une architecture étatique rigoureuse où le besoin opérationnel rencontre la raison d'État. Au sommet de cet édifice, la Marine Nationale définit ses besoins stratégiques : elle exprime les capacités de discrétion, d'endurance et de puissance de feu nécessaires pour garantir la crédibilité de la dissuasion et l'efficacité des missions de projection.

C'est la Direction Générale de l'Armement (DGA) qui prend ensuite le relais. En tant que maître d'ouvrage, elle est l'architecte de la cohérence technique et financière des programmes. Mais son rôle dépasse la simple ingénierie. Elle est la gardienne des secrets technologiques de la nation. Tout projet d'exportation ou de coopération est soumis à un contrôle drastique. C'est ici qu'intervient la CIEEMG (Commission Interministérielle pour l'Étude de l'Exportation des Matériels de Guerre). Sous l'autorité du Premier ministre, cette commission examine chaque dossier pour s'assurer qu'une vente ne nuise pas aux intérêts de la France ou ne conduise pas à une fuite de technologies sensibles.

L'exportation d'un sous-marin est indissociable d'un accord politique profond. Pour orchestrer cette diplomatie de l'armement, la DGA s'appuie sur sa Direction du Développement International (DGA/DI). En son sein, la DRI (Direction des Relations Internationales) joue un rôle de chef d'orchestre. Elle est chargée de la promotion de l'excellence française et du suivi rigoureux des prospects à travers le monde. La DRI agit sous l'égide du Ministère des Armées pour négocier des accords inter-étatiques de défense (G-to-G), garantissant au pays acheteur que la France se tient derrière son industriel.

Le point le plus délicat de ces accords concerne les ToT (Transferts de Technologie). Autoriser un partenaire à construire une partie de son sous-marin sur son propre sol, comme ce fut le cas pour le programme PROSUB au Brésil ou le projet P75 en Inde, est une décision hautement stratégique. Ces transferts sont strictement encadrés par la DGA : ils permettent de créer des partenariats de long terme tout en veillant à ne jamais céder le cœur du savoir-faire — ces algorithmes de traitement acoustique ou ces secrets de discrétion issus de décennies de recherche — qui assurent à la France sa propre supériorité sous-marine.

2.2 Naval Group : La métamorphose d'un géant, de Colbert à la haute technologie

L'histoire de Naval Group ne ressemble à aucune autre dans le paysage industriel français ; elle est le récit d'une institution vieille de quatre siècles qui a su muter pour survivre et dominer son marché. Ses racines plongent dans le XVII^e siècle, lorsque Richelieu puis Colbert décident de doter la France d'une marine de guerre puissante. À cette époque, l'État crée les Arsenaux de la Marine, des structures militaires où l'on construit, arme et répare les vaisseaux du Roi. Pendant des siècles, ces arsenaux seront le cœur battant de la souveraineté maritime française, fonctionnant sous un régime strictement administratif.

L'ère de la DCN : l'administration constructrice

Au XXe siècle, cette structure prend le nom de **DCN** (Direction des Constructions Navales). Intégrée au Ministère de la Défense et rattachée à la DGA, la DCN n'est pas une entreprise, mais une direction d'administration centrale. Ses ouvriers sont des fonctionnaires ou des ouvriers d'État, et ses budgets sont votés au Parlement. C'est sous ce statut que la France réalise ses plus grands exploits technologiques de l'époque : le lancement du premier sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE), *Le Redoutable*, en 1967. Cependant, malgré ses succès techniques, ce modèle rigide peine à s'adapter à la concurrence internationale et aux réalités du marché mondial de l'exportation.

Historique : La révolution juridique

Le véritable basculement s'opère vraiment au début des années 2000 sous l'impulsion d'une nécessité de modernisation industrielle. La transformation se déroule en plusieurs étapes clés :

- **Années 1970 - 1980 : la clarification des rôles.** Bien avant la transformation en société, l'État instaure une séparation étanche entre les fonctions régaliennes (la DCN étatique au sein de la DGA, chargée de définir le besoin et de contrôler les programmes) et les fonctions industrielles (la DCN, chargée de la construction), transformant la relation d'autorité en une relation client-fournisseur au sein même du ministère.
- **1990 : La création de DCN International.** Pour la première fois, l'État dote la DCN d'une structure commerciale dédiée à l'exportation. Jusqu'alors, la vente de navires de guerre était une affaire purement diplomatique et administrative. Avec DCN International, la France se dote d'une force de frappe commerciale capable de promouvoir les navires de surface et les sous-marins sur l'échiquier mondial. Cette entité démontre immédiatement son efficacité en remportant des contrats historiques, prouvant que le savoir-faire des arsenaux pouvait s'exporter avec succès. Ce fut le véritable "pied à l'étrier" qui a préparé les esprits à l'industrialisation du groupe.
- **1996 Début de fusion – UDS-International.** À cette période, au sein de la Marine nationale, DCN assure le rôle de maître d'œuvre du système de combat, tandis que Thales fournit les senseurs et les systèmes de mise en œuvre des armes. DCN conserve la responsabilité de l'élément fédérateur : le système tactique. Parallèlement, Thales développe une solution complète destinée à l'exportation. Ce système, baptisé SUBTICS, se révèle rapidement révolutionnaire, tant par son niveau d'intégration que par ses performances. DCN et Thales décident alors de mutualiser leurs savoir-faire en créant une coentreprise, UDS-International. Le succès à l'exportation est immédiat, et cette société dédiée aux sous-marins préfigure celle qui sera ultérieurement mise en place pour les bâtiments de surface.
- **2002 : Le saut vers Armaris.** Fort du succès de DCN International et UDS-International, un pas supplémentaire est franchi grâce à un accord stratégique avec **Thales**. Les deux géants décident de conjuguer leurs forces de vente à l'international en créant une joint-venture à parts égales : **Armaris**. Cette entité devient le visage de l'excellence navale française à l'étranger. En mariant la compétence de constructeur de la DCN et l'expertise en systèmes électroniques de Thales, Armaris permet de proposer des offres intégrées et cohérentes. Ce partenariat préfigure le rapprochement industriel majeur qui suivra quelques années plus tard.

- **2003 : La naissance de la SA.** Capitalisant sur la réussite commerciale d'Armaris, d'UDS-I et de DCN International, la structure évolue définitivement. La DCN sort du giron direct de l'administration pour devenir une société anonyme de droit privé (DCN SA), dont l'État reste l'unique actionnaire.
- **2007 : Le rapprochement avec Thales** : En absorbant les activités navales de Thales en contrepartie d'un actionnariat à hauteur de 25 % (portée ensuite à 35%), l'entreprise devient **DCNS**. Ce mariage permet de fusionner l'expertise de "coqueur" (la construction du navire) avec celle de "systémier" (l'électronique et l'informatique du système de combat). Cette intégration verticale devient l'atout maître pour proposer des navires "clés en main" à l'international.
- **2017 : Devenir Naval Group** : Pour accompagner son déploiement mondial et marquer sa dimension de groupe technologique global, l'entreprise change de nom pour devenir **Naval Group**.

Un leader mondial unique

Aujourd'hui, Naval Group s'affirme comme l'un des très rares industriels au monde — aux côtés de géants américains ou russes — capables de maîtriser l'intégralité du cycle de vie d'un sous-marin, de la première découpe de tôle à Cherbourg jusqu'à la gestion complexe des cœurs nucléaires. En passant d'une administration d'arsenal à un groupe technologique de pointe, Naval Group a su préserver le secret de la souveraineté française tout en devenant un champion de l'exportation. L'entreprise ne vend plus seulement des bateaux ; elle vend une capacité de défense stratégique globale, soutenue par une excellence logicielle héritée de la fusion de ses compétences.

Le saviez-vous ?

Énergie d'origine marine

L'énergie marine renouvelable (EMR) regroupe les technologies qui cherchent à produire de l'électricité grâce aux marées (hydrolien), aux vagues (houlomoteur) ou au gradient thermique des océans (ETM). L'intérêt est considérable : une énergie prévisible, décarbonée et bien plus dense que celle du vent.

Mais la mer est un environnement d'une dureté exceptionnelle. Les machines doivent résister à la corrosion saline, au bio-encrassement (organismes marins qui colonisent les surfaces) et à des forces mécaniques immenses lors des tempêtes. Installer et maintenir une turbine à 40 mètres de profondeur exige une ingénierie de haute précision, proche de celle des sous-marins.

La France, forte de son vaste domaine maritime, a longtemps été un acteur majeur du secteur. Naval Group, via sa filiale dédiée Naval Energies (avant l'arrêt de cette activité), a porté des projets emblématiques comme les hydroliennes d'Ouessant ou les fermes pilotes de Groix. Aujourd'hui, le marché se concentre surtout sur l'éolien en mer posé et flottant, mais l'expertise navale demeure essentielle : concevoir des structures capables de survivre trente ans dans la violence et le silence des profondeurs reste un savoir-faire rare et déterminant.

2.3 Un territoire au service des profondeurs : les pôles d'excellence

La force sous-marine française repose sur un maillage géographique où chaque site détient une expertise unique et critique. Cette organisation industrielle garantit qu'aucune compétence n'est redondante et que chaque établissement concourt à la performance globale du navire.

Les établissements industriels de Naval-Group: la forge et le cerveau

La construction d'un sous-marin est un puzzle géant dont les pièces sont façonnées dans quatre grands pôles nationaux :

- **Cherbourg (Manche) : le berceau de la construction.** C'est ici que bat le cœur industriel de Naval Group pour les sous-marins. Unique en France, ce site assure l'intégralité du cycle de fabrication, de la première découpe des tôles d'acier à haute limite élastique jusqu'à l'achèvement du navire. Le site dispose de nefs de montage monumentales où les sections modulaires sont assemblées et soudées avant la mise à l'eau.
- **Nantes-Indret (Loire-Atlantique) : le centre névralgique de la propulsion.** Spécialisé dans l'énergie, ce site conçoit et réalise les chaufferies nucléaires, les turbines et les lignes d'arbres. C'est là que l'on dompte la puissance de l'atome ou que l'on développe les technologies de propulsion anaérobie (AIP) pour le marché export. Indret est le garant de la mobilité et de la discrétion acoustique des machines.
- **Angoulême-Ruelle (Charente) : les équipements stratégiques.** Loin des côtes, cet ancien arsenal fondeur de canons s'est reconverti dans la haute précision. Il produit les systèmes de lancement d'armes (torpilles, missiles), les simulateurs de conduite indispensables à la formation des équipages et les systèmes de gestion des fluides.
- **Le pôle Systèmes de Combat : Ollioules, Saint-Mandrier et la Région Parisienne.** L'intelligence logicielle et tactique du sous-marin est répartie sur plusieurs pôles.
 - **Ollioules (Var) :** c'est une implantation récente et majeure (inaugurée en 2016 pour regrouper les forces de Naval Group). Ce site est le centre mondial d'excellence pour les systèmes de combat (CMS). C'est ici que sont codés les algorithmes qui permettent au commandant de fusionner les données des sonars et des senseurs.
 - **Bagneux (Région parisienne) :** longtemps reconnu comme l'un des centres majeurs de Thales pour le développement des radars, des calculateurs et des systèmes de combat navals, le site a été temporairement occupé par la DGA pendant la rénovation de ses propres installations au sud de Paris. Une fois les locaux restitués, Bagneux a retrouvé une vocation pleinement navale : il accueille désormais une partie des activités systèmes de combat de surface de Naval Group, dans le cadre du rapprochement industriel et capitalistique historique entre Naval Group et Thales. Les équipes franciliennes des deux groupes y poursuivent un rôle clé dans l'ingénierie système et le développement des technologies amont.
 - **Saint-Mandrier (Var) :** historiquement lié à l'expérimentation, ce site accueille le Pôle Écoles Méditerranée et des centres d'essais système pour la validation des radars et sonars en conditions réelles.
 - **Saint-Tropez :** le site assure la conception, l'assemblage et le soutien des torpilles lourdes et légères de la Marine nationale, ainsi que d'autres équipements sous-marins sensibles.

L'exploitation opérationnelle : les sanctuaires de la Marine

Une fois livrés, les sous-marins quittent le monde industriel pour entrer dans celui du secret opérationnel de la Marine Nationale.

- **Brest - L'Île Longue (Finistère) : Le sanctuaire de la Dissuasion.** Située dans la rade de Brest, cette base est l'une des plus protégées d'Europe. C'est le port d'attache exclusif des SNLE (Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins). L'Île Longue assure la maintenance de la Force Océanique Stratégique (FOST) et le stockage des missiles balistiques, garantissant la permanence de la France à la mer.
- **Toulon (Var) : Le pôle des Sous-marins Nucléaires d'Attaque (SNA).** La base navale de Toulon accueille l'escadrille des SNA. Ces prédateurs, chargés de la protection du porte-avions ou de la chasse aux navires ennemis, bénéficient ici de l'appui direct des ingénieurs de Naval Group Toulon pour leur entretien courant et leurs arrêts techniques majeurs (notamment pour le rechargement du combustible nucléaire).

2.4 Le rayonnement mondial : de la vente de navires au partenariat stratégique

Le succès des sous-marins français sur la scène internationale n'est pas seulement le résultat d'une excellence industrielle ; il est le fruit d'une doctrine unique au monde : celle de l'autonomie stratégique partagée. La France ne vend pas seulement de l'acier et des systèmes de combat, elle propose à ses partenaires de devenir des puissances sous-marines souveraines.

Une lignée de succès : De la classe Daphné au Scorpène

La saga de l'exportation commence véritablement avec les classes **Daphné** et **Agosta**. Ces sous-marins conventionnels (diesel-électriques, on dirait aujourd'hui : "hybride" comme pour les voitures) ont équipé de nombreuses marines à travers le globe (Pakistan, Espagne, Afrique du Sud, Portugal), forgeant la réputation de fiabilité et de discrétion des ingénieurs français.

Mais c'est le **Scorpène** qui a transformé cet essai en une domination mondiale sur le segment des sous-marins de 2 000 tonnes. Conçu spécifiquement pour l'exportation par Naval Group, ce navire intègre des technologies de discrétion directement issues de l'expérience française sur les sous-marins nucléaires. Vendu au Chili, à la Malaisie, à l'Inde et au Brésil, le Scorpène est devenu la référence absolue pour les nations exigeant une discrétion acoustique de premier ordre et une capacité de frappe polyvalente.



Sous-marin conventionnel Scorpène – Naval Group - France

Le Transfert de Technologie (ToT) : L'autonomie en partage

La France a compris très tôt que les grandes puissances émergentes ne souhaitent plus de simples livraisons « sur étagère ». Le succès français repose sur l'acceptation de transferts de technologie (ToT) massifs et complexes, encadrés par la DGA et le Ministère des Armées.

- **Le programme PROSUB au Brésil** : C'est sans doute l'exemple le plus spectaculaire. La France a accompagné le Brésil dans la création d'un chantier naval de pointe à Itaguaí (Itaguaí Construções Navais – ICN) et d'une base navale dédiée. Naval Group y assure le transfert de compétences pour la construction locale de quatre Scorpène, tout en assistant le Brésil dans la conception de la partie non-nucléaire de son premier sous-marin à propulsion nucléaire national (le SN-BR).



Lancement du sous-marin Tornelo en 2025 au Brésil

- **Le projet P75 en Inde** : À Mumbai, six sous-marins Scorpène (classe *Kalvari*) ont été construits par le chantier public MDL (Mazagon Dock Shipbuilders Limited) avec le soutien technique français. Ce partenariat a permis à l'Inde de régénérer son tissu industriel naval de haute technologie.



L'un des sous-marin indien (INS Vela) lors de son lancement en 2019

2.5 Conclusion et perspectives : le défi de la "mer de verre"

Pour clore ce chapitre sur l'écosystème français, il est essentiel de regarder vers l'horizon. La supériorité sous-marine de la France, acquise depuis les premières analyses du Type XXI au Brusc jusqu'aux succès du Scorpène, fait face à un défi technologique sans précédent.

Nous entrons dans l'ère de la "Mer de Verre". Ce concept désigne un futur proche où l'océan, autrefois opaque et protecteur, deviendrait transparent pour l'adversaire. La multiplication des capteurs fixes sur les fonds marins, le déploiement de nuées de drones sous-marins autonomes (UUV) et l'utilisation de satellites capables de détecter les micro-variations de la surface de l'eau menacent le principe même de l'invisibilité.

Pour répondre à cette menace, la France prépare déjà la prochaine génération :

- **Le SNLE 3G (3e Génération)** : ce futur géant de la dissuasion devra être encore plus silencieux que le bruit de fond naturel de l'océan.
- **L'Intelligence Artificielle** : elle devient le nouveau membre d'équipage indispensable, capable de trier des millions de données acoustiques pour identifier une menace là où l'oreille humaine ne perçoit plus rien.
- **La maîtrise des grands fonds** : au-delà des 600 mètres habituels, la France investit dans l'exploration et la surveillance des abysses, un nouvel espace de conflictualité où se trouvent les câbles sous-marins, artères vitales de l'internet mondial.

En s'appuyant sur son triangle d'or (Marine, DGA, Naval Group), la France ne se contente pas de suivre l'évolution technologique : elle cherche à conserver ce temps d'avance qui permet, au milieu du tumulte du monde, de rester le maître absolu du silence.

Chapitre 3 : La France et l'Australie : un bon début ...

3.1 Évolution de la force sous-marine australienne,

La stratégie navale de l'Australie est dictée par sa géographie : une île-continent immense dont la survie dépend de ses voies de communication maritimes. Pour protéger ces « autoroutes » de l'Indo-Pacifique, Canberra a dû faire évoluer sa flotte au gré des alliances et des défis technologiques.

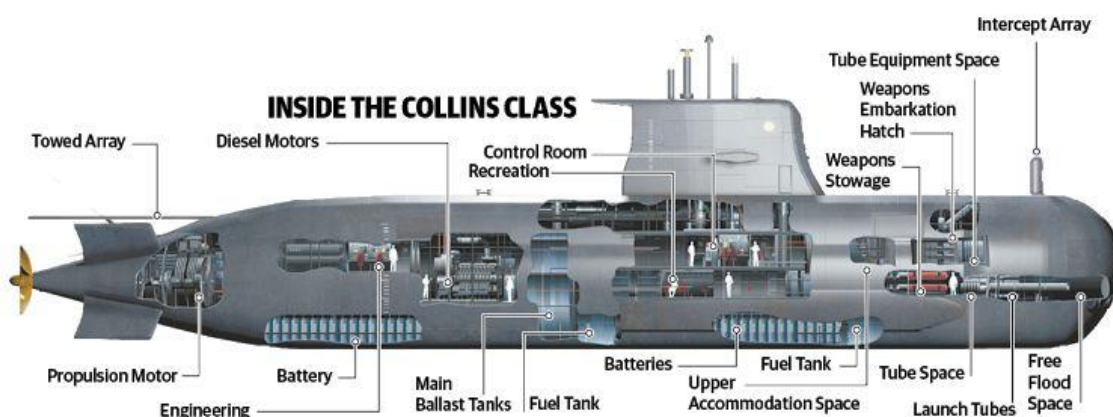
Note : L'Australie compte environ 26 millions d'habitants pour une superficie de 7,69 millions de km². Elle possède l'un des plus longs linéaires côtiers au monde, avec environ 34 000 km de côtes, et dispose d'une zone économique exclusive (ZEE) de 8,15 millions de km², la 3^e plus vastes de la planète (après les États-Unis et la France).

L'ère des Oberon (1960 - 1990) : l'héritage britannique

Pendant des décennies, l'Australie a opéré six sous-marins de la classe Oberon, de conception britannique. Ces navires conventionnels, réputés pour leur silence exceptionnel pour l'époque, ont permis à la Royal Australian Navy (RAN) de se forger une solide expérience de l'endurance. Bien que performants, ils restaient des navires de conception étrangère, limitant l'autonomie industrielle du pays.

La classe Collins (2000 - Présent) : le baptême du feu industriel

Avec la classe Collins, l'Australie a voulu passer du statut d'opérateur à celui de constructeur. Conçus avec le suédois Kockums et construits localement par ASC (Adelaide), ces six sous-marins étaient à leur lancement les plus grands sous-marins conventionnels au monde. Le programme fut cependant marqué par des débuts laborieux. Cependant, après des années de mise au point, le Collins est aujourd'hui considéré comme l'un des meilleurs sous-marins diesel-électriques de sa catégorie, capable de patrouilles extrêmement longues, adaptées aux distances colossales du Pacifique.



Le grand virage : du Shortfin Barracuda à AUKUS

Face à la montée des tensions en mer de Chine, l'Australie a estimé que le remplacement des Collins nécessitait une autonomie encore plus grande.

- **L'épisode français :** en 2016, Naval Group remporte le contrat du siècle avec le Shortfin Barracuda, une version à propulsion classique du fleuron nucléaire français.

- **La rupture AUKUS (2021)** : dans un coup de théâtre géopolitique, l'Australie annule le contrat français au profit du pacte AUKUS (Australia, United Kingdom et United States) avec les États-Unis et le Royaume-Uni. L'ambition change d'échelle : l'Australie décide d'acquérir des sous-marins à propulsion nucléaire (SSN).

Les nouveaux sous-marins pour l'Australie: l'ambition nucléaire

Le plan actuel est un défi industriel sans précédent pour une nation sans filière nucléaire civile :

1. **Phase de transition** : achat de 3 à 5 sous-marins américains de la classe Virginia dès les années 2030 pour éviter un trou capacitair.
2. **Le futur SSN-AUKUS** : co-conception d'un nouveau modèle avec les Britanniques, intégrant des technologies américaines, qui sera construit à Adélaïde à l'horizon 2040.

3.2 La Genèse de la Classe Collins et la France

Le remplacement des vieux Oberon britanniques par la classe Collins marque l'acte de naissance d'une souveraineté navale australienne, mais aussi une aventure industrielle de haute tension. Le processus de sélection fut l'un des plus rigoureux jamais mis en œuvre par le Département de la Défense (DoD) australien.

Le Processus de Sélection : de l'ITR au Contrat

Le gouvernement australien souhaitait un sous-marin construit localement, adapté aux distances gigantesques du Pacifique, dépassant les capacités des modèles européens standards de l'époque.

- **1982 - L'ITR (Invitation to Register)** : l'Australie lance un appel à manifestation d'intérêt. Plusieurs constructeurs répondent (français, allemands, italiens, suédois, britanniques et hollandais).
- **1983 - L'appel d'offres (RFT)** : après une première sélection, sept chantiers et douze sociétés de systèmes de combat sont mis en compétition.
- **1985 - La phase PDS (Project Definition Study)** : le choix se resserre sur deux finalistes pour la coque (le suédois **Kockums** avec le Type 471 et l'allemand **HDW/IKL**) et deux pour le système de combat (**Rockwell /Singer / Thalès** et le hollandais **HSA**).
- **1987 - La Signature du contrat** : en mai 1987, le gouvernement choisit officiellement le design de **Kockums** et le système de combat de **Rockwell**. Le contrat de construction est signé pour six unités, avec la création de l'**ASC (Australian Submarine Corporation)** à Adélaïde.

Une coalition sous influence française

Il est important de souligner que la structure du consortium ne fut pas imposée par les Américains, mais bien orchestrée dès l'origine par les Français. À l'initiative de **Thomson-CSF** dès l'ITR de 1982, le développement du système fut pensé comme une coalition internationale complexe.

C'est **Thomson-Csf** qui, anticipant le besoin d'interopérabilité, a sollicité le leadership américain de **Rockwell**. Ce choix pragmatique répondait à une exigence incontournable : l'Australie ayant opté pour des armements américains (comme la torpille Mk48 et le missile Harpoon), il était stratégique de placer un intégrateur d'outre-Atlantique en première ligne pour garantir la compatibilité des systèmes d'armes.

Les industriels impliqués :

- **Rockwell (USA)** : maître d'œuvre et responsable de l'intégration globale, sous l'impulsion du montage industriel de Thomson-Csf.
- **Singer-Librascope (USA)** : spécialiste des consoles, du traitement des données tactiques et du lancement des armes américaines.
- **Thomson-Sintra (France)** : bien que le leadership apparent du système de combat ait été confié à Rockwell pour des raisons de politique d'armement, la branche sonar de Thomson a verrouillé la fourniture de la suite acoustique complète. En tant que pilier de la coalition, Thomson-Sintra a imposé son expertise sur l'élément le plus critique du sous-marin : ses oreilles.
- **Computer Sciences of Australia (CSA)** : responsable du développement local du logiciel de combat.

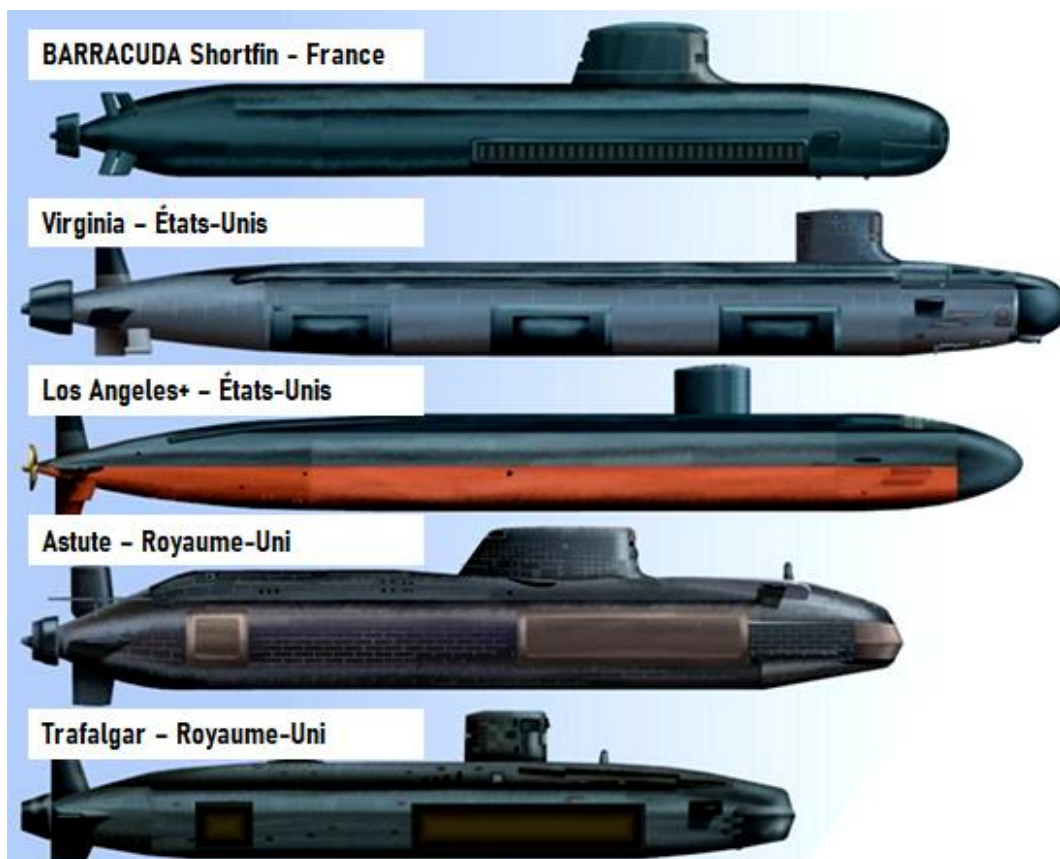
L'ironie d'un destin croisé

Le dénouement de cette compétition reste un cas d'école. Le concurrent malheureux de Rockwell, le hollandais **HSA** (filiale de Philips), fut racheté quelques années plus tard par **Thomson-CSF** (devenu **Thales**). Ce mouvement de consolidation a fini par réunir le "gagnant" technologique (le sonar Thomson au sein du système Rockwell) et le "perdant" de l'appel d'offres (HSA) sous une seule et même bannière française.

C'est un exemple rare et probant de synergie européenne : au-delà des rivalités des appels d'offres, l'expertise industrielle a fini par se concentrer pour créer un champion mondial capable de maîtriser toute la chaîne sensorielle et tactique.



Partie 10: SOUS-MARINS DANS LE MONDE



Chapitre 1 : Les États-Unis et les sous-marins : une puissance océanique façonnée par la technologie, l'industrie et la stratégie globale

Les États-Unis sont aujourd'hui la première puissance sous-marine mondiale. Leur flotte, entièrement nucléaire depuis les années 1990, constitue l'un des piliers de la stratégie militaire américaine, qu'il s'agisse de dissuasion, de projection de puissance ou de domination informationnelle.

Cette suprématie repose sur un siècle d'innovation, une industrie navale colossale et une doctrine opérationnelle tournée vers la maîtrise des océans. Contrairement aux nations européennes, dont les flottes sont souvent mixtes ou centrées sur les environnements littoraux, les États-Unis ont développé une force sous-marine océanique, globale et permanente, capable d'opérer simultanément dans l'Atlantique, le Pacifique, l'Arctique et l'océan Indien.

1.1 Un siècle d'histoire sous-marine américaine

Les débuts : de l'expérimentation à la puissance (1900–1945)

Les premiers sous-marins américains apparaissent au début du XX^e siècle, avec les classes *Holland* et *Plunger*. Rapidement, l'US Navy comprend l'intérêt stratégique de ces unités pour la défense côtière et la surveillance des approches maritimes.

Pendant la Première Guerre mondiale, les sous-marins américains jouent un rôle limité, mais la période interguerre voit une montée en puissance technologique. La Seconde Guerre mondiale marque un tournant : les sous-marins américains deviennent l'arme décisive contre le Japon.

Les classes *Gato*, *Balao* et *Tench* mènent une guerre de course implacable, coulant plus de 1 300 navires japonais et contribuant directement à l'effondrement logistique de l'Empire nippon. Cette campagne forge une culture opérationnelle centrée sur l'endurance, l'autonomie et la capacité à opérer loin des bases.

L'ère nucléaire : la révolution du Nautilus (1955–1990)

Le lancement du USS Nautilus en 1955, premier sous-marin à propulsion nucléaire, bouleverse la guerre navale.

Pour la première fois, un sous-marin peut rester immergé des semaines, voire des mois, sans remonter. Les États-Unis deviennent alors les pionniers incontestés du nucléaire naval.

Les SSN : Skipjack, Sturgeon, Los Angeles

Les classes Skipjack puis Sturgeon introduisent des coques hydrodynamiques optimisées et des réacteurs plus compacts. La classe Los Angeles, mise en service à partir de 1976, devient la colonne vertébrale de la flotte d'attaque américaine pendant plus de trente ans. Ces sous-marins patrouillent dans l'Atlantique Nord, suivent les groupes soviétiques, surveillent les bastions de la flotte du Nord et participent à des opérations de renseignement sous-marin d'une ampleur inédite.



Sous-marin nucléaire américain Los Angeles à la mer et son poste de pilotage (62 construits)

Les SSBN : la dissuasion océanique

Avec les classes George Washington, Lafayette puis Ohio, les États-Unis mettent en place une dissuasion nucléaire océanique permanente. Les Ohio, équipés de missiles Trident, deviennent l'un des piliers de la triade nucléaire américaine.

L'après-guerre froide : Seawolf, Virginia et la domination technologique

La fin de la guerre froide ne marque pas un ralentissement, mais une transformation. Les États-Unis développent la classe Seawolf, sous-marins extrêmement performants mais coûteux, puis la classe Virginia, plus polyvalente, mieux adaptée aux opérations littorales et aux missions de renseignement.



Le sous-marin Seawolf – Connecticut (SSN22) – SM très efficace mais jugés trop cher

1.2 L'industrie sous-marine américaine : un écosystème colossal

La puissance sous-marine américaine repose sur un écosystème industriel unique au monde, structuré autour de deux constructeurs principaux et d'un réseau dense de fournisseurs.

Electric Boat : le cœur historique

Electric Boat (EB), filiale de General Dynamics, est le berceau du sous-marin nucléaire américain. Depuis le Nautilus, EB conçoit et construit la majorité des sous-marins américains, notamment : les classes Los Angeles, Seawolf, Virginia, et les futurs SSBN de classe Columbia.

EB maîtrise l'intégration des réacteurs, la construction modulaire, la furtivité acoustique et les systèmes de combat.

Newport News Shipbuilding : le partenaire stratégique

Newport News Shipbuilding (NNS), filiale de Huntington Ingalls Industries, est le second constructeur de sous-marins nucléaires américains. Il est le seul chantier au monde capable de construire à la fois des sous-marins nucléaires et des porte-avions à propulsion nucléaire.

NNS partage la production des classes Virginia et Columbia avec Electric Boat, dans un modèle de coopération industrielle unique.

L'écosystème électronique : Lockheed, Raytheon, Northrop Grumman...

Les systèmes de combat, sonars, calculateurs et senseurs des sous-marins américains proviennent d'un ensemble d'acteurs majeurs, dont la complémentarité structure un écosystème technologique unique au monde :

- **Lockheed Martin** – maître d'œuvre des systèmes de tir, des calculateurs de mission et des missiles Trident.
- **Raytheon** – spécialiste des sonars, de la guerre électronique et du traitement acoustique.
- **Northrop Grumman** – acteur clé dans les senseurs avancés, l'acoustique et les systèmes embarqués.
- **BAE Systems Inc.** – intégration électronique, interfaces de conduite de combat, architectures logicielles.
- **Rockwell / Singer Librascope** – calculateurs embarqués, systèmes de combat exportables, logiciels critiques.

L'apport de Singer Librascope, absorbé ensuite par Rockwell, est souvent sous-estimé. Cette entreprise a longtemps fourni les calculateurs de tir, les systèmes de gestion de combat et les architectures logicielles embarquées sur de nombreuses plateformes américaines. Elle a également joué un rôle central dans l'exportation de technologies américaines, notamment via le système de combat initial des sous-marins australiens Collins, démontrant la stratégie américaine consistant à exporter des briques électroniques plutôt que des coques complètes.

Cet écosystème, largement financé par le budget fédéral et structuré autour de programmes pluri-décennaux, permet une innovation continue, une maîtrise totale de la chaîne technologique sous-marine et une supériorité acoustique que les États-Unis protègent jalousement.

1.3 L'industrie sous-marine américaine et ses velléités d'exportation

Contrairement à l'Allemagne, à la Suède ou à la France, les États-Unis n'exportent pas de sous-marins complets. Cette position résulte de plusieurs facteurs :

- la sensibilité extrême des technologies nucléaires ;
- la volonté de préserver la supériorité acoustique américaine ;
- la saturation chronique des chantiers ;
- une doctrine politique très restrictive.

En revanche, les États-Unis ont tenté — parfois avec succès, parfois non — d'exporter des systèmes de combat, des senseurs ou des armements.

L'Australie et la classe Collins : l'exemple le plus emblématique

Le programme Collins, conçu par Kockums (Suède), est le cas le plus connu.

Sous la sollicitation de Thalès (France) en 1981, les États-Unis y ont fourni le système de combat, initialement développé par Rockwell, puis repris par d'autres industriels américains après les difficultés

d'intégration. Ce choix visait à ancrer durablement l'Australie dans l'écosystème technologique américain. Malgré les problèmes initiaux, la classe Collins est aujourd'hui considérée comme un succès opérationnel, mais elle a laissé une trace durable dans la perception des grands systèmes américains exportés.

La tentative de coopération avec l'Espagne : le programme S-80

Autre épisode significatif : la coopération avec l'Espagne sur le **S-80**.

Les États-Unis ont cherché à fournir des briques critiques — systèmes de combat, armement, assistance à l'intégration — tandis que Navantia conservait la maîtrise de la coque. Là encore, la logique américaine était claire : ne pas exporter de sous-marins, mais verrouiller les fonctions clés.

Le cas du Japon : assistance discrète mais stratégique

Le Japon, bien que constructeur autonome, a bénéficié d'un soutien américain sur les systèmes de combat, les torpilles, certains senseurs. Cette coopération reste discrète, mais elle illustre la volonté américaine de soutenir des alliés stratégiques sans transférer de technologies nucléaires.

Taïwan : soutien indirect et hautement politique

Les États-Unis n'ont jamais exporté de sous-marins à Taïwan, mais ils ont fourni : des systèmes de combat, des torpilles lourdes, un soutien technique pour la modernisation des unités existantes. Là encore, la logique est politique : renforcer un allié sans franchir le seuil symbolique de l'exportation de coques.

AUKUS : une exception historique

Le partenariat AUKUS (après l'annulation du contrat avec la France) constitue une rupture majeure : pour la première fois, les États-Unis acceptent de transférer des technologies nucléaires à un pays tiers (l'Australie), mais dans un cadre politique exceptionnel et sous contrôle strict. Il s'agit moins d'une exportation que d'une coopération stratégique encadrée, destinée à contrer la montée en puissance chinoise dans le Pacifique.

Le programme AUKUS traverse aujourd'hui (2026) une zone d'incertitude : un rapport du Congrès américain envisage même la possibilité de ne livrer aucun sous-marin nucléaire à l'Australie, tandis que certains élus tentent au contraire de sauver l'accord. Avec le recul, Canberra pourrait avoir troqué un partenariat industriel solide avec la France pour une promesse stratégique dont la pérennité n'est plus totalement assurée.

1.4 La flotte actuelle : une force entièrement nucléaire

La flotte sous-marine américaine est aujourd'hui composée de deux grandes catégories :

- les **SSN** (sous-marins nucléaires d'attaque),
- les **SSBN** (sous-marins nucléaires lanceurs d'engins).

En 2026, cette flotte aligne 68 sous-marins : les 54 SSN — Los Angeles, Seawolf et Virginia — constituent la force d'attaque la plus puissante et la plus déployée au monde tandis que les 14 SSBN de classe Ohio assurent la dissuasion nucléaire.

Les SSN : Los Angeles, Seawolf, Virginia

Classe Los Angeles : une trentaine d'unités encore en service, progressivement retirées. Elles assurent des missions de patrouille, de renseignement et de lutte anti-sous-marine.

Classe Seawolf : trois unités seulement, mais parmi les sous-marins les plus performants au monde. Conçus pour la guerre froide, ils restent des plateformes de pointe pour les missions sensibles.

Classe Virginia : La colonne vertébrale actuelle et future de la flotte d'attaque. Polyvalents, furtifs, dotés de capacités avancées pour les opérations littorales, les drones sous-marins et les forces spéciales.

Les SSBN : la classe Ohio

Les 14 sous-marins de classe Ohio assurent la dissuasion nucléaire américaine. Chacun embarque des missiles Trident II D5, capables de frapper à très longue distance. La posture américaine repose sur une présence permanente en mer, avec plusieurs unités en patrouille à tout moment.

Le futur : la classe Columbia

La classe **Columbia**, en construction, remplacera les Ohio à partir des années 2030. Ces sous-marins seront plus silencieux, plus endurants et dotés d'un compartiment missile commun avec les Britanniques.

1.5 Doctrine opérationnelle : domination océanique et dissuasion globale

La doctrine sous-marine américaine repose sur une vision simple et implacable : les océans doivent rester un espace où les États-Unis conservent une liberté d'action totale, tout en empêchant toute puissance rivale d'y établir une présence menaçante. Au cœur de cette stratégie se trouve la dissuasion nucléaire océanique. Les sous-marins lanceurs d'engins patrouillent en permanence, invisibles et insaisissables, garantissant une capacité de frappe stratégique que rien ne peut neutraliser. Cette permanence silencieuse constitue l'un des piliers de la triade nucléaire américaine et façonne l'ensemble de la posture militaire du pays.

À cette mission fondamentale s'ajoute la maîtrise des océans, assurée par les sous-marins nucléaires d'attaque. Ces unités sillonnent sans relâche les zones les plus sensibles de la planète, qu'il s'agisse de l'Atlantique Nord, du Pacifique occidental, de l'océan Indien ou des approches arctiques. Leur présence n'est jamais annoncée, mais toujours ressentie : ils suivent les sous-marins adverses, surveillent les mouvements de surface, escortent les groupes aéronavals et veillent à ce que la supériorité acoustique américaine ne soit jamais remise en cause. Leur rôle est autant préventif que coercitif, car ils incarnent la capacité des États-Unis à intervenir partout, sans préavis.

Cette domination océanique s'appuie également sur un volet plus discret, mais tout aussi essentiel : le renseignement et les opérations spéciales. Les sous-marins américains sont régulièrement engagés dans des missions d'écoute avancée, de surveillance des bastions adverses, d'interception de communications ou d'observation de câbles sous-marins. Ils servent aussi de plateformes de déploiement pour les forces spéciales, capables d'approcher des côtes hostiles sans être détectées. Ces opérations, rarement évoquées publiquement, constituent pourtant l'un des atouts les plus précieux de la flotte américaine, car elles permettent d'obtenir des informations impossibles à recueillir autrement.

Enfin, les sous-marins d'attaque assurent une capacité de projection de puissance unique au monde. Grâce aux missiles de croisière Tomahawk, ils peuvent frapper des cibles terrestres situées à des centaines de kilomètres, sans jamais révéler leur position. Cette faculté de mener des frappes de précision depuis les

profondeurs donne aux États-Unis un outil de coercition particulièrement efficace, capable de neutraliser des infrastructures critiques ou de soutenir des opérations aériennes et terrestres sans exposer de forces visibles.

Conclusion

Les États-Unis disposent aujourd'hui de la force sous-marine la plus puissante, la plus endurante et la plus technologiquement avancée du monde. Cette suprématie ne doit rien au hasard : elle est le fruit d'un siècle d'innovation continue, d'une industrie colossale capable de produire et de maintenir une flotte entièrement nucléaire, et d'une doctrine résolument tournée vers la domination océanique et la dissuasion permanente en mer. Dans ce dispositif, l'US Navy occupe une place centrale. Elle garantit la liberté d'action globale des États-Unis, protège leurs intérêts stratégiques et assure que, dans les profondeurs comme en surface, aucune puissance ne puisse contester leur présence ou leur influence.

Chapitre 2 : Le Royaume-Uni et les sous-marins : une puissance océanique façonnée par l'innovation et l'industrie

Le Royaume-Uni est l'une des grandes nations sous-marines de la planète. Depuis plus d'un siècle, ses sous-marins jouent un rôle central dans sa stratégie navale, sa posture de dissuasion et sa capacité d'action globale. Contrairement à d'autres pays européens dont les flottes sont restées centrées sur les environnements littoraux, la Royal Navy a développé une tradition profondément océanique, tournée vers la projection, la permanence en mer et la maîtrise des grands espaces maritimes. Cette orientation a façonné une industrie puissante, un savoir-faire technique unique et une culture opérationnelle marquée par l'endurance, la rigueur et la discrétion.

2.1 Un siècle d'histoire sous-marine

Les débuts : de l'expérimentation à la maîtrise (1900–1945)

Le Royaume-Uni fait partie des pionniers du sous-marin moderne. Dès 1901, la Royal Navy met en service ses premiers bâtiments de classe *Holland*, construits sous licence américaine. Rapidement, les Britanniques développent leurs propres modèles, adaptés aux exigences de la guerre navale en Atlantique et en mer du Nord.

Pendant la Première Guerre mondiale, les sous-marins britanniques mènent des opérations offensives en mer du Nord, en Baltique et en Méditerranée. Ils jouent un rôle essentiel dans la lutte contre les U-Boote allemands, mais aussi dans l'interdiction du trafic maritime ennemi.

La Seconde Guerre mondiale confirme cette importance. Les classes *T*, *U* et *S* opèrent dans l'Atlantique, en Méditerranée et dans le Pacifique. Les sous-marins britanniques coulent plus de 200 navires ennemis et participent à des opérations spéciales, notamment en Norvège et en Asie du Sud-Est. Cette période forge une culture opérationnelle centrée sur la polyvalence, la navigation océanique et la capacité à opérer loin des bases.

L'ère nucléaire : une transformation stratégique (1950–1990)

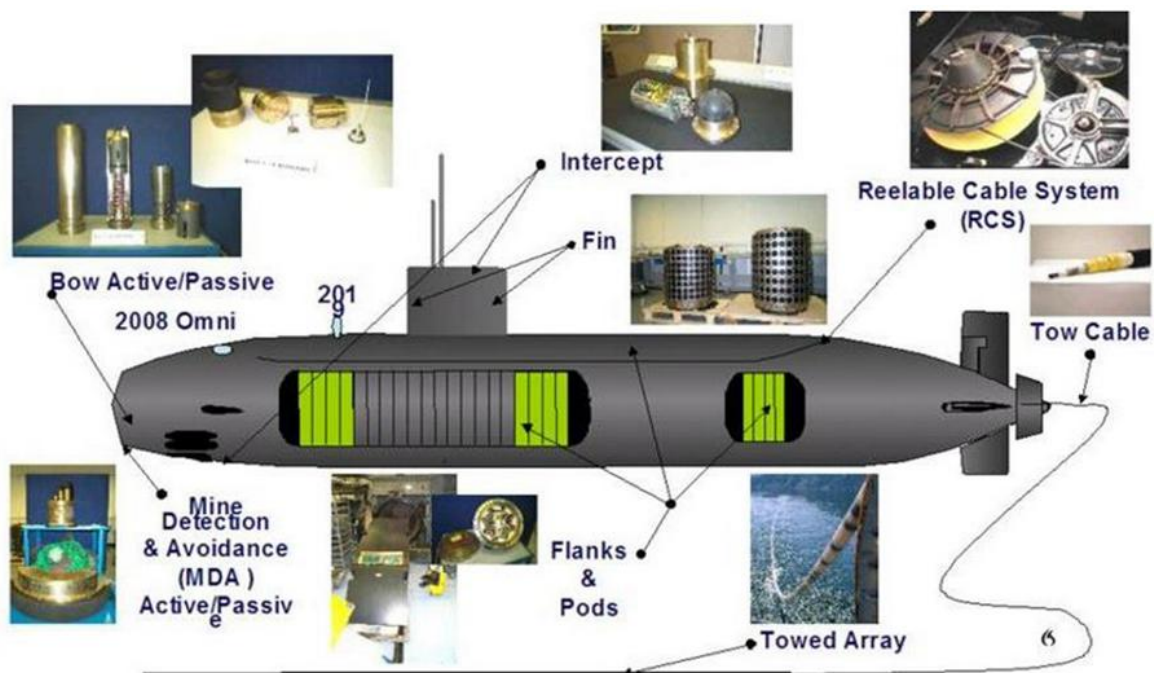
Après 1945, le Royaume-Uni devient l'une des premières nations à maîtriser la propulsion nucléaire. La mise en service du HMS Dreadnought en 1963, construit avec l'aide américaine pour la partie réacteur, marque une rupture majeure. La Royal Navy entre alors dans l'ère des sous-marins nucléaires d'attaque (SSN), bientôt suivis par les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SSBN).

Bien que le Royaume-Uni ait été l'une des premières nations à maîtriser la propulsion nucléaire et à construire ses propres sous-marins nucléaires, sa capacité de frappe stratégique est restée étroitement liée aux États-Unis. Depuis les missiles Polaris des années 1960 jusqu'aux Trident II D5 actuels, les Britanniques dépendent du système américain pour l'armement balistique, qu'il s'agisse de la conception, de la maintenance ou de la logistique des missiles. La Royal Navy conserve un contrôle opérationnel complet sur l'emploi de la force, mais la chaîne technologique et industrielle de l'arme nucléaire embarquée demeure profondément intégrée à celle des États-Unis, condition implicite de la coopération stratégique entre les deux pays.

Les SSN : la classe Valiant puis Swiftsure

Les classes Valiant et Swiftsure permettent au Royaume-Uni de disposer d'une flotte d'attaque capable de suivre les groupes soviétiques, de protéger les lignes atlantiques et de mener des opérations de renseignement sous-marin.

Les 5 unités en service : HMS Astute, HMS Ambush, HMS Artful, HMS Audacious, HMS Anson, HMS Agamemnon (en achèvement), HMS Agincourt (en construction)



Le sonar intégré du sous-marin Astute

Les SSBN : la dissuasion permanente

Avec la classe Resolution, équipée de missiles Polaris, le Royaume-Uni adopte une posture de dissuasion continue en mer. Cette mission, reprise plus tard par la classe Vanguard équipée de missiles Trident, devient l'un des piliers de la stratégie britannique.

La dissuasion britannique repose sur quatre sous-marins de classe Vanguard, chacun équipé de missiles Trident II D5 : HMS Vanguard, HMS Victorious, HMS Vigilant, HMS Vengeance

Ces unités assurent la Continuous At-Sea Deterrence (CASD) : un sous-marin est en permanence en patrouille, invisible et prêt à agir. Cette mission est l'une des plus exigeantes de la Royal Navy, nécessitant une discipline extrême et une disponibilité technique irréprochable.

2.2 L'industrie sous-marine britannique

VSEL : le berceau des sous-marins britanniques

Le cœur historique de la construction sous-marine britannique est Vickers Shipbuilding and Engineering Ltd (VSEL), basé à Barrow-in-Furness. Depuis le début du XX^e siècle, VSEL construit la quasi-totalité des sous-marins britanniques, des premiers modèles diesel-électriques aux SSN et SSBN modernes.

Dans les années 1990, VSEL est intégré dans BAE Systems, qui devient l'acteur central de la construction sous-marine britannique.

BAE Systems : l'architecte des flottes nucléaires

BAE Systems Submarines, héritier direct de VSEL, est aujourd'hui le seul chantier britannique capable de construire des sous-marins nucléaires. Il est responsable de :

- la classe Astute (SSN),
- la future classe Dreadnought (SSBN),
- la maintenance lourde des unités en service.

2.3 L'écosystème électronique : de Ferranti et Plessey à Thales

L'industrie électronique navale britannique a connu une série de fusions et d'absorptions qui ont profondément remodelé le paysage.

Pendant la guerre froide, plusieurs entreprises britanniques développent des systèmes sonar, des calculateurs de tir et des radars pour les sous-marins :

- **Ferranti** (avionique, calculateurs),
- **Plessey** (sonars, électronique navale),
- **Racal** (communications),
- **Marconi** (systèmes de combat).

Ces entreprises sont progressivement regroupées dans les années 1980–1990, souvent sous pression politique, pour rationaliser l'industrie de défense.

Dans les années 1990, Thomson-CSF absorbe une partie importante de cet écosystème, notamment les activités sonar et systèmes de combat. Sous la présidence de Denis Ranque, Thomson-CSF devient Thales, un nom plus consensuel et international, reflétant une stratégie d'expansion globale.

Aujourd'hui, Thales UK est un acteur majeur dans les sonars de la classe Astute, les systèmes de guerre électronique et les senseurs des futurs sous-marins Dreadnought.

Cette continuité industrielle franco-britannique est l'un des aspects les moins connus mais les plus structurants de la filière.

2.4 La doctrine opérationnelle britannique

La doctrine sous-marine du Royaume-Uni repose sur trois piliers.

La dissuasion permanente en mer

Le Royaume-Uni est l'un des deux seuls pays européens à maintenir une dissuasion nucléaire océanique. Cette posture impose :

- une flotte de SSBN dédiée,
- une chaîne logistique robuste,
- une culture opérationnelle centrée sur la permanence et la discrétion.

La projection de puissance

Les SSN britanniques opèrent régulièrement :

- en Atlantique Nord,
- en Méditerranée,
- dans l'océan Indien,
- en soutien des opérations américaines.

Ils escortent les groupes aéronavals, surveillent les sous-marins adverses et mènent des missions de renseignement.

La coopération étroite avec les États-Unis

La Royal Navy entretient une relation unique avec l'US Navy :

- partage technologique (missiles Trident, systèmes de combat),
- entraînement conjoint,
- opérations coordonnées.

Cette coopération renforce la crédibilité de la dissuasion britannique et la performance de ses SSN.

2.5 L'avenir : la classe Dreadnought et les SSN(R)

La classe Dreadnought (SSBN)

Quatre nouveaux sous-marins remplaceront les Vanguard à partir des années 2030. Ils intégreront :

- une nouvelle coque plus silencieuse,
- un compartiment missile commun avec les États-Unis (CMC),
- des systèmes de combat Thales UK.

Le programme SSN(R)

Le futur sous-marin d'attaque britannique, développé avec les États-Unis, remplacera les Astute dans les années 2040. Il intégrera :

- une propulsion plus silencieuse,
- des senseurs avancés,
- une capacité accrue pour les drones sous-marins.

Conclusion

Le Royaume-Uni est l'une des grandes puissances sous-marines mondiales. Sa flotte, son industrie et sa doctrine reposent sur :

- une tradition océanique ancienne,
- une maîtrise complète du nucléaire naval,
- une industrie structurée autour de BAE Systems et Thales UK,
- une coopération stratégique unique avec les États-Unis.

Cette combinaison fait de la Royal Navy l'une des forces sous-marines les plus crédibles et les plus influentes du monde.

Chapitre 3 : La Chine et les sous-marins : l'ascension silencieuse d'une puissance océanique

3.1 Historique

La Chine est devenue en quelques décennies l'un des acteurs majeurs de la scène sous-marine mondiale. Là où l'URSS avait mis près d'un demi-siècle à bâtir une flotte nucléaire crédible, Pékin a accéléré le processus à une vitesse remarquable, portée par une volonté politique inébranlable, une industrialisation massive et une vision stratégique tournée vers la maîtrise de ses approches maritimes et la projection de puissance en Indo-Pacifique. L'histoire sous-marine chinoise commence modestement dans les années 1950, avec l'aide soviétique. Les premiers sous-marins, copies des *Romeo* soviétiques, sont bruyants, lents et technologiquement dépassés. Mais ils permettent à la Chine de se familiariser avec la navigation en plongée, la maintenance des coques et la formation d'équipages. La rupture intervient dans les années 1970, lorsque Pékin décide de développer ses propres sous-marins nucléaires, malgré un isolement technologique presque total. Les premiers *Han* (SSN) et *Xia* (SSBN) sont des plateformes imparfaites, mais elles marquent l'entrée de la Chine dans le club très fermé des nations capables de construire des sous-marins nucléaires.

À partir des années 1990, la modernisation s'accélère. La Chine acquiert des sous-marins russes de classe *Kilo*, qui lui offrent un bond qualitatif en matière de furtivité et de systèmes de combat. Cette acquisition joue un rôle décisif : elle permet aux ingénieurs chinois d'observer de près les standards russes et occidentaux, et d'intégrer ces enseignements dans leurs propres programmes. Les années 2000 voient ainsi émerger les classes *Yuan* et *Song*, premières générations de sous-marins conventionnels réellement modernes conçus en Chine. Dans le domaine nucléaire, les classes *Shang* (SSN) et *Jin* (SSBN) marquent une montée en puissance progressive, tandis que les programmes plus récents — dont les *Type 095* et *Type 096* — témoignent d'une ambition désormais globale.

3.2 Une industrie tentaculaire : la puissance des chantiers chinois

L'industrie sous-marine chinoise repose sur un réseau de chantiers navals gigantesques, dominés par deux groupes : CSIC (China Shipbuilding Industry Corporation) et CSSC (China State Shipbuilding Corporation), désormais fusionnés. Les chantiers de Bohai, spécialisés dans le nucléaire, et ceux de Wuchang ou Jiangnan, dédiés aux sous-marins conventionnels, constituent l'épine dorsale de cette filière.

Cette industrie bénéficie d'un avantage unique : une capacité de production quasi illimitée, soutenue par un financement étatique massif et une planification centralisée. Là où les marines occidentales construisent un ou deux sous-marins par an, la Chine peut en lancer plusieurs simultanément. Cette dynamique permet non seulement de renouveler rapidement la flotte, mais aussi d'expérimenter des architectures nouvelles, d'intégrer des systèmes AIP avancés et de développer des missiles de croisière et balistiques spécifiquement conçus pour les plateformes sous-marines.

La Chine a également investi dans les technologies acoustiques, longtemps considérées comme son point faible. Les progrès réalisés depuis les années 2010 sont significatifs : les nouveaux sous-marins chinois ne rivalisent pas encore avec les standards américains ou japonais, mais ils ont comblé une grande partie du retard qui les séparait des flottes occidentales.

3.3 La flotte actuelle : une force massive en pleine modernisation

En 2026, la Chine dispose d'une flotte impressionnante d'environ soixante-dix sous-marins en service, ce qui en fait l'une des plus grandes flottes sous-marines du monde. Parmi eux, une quinzaine sont des sous-marins nucléaires — répartis entre les SSN de classe *Shang* et les SSBN de classe *Jin* — tandis que plus de cinquante sont des sous-marins conventionnels, principalement des *Yuan*, *Song* et *Kilo* modernisés.

Cette flotte est en pleine transition. Les unités les plus anciennes sont progressivement retirées, tandis que les nouveaux modèles, plus silencieux et mieux armés, entrent en service à un rythme soutenu. Les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins de classe *Jin*, équipés de missiles JL-2, assurent la dissuasion stratégique chinoise, principalement depuis des zones protégées en mer de Chine méridionale. Les sous-marins nucléaires d'attaque de classe *Shang* patrouillent dans le Pacifique occidental, où ils croisent régulièrement les forces américaines et japonaises.

Les sous-marins conventionnels, dotés pour certains de systèmes AIP performants, jouent un rôle essentiel dans la surveillance des détroits, la protection des bases navales et la présence dans les zones contestées, notamment autour de Taïwan et dans les archipels disputés.

3.4 Doctrine opérationnelle : déni d'accès, dissuasion régionale et projection progressive

La doctrine sous-marine chinoise repose sur trois axes principaux. Le premier est le déni d'accès : empêcher les forces américaines et alliées d'opérer librement en mer de Chine méridionale et dans les détroits stratégiques. Les sous-marins chinois, nombreux et bien répartis, constituent un outil idéal pour saturer ces zones et compliquer toute intervention extérieure.

Le deuxième axe est la dissuasion régionale, assurée par les SSBN de classe *Jin*. Contrairement aux États-Unis ou à la Russie, la Chine ne pratique pas encore une dissuasion océanique globale, mais elle cherche à garantir une capacité de seconde frappe crédible dans son environnement immédiat.

Le troisième axe est la projection progressive. Les sous-marins chinois opèrent désormais dans l'océan Indien, participent à des missions lointaines et s'entraînent à des scénarios de haute intensité. Pékin ne se contente plus de défendre ses approches : il prépare une marine capable d'agir loin de ses bases, en soutien de ses ambitions géopolitiques.

Conclusion

La Chine est devenue en quelques décennies une puissance sous-marine majeure. Sa flotte, forte d'environ soixante-dix sous-marins en 2026, combine une masse impressionnante, une modernisation rapide et une doctrine tournée vers la contestation de la présence américaine en Indo-Pacifique. Soutenue par une industrie tentaculaire et une volonté politique affirmée, la marine chinoise poursuit une trajectoire ascendante qui redessine l'équilibre stratégique de la région et, de plus en plus, celui du monde.

Chapitre 4 : L'Allemagne et les sous-marins: une tradition navale, industrielle et exportatrice

L'histoire sous-marine allemande est l'une des plus riches et des plus influentes du monde naval. Elle s'étend sur plus d'un siècle, traverse deux guerres mondiales, renaît sous la tutelle de l'OTAN, puis s'impose comme un modèle industriel et opérationnel dans le domaine du sous-marin conventionnel. Contrairement à d'autres nations qui ont privilégié la projection océanique ou la dissuasion nucléaire, l'Allemagne a développé une expertise singulière : celle du sous-marin compact, discret, parfaitement adapté aux environnements littoraux complexes. Cette spécialisation, née des contraintes géographiques de la mer Baltique et de la mer du Nord, a façonné une flotte, une doctrine et une industrie dont l'influence dépasse largement les frontières européennes.

4.1 Héritage des U-Boote : une culture opérationnelle fondatrice

L'aventure sous-marine allemande commence au début du XX^e siècle, lorsque la Kaiserliche Marine adopte ses premiers U-Boote. Dès la Première Guerre mondiale, ces unités démontrent leur efficacité dans la guerre de course, frappant les lignes de ravitaillement alliées avec une audace et une endurance qui marquent durablement les esprits. Les équipages développent une culture de la patience, de la discrétion et de la navigation en eaux difficiles, qui deviendra l'un des piliers de l'identité sous-marine allemande.

La Seconde Guerre mondiale amplifie cette dynamique. Les types VII et IX deviennent les symboles d'une guerre sous-marine massive, tandis que le type XXI, conçu trop tard pour influencer sur le conflit, introduit des innovations majeures : vitesse élevée en plongée, coque optimisée pour l'immersion, batteries de grande capacité. Ce modèle inspirera directement les sous-marins d'après-guerre, en Allemagne comme ailleurs.

Après 1945, l'Allemagne est privée de flotte sous-marine. Mais l'expérience accumulée, les bureaux d'études et les compétences humaines ne disparaissent pas. Lorsque la Bundesmarine renaît en 1955, elle hérite d'un savoir-faire latent, prêt à être réactivé.

4.2 La renaissance sous-marine de la Bundesmarine : une flotte littorale dédiée à l'OTAN

La nouvelle marine allemande s'inscrit dans un contexte stratégique très différent : celui de la guerre froide. L'OTAN confie à l'Allemagne de l'Ouest une mission essentielle : surveiller et contrôler les approches de la Baltique, un espace maritime peu profond, encombré, acoustiquement difficile. Cette mission impose des sous-marins compacts, silencieux, capables de manœuvrer dans des eaux resserrées et de se fondre dans un environnement complexe.

Les premières générations : types 201, 202 et 205

Les types 201 et 202 inaugurent une innovation majeure : l'utilisation d'aciers non magnétiques pour réduire la vulnérabilité aux mines et aux détecteurs magnétiques. Bien que ces premières séries rencontrent des difficultés techniques, elles posent les bases d'une philosophie de conception centrée sur la discrétion et la compacité.

Le type 205, mis en service dans les années 1960, marque une étape plus aboutie. Ces sous-marins, d'environ 450 tonnes, sont parfaitement adaptés aux eaux de la Baltique. Leur faible tirant d'eau, leur manœuvrabilité et leur signature réduite en font des outils redoutables pour la surveillance et l'interdiction littorale.

Le type 206 : la maturité opérationnelle

Le véritable saut qualitatif intervient avec le type 206, mis en service à partir de 1973. Plus robustes, plus fiables, dotés d'une électronique modernisée, ces sous-marins deviennent la colonne vertébrale de la flotte allemande pendant plus de trente ans. Leur version modernisée, le 206A, prolonge leur carrière jusqu'au début des années 2000.

Les marins allemands gardent un souvenir fort de ces unités : rustiques mais efficaces, exigeantes mais fiables, elles ont formé plusieurs générations d'équipages à la navigation silencieuse, à la chasse sous-marine en eaux confinées et à la coopération OTAN. Leur maniabilité exceptionnelle en fait des adversaires redoutés lors des exercices internationaux.

4.3 L'industrie allemande : un écosystème cohérent et performant

L'une des forces majeures de l'Allemagne réside dans son industrie navale, structurée autour de pôles spécialisés et d'une intégration verticale remarquable.

HDW Kiel : le cœur de la construction sous-marine

Le chantier Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW), basé à Kiel, est le centre historique de la construction sous-marine allemande. C'est là que sont assemblés la plupart des sous-marins allemands depuis les années 1960. HDW développe une expertise unique dans la fabrication modulaire, l'intégration de systèmes complexes et la maîtrise des signatures acoustiques.

Lübeck et les chantiers associés

Lübeck et les chantiers associés : à Lübeck, Flender Werft contribue à la fabrication de modules et de sections de coque, tandis que l'IKL (Ingenieurkontor Lübeck), bureau d'études fondamental dans l'histoire du sous-marin allemand, assure la conception et l'ingénierie des unités non nucléaires. Cette

complémentarité entre production et architecture navale permet une montée en cadence efficace et une spécialisation claire des sites.

ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS)

Au début des années 2000, la consolidation industrielle aboutit à la création de ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS), qui regroupe HDW, les chantiers associés et les compétences de Thyssen. TKMS devient alors l'un des leaders mondiaux du sous-marin conventionnel, capable de proposer des plateformes complètes, du design initial à l'intégration des systèmes de combat.

Atlas Elektronik : le cerveau des sous-marins

Atlas Elektronik, héritier de Krupp-Atlas, est le spécialiste allemand des sonars, senseurs, calculateurs de tir et systèmes de combat. Ses produits équipent non seulement les sous-marins allemands, mais aussi une grande partie des unités exportées. L'intégration étroite entre TKMS et Atlas Elektronik permet une cohérence technique rare dans le domaine naval.

4.4 L'âge moderne : la montée en puissance de la flotte allemande

À partir des années 1990, la Bundesmarine entre dans une nouvelle ère. La fin de la guerre froide, l'évolution des missions OTAN et les progrès technologiques conduisent à une modernisation profonde de la flotte.

Le type 212A : la référence nationale

Le type 212A devient le pilier de la flotte allemande. Conçu spécifiquement pour les besoins de la Bundesmarine, il combine une propulsion anaérobie (AIP) à pile à combustible, une coque en acier non magnétique et une signature acoustique extrêmement faible. Ces qualités en font un outil idéal pour les missions de surveillance, de lutte anti-sous-marine, d'opérations spéciales et de renseignement dans les mers du Nord et Baltique. L'Italie adopte une version dérivée, construite en coopération avec Fincantieri, illustrant la capacité allemande à travailler en partenariat européen.

Le futur : le type 212CD

Le programme 212CD, développé conjointement avec la Norvège, représente la prochaine étape. Plus grand, doté d'une endurance accrue et d'une furtivité renforcée, il est pensé pour des opérations prolongées dans l'Atlantique Nord. Il marque l'ambition allemande de conserver une flotte conventionnelle parmi les plus avancées au monde.

4.5 Les succès à l'exportation : une domination mondiale

L'Allemagne est aujourd'hui le premier exportateur mondial de sous-marins conventionnels. Cette réussite repose sur une combinaison de fiabilité, de modularité, de coûts maîtrisés et d'une capacité unique à adapter les plateformes aux besoins des marines clientes.

Le type 209 : le best-seller absolu

Conçu dans les années 1970, le type 209 est devenu un standard mondial : plus de 60 unités vendues dans 14 pays. Décliné en plusieurs versions (209/1100, 209/1200, 209/1400), il a été construit sous licence en Turquie, en Corée du Sud ou en Grèce. Sa robustesse, sa simplicité d'entretien et sa modularité en font encore aujourd'hui la colonne vertébrale de nombreuses marines.

Le type 214 : la montée en gamme export

Le type 214, apparu dans les années 2000, transpose les innovations du 212A dans une plateforme destinée à l'export. Plus grand, doté d'une autonomie accrue et d'un AIP performant, il répond aux besoins de marines opérant en environnement océanique. La Grèce, la Turquie, la Corée du Sud et le Portugal en sont équipés. Le 214 s'est imposé comme un sous-marin polyvalent, capable de missions lointaines et de surveillance discrète.

Le type 218SG : la customisation poussée

Le type 218SG, développé pour Singapour, illustre la capacité allemande à concevoir des plateformes sur mesure. Adapté aux eaux tropicales, doté d'une électronique avancée et d'une endurance prolongée, il représente l'un des sous-marins conventionnels les plus modernes du monde. Sa conception modulaire permet d'intégrer des systèmes spécifiques demandés par la marine singapourienne, notamment en matière de renseignement et de lutte anti-sous-marin.

Les raisons structurelles du succès allemand

La domination allemande s'explique par plusieurs facteurs :

- une philosophie de conception centrée sur la discrétion, la compacité et la fiabilité ;
- une industrie intégrée (TKMS, HDW, Atlas Elektronik) maîtrisant toute la chaîne, du design au système de combat ;
- une stratégie commerciale pragmatique, ouverte aux constructions sous licence ;
- une capacité à adapter les plateformes aux doctrines nationales.

Un impact mondial durable

Des Amériques à l'Asie, en passant par l'Europe et le Moyen-Orient, les sous-marins allemands ont façonné des générations de marines. Le type 209 a servi de cas d'école pour des dizaines d'équipages, tandis que les types 214 et 218SG incarnent aujourd'hui le haut de gamme du conventionnel. L'influence allemande dans le domaine du sous-marin non nucléaire est aujourd'hui incontestable.

4.6 La flotte sous-marine allemande aujourd'hui et sa doctrine opérationnelle

La Deutsche Marine dispose aujourd'hui d'une flotte sous-marine compacte mais technologiquement très avancée. Héritière d'une longue tradition d'opérations en mer Baltique, elle a progressivement adapté sa doctrine aux exigences contemporaines : coopération OTAN, surveillance des approches maritimes, lutte anti-sous-marin en environnement complexe et contribution aux opérations de sécurité maritime en Europe du Nord. Contrairement aux grandes marines océaniques, l'Allemagne privilégie une flotte réduite, hautement spécialisée, centrée sur la discrétion, la réactivité et l'intégration dans les réseaux alliés.

Une flotte resserrée mais à très forte valeur opérationnelle

Depuis le retrait des derniers types 206A, la flotte allemande repose exclusivement sur les sous-marins de type 212A, considérés comme l'un des meilleurs modèles conventionnels au monde. Leur propulsion anaérobie (AIP) leur permet de rester en plongée prolongée, un atout majeur dans les eaux peu profondes et acoustiquement difficiles de la Baltique.

Ces unités sont conçues pour opérer en silence, se faufiler dans les détroits, surveiller les mouvements adverses et mener des opérations spéciales. Leur taille modeste, leur manœuvrabilité et leur signature extrêmement faible en font des plateformes redoutables dans les environnements littoraux, là où les sous-marins plus volumineux perdent en efficacité.

Doctrine opérationnelle : discrétion, coopération et maîtrise des eaux du Nord

La doctrine allemande repose sur trois piliers :

La maîtrise des approches de la Baltique et de la mer du Nord

La Baltique est un espace stratégique : peu profonde, encombrée, bordée par plusieurs États membres de l'OTAN et par la Russie. Les sous-marins allemands y jouent un rôle essentiel de surveillance, de dissuasion conventionnelle et de contrôle des détroits (Kattegat, Skagerrak, Sund).

L'intégration OTAN

Les sous-marins allemands participent régulièrement aux exercices OTAN de lutte anti-sous-marine, où leur discrétion extrême en fait des adversaires très recherchés pour l'entraînement des forces alliées. Ils contribuent également à la surveillance des câbles sous-marins, des routes énergétiques et des zones d'intérêt stratégique en mer du Nord.

Les opérations spéciales et le renseignement

Grâce à leur faible signature acoustique, les 212A sont particulièrement adaptés aux missions de renseignement côtier, de recueil d'informations électromagnétiques et de déploiement discret de nageurs de combat. Ces missions, rarement médiatisées, constituent une part importante de leur activité réelle.

Les sous-marins en service

En 2026, la flotte allemande comprend **six sous-marins de type 212A**, répartis en deux lots successifs :

Type 212A – Première série

- **U31** – Entré en service en 2005
- **U32** – 2006
- **U33** – 2007
- **U34** – 2008

Type 212A – Deuxième série (212A Batch 2)

- **U35** – 2015
- **U36** – 2016

Les sous-marins prévus : le programme 212CD

L'avenir de la flotte allemande repose sur le programme 212CD (Common Design), développé conjointement avec la Norvège. Il vise à remplacer progressivement les 212A les plus anciens et à renforcer la capacité opérationnelle de la Deutsche Marine.

Unités prévues pour l'Allemagne :

- **U37** – Livraison prévue autour de 2030

- **U38** – Livraison prévue autour de 2032

La Norvège recevra quatre unités supplémentaires, ce qui permettra une interopérabilité étroite entre les deux marines, notamment dans les zones arctiques et subarctiques.

Chapitre 5 : Les Pays-Bas et les sous-marins : une tradition discrète mais solide

5.1 Historique

L'histoire sous-marine des Pays-Bas est moins médiatisée que celle des grandes puissances navales, mais elle n'en demeure pas moins riche, cohérente et marquée par une continuité remarquable. Dès le début du XX^e siècle, la Koninklijke Marine comprend l'intérêt stratégique du sous-marin pour la défense d'un pays doté d'un littoral étendu, de voies maritimes vitales et d'un empire colonial alors très dispersé. Les premiers bâtiments néerlandais sont mis en service avant la Première Guerre mondiale, et la flotte se développe progressivement, avec des unités opérant aussi bien dans les eaux européennes que dans les Indes néerlandaises.

Durant la Seconde Guerre mondiale, plusieurs sous-marins néerlandais se distinguent dans le Pacifique, opérant aux côtés des forces alliées. Après 1945, la reconstruction de la flotte s'inscrit dans le cadre de l'OTAN : les Pays-Bas deviennent un contributeur régulier aux opérations de surveillance en mer du Nord, en Atlantique Nord et en Méditerranée. Les années 1960 et 1970 voient l'arrivée des classes Dolfijn et Zwaardvis, qui modernisent profondément la force sous-marine néerlandaise et préparent la transition vers une génération plus ambitieuse.

5.2 Un écosystème industriel national : RDM et HSA

La construction sous-marine néerlandaise repose historiquement sur un duo industriel solide.

RDM : le constructeur historique

Le chantier Rotterdamsche Droogdok Maatschappij (RDM), fondé en 1902, est le cœur de la construction navale militaire néerlandaise. Il construit au total 18 sous-marins au cours de son existence, dont les classes Zwaardvis et Walrus. RDM développe une expertise reconnue dans les coques résistantes, l'intégration des systèmes de propulsion diesel-électrique et la construction modulaire. Jusqu'à sa disparition en 1996, il demeure l'acteur central de la filière sous-marine néerlandaise.

HSA : du groupe Philips à Thales

À côté de RDM, l'autre pilier est Hollandse Signaalapparaten (HSA), filiale du groupe Philips. HSA devient rapidement un acteur majeur dans les radars, sonars et systèmes de conduite de combat. Ses technologies équipent non seulement les sous-marins néerlandais, mais aussi de nombreuses marines étrangères. Intégrée progressivement dans le groupe Thales, cette entité se consacre aujourd'hui exclusivement aux systèmes de combat de bâtiments de surface.

Une ingénierie "délocalisée" pour contourner les restrictions d'après-guerre

Dans les années qui suivent 1945, l'Allemagne de l'Ouest est juridiquement empêchée de concevoir ou de construire des sous-marins. Pourtant, la continuité du savoir-faire technique allemand ne disparaît pas : elle

se recompose discrètement autour de partenariats industriels étrangers. Parmi eux, Hollandse Signaalapparaten (HSA) joue un rôle clé. Officiellement spécialisée dans les radars et les systèmes de conduite de tir, la filiale de Philips sert aussi de plateforme d'accueil pour des ingénieurs allemands issus de l'ancienne industrie sous-marine.

Cette coopération permet de maintenir vivants des domaines critiques : architecture de coque, intégration des senseurs, calcul de tir, acoustique sous-marine. Plusieurs travaux préliminaires liés aux futurs sous-marins allemands — notamment ceux qui aboutiront aux types 201 et 205 — sont ainsi menés sous couvert d'activités électroniques au sein de HSA, avant d'être réintégrés dans les bureaux d'études allemands lorsque les restrictions sont levées en 1955.

Ce dispositif, parfaitement légal mais volontairement discret, a joué un rôle déterminant dans la renaissance rapide de la filière sous-marine allemande au sein de la Bundesmarine et de HDW.

5.3 La flotte néerlandaise

La flotte actuelle : la classe Walrus

Depuis les années 1990, la Koninklijke Marine opère exclusivement la classe Walrus, conçue par RDM et mise en service entre 1990 et 1994. Ces sous-marins diesel-électriques de 2 800 tonnes en plongée sont réputés pour leur endurance, leur discrétion et leur polyvalence. Ils ont été engagés dans des missions OTAN en Atlantique Nord, en Méditerranée, ainsi que dans des opérations de lutte contre le trafic de drogue dans les Caraïbes.

Vers la relève : le programme Orka

Les Pays-Bas ont lancé le programme RNSC (Replacement Netherlands Submarine Capability) pour remplacer la classe Walrus. Le futur programme Orka, attribué à Naval Group avec Thales comme partenaire sonar, doit fournir une nouvelle génération de sous-marins océaniques, plus endurants et mieux adaptés aux missions de renseignement et aux opérations spéciales. Ces unités marqueront le retour des Pays-Bas dans la construction sous-marine de pointe, en s'appuyant sur l'héritage de RDM et sur l'expertise technologique de Thales.

Chapitre 6 : La Suède et les sous-marins : une école d'ingénierie unique au monde

La Suède occupe une place singulière dans le paysage sous-marin mondial. Nation non alignée durant la guerre froide, dotée d'un littoral complexe et d'un environnement maritime parmi les plus exigeants d'Europe, elle a développé une approche très spécifique du sous-marin conventionnel. Ses unités sont conçues pour opérer dans les eaux froides, peu profondes et acoustiquement difficiles de la mer Baltique, où la discrétion, la manœuvrabilité et la capacité à se fondre dans un environnement saturé de bruits naturels sont essentielles. Cette spécialisation a donné naissance à une véritable « école suédoise » du sous-marin, reconnue pour son innovation, sa compacité et son audace technologique.

6.1 Un siècle d'histoire sous-marine

La Suède met en service son premier sous-marin, le *Hajen*, en 1904. Dès les années 1930, elle développe une flotte cohérente, adaptée à la défense côtière et à la surveillance de la Baltique. Pendant la guerre froide, les sous-marins suédois jouent un rôle crucial dans la détection des intrusions soviétiques, un enjeu majeur dans une région où les incursions sous-marines sont fréquentes.

Les classes *Draken*, *Sjöormen* puis *Näcken* marquent des étapes importantes : amélioration de la furtivité, optimisation pour les eaux littorales, introduction de systèmes de propulsion innovants. La Suède devient l'un des rares pays capables de concevoir et de construire ses sous-marins de manière totalement autonome.

6.2 Kockums : le cœur industriel suédois

L'industrie sous-marine suédoise repose principalement sur Kockums, chantier naval fondé à Malmö au XIX^e siècle. Kockums développe une expertise unique dans les coques compactes, les systèmes de propulsion silencieux et les solutions adaptées aux environnements littoraux.

La propulsion anaérobie (AIP) : une révolution suédoise

Dans les années 1980, Kockums introduit la propulsion Stirling AIP, permettant aux sous-marins de rester en plongée plusieurs semaines sans remonter à l'immersion périscopique. Cette innovation équipe la classe *Gotland*, mise en service dans les années 1990, et devient un standard mondial du conventionnel avancé.

Coopération et tensions : Kockums et HDW

Dans les années 1990, Kockums est racheté par l'allemand **HDW**, futur cœur de TKMS. Cette coopération germano-suédoise vise à mutualiser les savoir-faire :

- expertise suédoise en AIP et en opérations littorales,
- expertise allemande en construction modulaire et systèmes de combat.

Cependant, la relation se tend au fil du temps. La Suède estime que certains développements stratégiques sont priorisés pour les programmes allemands, au détriment de ses propres besoins. En 2014, après un bras de fer politique et industriel, Kockums est finalement racheté par Saab, redevenant un acteur national à part entière sous le nom de Saab Kockums. Cette reprise marque la volonté de Stockholm de préserver une autonomie stratégique totale dans le domaine sous-marin.

Le succès australien : la classe Collins

L'un des plus grands succès internationaux de Kockums est la classe *Collins*, développée pour la Royal Australian Navy dans les années 1990. Ces sous-marins océaniques, dérivés du design suédois mais considérablement agrandis, sont adaptés aux vastes distances du Pacifique et aux missions de longue durée. Ce programme a démontré la capacité de Kockums à concevoir des plateformes sur mesure, bien au-delà de son environnement baltique d'origine.

6.3 La flotte actuelle : Gotland et A26 Blekinge

La Suède opère aujourd'hui une flotte moderne et cohérente, centrée sur la classe *Gotland*, dont trois unités ont été profondément modernisées (programme Mid-Life Upgrade).

Ces sous-marins, dotés d'un AIP amélioré et d'une électronique modernisée, restent parmi les plus discrets au monde. Leur performance a été démontrée lors d'exercices internationaux, notamment lorsqu'un Gotland a « coulé » un porte-avions américain lors d'un exercice en 2005, illustrant l'efficacité des sous-marins littoraux contre des groupes aéronavals.

La prochaine génération, la classe A26 Blekinge, actuellement en construction, représente l'avenir de la flotte suédoise. Conçue pour les opérations littorales et océaniques, elle intègre un AIP de nouvelle génération, une signature acoustique encore réduite et une capacité avancée pour les opérations spéciales.

Chapitre 7 : La Norvège et les sous-marins : la sentinelle silencieuse de l'Arctique

La Norvège possède l'une des traditions sous-marines les plus discrètes mais les plus essentielles d'Europe. Sa géographie, faite de fjords profonds, de côtes déchiquetées et de vastes espaces arctiques, a façonné une marine tournée vers la surveillance, la dissuasion locale et la protection de ses ressources énergétiques. Dès les années 1960, Oslo comprend que les sous-marins sont l'outil idéal pour opérer dans ces eaux complexes, où la furtivité et la connaissance du milieu comptent autant que la puissance brute. Les premières générations, issues de coopérations avec l'Allemagne, permettent à la Norvège de développer une expertise solide dans l'emploi de sous-marins compacts, silencieux et parfaitement adaptés aux environnements littoraux.

Cette logique se poursuit au fil des décennies, portée par une industrie étroitement liée à l'Allemagne et par une culture opérationnelle exigeante. Les sous-marins norvégiens sont conçus pour se fondre dans les reliefs sous-marins, surveiller les mouvements russes en mer de Barents et protéger les infrastructures énergétiques qui constituent la richesse du pays. La Norvège n'a jamais cherché la quantité : elle privilégie la qualité, la modernité et la parfaite connaissance de son théâtre d'opérations.

En 2026, la flotte norvégienne compte six sous-marins en service, principalement issus des classes *Ula* et *Type 212CD*. Les *Ula*, malgré leur âge, restent remarquablement efficaces grâce à une modernisation continue et à une discrétion acoustique exceptionnelle. Les nouveaux *212CD*, développés en coopération avec l'Allemagne, incarnent la nouvelle génération : plus grands, plus durables et dotés de capteurs de pointe, ils offrent à Oslo une capacité accrue de surveillance et de dissuasion dans l'Arctique. Cette flotte compacte, parfaitement entretenue et servie par des équipages très expérimentés, constitue l'un des outils les plus fiables de la défense norvégienne.

La doctrine norvégienne repose sur la surveillance permanente des approches arctiques, la protection des champs gaziers et pétroliers, et la capacité à suivre discrètement les mouvements russes dans les zones sensibles. Les sous-marins jouent un rôle central dans cette stratégie, car ils permettent à la Norvège de compenser la modestie de sa flotte de surface par une présence invisible mais constante. Ils participent également aux opérations de l'OTAN, où leur connaissance unique des eaux froides et des reliefs arctiques est particulièrement appréciée.

La Norvège n'a pas d'ambitions exportatrices dans le domaine sous-marin, mais elle joue un rôle clé dans le développement européen, notamment à travers sa coopération étroite avec l'Allemagne sur les *212CD*. Cette collaboration renforce l'interopérabilité au sein de l'OTAN et contribue à maintenir en Europe une filière de sous-marins conventionnels de très haut niveau.

En 2026, la Norvège demeure ainsi une puissance sous-marine discrète mais essentielle, dont les capacités, bien que limitées en nombre, jouent un rôle stratégique majeur dans l'équilibre de l'Arctique et dans la surveillance des activités russes au nord du continent.

Chapitre 8 : L'Espagne et les sous-marins : une ambition contrariée mais persistante

8.1 Historique

L'histoire sous-marine de l'Espagne est marquée par une alternance de phases d'audace technologique, de longues périodes de stagnation et d'un effort constant pour maintenir une capacité nationale dans un domaine où peu de pays européens ont réussi à rester autonomes. Dès le début du XX^e siècle, l'Espagne s'intéresse au sous-marin comme outil de défense côtière et de contrôle de ses approches maritimes. Les premiers bâtiments, mis en service avant la guerre civile, sont modestes mais témoignent d'une volonté d'innovation. Après 1945, la reconstruction de la marine se fait sous forte influence américaine, avec l'acquisition de sous-marins d'occasion qui permettent de maintenir une compétence opérationnelle minimale.

C'est dans les années 1960 et 1970 que l'Espagne franchit un cap décisif grâce à la coopération avec la France. Les classes Daphné et Agosta, construites sous licence, donnent naissance à une véritable école espagnole du sous-marin. Les chantiers de Cartagena, futurs Navantia, acquièrent alors une maîtrise industrielle qui leur permet d'envisager, à terme, la conception de leurs propres unités. Cette période constitue le socle sur lequel reposera l'ambition du programme S-80, lancé plusieurs décennies plus tard.

8.2 Une industrie en quête d'autonomie : Navantia et le pari du S-80

L'industrie sous-marine espagnole est aujourd'hui dominée par Navantia, héritier des chantiers publics Bazán. L'entreprise a longtemps travaillé sous licence étrangère, mais elle a progressivement développé ses propres capacités d'ingénierie. Le programme S-80 représente l'aboutissement — et en même temps l'épreuve — de cette ambition.

Conçu comme le premier sous-marin entièrement espagnol, le S-80 devait initialement être une plateforme compacte, dotée d'un système AIP avancé et d'une autonomie accrue. Mais le programme a rapidement rencontré des difficultés majeures : erreurs de calcul de flottabilité, retards dans le développement de l'AIP, surcoûts massifs. Pour corriger ces problèmes, l'Espagne a dû faire appel à l'expertise américaine, notamment à General Dynamics Electric Boat, qui a contribué à la redéfinition de la coque et à la validation des calculs de stabilité. Cette coopération, parfois présentée comme un partenariat, reflète en réalité la dépendance technique persistante de l'Espagne dans certains domaines critiques.

Malgré ces obstacles, le S-80 est devenu un symbole de résilience industrielle. Les premières unités, désormais en service ou en achèvement, marquent une étape importante dans la quête d'autonomie technologique de Navantia.

8.3 La flotte actuelle : une force réduite mais modernisée

En 2026, la flotte sous-marine espagnole est l'une des plus petites d'Europe occidentale, mais elle reste opérationnelle et en cours de renouvellement. Elle compte trois sous-marins en service, tous de la classe Agosta modernisée ou issus de la transition vers le S-80.

Le premier S-80, le *Isaac Peral*, livré à la marine espagnole en novembre 2023 après une longue campagne d'essais, a progressivement atteint sa pleine capacité opérationnelle au cours de l'année suivante. Son entrée en service marque un tournant pour la flotte espagnole, qui voit enfin se concrétiser un programme longtemps retardé et devenu emblématique de la volonté nationale d'autonomie technologique.

Cette flotte réduite impose une gestion extrêmement fine des périodes d'entretien et de disponibilité. L'Espagne ne peut maintenir qu'un ou deux sous-marins en mer à un instant donné, ce qui limite sa capacité de présence continue mais lui permet néanmoins de conserver un savoir-faire opérationnel précieux.

8.4 Doctrine opérationnelle : défense côtière, Méditerranée et OTAN

La doctrine sous-marine espagnole est pragmatique et centrée sur trois axes. Le premier est la défense des approches maritimes, en particulier dans les zones sensibles du détroit de Gibraltar et de la Méditerranée occidentale. Les sous-marins espagnols y jouent un rôle de surveillance, de dissuasion locale et de contrôle discret des flux maritimes.

Le deuxième axe est la participation aux opérations de l'OTAN. Bien que la flotte soit modeste, l'Espagne contribue régulièrement aux missions de patrouille et d'entraînement alliées, ce qui lui permet de maintenir un niveau d'interopérabilité élevé et de bénéficier des retours d'expérience des grandes marines européennes.

Le troisième axe est la projection limitée, principalement dans le cadre d'exercices internationaux ou de missions de présence. Les sous-marins espagnols ne sont pas conçus pour des opérations océaniques prolongées, mais ils peuvent opérer ponctuellement en Atlantique ou en Méditerranée orientale.

Conclusion

L'Espagne n'est pas une grande puissance sous-marine, mais elle a su préserver une capacité nationale dans un domaine où la plupart des pays européens ont renoncé. Sa flotte, réduite mais modernisée, repose sur un équilibre délicat entre héritage français, assistance américaine et ambition industrielle propre. Le programme S-80, malgré ses difficultés, témoigne de la volonté de Madrid de maintenir une autonomie stratégique minimale et de continuer à jouer un rôle crédible au sein de l'OTAN et en Méditerranée. En 2026, avec seulement trois sous-marins opérationnels, l'Espagne reste un acteur modeste mais déterminé, dont la persévérance industrielle mérite d'être soulignée.

Chapitre 9 : L'Italie et les sous-marins : une tradition discrète, une maîtrise solide

L'Italie occupe une place singulière dans le paysage sous-marin européen. Sans disposer de l'ampleur industrielle de la France ou de l'Allemagne, elle a pourtant développé une tradition technique robuste, marquée par une grande maîtrise des sous-marins conventionnels et par une capacité d'innovation qui

remonte aux années 1930. Les premières unités italiennes, engagées durant la Seconde Guerre mondiale, étaient nombreuses mais technologiquement inégales. Après 1945, la marine italienne se reconstruit lentement, d'abord avec des sous-marins américains d'occasion, puis en renouant progressivement avec une production nationale.

C'est dans les années 1960 et 1970 que l'Italie retrouve une véritable autonomie industrielle. Les chantiers de Fincantieri, héritiers d'une longue tradition navale, modernisent leurs capacités et s'associent à l'Allemagne pour produire sous licence les classes Type 212A, qui deviendront la base de la flotte italienne contemporaine. Cette coopération germano-italienne, l'une des plus réussies en Europe, permet à Rome de disposer de sous-marins modernes, silencieux et parfaitement adaptés aux opérations en Méditerranée.

9.1 Une industrie structurée autour de Fincantieri

L'industrie sous-marine italienne repose presque entièrement sur Fincantieri, l'un des plus grands chantiers navals d'Europe. L'entreprise maîtrise la construction de sous-marins conventionnels, l'intégration des systèmes de combat et la maintenance lourde. Elle a également développé une expertise reconnue dans les systèmes AIP, en partenariat avec l'Allemagne, ainsi que dans l'intégration de senseurs avancés adaptés aux environnements littoraux complexes de la Méditerranée.

À côté de ce pilier industriel, l'Italie s'appuie aussi sur un savoir-faire historique dans le domaine de la torpillerie. L'ancienne WASS — héritière directe de Whitehead, pionnier de la torpille moderne — a été intégrée au groupe Leonardo, qui poursuit aujourd'hui le développement des torpilles lourdes et légères italiennes, dont la Black Shark Advanced. Cette compétence nationale s'exprime également au sein du consortium EuroTorp, où l'Italie joue un rôle clé dans la conception et la production de la torpille légère MU90, largement adoptée en Europe.

EUROTORP est un groupement européen (GEIE) réunissant Thales, Naval Group et l'italien Whitehead Alenia Sistemi Subacquei, créé pour assurer le développement, la production et la commercialisation de la torpille légère MU90, devenue la référence européenne en matière d'armement anti-sous-marin.

Cette constellation industrielle, plus modeste que celle de ses voisins du nord mais remarquablement cohérente, permet à l'Italie de produire des sous-marins fiables, silencieux et parfaitement adaptés à ses besoins. Le pays n'a jamais cherché à développer une filière nucléaire, préférant concentrer ses ressources sur des plateformes conventionnelles de haute qualité, capables d'opérer longtemps en immersion grâce à des systèmes AIP performants et à une électronique embarquée de premier plan.

9.2 La flotte actuelle : une force compacte mais très moderne

En 2026, la marine italienne aligne six sous-marins en service, tous de conception allemande ou germano-italienne. Les quatre premiers appartiennent à la classe Sauro (*Illustration*), modernisée mais vieillissante, tandis que les deux plus récents sont des Type 212A, considérés comme parmi les sous-marins conventionnels les plus silencieux au monde. Deux autres unités de nouvelle génération, dérivées du 212A,



sont en construction ou en essais, ce qui permettra à l'Italie de maintenir une flotte de six sous-marins pleinement opérationnels dans les années à venir.

Cette force compacte impose une gestion rigoureuse des cycles d'entretien, mais elle offre à la marine italienne une capacité de présence continue en Méditerranée. Les sous-marins italiens sont réputés pour leur discrétion, leur endurance et leur aptitude à opérer dans des environnements littoraux complexes, où la densité du trafic maritime et la variabilité des fonds exigent une grande finesse acoustique.

9.3 Doctrine opérationnelle : Méditerranée, OTAN et contrôle des approches

La doctrine sous-marine italienne est profondément ancrée dans la géographie. La Méditerranée, mer semi-fermée aux fonds irréguliers, constitue un environnement exigeant où les sous-marins jouent un rôle essentiel de surveillance, de dissuasion locale et de contrôle des approches maritimes. Les unités italiennes patrouillent régulièrement dans le canal de Sicile, dans le golfe de Tarente et dans les zones sensibles proches de la Libye ou de la Tunisie, où les flux migratoires, les trafics et les tensions régionales imposent une vigilance constante.

L'Italie joue également un rôle actif au sein de l'OTAN. Ses sous-marins participent aux exercices alliés, aux missions de surveillance en Méditerranée orientale et aux opérations de lutte anti-sous-marine dans l'Atlantique, même si ces déploiements restent ponctuels. Cette participation permet à la marine italienne de maintenir un haut niveau d'interopérabilité et de bénéficier des retours d'expérience des grandes marines européennes et américaines.

Enfin, les sous-marins italiens contribuent à la protection des infrastructures critiques, notamment les câbles sous-marins et les pipelines énergétiques qui traversent la Méditerranée. Dans un contexte de tensions croissantes autour de ces infrastructures, leur rôle discret mais essentiel prend une importance stratégique nouvelle.

Conclusion

L'Italie ne cherche pas à rivaliser avec les grandes puissances sous-marines, mais elle a su construire une flotte cohérente, moderne et parfaitement adaptée à son environnement stratégique. Avec six sous-marins en service en 2026, elle dispose d'une force compacte mais redoutablement efficace, soutenue par une industrie solide et par une doctrine centrée sur la Méditerranée et l'OTAN. Cette combinaison, fondée sur la maîtrise technique plutôt que sur la quantité, permet à Rome de jouer un rôle crédible dans la sécurité régionale et de maintenir une présence sous-marine qui compte dans l'équilibre stratégique de la Méditerranée.

Chapitre 10 : La Russie et les sous-marins : une puissance des profondeurs façonnée par l'histoire, la géographie et la stratégie

La Russie occupe une place singulière dans l'histoire mondiale des sous-marins. Héritière directe de l'Union soviétique, elle a développé une culture sous-marine marquée par l'immensité de ses espaces maritimes, la rivalité stratégique avec les États-Unis et une tradition d'ingénierie audacieuse, parfois risquée, mais toujours inventive. Là où les marines occidentales ont privilégié la standardisation et la fiabilité, la Russie a souvent misé sur la puissance brute, la profondeur d'immersion, la vitesse et des architectures radicales.

Cette approche a donné naissance à certaines des plateformes les plus impressionnantes — et parfois les plus inquiétantes — jamais construites.

10.1 Un siècle d'histoire sous-marine

L'aventure russe commence au début du XX^e siècle, mais c'est véritablement après 1945 que l'URSS devient une puissance sous-marine majeure. La guerre froide transforme les océans en un immense échiquier où les sous-marins soviétiques doivent suivre, traquer et parfois défier les groupes aéronavals américains. Les premières générations, bruyantes et peu fiables, laissent rapidement place à des classes plus ambitieuses : les *November*, *Victor*, *Charlie* ou *Echo* marquent les débuts d'une flotte nucléaire en pleine expansion.

Dans les années 1970 et 1980, l'URSS franchit un cap spectaculaire. Les classes *Alfa*, dotées d'une coque en titane et capables d'atteindre des vitesses inégalées, deviennent un symbole de l'ingénierie soviétique. Les *Typhoon*, monstres d'acier de plus de 170 mètres de long, incarnent la dissuasion nucléaire la plus massive jamais mise à flot. Les *Akula* et *Oscar* affinent encore la furtivité et la puissance de feu, tandis que les *Kilo* diesel-électriques s'imposent comme des références mondiales pour les opérations littorales.

L'effondrement de l'URSS en 1991 plonge la flotte dans une crise profonde. Les budgets s'effondrent, les chantiers navals se vident, et plusieurs accidents — dont le drame du *Koursk* en 2000 — révèlent l'ampleur des difficultés. Pourtant, la Russie parvient progressivement à relancer sa filière, en s'appuyant sur les acquis soviétiques et sur une volonté politique affirmée de restaurer sa puissance maritime.

10.2 Un écosystème industriel marqué par l'héritage soviétique

L'industrie sous-marine russe repose sur un réseau de chantiers et de bureaux d'études hérités de l'URSS. Les deux pôles principaux sont Sevmash, à Severodvinsk, et Admiralty Shipyards, à Saint-Pétersbourg. Le premier construit les sous-marins nucléaires, le second les unités conventionnelles. À leurs côtés, les bureaux d'ingénierie Rubin et Malakhit conçoivent respectivement les sous-marins stratégiques et les sous-marins d'attaque.

Cet écosystème, longtemps affaibli par le manque de financement, a retrouvé une certaine vigueur dans les années 2010. La Russie a lancé plusieurs programmes majeurs : les *Borei* pour la dissuasion, les *Yasen* pour la chasse océanique, et les *Lada* pour renouveler la flotte conventionnelle.

La philosophie russe reste marquée par une recherche de puissance et de profondeur : coques en titane, torpilles à très haute vitesse, missiles de croisière à longue portée, systèmes de propulsion robustes plutôt que silencieux.

Cette approche produit des sous-marins parfois moins discrets que leurs équivalents occidentaux, mais souvent plus rapides, plus profonds et dotés d'armements impressionnants.

10.3 La flotte actuelle : une force nucléaire et conventionnelle encore redoutable

En 2026, la Russie maintient une flotte d'environ cinquante-huit sous-marins, un ensemble vaste mais profondément hétérogène, où se côtoient encore plusieurs héritiers de l'ère soviétique et les plateformes les plus modernes issues des programmes lancés au cours des deux dernières décennies. Près de la moitié de cette force est constituée d'unités nucléaires, cœur de la puissance océanique russe : d'un côté les sous-marins stratégiques chargés de la dissuasion, de l'autre les sous-marins d'attaque qui patrouillent dans l'Arctique, le Pacifique ou l'Atlantique Nord. L'autre moitié repose sur une flotte conventionnelle robuste,

discrète et parfaitement adaptée aux mers fermées où Moscou exerce une présence constante, comme la Baltique, la mer Noire ou la mer du Japon. Malgré des écarts techniques parfois considérables entre les différentes générations, cette combinaison permet à la Russie de conserver une capacité sous-marine significative, capable de peser sur les équilibres régionaux et de soutenir sa doctrine de « bastions » protégés.

La flotte russe s'articule aujourd'hui autour de deux piliers clairement identifiés. Le premier est celui des sous-marins nucléaires, qui assurent à la fois la dissuasion stratégique et la projection océanique. Les sous-marins lanceurs d'engins de la classe *Borei*, plus silencieux et plus modernes que les *Typhoon* ou les *Delta* qu'ils remplacent progressivement, embarquent les missiles *Bulava* et patrouillent principalement dans les zones arctiques, où la couverture de glace offre une protection naturelle contre la détection. À leurs côtés, les sous-marins nucléaires d'attaque — *Akula*, *Oscar II* et surtout *Yasen* — constituent la force de frappe océanique. Les *Yasen*, en particulier, incarnent l'ambition russe de rivaliser avec les unités occidentales les plus avancées : leur furtivité améliorée, leur polyvalence et leur arsenal de missiles de croisière longue portée en font des plateformes redoutées.

Le second pilier est celui de la flotte conventionnelle, dominée par les *Kilo* et *Improved Kilo*, réputés pour leur discrétion en eaux littorales et largement exportés. Ces sous-marins, parfaitement adaptés aux mers fermées, jouent un rôle essentiel dans la surveillance régionale et les opérations de présence. Les *Lada*, censés leur succéder, ont connu un développement difficile, mais la Russie continue d'investir dans cette filière, notamment pour renforcer ses flottes de la Baltique et de la mer Noire.

Dans son ensemble, cette flotte composite — mélange de modernité, de résilience industrielle et d'héritage soviétique — permet à Moscou de maintenir une présence sous-marine crédible, capable de soutenir sa stratégie de dissuasion, de défendre ses approches maritimes et d'exercer une influence régionale durable.

10.4 Doctrine opérationnelle : dissuasion, bastions et projection régionale

La doctrine sous-marine russe s'articule autour de trois axes majeurs. Le premier est la dissuasion nucléaire, assurée par les *Borei* qui patrouillent dans des zones protégées appelées « bastions », principalement en mer de Barents et en mer d'Okhotsk. L'objectif est de garantir la survie des sous-marins stratégiques face à la surveillance américaine.

Le deuxième axe est la défense des approches maritimes. Les sous-marins d'attaque russes surveillent les mouvements occidentaux dans l'Arctique, l'Atlantique Nord et le Pacifique. Ils suivent les groupes aéronavals américains, traquent les sous-marins de l'OTAN et cherchent à maintenir une pression constante sur les lignes de communication maritimes adverses.

Le troisième axe est la projection régionale, notamment en Méditerranée et en mer Noire. Les sous-marins russes y mènent des missions de renseignement, de présence stratégique et, depuis quelques années, de frappes de missiles de croisière contre des cibles terrestres, comme on l'a vu en Syrie.

Conclusion

La Russie demeure l'une des grandes puissances sous-marines du monde. Sa flotte, héritière d'une tradition soviétique riche et parfois extrême, combine des plateformes nucléaires de grande endurance,

des sous-marins d'attaque puissants et des unités conventionnelles adaptées aux mers fermées. Cette force repose sur une industrie qui, malgré les crises, a su préserver un savoir-faire unique, et sur une doctrine qui mêle dissuasion, contrôle régional et projection de puissance. Dans les profondeurs glacées de l'Arctique comme dans les eaux plus chaudes de la Méditerranée, les sous-marins russes continuent de jouer un rôle central dans la stratégie militaire de Moscou, rappelant que la bataille des océans reste l'un des théâtres les plus silencieux — et les plus déterminants — du monde contemporain.

1981

ANECDOTE

Le "Typhoon" : L'hôtel de luxe nucléaire

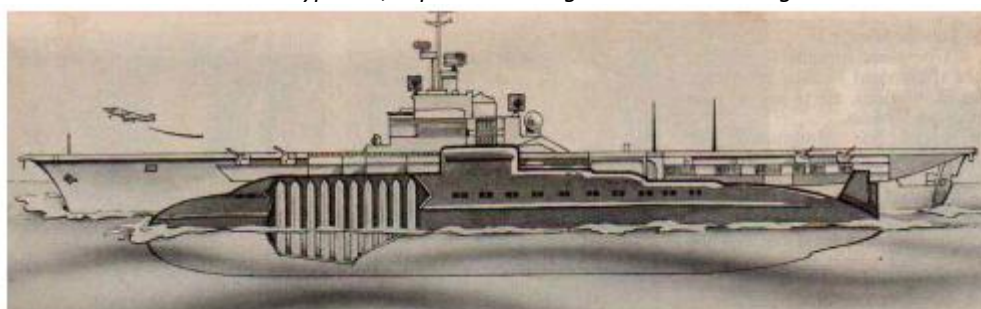
Les sous-marins russes de classe Typhoon sont les plus gros jamais construits. Ils sont si vastes qu'ils abritaient une petite piscine, un sauna et un solarium pour l'équipage ! L'idée était de garder le moral des troupes pendant des mois d'immersion sous la banquise arctique.

Son architecture révolutionnaire repose sur trois coques pressurisées principales (et deux plus petites) imbriquées dans une immense coque externe, offrant une survie inégalée en cas d'impact. Avec ses 48 000 tonnes en plongée, ce monstre déplace un volume d'eau supérieur à celui du porte-avions français Charles de Gaulle. Mise en service 1981 -- 2022





Le sous-marin Typhoon, capable de naviguer sous la calotte glacière



Le sous-marin Typhoon, comparé au porte-avions français Clémenceau

Chapitre 11 : L'Inde et les sous-marins : une puissance émergente entre ambition nationale et dépendances technologiques

11.1 Historique

L'Inde occupe une place singulière dans le paysage sous-marin mondial. Ni puissance océanique traditionnelle comme les États-Unis ou la Russie, ni acteur strictement régional, elle s'est engagée depuis plusieurs décennies dans une montée en puissance méthodique, portée par une ambition stratégique claire : devenir la force dominante de l'océan Indien et disposer d'une dissuasion crédible face à la Chine et au Pakistan. L'histoire sous-marine indienne commence modestement dans les années 1960, avec l'acquisition de sous-marins soviétiques de classe *Foxtrot*. Ces unités, rustiques mais robustes, permettent à la marine indienne de se familiariser avec la navigation en plongée et de former ses premières générations de sous-mariniers.

Les années 1980 marquent un tournant décisif avec l'arrivée simultanée de deux familles de sous-marins très différentes. D'un côté, les *Kilo* russes, plus modernes et plus endurants, qui deviendront la colonne vertébrale de la flotte pendant plus de trente ans. De l'autre, les Type 209/1500 construits sous licence

avec HDW (*Illustration*), qui introduisent pour la première fois en Inde une véritable culture industrielle : intégration locale, montée en compétence des chantiers de Mazagon Dock, et apprentissage des standards occidentaux en matière d'acoustique et d'ingénierie. Ces 209/1500 — connus sous le nom de classe *Shishumar* — jouent un rôle essentiel : ils permettent à l'Inde de diversifier ses sources d'approvisionnement, de comparer les philosophies russes et allemandes, et surtout de poser les bases d'une autonomie industrielle qui portera ses fruits plusieurs décennies plus tard.



L'Inde franchit un cap symbolique en 1988 lorsqu'elle loue à l'URSS un sous-marin nucléaire d'attaque, le *Chakra*. L'expérience est brève, mais elle laisse une empreinte durable : New Delhi comprend que la maîtrise du nucléaire naval est indispensable pour devenir une puissance maritime majeure. Cette intuition guidera les décennies suivantes.

11.2 Une industrie en construction : entre ambition nationale et partenariats étrangers

L'industrie sous-marine indienne repose sur un ensemble d'acteurs publics, au premier rang desquels Mazagon Dock Shipbuilders Limited (MDL), basé à Mumbai. Longtemps cantonné à la construction sous licence, MDL a progressivement acquis une expertise solide grâce à des coopérations successives avec l'Allemagne, la Russie et la France. Le programme Scorpène, mené avec Naval Group, constitue l'un des jalons les plus importants de cette montée en compétence. Les sous-marins de classe *Kalvari*, construits en Inde avec un transfert de technologie significatif, ont permis à MDL de maîtriser des procédés complexes, notamment l'intégration de systèmes de combat modernes et la construction modulaire.

Parallèlement, l'Inde a lancé un programme national de sous-marins nucléaires, le Projet ATV, qui a donné naissance au *Arihant*, premier SNLE indien. Ce programme, mené sous une opacité quasi totale, s'appuie sur un réseau d'entreprises publiques et de laboratoires de défense, mais il reste fortement dépendant de l'assistance russe, notamment pour la propulsion et certains systèmes critiques.

L'Inde se trouve ainsi dans une situation intermédiaire : elle possède une industrie capable de construire des sous-marins modernes, mais elle reste dépendante de partenaires étrangers pour les technologies les plus sensibles, qu'il s'agisse de l'AIP, de la propulsion nucléaire ou de certains senseurs acoustiques.

11.3 La flotte actuelle : une force en transition

En 2026, la marine indienne aligne environ dix-sept sous-marins en service, un ensemble mêlant unités conventionnelles modernes, plateformes plus anciennes et les premières unités nucléaires nationales. La flotte conventionnelle repose sur les *Kilo* russes, encore nombreux malgré leur âge, et sur les *Kalvari* issus du programme Scorpène, qui représentent la nouvelle génération. Ces derniers, plus silencieux et mieux armés, constituent le cœur de la modernisation en cours.

La composante nucléaire, encore modeste, comprend le *Arihant* et son sister-ship *Arighat*, tandis qu'un nouveau sous-marin nucléaire d'attaque est en développement. L'Inde loue également un sous-marin

nucléaire russe, le *Chakra II*, qui sert de plateforme d'entraînement et de transition vers une flotte nucléaire nationale.

Cette flotte composite reflète la trajectoire indienne : une puissance en construction, encore marquée par des héritages soviétiques, mais résolument tournée vers l'autonomie stratégique.

11.4 Doctrine opérationnelle : contrôle de l'océan Indien, dissuasion et rivalité avec la Chine

La doctrine sous-marine indienne s'articule autour de trois axes majeurs. Le premier est le contrôle de l'océan Indien, considéré comme l'espace vital de la puissance indienne. Les sous-marins patrouillent régulièrement dans les approches du détroit de Malacca, dans le golfe du Bengale et dans la mer d'Arabie, où ils surveillent les mouvements chinois et pakistanais.

Le deuxième axe est la dissuasion nucléaire, assurée par les SNLE de classe *Arihant*. Bien que leur autonomie et leur discrétion soient encore inférieures aux standards occidentaux, ils offrent à l'Inde une capacité de seconde frappe crédible, élément central de sa doctrine de « non-emploi en premier ».

Le troisième axe est la réponse à la montée en puissance chinoise. La présence croissante de sous-marins chinois dans l'océan Indien, souvent sous couvert de missions « anti-piraterie », a profondément modifié la posture indienne. Les sous-marins indiens sont désormais engagés dans une surveillance constante des mouvements chinois, et la modernisation accélérée de la flotte répond directement à cette pression stratégique.

Conclusion

L'Inde est aujourd'hui une puissance sous-marine en pleine ascension. Sa flotte, forte d'environ dix-sept sous-marins en 2026, combine des plateformes conventionnelles modernes, des héritages soviétiques encore opérationnels et les premières unités nucléaires conçues nationalement. Soutenue par une industrie en progrès constant et par une volonté politique affirmée, la marine indienne poursuit une trajectoire qui vise à faire de l'océan Indien un espace où elle ne tolérera plus la présence dominante d'aucune autre puissance. Dans ce mouvement, les sous-marins jouent un rôle central, à la fois comme instruments de dissuasion, de surveillance et de projection régionale.

Chapitre 12 : Le Japon et les sous-marins : la maîtrise silencieuse du Pacifique

12.1 Historique

Le Japon possède l'une des traditions sous-marines les plus anciennes et les plus singulières d'Asie. Dès les années 1930, l'Empire du Soleil-Levant développe des sous-marins innovants, parfois audacieux, capables de longues traversées dans le Pacifique. La Seconde Guerre mondiale marque l'apogée de cette première génération, avec des unités géantes comme les *I-400*, véritables porte-avions sous-marins. Mais la défaite de 1945 entraîne la dissolution complète de la flotte et l'interdiction temporaire de toute capacité offensive.

La renaissance commence dans les années 1950, lorsque le Japon, sous supervision américaine, reconstitue une force maritime strictement défensive. Les premiers sous-marins d'après-guerre sont modestes, mais ils permettent de reconstruire un savoir-faire industriel et opérationnel. Très vite, le Japon se distingue par une approche méthodique, fondée sur la qualité, la discrétion acoustique et l'innovation continue. À partir des années 1980, les classes *Yūshio* puis *Harushio* témoignent d'une maîtrise croissante des technologies sous-marines. Le véritable tournant survient avec les classes *Oyashio* et *Sōryū*, qui placent le Japon parmi les leaders mondiaux du sous-marin conventionnel.

12.2 Une industrie d'excellence : Mitsubishi, Kawasaki et la culture de l'amélioration continue

L'industrie sous-marine japonaise repose sur deux géants industriels : Mitsubishi Heavy Industries et Kawasaki Heavy Industries, qui se partagent la construction des sous-marins depuis plus d'un demi-siècle. Cette alternance systématique entre les deux chantiers crée une dynamique unique : chaque nouvelle unité intègre des améliorations incrémentales, issues d'un processus d'ingénierie extrêmement rigoureux.

Le Japon a longtemps été pionnier dans l'utilisation de technologies avancées pour les sous-marins conventionnels. Il a été l'un des premiers à intégrer des systèmes AIP Stirling à grande échelle, avant de passer à une solution encore plus ambitieuse : les batteries lithium-ion, qui offrent une endurance en plongée inégalée pour un sous-marin non nucléaire. Cette innovation, maîtrisée avec une prudence typiquement japonaise, a fait du Japon le premier pays au monde à déployer opérationnellement des sous-marins équipés de batteries lithium-ion, ouvrant une nouvelle ère dans la propulsion conventionnelle.

L'industrie japonaise se distingue également par la qualité de ses senseurs, de ses systèmes de combat et de ses matériaux acoustiques. Le pays n'exporte pas ses sous-marins, mais il a été sollicité par l'Australie pour le programme qui deviendra finalement AUKUS — preuve de la réputation internationale de ses plateformes.

12.3 La flotte actuelle : une force compacte, moderne et redoutablement silencieuse

En 2026, le Japon aligne vingt-deux sous-marins en service, ce qui en fait l'une des plus grandes flottes conventionnelles du monde. Cette force repose sur les classes *Sōryū* et *Taigei*, deux générations successives qui incarnent le sommet de la technologie conventionnelle japonaise. Les *Sōryū*, dotés d'un AIP performant, ont longtemps été la référence en matière de discrétion et d'endurance. Les *Taigei*, plus récents, abandonnent l'AIP au profit des batteries lithium-ion, offrant une capacité d'immersion prolongée et une vitesse silencieuse supérieure.

Cette flotte est l'une des plus homogènes et des mieux entretenues au monde. Le Japon applique un cycle de renouvellement strict : chaque classe est remplacée après environ vingt ans de service, ce qui garantit une modernisation continue et évite l'obsolescence. Les équipages japonais, réputés pour leur discipline et leur maîtrise technique, bénéficient d'un entraînement intensif, notamment dans les eaux complexes du Pacifique occidental.

12.4 Doctrine opérationnelle : défense des approches, surveillance de la Chine et contrôle des détroits

La doctrine sous-marine japonaise est profondément marquée par la géographie et par l'évolution du contexte stratégique en Asie. Le Japon est un archipel long de plusieurs milliers de kilomètres, entouré de détroits étroits et de zones maritimes contestées. Les sous-marins y jouent un rôle essentiel de surveillance, de dissuasion et de contrôle des routes maritimes.

Le premier axe de cette doctrine est la défense des approches maritimes, notamment autour des îles Nansei et de l'archipel d'Okinawa. Les sous-marins japonais y surveillent les mouvements chinois et russes, en particulier les transits de sous-marins nucléaires chinois vers le Pacifique.

Le deuxième axe est la surveillance de la Chine, devenue la principale préoccupation stratégique de Tokyo. Les sous-marins japonais patrouillent régulièrement dans les zones où la marine chinoise cherche à étendre sa présence, notamment autour de Taïwan et dans la mer de Chine orientale. Leur discrétion et leur endurance en font des outils privilégiés pour suivre les mouvements adverses sans être détectés.

Le troisième axe est le contrôle des détroits, notamment ceux de Tsushima, Miyako et Bashi, qui constituent des passages obligés pour les sous-marins chinois cherchant à accéder au Pacifique. Le Japon considère ces détroits comme des points de pression stratégiques, où ses sous-marins peuvent surveiller, intercepter ou dissuader les mouvements adverses.

Conclusion

Le Japon dispose en 2026 d'une flotte sous-marine de vingt-deux unités, l'une des plus modernes et des plus silencieuses au monde. Soutenue par une industrie d'excellence, une doctrine rigoureuse et une culture de l'amélioration continue, cette force joue un rôle central dans l'équilibre stratégique du Pacifique occidental. Face à la montée en puissance chinoise et aux tensions régionales croissantes, les sous-marins japonais constituent l'un des piliers les plus solides de la défense de l'archipel — une présence discrète, mais déterminante, dans les profondeurs du Pacifique.

Chapitre 13 : La Corée du Sud et les sous-marins : une puissance technologique en ascension

13.1 Historique

La Corée du Sud s'est imposée en quelques décennies comme l'un des acteurs les plus dynamiques du domaine sous-marin. Là où le Japon a construit une tradition ancienne et où la Chine a misé sur la masse, Séoul a choisi une voie intermédiaire : une montée en puissance méthodique, fondée sur l'innovation, la qualité industrielle et une volonté affirmée de s'imposer sur le marché mondial.

L'histoire sous-marine sud-coréenne commence tardivement, dans les années 1990, avec l'acquisition de sous-marins allemands de type 209. Ces premières unités, construites sous licence, permettent à la Corée du Sud de se familiariser avec la construction modulaire, l'intégration de systèmes de combat et la maintenance lourde. Très vite, les chantiers locaux — Hyundai Heavy Industries et Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering — dépassent le simple rôle d'assembleurs pour devenir de véritables concepteurs.

13.2 Une industrie en plein essor : Hyundai, DSME et l'ambition d'exporter

L'industrie sud-coréenne est aujourd'hui l'une des plus compétitives au monde. Les chantiers Hyundai et DSME ont acquis une maîtrise remarquable des sous-marins conventionnels, d'abord grâce aux transferts de technologie allemands, puis en développant leurs propres solutions.

Le programme KSS-III, entièrement national, marque une rupture : ces sous-marins de grande taille, dotés d'un système AIP avancé et de missiles balistiques mer-sol, témoignent d'une ambition stratégique nouvelle. La Corée du Sud n'est plus seulement un constructeur sous licence : elle devient un concepteur de premier plan.

Cette montée en compétence nourrit une ambition claire : devenir un exportateur majeur. Séoul a déjà remporté plusieurs contrats, notamment en Indonésie, et se positionne désormais face à l'Allemagne, la France et le Japon sur le marché mondial des sous-marins conventionnels. La compétitivité des chantiers coréens, leur rapidité d'exécution et leur capacité à proposer des transferts de technologie attractifs en font des concurrents redoutables.

13.3 La flotte actuelle : une force moderne et en expansion

En 2026, la Corée du Sud aligne dix-huit sous-marins en service, un ensemble homogène et en constante modernisation. Les classes *Chang Bogo* (type 209) et *Son Won-il* (type 214) constituent la base de la flotte, tandis que les premiers *KSS-III* commencent à entrer en service, offrant à Séoul une capacité océanique et une autonomie inédites.

Cette flotte, entièrement conventionnelle, est l'une des plus modernes d'Asie. Les sous-marins sud-coréens sont réputés pour leur discrétion, leur endurance et la qualité de leurs senseurs, souvent développés localement. Les équipages bénéficient d'un entraînement intensif, notamment dans les eaux complexes de la mer Jaune et du détroit de Corée, où la proximité de la Corée du Nord impose une vigilance constante.

13.4 Doctrine opérationnelle : dissuasion régionale et contrôle des détroits

La doctrine sous-marine sud-coréenne est profondément marquée par la menace nord-coréenne. Les sous-marins jouent un rôle essentiel dans la surveillance des mouvements adverses, la protection des approches maritimes et la dissuasion conventionnelle.

Mais la Corée du Sud ne se limite plus à une posture défensive. Avec les *KSS-III*, elle acquiert une capacité de frappe en profondeur, capable de cibler des infrastructures stratégiques à longue distance. Cette évolution traduit une volonté de s'affirmer comme puissance régionale, capable de peser dans les équilibres de l'Asie du Nord-Est.

Les sous-marins sud-coréens participent également à des missions plus lointaines, notamment dans l'océan Indien, où Séoul cherche à sécuriser ses routes énergétiques et à renforcer sa présence diplomatique.

Conclusion

La Corée du Sud est devenue en quelques décennies l'un des acteurs les plus innovants du domaine sous-marin. Avec dix-huit sous-marins en service en 2026, une industrie en plein essor et une ambition exportatrice affirmée, elle s'impose comme un concurrent sérieux des grandes puissances navales. Sa flotte, moderne et en expansion, reflète une stratégie claire : défendre ses approches, dissuader ses

adversaires et s'affirmer comme une puissance maritime capable d'influencer l'équilibre stratégique de l'Asie du Nord-Est.

Chapitre 14 : La Turquie et les sous-marins : une puissance émergente entre Méditerranée et ambitions globales

La Turquie s'est imposée en quelques décennies comme l'un des acteurs les plus dynamiques du domaine sous-marin en Méditerranée. Longtemps dépendante de technologies étrangères, elle a progressivement bâti une industrie solide, capable d'intégrer des systèmes complexes et de concevoir ses propres évolutions. L'histoire moderne de sa flotte commence dans les années 1980 avec l'acquisition de sous-marins allemands de type 209, construits sous licence dans les chantiers nationaux. Cette coopération avec l'Allemagne joue un rôle fondateur : elle permet à Ankara de maîtriser la construction modulaire, l'intégration de systèmes de combat et la maintenance lourde, tout en développant une culture industrielle tournée vers l'autonomie.

Au fil des années, les chantiers turcs — notamment Gölcük Naval Shipyard — montent en compétence et deviennent capables de produire des sous-marins de plus en plus sophistiqués. Le programme Reis, basé sur le Type 214 allemand mais largement turquifié, marque une étape décisive. Dotés d'un système AIP performant et d'une électronique embarquée développée localement, ces sous-marins témoignent de la volonté d'Ankara de réduire sa dépendance technologique et de s'affirmer comme un concepteur à part entière. Cette ambition s'inscrit dans une stratégie industrielle plus large, où la Turquie cherche à devenir un exportateur majeur d'équipements navals, à l'image de ses succès dans les drones ou les corvettes. Les sous-marins ne font pas exception : Ankara vise clairement le marché international, notamment en Asie du Sud-Est et au Moyen-Orient, où ses offres compétitives et ses transferts de technologie attractifs séduisent plusieurs marines.

En 2026, la Turquie aligne douze sous-marins en service, un ensemble homogène et en cours de modernisation. Les unités de type 209 constituent encore la majorité de la flotte, mais les premiers sous-marins du programme Reis commencent à entrer en service, offrant une endurance accrue et une discrétion nettement améliorée. Cette flotte, entièrement conventionnelle, est parfaitement adaptée aux eaux complexes de la mer Égée et de la Méditerranée orientale, où les tensions régionales imposent une présence constante et une capacité de réaction rapide.

La doctrine sous-marine turque reflète cette géographie tourmentée. Les sous-marins jouent un rôle central dans la surveillance des approches maritimes, la dissuasion régionale et la protection des zones économiques contestées, notamment autour de Chypre. Ils participent également à des missions plus lointaines, en mer Rouge ou dans l'océan Indien, où Ankara cherche à affirmer son influence croissante. Cette posture s'inscrit dans une stratégie maritime ambitieuse, où les sous-marins constituent l'un des instruments les plus discrets mais les plus efficaces de la puissance turque.

En quelques décennies, la Turquie est ainsi passée du statut d'utilisateur à celui de constructeur et bientôt d'exportateur. Avec douze sous-marins en 2026, une industrie en pleine ascension et une doctrine tournée vers la Méditerranée élargie, elle s'impose comme un acteur incontournable dans l'équilibre naval régional — et un concurrent sérieux sur le marché mondial des sous-marins conventionnels.

Chapitre 15 : Israël et les sous-marins : la dissuasion silencieuse de la Méditerranée

Israël possède l'une des forces sous-marines les plus discrètes et les plus stratégiques du Moyen-Orient. Sa flotte, bien que réduite, joue un rôle central dans la doctrine de dissuasion israélienne, fondée sur la capacité à frapper en profondeur tout en restant invisible. L'histoire sous-marine du pays commence dans les années 1960, mais c'est véritablement avec l'arrivée des sous-marins allemands de type *Dolphin* que la marine israélienne franchit un seuil décisif. Ces unités, financées en grande partie par l'Allemagne, offrent à Israël une plateforme moderne, silencieuse et capable d'emporter des armements sophistiqués, adaptés à ses besoins spécifiques.

Au fil des décennies, Israël a développé une relation industrielle étroite avec les chantiers allemands, qui lui ont permis d'obtenir des sous-marins de plus en plus avancés. Les *Dolphin II*, dotés d'un système AIP, constituent aujourd'hui le cœur de la flotte. Leur endurance accrue et leur discrétion en font des outils idéaux pour les missions de longue durée en Méditerranée, en mer Rouge ou au-delà. Israël ne communique jamais sur les capacités exactes de ses sous-marins, mais il est largement admis qu'ils jouent un rôle clé dans la dissuasion stratégique du pays, notamment grâce à la possibilité d'emporter des missiles de croisière à longue portée.

En 2026, Israël aligne six sous-marins en service, tous issus des différentes générations de la classe *Dolphin*. Cette flotte compacte est l'une des plus modernes du bassin méditerranéen. Les équipages israéliens, sélectionnés avec une exigence extrême, bénéficient d'un entraînement intensif et d'une culture opérationnelle fondée sur la précision, la réactivité et la discrétion absolue. Les sous-marins israéliens sont régulièrement déployés dans des zones sensibles, où ils assurent la surveillance, la collecte de renseignement et la capacité de frappe en profondeur.

La doctrine israélienne repose sur une combinaison de dissuasion, de renseignement et de projection discrète. Les sous-marins constituent l'un des piliers de la « seconde frappe » potentielle du pays, garantissant qu'Israël puisse répondre à toute menace existentielle, même en cas de surprise stratégique. Ils jouent également un rôle essentiel dans la surveillance des routes maritimes, la protection des infrastructures gazières offshore et la présence discrète dans les zones où les tensions régionales sont les plus fortes.

Israël n'a pas d'ambitions exportatrices dans le domaine sous-marin, préférant concentrer ses ressources sur une flotte réduite mais technologiquement de pointe. Sa coopération avec l'Allemagne reste toutefois un élément structurant, notamment avec le programme *Dakar*, qui doit renouveler la flotte dans les années 2030.

En 2026, avec six sous-marins modernes et parfaitement adaptés à ses besoins, Israël dispose d'une force sous-marine compacte mais redoutablement efficace, qui constitue l'un des instruments les plus discrets — et les plus déterminants — de sa stratégie de sécurité nationale.

Chapitre 16 : Le Brésil et les sous-marins : l'ambition océanique de l'Amérique du Sud

Le Brésil est la seule puissance sud-américaine à avoir engagé une véritable stratégie sous-marine de long terme, portée par une vision claire : protéger un littoral immense, riche en ressources énergétiques, et affirmer son statut de puissance régionale. L'histoire sous-marine brésilienne commence modestement dans les années 1970 avec l'acquisition de sous-marins allemands de type 209, qui permettent à la marine de se familiariser avec la navigation en plongée et la maintenance de plateformes modernes. Très vite, le Brésil comprend que la maîtrise industrielle est indispensable pour garantir son autonomie stratégique. Cette intuition donnera naissance, plusieurs décennies plus tard, à l'un des programmes les plus ambitieux du continent : le PROSUB.

Ce programme, lancé en partenariat avec la France, marque une rupture profonde. Il prévoit la construction locale de sous-marins de type Scorpène — adaptés aux besoins brésiliens — ainsi que la création d'une base navale et d'un chantier entièrement dédiés à la filière sous-marine. Mais l'ambition va plus loin : PROSUB inclut également le développement du premier sous-marin nucléaire d'attaque brésilien, le SN-10 Álvaro Alberto, symbole d'une volonté d'indépendance technologique rarement observée dans la région. Si le réacteur reste développé nationalement, la France a fourni l'expertise nécessaire pour la conception de la coque et l'intégration des systèmes non nucléaires, permettant au Brésil de franchir un seuil technologique décisif.

En 2026, la flotte brésilienne compte six sous-marins en service, dont quatre Scorpène de classe *Riachuelo* et deux unités plus anciennes de type 209 encore opérationnelles. Cette flotte, entièrement conventionnelle pour l'instant, est en pleine transition : les Scorpène offrent une discrétion et une endurance nettement supérieures, tandis que l'arrivée prochaine du sous-marin nucléaire transformera profondément les capacités de la marine. Le Brésil ne cherche pas la quantité, mais une force cohérente, moderne et adaptée à la surveillance de la « *Amazônia Azul* », cet immense espace maritime qui concentre une grande partie de ses ressources pétrolières et gazières.

La doctrine brésilienne repose sur la protection des infrastructures offshore, la surveillance des approches atlantiques et la capacité à dissuader toute présence hostile dans son environnement régional. Les sous-marins jouent un rôle central dans cette stratégie, car ils permettent au Brésil de compenser la dispersion de son littoral et de maintenir une présence discrète mais constante dans l'Atlantique Sud. L'arrivée du sous-marin nucléaire, prévue dans la seconde moitié des années 2020, donnera au pays une capacité océanique inédite en Amérique latine, renforçant son statut de puissance émergente.

Le Brésil n'a pas encore d'ambitions exportatrices dans le domaine sous-marin, mais la montée en compétence de son industrie, soutenue par PROSUB, pourrait lui ouvrir des perspectives à long terme. En 2026, il demeure avant tout un constructeur national en pleine maturation, déterminé à maîtriser l'ensemble de la chaîne technologique, du réacteur nucléaire aux systèmes de combat.

Avec six sous-marins opérationnels et un programme nucléaire en développement, le Brésil s'impose comme la puissance sous-marine la plus ambitieuse de l'hémisphère sud, engagé dans une trajectoire qui pourrait, à terme, redéfinir l'équilibre naval de l'Atlantique Sud.

Chapitre 17 : L'Australie et les sous-marins : une transition stratégique vers l'ère nucléaire

L'Australie se trouve aujourd'hui à un moment charnière de son histoire navale. Longtemps dotée d'une flotte sous-marine conventionnelle solide mais limitée, elle a décidé d'opérer un basculement stratégique majeur avec l'accord AUKUS, qui doit lui permettre d'acquérir des sous-marins nucléaires d'attaque. Cette décision, motivée par la montée en puissance chinoise et par l'évolution rapide de l'équilibre stratégique en Indo-Pacifique, marque une rupture profonde avec la posture traditionnelle de Canberra.

L'histoire sous-marine australienne moderne commence dans les années 1990 avec la classe *Collins*, construite localement en partenariat avec la Suède. Ces sous-marins, malgré des débuts difficiles, ont fini par devenir des plateformes fiables, adaptées aux vastes espaces maritimes australiens. Leur endurance, leur robustesse et leur capacité à opérer loin des côtes ont permis à l'Australie de maintenir une présence discrète mais constante dans l'océan Indien et dans le Pacifique Sud. Cependant, l'évolution du contexte stratégique a rapidement montré les limites d'une flotte strictement conventionnelle. Les distances immenses, la nécessité de surveiller des zones maritimes gigantesques et la montée en puissance de la Chine ont convaincu Canberra qu'il lui fallait franchir un seuil technologique.

En 2026, l'Australie aligne six sous-marins en service, tous issus de la classe *Collins*. Ces unités, modernisées et bien entretenues, constituent encore l'épine dorsale de la flotte, mais elles approchent de la fin de leur vie opérationnelle. Leur remplacement devait initialement être assuré par les sous-marins français de classe *Attack*, dérivés du Barracuda, mais ce programme a été annulé en 2021 au profit d'un partenariat stratégique avec les États-Unis et le Royaume-Uni. AUKUS prévoit désormais la construction de sous-marins nucléaires d'attaque, d'abord via l'acquisition de quelques unités américaines d'occasion, puis par la production locale d'un modèle dérivé du futur SSN britannique. Ce choix place l'Australie dans un cercle extrêmement restreint de nations disposant de sous-marins nucléaires, mais il implique un effort industriel colossal, une transformation doctrinale profonde et une dépendance accrue vis-à-vis de ses alliés anglo-saxons.

La doctrine australienne repose sur la surveillance des approches maritimes, la protection des routes commerciales et la capacité à opérer loin de ses bases, notamment dans le détroit de Lombok, la mer de Chine méridionale ou l'océan Indien. Les sous-marins jouent un rôle central dans cette stratégie, car ils permettent à l'Australie de compenser la modestie de sa flotte de surface par une présence invisible mais déterminante. Avec l'arrivée future des sous-marins nucléaires, Canberra ambitionne de devenir une puissance océanique à part entière, capable de mener des opérations prolongées en Indo-Pacifique et de contribuer de manière décisive à la dissuasion régionale.

En 2026, l'Australie demeure donc une puissance sous-marine en transition : encore dépendante de ses *Collins*, mais déjà engagée dans l'un des programmes les plus ambitieux du monde occidental. Cette trajectoire, soutenue par AUKUS, pourrait transformer durablement l'équilibre naval de l'Indo-Pacifique.

Chapitre 18 : Panorama des autres puissances sous-marines en 2026

Au-delà des grandes marines que tu as déjà étudiées, plusieurs pays maintiennent des forces sous-marines plus modestes mais néanmoins stratégiques, souvent adaptées à des besoins régionaux ou à des ambitions limitées mais cohérentes.

L'**Iran** dispose d'une flotte hétérogène mêlant sous-marins russes de classe *Kilo*, unités côtières locales et mini-sous-marins destinés aux opérations asymétriques dans le golfe Persique. Cette force, numériquement importante, vise moins la projection que la saturation des détroits et la dissuasion régionale. L'**Égypte**, soutenue par l'Allemagne, aligne plusieurs *Type 209* modernes, qui lui offrent une capacité de surveillance et de frappe en Méditerranée orientale, dans un contexte régional particulièrement instable. L'**Algérie**, elle aussi cliente de Moscou, s'appuie sur des *Kilo* modernisés pour contrôler ses approches et affirmer sa présence en Méditerranée occidentale.

En Asie du Sud-Est, plusieurs marines ont engagé des programmes ambitieux. Le **Vietnam**, équipé de *Kilo* russes, a développé une force discrète mais efficace pour surveiller la mer de Chine méridionale. L'**Indonésie**, engagée dans une modernisation progressive, exploite des sous-marins sud-coréens et allemands, adaptés à la surveillance de ses détroits stratégiques. La **Malaisie** et le **Bangladesh** disposent de flottes plus réduites, mais qui leur permettent de maintenir une présence sous-marine crédible dans des zones maritimes contestées ou vulnérables.

En Europe, plusieurs pays entretiennent des forces compactes mais modernes. Le **Danemark** a renoncé à ses sous-marins, mais la **Pologne** maintient une petite flotte vieillissante en attendant un renouvellement longtemps repoussé. Le **Portugal**, avec ses *Tridente* de conception allemande, assure une présence régulière dans l'Atlantique. La **Grèce**, dotée de *Type 214* particulièrement performants, possède l'une des flottes conventionnelles les plus avancées de Méditerranée, essentielle dans son face-à-face permanent avec la Turquie.

En Amérique latine, plusieurs marines conservent des capacités limitées mais utiles. Le **Chili**, qui dispose de l'une des forces les plus professionnelles du continent, est équipé de sous-marins allemands mais aussi, plus récemment, de deux *Scorpène* construits par Naval Group équipé d'un système de combat SUBTICS de UDS-I. Le **Pérou** maintient une flotte de type 209 modernisée, adaptée à la surveillance de son littoral. L'**Argentine**, en revanche, peine à reconstituer une capacité sous-marine crédible depuis la perte du San Juan. Le **Brésil** fait figure d'exception : il opère quatre *Scorpène* construits localement avec Naval Group et prépare son premier sous-marin nucléaire d'attaque national, développé avec l'appui technologique français.

Enfin, quelques pays entretiennent des forces symboliques ou en transition. Le **Pakistan**, doté de sous-marins français (*Agosta*) et chinois, mise sur une modernisation rapide pour contrer l'Inde. La **Colombie** et le **Venezuela** conservent de petites flottes héritées de programmes anciens. La **Birmanie** et la **Thaïlande** ont engagé des acquisitions récentes, souvent auprès de la Chine, pour renforcer leur présence régionale.

En 2026, ces marines ne rivalisent pas avec les grandes puissances, mais elles jouent un rôle essentiel dans l'équilibre régional, la surveillance des détroits, la protection des ressources et la dissuasion locale. Leur diversité reflète un monde où le sous-marin reste un outil stratégique, même pour les États qui n'ambitionnent pas la domination océanique.

Chapitre 19 : Quantité de sous-marin en service en 2026

En 2026, on estime qu'il existe **entre 450 et 500 sous-marins en service dans le monde**, toutes catégories confondues — des SNLE et SNA des grandes puissances aux petits sous-marins côtiers et unités spéciales des marines régionales. Cette fourchette reflète la diversité des flottes, la discrétion de certains programmes et l'opacité de pays comme la Corée du Nord ou l'Iran.

Note : l'estimation du nombre réel de sous-marins en service reste délicate. Les chiffres varient selon les sources et dépendent fortement des annonces officielles de mise en service, mais surtout des dates — parfois peu publiées — de retrait opérationnel.

Tableau comparatif mondial des flottes sous-marines (2026)

(N = Nucléaires, C = Conventionnels, m = Mini sous-marins)

Pays	Qté	N	C	m	Particularités / Capacités notables
Chine	78	x	x		Montée en puissance rapide ; forte production nationale
États-Unis	70	x			Plus grande flotte nucléaire du monde ; SSN/SSBN très modernes
Russie	63	x	x		Large spectre : SNLE, SNA, SSGN, mini sous-marins
Iran	25		x	x	Doctrine asymétrique dans le Golfe
Japon	24				Référence mondiale en propulsion Li-ion
Corée du Sud	22		x		Industrie exportatrice ; KSS-III à missiles balistiques
Corée du Nord	20		x	x	Doctrine asymétrique (Quantité difficile à évaluer)
Inde	18	x	x		Début de filière nucléaire nationale ; Scorpène modernes
Turquie	13		x		Ambition exportatrice ; Type 214 adapté
Grèce	11		x		Type 214 + 209 - Excellente discrétion acoustique
Royaume-Uni	11	x			Flotte exclusivement océanique ; SSBN + SSN Astute
France	9	x			Flotte entièrement océanique ; SNLE + SNA Barracuda
Vietnam	9		x		Kilo 636 -Excellente adaptation aux eaux littorales ; rôle clé en mer de Chine méridionale
Pakistan	8		x		Coopération chinoise ; futurs SSK modernes
Allemagne	6		x		Référence mondiale du Type 212A/214
Norvège	6		x		Expertise arctique ; nouveaux 212CD
Italie	8		x		Coopération germano-italienne 212A
Australie	6		x		Transition vers sous-marins nucléaires (AUKUS)
Israël	6		x		Rôle clé dans la dissuasion régionale
Brésil	6		x		Programme PROSUB + futur SNA national
Algérie	6		x		Kilo modernisés russes
Vietnam	6		x		Kilo optimisés pour la mer de Chine méridionale
Pérou	6		x		Type 209 modernisés
Suède	5		x		Pionniers de l'AIP Stirling
Pays-Bas	4		x		Spécialistes des opérations lointaines

L'Empire du Silence Technologie, Tactique et Géopolitique du SOUS-MARIN
Partie 10: SOUS-MARINS DANS LE MONDE

Pays	Qté	N	C	m	Particularités / Capacités notables
Égypte	4		x		Type 209 modernes allemands
Indonésie	4		x		Coopération Corée du Sud/Allemagne
Chili	4		x		Flotte moderne allemande
Espagne	3		x		Programme S-80 national (+1 à venir)
Malaisie	2		x		Scorpène adaptés aux eaux tropicales
Bangladesh	2		x		Sous-marins chinois pour surveillance côtière
Thaïlande	1		x		Début de filière chinoise (+1 à venir)
Myanmar	1		x		Sous-marin d'occasion indien
Argentine	0				Perte du San Juan ; capacité en reconstruction

Chapitre 20 : Principales commandes de sous-marins

Tableau des principales commandes de 2000 à 2025 telles qu'elles sont connues dans la littérature ouverte. Le dénombrement est parfois difficile à réaliser. La mention "nucléaires" veut dire "propulsion nucléaire"

Année	Pays acheteur	Fournisseur	Classe / modèle	Qté
1997 – 2010	Royaume-Uni	BAE Systems	Astute class (SSN)	7
<i>Commande décidée avant 2000 mais exécutée et ajustée sur la période</i>				
1998 – 2025	États-Unis	GD Electric Boat / HII	Virginia class (SSN-774)	41
<i>41 sous-marins commandés au total, dont la majorité après 2000.</i>				
2000 – 2026	Russie	Divers	Programmes Boreï, lassen, Kilo 636.3	60
<i>46 nucléaires et 14 conventionnels (environ)</i>				
2000 – 2026	Chine	Divers	Production massive Type 039A/B/C	52
<i>6 nucléaires et 46 conventionnels (environ). En service en 2026: 70 dont 12 nucléaires</i>				
2000 – 2005	Grèce	TKMS / HDW	Type 214 (Papanikolis class)	4
<i>Première série export du Type 214 AIP.</i>				
2000 – 2010	Corée du Sud	TKMS + chantiers coréens	Type 214 (Son Won-il class)	9
<i>Production sous licence, base de la flotte AIP sud-coréenne.</i>				
2002	Malaisie	Naval Group / Navantia	Scorpène	2
<i>Première commande asiatique de Scorpène, livrées en 2009.</i>				
2003 – 2004	Espagne	Navantia	S-80 Plus	4
<i>Programme national espagnol, fortement retardé mais confirmé (S-81 à S-84).</i>				
2004	Portugal	TKMS / HDW	Type 214 (Tridente class)	2

L'Empire du Silence Technologie, Tactique et Géopolitique du SOUS-MARIN
Partie 10: SOUS-MARINS DANS LE MONDE

Année	Pays acheteur	Fournisseur	Classe / modèle	Qté
			<i>Version adaptée aux besoins portugais.</i>	
2005	Inde	Naval Group / MDL	Scorpène (Kalvari class)	6
			<i>Construction locale sous licence (Project 75).</i>	
2006	France	Naval Group	Suffren / Barracuda (SNA)	6
			<i>Programme de renouvellement des SNA français (Rubis → Suffren).</i>	
2008	Brésil	Naval Group / Itaguaí	Scorpène (Riachuelo class)	4
			<i>Programme incluant transfert de technologie et chantier local.</i>	
2009 – 2015	Turquie	TKMS / Gölcük Shipyard	Type 214 (Reis class)	6
			<i>Construction locale progressive.</i>	
2014 – 2020	Corée du Sud	DSME / HHI / Hanwha	KSS-III (Dosan Ahn Changho)	9
			<i>Programme national en 3 lots de 3 sous-marins, avec capacité missiles balistiques.</i>	
2015	Pakistan	CSIC / KSEW	Hangor class (Type 039B dérivé)	8
			<i>Contrat majeur Chine Pakistan, 4 construits en Chine, 4 au Pakistan</i>	
2017 – 2025	Allemagne	TKMS	Type 212CD	6
			<i>Programme commun avec la Norvège pour la nouvelle génération AIP.</i>	
2017 – 2026	Norvège	TKMS	Type 212CD	6
			<i>4 sous-marins initiaux, puis 2 supplémentaires commandés en 2026.</i>	
2024	Indonésie	Naval Group	Scorpène Evolved	2
			<i>Première commande de Scorpène Evolved, avec options supplémentaires envisagées.</i>	



Partie 11: SYNTHÈSE ET ENJEUX DU XXIÈ SIÈCLE

1.1 Bilan sur le sous-marin

Au terme de ce tour d'horizon, le domaine sous-marin apparaît comme un monde de contrastes extrêmes. C'est une enceinte de confinement absolu où l'on déploie la technologie la plus vaste ; un lieu de silence où l'on écoute le moindre murmure de l'océan ; un outil de paix qui porte en lui la puissance de destruction la plus terrifiante.

L'excellence française dans ce domaine n'est pas seulement une question d'ingénierie navale ou de puissance nucléaire. Elle réside dans cette capacité unique à faire cohabiter, dans une coque de quelques mètres de diamètre, la science de pointe et l'humilité de l'homme face à l'immensité océanique. Le sous-marin reste, et restera pour le XXI^e siècle, le dernier espace de liberté et d'invulnérabilité stratégique des nations qui possèdent l'audace de l'habiter.

En conclusion, nous portons notre regard vers l'avenir. Le sous-marin n'est plus seulement un outil de guerre, il est au centre de nouveaux enjeux globaux : la géopolitique de l'Arctique, la protection des câbles internet sous-marins et l'exploitation des ressources minérales. Dans un cadre juridique défini par la convention de Montego Bay, la technologie doit désormais composer avec l'éthique environnementale. Cette ultime partie dessine les contours d'une marine de demain, où l'invisibilité reste le destin, mais où la responsabilité écologique devient une nouvelle frontière.

Nous avons parcouru l'évolution du sous-marin, de la cloche de Colladon aux capteurs piézoélectriques moléculaires. Ce que l'histoire nous enseigne, c'est que la supériorité sous-marine ne repose pas uniquement sur la force de frappe, mais sur la compréhension intime de la physique.

Demain, avec l'apport de l'Intelligence Artificielle capable de décoder les trajectoires courbes du son dans des milieux de plus en plus pollués acoustiquement, et avec l'arrivée des drones-suiveurs, le sous-marin restera l'ombre souveraine des nations. Il ne s'agit plus seulement de plonger, mais de se fondre dans la complexité de l'océan pour en devenir le prédateur invisible, le gardien des abysses et le pivot de la paix mondiale par la dissuasion.

À l'horizon 2026, le sous-marin ne se définit plus seulement comme un prédateur isolé, mais comme le nœud central d'un réseau complexe. Les enjeux actuels marquent une rupture majeure avec la guerre froide, mêlant robotique de pointe et lutte pour la maîtrise des grands fonds.

1.2 Défis technologiques et Axes de recherche

Le sous-marin de demain repose sur une équation complexe : rester invisible tout en devenant plus puissant.

- **L'IA et le "combat collaboratif"** : l'intelligence artificielle est désormais intégrée pour l'analyse acoustique massive. Elle aide les "oreilles d'or" à distinguer un bruit d'hélice d'un son biologique dans un environnement de plus en plus bruyant.
- **La révolution des drones (XLUUV)** : le sous-marin devient un "porte-drones". Il déploie des véhicules autonomes (AUV) pour des missions de reconnaissance, de guerre des mines ou pour servir de leurres, étendant son rayon d'action sans s'exposer.
- **Propulsion et énergie** : la propulsion anaérobie (AIP) se perfectionne pour les sous-marins classiques, tandis que pour le nucléaire (comme le futur SNLE 3G français), l'enjeu est la réduction absolue de la signature acoustique par de nouvelles technologies de pompes-hélices.
- **Capteurs quantiques** : la recherche s'accélère sur les gravimètres quantiques qui permettraient de naviguer avec une précision extrême sans aucun signal GPS ou émission sonar active, rendant le bâtiment indétectable par ses propres ondes.

Le saviez-vous ?

Les capteurs quantiques, futurs "super-sens" des sous-marins

Les capteurs quantiques pourraient révolutionner la navigation et la détection sous-marine dans les prochaines décennies. Basés sur des phénomènes comme la superposition ou l'intrication, ils permettent de mesurer des variations infimes du champ magnétique, de la gravité ou du mouvement avec une précision inatteignable par les technologies classiques.

Un sous-marin équipé d'un gyroscope quantique pourrait naviguer sans GPS pendant des semaines avec une dérive quasi nulle, tandis qu'un gravimètre quantique serait capable de détecter les anomalies du fond marin ou même la présence d'un navire en mouvement par sa signature gravitationnelle.

Ces capteurs, encore expérimentaux, promettent une nouvelle ère où la furtivité et la détection se joueront à l'échelle de l'atome — un bouleversement majeur pour la guerre sous-marine du futur.

1.3 Problèmes tactiques et stratégiques

La fin de l'invulnérabilité absolue est le problème majeur.

- **La transparence des océans** : avec la multiplication des capteurs fixes sur les fonds marins et les drones de surface persistants, "se cacher" devient un défi constant.
- **Guerre des fonds marins (Seabed Warfare)** : les infrastructures vitales (câbles internet, gazoducs) sont de nouvelles cibles. Les sous-marins doivent désormais agir jusqu'à 6 000 mètres de profondeur pour protéger ou neutraliser ces actifs.
- **Cyber-résilience** : étant de plus en plus connectés (via des bouées de communication ou des drones), les sous-marins font face au risque de cyber-attaques pouvant paralyser leurs systèmes d'armes.

1.4 Aspect géopolitique : Le basculement vers l'Indopacifique

Le sous-marin est redevenu l'outil premier de la souveraineté.

- **AUKUS et la prolifération** : l'accord entre les USA, le Royaume-Uni et l'Australie pour doter cette dernière de sous-marins nucléaires a brisé un tabou et lancé une course aux armements dans le Pacifique.
- **Le bastion chinois** : la Chine développe massivement sa flotte pour transformer la mer de Chine méridionale en un sanctuaire impénétrable pour ses propres lanceurs d'engins (SNLE).
- **Le retour de la Mer de Barents** : en Europe, les routes de l'Arctique redeviennent des zones de friction majeures avec la Russie, obligeant l'OTAN à repenser le passage GIUK (Groenland-Islande-UK).

En somme, le sous-marin du futur est un système de systèmes. Il quitte son rôle de chasseur solitaire pour devenir le centre de contrôle d'une bulle de combat sous-marine, où la supériorité informationnelle prime désormais sur la force brute.

Le saviez-vous ?	<p>Si l'Arctique et l'Antarctique fondaient...</p> <p>La fonte totale de l'Arctique et de l'Antarctique n'aurait pas du tout les mêmes conséquences sur le niveau des océans. La différence vient d'un point clé : la glace arctique flotte, alors que la glace antarctique repose sur un continent.</p> <p>Fonte complète de la banquise arctique : la banquise est déjà en flottabilité. Sa fonte n'augmenterait quasiment pas le niveau des mers : moins de 10 centimètres, souvent arrondis à 0 m dans les estimations globales.</p> <p>Fonte complète de l'Antarctique : l'Antarctique contient la plus grande réserve d'eau douce gelée de la planète. Si toute sa glace fondait, le niveau des océans monterait d'environ 58 mètres.</p> <p>De plus, la fonte totale du Groenland, qui repose aussi sur un socle rocheux, ajouterait environ 7 mètres.</p> <p>Un rappel saisissant de l'importance des calottes polaires dans l'équilibre de notre planète.</p>
-------------------------	---

1.5 Habitat sous l'eau : les perspectives

L'habitat sous-marin, longtemps confiné aux récits de Jules Verne ou aux expériences scientifiques des années 1960 (*Précontinent* de Cousteau), connaît aujourd'hui un renouveau technologique majeur. En 2026, l'enjeu n'est plus seulement de prouver qu'il est possible de survivre sous l'eau, mais d'y instaurer une présence humaine durable, scientifique et parfois touristique.

État actuel et Projets phares

Le secteur se divise actuellement en trois segments : les stations de recherche, le tourisme de luxe et les concepts de cités prospectives.

- **DEEP et le programme Sentinel** : c'est le projet le plus avancé en 2026. Situé au large du pays de Galles, ce système d'habitats modulaires imprimés en 3D permet à des chercheurs de vivre jusqu'à 200 mètres de profondeur pour des missions de longue durée (plus de 28 jours).

- **SeaOrbiter** : porté par l'architecte Jacques Rougerie, ce "vaisseau vertical" dérive désormais au gré des courants. À mi-chemin entre le navire et la station spatiale, il permet une observation continue de l'interface océan-atmosphère.
- **Tourisme de luxe** : des structures comme *The Muraka* aux Maldives ou les *Floating Seahorse* à Dubaï proposent des suites immergées, bien que ces projets restent techniquement des extensions de structures de surface plutôt que de véritables habitats autonomes.

Analyse FFRO (Forces, Faiblesses, Risques, Opportunités)

Pour évaluer la viabilité de ces habitations, une analyse FFRO permet de dégager les perspectives stratégiques :

Forces	Faiblesses
Accès direct au milieu : Observation in-situ continue sans les contraintes de décompression répétées.	Coûts prohibitifs : Maintenance extrême due à la corrosion et à la pression.
Stabilité thermique : Température constante des profondeurs facilitant la régulation.	Isolement psychologique : Impact du confinement et de l'absence de lumière naturelle.

Risques	Opportunités
Accidents techniques : Défaillance des systèmes de survie ou brèche de coque fatale.	Ressources bleues : Gestion durable des énergies marines et de l'aquaculture.
Impact écologique : Perturbation des écosystèmes locaux par la présence humaine permanente.	Analogie spatiale : Utilisation comme base d'entraînement pour les futures missions martiennes.

Conclusion et Perspectives

L'habitat sous-marin de 2026 s'éloigne de l'utopie pour devenir un outil industriel et scientifique. Si la démocratisation résidentielle reste freinée par les limites physiologiques et le coût de l'énergie, l'impression 3D béton et les nouveaux alliages ouvrent la voie à des "villages" sous-marins modulaires d'ici la fin de la décennie.

1.6 Synthèse finale — Le silence comme destin

Au terme de ce voyage à travers l'histoire et les technologies sous-marines, une évidence s'impose : le sous-marin demeure l'une des créations les plus fascinantes et les plus exigeantes de l'ingénierie humaine. Qu'il s'agisse d'un colosse nucléaire capable de traverser les océans sans jamais refaire surface, ou d'un drone discret évoluant à quelques mètres de profondeur, tous incarnent la même quête : repousser les limites du possible dans un univers où le silence est la première arme.

La France, héritière d'une longue tradition d'architectes navals audacieux, a su préserver une maîtrise rare de cet art. Des expérimentations téméraires de la Turtle aux systèmes autonomes pilotés par l'intelligence artificielle, chaque génération a ajouté une pierre à l'édifice, cherchant inlassablement l'équilibre entre la puissance, la furtivité et la résilience. Cette continuité n'est pas seulement technique : elle est culturelle, presque philosophique. Elle traduit la conviction que la souveraineté se joue aussi dans les profondeurs, là où se croisent les enjeux militaires, scientifiques et économiques du monde moderne.

Car comprendre et maîtriser l'espace sous-marin, c'est accéder à un territoire immense et encore largement méconnu, où se trouvent des ressources vitales, des câbles essentiels à l'économie mondiale et des zones de transit stratégiques. Dans un XXI^e siècle marqué par le retour des rivalités entre puissances, les océans redeviennent un théâtre central de compétition. Les sous-marins, invisibles mais omniprésents, en sont les acteurs les plus déterminants.

Ces « chevaliers du silence » veillent loin des regards, dans un environnement où la moindre erreur peut être fatale, mais où chaque mission réussie contribue à la stabilité internationale. Ils rappellent que la paix repose souvent sur des forces que l'on ne voit pas, et que la maîtrise des profondeurs reste l'une des clés de notre sécurité collective. Dans ce monde de ténèbres et de pression extrême, le silence n'est pas seulement une tactique : c'est un destin.



Partie 12: RÉFÉRENCES SUR LES SOUS-MARINS

1.1 Le mémo du sous-marin – Glossaire et lexique

Voici un glossaire complet et détaillé, conçu pour servir de référence rapide. Il regroupe les termes techniques, tactiques et scientifiques abordés dans votre étude sur les sous-marins et les technologies sous-marines de 2026.

Actif : se dit d'un sonar qui fonctionne comme un radar : émission d'un signal et écoute de son écho sur un objet (bâtiment de surface, sous-marin, rochers, animaux marins, ...). Opposé à Passif.
Note : dans le jargon des sonaristes ce terme est souvent utilisé pour dire, à tort : sensible, Exemple la partie "active" de la flûte (celle où se trouvent les hydrophones) par opposition à la partie inerte qui n'est que la liaison par câble)

AIP (Air Independent Propulsion) : propulsion anaérobie permettant aux sous-marins classiques (non nucléaires) de générer de l'énergie sans remonter à la surface pour aspirer de l'air (immersion prolongée de plusieurs semaines).

ALR : Antenne Linéaire Reporquée (Flûte).

Antenne d'Étrave (Sphérique ou Cylindrique) : sonar principal situé à l'avant du sous-marin, utilisé pour la détection frontale et la télémétrie.

Antenne Flanc (Flank Array) : larges panneaux de capteurs acoustiques disposés sur les côtés de la coque, permettant une écoute latérale très précise sur une grande surface.

Antenne Linéaire Remorquée (ALR) : autre nom de la flûte sonar ; antenne souple déployée à l'arrière du sous-marin pour détecter les sons très basse fréquence.

ASDIC : Anti-Submarine Detection Investigation Committee. Ancien nom du sonar.

ASM : anti sous-marine. On rencontre plus souvent **LASM** : lutte anti sous-marine. Aussi : Activité Sous-Marine

Assiette (d'un sous-marin) : position angulaire du sous-marin par rapport à l'horizontale, c'est-à-dire l'inclinaison longitudinale de la coque. Une assiette positive signifie que l'étrave pointe vers le haut ; une assiette négative indique qu'elle pointe vers le bas. L'assiette est contrôlée par les barres de plongée et par la répartition des masses internes (ballasts, transferts d'eau). Elle conditionne la capacité du sous-marin à monter, descendre ou maintenir une profondeur stable en toute discrétion.

ASW : Anti-Submarine Warfare

AUKUS : Alliance stratégique entre l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis, centrée sur le partage de technologies de propulsion nucléaire sous-marine. Pacte de sécurité trilatéral entre l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis. Son pilier principal est l'assistance apportée à l'Australie pour acquérir une flotte de sous-marins d'attaque à propulsion nucléaire.

AUV : Autonomous Underwater Vehicle.

Bâtiment de surface : navire à vocation militaire conçu pour opérer au-dessus de la surface de la mer, par opposition aux sous-marins. Il remplit des missions de surveillance, combat, escorte, projection de forces, commandement, ou soutien. Principaux types : corvette, frégate, destroyer, contre-torpilleur, croiseur, porte-avions ou hélicoptère, patrouilleur, chasseur de mines, ...

Bathymétrie : mesure des profondeurs et de la topographie du relief sous-marin.

BBNJ (Biodiversity Beyond National Jurisdiction) : traité international sur la protection de la biodiversité en haute mer, influençant les futures réglementations sur l'exploitation minière sous-marine.

- Beamforming** (Formation de voies) : processus mathématique utilisé par les calculateurs sonar pour combiner les signaux de multiples hydrophones afin de créer des "pinces d'écoute" directionnels.
- BITE** (Built-In Test Equipment) : système d'autodiagnostic intégré aux équipements électroniques permettant de détecter et localiser une défaillance interne en temps réel.
- Bruit Propre** : ensemble des bruits générés par le sous-marin lui-même (écoulement de l'eau, machines internes), que le système de traitement doit filtrer pour entendre l'ennemi.
- Canal SOFAR** (Sound Fixing and Ranging) : couche océanique située à une profondeur où la vitesse du son est minimale, agissant comme un guide d'ondes permettant aux sons de se propager sur des milliers de kilomètres.
- CAPTAS** : Combined Active and Passive Towed Array Sonar.
- Cavitation** : formation de bulles de vapeur sur les pales d'une hélice lorsque la pression chute. En éclatant, ces bulles créent un bruit caractéristique très repérable par l'ennemi.
- Célérité** : vitesse de propagation d'une onde (acoustique ou lumineuse) dans un milieu donné.
- CIEMG** (Commission Interministérielle pour l'Étude des Exportations de Matériels de Guerre) : Organisme placé sous l'autorité du Premier ministre français qui délivre les autorisations indispensables pour proposer et exporter des technologies militaires sensibles. C'est le premier verrou de souveraineté.
- CMA** : Contact Motion Analysis.
- CMS** (Combat Management System) : système informatique central qui agrège toutes les données des capteurs (sonars, radars, optronique) pour présenter une situation tactique et gérer l'engagement des armes.
- CO (Centre Opérations)** : cœur névralgique du sous-marin où sont analysées les informations et où sont prises les décisions tactiques par le commandant et ses officiers. *Voir* PCNO
- DA** : Distributed Array pour notamment la mesure de distance
- DASH** (Distributed Acoustic Sensing) : technologie utilisant la fibre optique pour transformer un câble en une série de capteurs acoustiques ultra-sensibles.
- DEMON** (Demodulated Noise) : technique d'analyse acoustique permettant d'extraire la fréquence de rotation des hélices et le nombre de pales d'une cible, facilitant son identification précise.
- Déni d'accès (A2/AD)** : stratégie visant à interdire à un adversaire l'accès à une zone géographique en utilisant des mines, des missiles et des sous-marins.
- Déplacement** : poids du volume d'eau déplacé par le sous-marin. On distingue le déplacement "en surface" et "en plongée" (ce dernier incluant l'eau contenue dans les ballasts).
- Diesel- électrique** : un sous-marin diesel-électrique (SSK) utilise un moteur électrique alimenté par des batteries pour sa propulsion en immersion, batteries qui sont rechargées en surface ou au schnorchel grâce à un moteur diesel nécessitant l'air atmosphérique. Contrairement à une voiture hybride capable de combiner simultanément moteur thermique et électrique pour optimiser son rendement, un sous-marin diesel-électrique alterne strictement entre les deux modes : diesel pour recharger, électrique pour naviguer en plongée, ce qui limite son autonomie submergée.
- Dissuasion** : stratégie visant à décourager une agression par la menace d'une riposte nucléaire massive (rôle principal des SNLE).
- DRSV (Deep Rescue Submarine Vehicle)** : sous-marin de sauvetage conçu pour intervenir en grande profondeur et récupérer l'équipage d'un sous-marin accidenté.
- Électromagnétisme sous-marin** : étude et utilisation des champs électriques et magnétiques générés par un sous-marin (signature E-M). En 2026, de nouveaux capteurs tentent de détecter ces anomalies pour compléter l'acoustique.
- ESM** (Electronic Support Measures) : système de guerre électronique captant les émissions radars et radio des navires ou aéronefs ennemis pour les identifier sans émettre soi-même.

Éversion (ou inversion) de température : phénomène où une couche d'eau chaude se trouve emprisonnée sous une couche plus froide, créant une zone de "cachette" acoustique pour les sous-marins.

F21 / MU90 : respectivement torpille lourde (française) et torpille légère (européenne). La première sert à couler, la seconde à chasser.

FA : Flanck Array. Antenne latérale de flanc.

Filoguidage : système de direction d'une torpille par un fil de cuivre ou une fibre optique, permettant au sous-marin lanceur de garder le contrôle total de l'engin pendant sa course.

FLASH (Folding Light Acoustic System for Helicopters), un sonar actif et passif monté à bord des hélicoptères.

Flûte sonar : antenne acoustique longue de plusieurs centaines de mètres, remorquée derrière le sous-marin pour s'éloigner du bruit propre du bâtiment.

FOST : Voir FSM

FREMM : frégates multimissions. Coopération entre la France et l'Italie. Douze sont en service dans diverses Marines.

FSM : les sous-marins français dépendent des Forces sous-marines françaises (FSM), une des quatre grandes composantes de la Marine française. Les FSM sont placées sous le commandement de la Force océanique stratégique (FOST). Basée à Brest, la FOST est commandée par un officier général de marine placé sous l'autorité du chef d'état-major de la marine.

Fuel Cell (Pile à combustible) : technologie de propulsion AIP utilisant la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité sans combustion, offrant un silence quasi absolu.

Gflops / MIPS : unités de mesure de la puissance de calcul. Les **Gflops** mesurent les opérations à virgule flottante (crucial pour le traitement du signal sonar), tandis que les **MIPS** mesurent les millions d'instructions par seconde.

GIUK Gap : espace maritime entre le Groenland, l'Islande et le Royaume-Uni, point de passage stratégique obligatoire pour les flottes russes sortant de l'Arctique vers l'Atlantique.

Halieutique : relatif à la pêche et à l'exploitation des ressources vivantes de la mer. Les sous-marins surveillent souvent ces activités pour contrer la pêche illégale.

Haliocline : couche d'eau où la salinité varie rapidement avec la profondeur. Comme la température, la salinité influence la célérité du son et peut créer des phénomènes de réfraction acoustique.

Hard Power : capacité d'un État à influencer les autres par la contrainte militaire ou économique (les sous-marins en sont l'outil pur).

Hydrophone : capteur élémentaire transformant les ondes de pression acoustique sous-marines en signaux électriques. Microphone conçu pour être utilisé sous l'eau pour enregistrer ou écouter les sons sous-marins.

IA (Intercept Array) : antenne d'interception acoustique spécifiquement conçue pour détecter, localiser et analyser les impulsions des sonars actifs adverses ("pings").

IA Acoustique : utilisation d'algorithmes d'apprentissage profond pour identifier automatiquement la "signature" d'un bâtiment parmi le bruit de fond marin, surpassant l'oreille humaine des "Oreilles d'Or".

Immersion : profondeur à laquelle se trouve le sous-marin. L'**immersion de sécurité** est la profondeur maximale autorisée pour éviter l'écrasement de la coque.

IP (Industry Participation) : obligations de retombées économiques locales imposées par le client, obligeant le fournisseur à faire travailler des entreprises du pays acheteur. Le sigle IP est souvent précédé de l'initiale du pays concerné, Ainsi, AIP : Australien Industry Participation,

ITR (Invitation to Register Interest) : première étape de consultation où le client identifie les industriels capables de concourir et sollicite leur manifestation d'intérêt.

LASM : lutte anti sous-marine

Leurre (Decoy) : dispositif éjectable destiné à tromper les capteurs d'une torpille ennemie en simulant une fausse cible.

LFAS (Low Frequency Active Sonar) : sonar actif basse fréquence utilisé par les navires de surface pour détecter des sous-marins très silencieux à longue distance.

Lidar Bleu-Vert : technologie laser expérimentale capable de pénétrer l'eau sur quelques dizaines de mètres, utilisée pour la détection de mines ou de sous-marins proches de la surface.

Lithium-Ion : technologie de batteries haute capacité permettant aux sous-marins classiques d'effectuer des sprints de vitesse prolongés, remplaçant les anciennes batteries au plomb.

LOFAR : Low Frequency Analysis and Recording.

LSM : Lutte Sous-Marine.

Maître d'œuvre : industriel responsable de la coordination globale du projet, garant de la cohérence entre les différents systèmes (coque, propulsion, combat) et interlocuteur unique du client.

Maître-bau : Largeur maximale du sous-marin. C'est une dimension critique qui détermine la résistance hydrodynamique et l'espace disponible pour les équipements internes.

Masse d'eau : concept tactique désignant un volume d'eau dont les propriétés (salinité, température, pression) sont homogènes, influençant la portée des capteurs.

Massif : structure supérieure du sous-marin abritant les mâts (périscopes, antennes) et servant de plateforme d'observation en surface. *Synonymes : Kiosque, Baignoire (partie supérieure ouverte), Fausse-tour.*

Massue (Effet) : terme tactique désignant l'impact psychologique et militaire d'une frappe soudaine par missiles de croisière (MDCN) depuis un SNA.

Mâts Optroniques : remplaçants modernes des périscopes optiques, utilisant des caméras haute définition (infrarouge, thermique) qui ne traversent plus physiquement la coque épaisse.

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) : micro-capteurs gravés sur silicium, permettant de miniaturiser les systèmes d'écoute à l'échelle microscopique.

Métamatériaux : matériaux artificiels conçus pour manipuler les ondes (acoustiques ou électromagnétiques) afin de rendre un objet invisible ou d'absorber totalement les sons.

Midget : sous-marin de poche ou mini sous-marin.

MIPS : Méga Instructions Per Seconde.

MOC : Multifunction Operator Console.

Mouilleur de mines : dispositif ou capacité d'un sous-marin à déposer des mines sous-marines de manière discrète dans une zone stratégique.

Nodules polymétalliques : concrétions rocheuses riches en métaux rares (manganèse, cobalt, nickel) reposant sur les plaines abyssales à 4000-6000m de profondeur.

Number Cruncher : processeur ou ordinateur à très haute puissance de calcul spécialisé dans le traitement de flux de données massifs (nécessaire aux traitements amont du sonar). Unité de calcul ultra-puissante dédiée au traitement massif des données brutes issues des antennes sonar pour les transformer en pistes exploitables.

Oreille d'Or : spécialiste de l'écoute acoustique chargé d'identifier les bruits captés par les sonars (hélices, pompes, bruits biologiques). Bien que l'IA progresse, leur expertise reste cruciale en 2026.

Passif : se dit d'un sonar qui "tend l'oreille" pour écouter les sons émis par d'autres. Opposé à Actif.

Patmar (Patrouille Maritime) : désigne à la fois la mission et l'aéronef (comme l'Atlantique 2) spécialisé dans la surveillance de vastes zones océaniques. Véritable PC de combat volant, il combine des capteurs acoustiques, radars et optroniques pour localiser et, si nécessaire, attaquer des sous-marins avec ses propres torpilles

PCNO (Poste Central Navigation Opérations) : zone du sous-marin regroupant le pilotage du navire et la conduite des opérations de combat (Centre Opérations – CO).

- PDS** (Project Definition Study) : étude de définition de projet, souvent subventionnée, qui permet d'affiner la conception technique et de figer les compromis coûts/performances avant la signature finale.
- PFAS** : Planar Flank Array Sonar.
- Piézoélectricité** : propriété de certains matériaux (céramiques PZT, polymère PVDF) à générer une tension électrique lorsqu'ils subissent une contrainte mécanique (onde sonore).
- PMFL** : Performance Monitoring and Fault Localization. Voir *BITE*.
- Pompe-hélice (Pump-jet)** : système de propulsion caréné remplaçant l'hélice conventionnelle pour réduire la cavitation et augmenter la vitesse de discrétion. Équipement standard des classes *Triumphant*, *Suffren* et *Virginia*.
- PTZ** : abréviation de piézoélectrique
- PVDF** (Polyfluorure de vinylidène) : polymère plastique souple utilisé pour créer des feuilles de capteurs acoustiques "collées" sur la coque.
- Quiescence** : état d'un sous-marin opérant dans un silence absolu, limitant ses propres émissions au strict minimum pour se fondre dans le bruit ambiant de l'océan.
- Réchauffeur (ou Régénérateur d'air)** : dispositif chimique ou mécanique permettant de recycler l'oxygène et d'éliminer le CO₂, crucial pour l'autonomie en immersion des SNLE.
- Réfraction** : déviation d'une onde sonore lorsqu'elle passe d'une couche d'eau à une autre avec des propriétés différentes (température/pression).
- ROV (Remotely Operated Vehicle)** : robot sous-marin télécommandé depuis la surface, utilisé pour l'exploration, l'inspection ou les interventions en profondeur.
- SAR (Synthetic Aperture Radar)** : radar à synthèse d'ouverture (RSO). Radar qui permet d'obtenir des images en deux dimensions ou des reconstitutions tridimensionnelles d'objets visés, tels des paysages.
- Seabed Warfare** : guerre des fonds marins visant à protéger ou attaquer les infrastructures critiques (câbles internet, pipelines).
- Short-list** : sélection restreinte des deux ou trois meilleurs candidats autorisés à poursuivre la compétition après l'analyse des premières offres.
- Signature Acoustique** : "empreinte digitale" sonore d'un navire, composée des fréquences spécifiques émises par ses machines et son hélice.
- Singularité de sillage** : perturbations physiques (thermiques ou turbulentes) laissées par le passage d'un sous-marin, que de nouveaux capteurs laser ou radars tentent de détecter depuis l'espace ou la surface.
- SINS** : Ship's Inertial Navigation System
- SLBM** : Submarine Launched Ballistic Missile.
- SNA** (Sous-marin Nucléaire d'Attaque ou SSN) : sous-marin à propulsion nucléaire dont la mission est la chasse, l'escorte et la projection de puissance (missiles de croisière).
- SNLE** (Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins) : sous-marin géant à propulsion nucléaire et transportant des missiles balistiques nucléaires, pivot de la dissuasion. Donc doublement nucléaire,
- SOFAR** (Sound Fixing and Ranging) : canal de propagation acoustique profond où le son reste "piégé" et peut parcourir des distances transocéaniques avec très peu de perte.
- Sonar Actif** : système émettant une onde sonore ("ping") pour obtenir un écho sur une cible. Très précis mais révèle immédiatement la position de l'émetteur.
- Sonar de Tranche** : capteurs acoustiques répartis sur toute la structure du navire pour surveiller les bruits internes et prévenir toute anomalie mécanique.
- Sonar Intercepteur** : capteur spécifique chargé de détecter instantanément si un sous-marin est "éclairé" par le sonar actif d'un ennemi. Il détecte les émissions sonar adverses,
- SOSUS** (Sound Surveillance System) : réseau historique et moderne de capteurs acoustiques fixes posés sur le fond de l'océan pour surveiller les mouvements sous-marins.

- SSBN** (Ship Submersible Ballistic Nuclear) : acronyme OTAN pour les SNLE (Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins).
- SSK** (Ship Submersible Hunter-Killer) : désignation OTAN pour les sous-marins conventionnels (non nucléaires) à propulsion diesel-électrique, dont la mission principale est la lutte anti-sous-marine et anti-surface. En 2026, ces bâtiments sont souvent équipés de technologies **AIP** ou de batteries au **Lithium-Ion** pour accroître leur discrétion et leur autonomie en plongée.
- SSN** (Ship Submersible Nuclear) : anglais pour Sous-marin Nucléaire d'Attaque (SNA).
- SUBTICS** : Submarine Tactical Integrated Combat System. Nom générique introduit par Thales et Naval Group dans les années 1990 lors de l'introduction sur le marché d'un Système de Combat révolutionnaire donnant la primauté à l'usage opérationnel,
- TA** (Towed Array) : nom anglais de l'antenne linéaire remorquée aussi appelée flûte.
- Téléométrie acoustique** : calcul de la distance d'une cible en analysant le temps de trajet du son ou la différence de phase entre plusieurs capteurs.
- Tender** (Demande d'offre) : document contractuel majeur émis par le client, contenant les spécifications techniques et les exigences administratives auxquelles l'industriel doit répondre.
- Thermocline** : couche de transition thermique rapide entre les eaux de surface (chaudes) et les eaux profondes (froides), agissant comme une barrière pour les ondes sonores. Elle agit comme un miroir acoustique, reflétant les ondes sonores et permettant à un sous-marin de se cacher des sonars de surface.
- TMA** (Target Motion Analysis) : analyse des mouvements du but. Processus suivi par des calculateurs ou des opérateurs pour calculer la route, vitesse et distance d'un objectif pour un lancement de torpille ou de missile
- ToT** (Transfer of Technology) : transfert de technologie permettant au pays client d'acquérir les compétences nécessaires pour maintenir, réparer ou construire une partie du système sur son territoire.
- Tranche** : compartiment étanche d'un sous-marin. La conception par tranches permet d'isoler une voie d'eau ou un incendie pour préserver la flottabilité du reste du bâtiment.
- Tube Lance-Torpilles** (TLT) : dispositif permettant d'éjecter des torpilles, des missiles de croisière ou des drones, souvent à l'aide d'une chasse à air comprimé ou d'une pompe à eau.
- UDS-International** (Underwater Defense System International). Société par Actions Simplifiées (SAS) fondée par Thalès et Naval Group en 1996 pour regrouper leurs activités en Systèmes de Combat pour sous-marins. Voir *SUBTICS*. Cette société sera apportée à la fusion plus générale des activités navales de ces deux sociétés en 2007.
- UUV** (Unmanned Underwater Vehicle) : drone sous-marin autonome ou télécommandé utilisé pour la surveillance, la guerre des mines ou l'attaque.
- Vecteur** : terme désignant le moyen de transport d'une charge (missile, torpille, drone) depuis le sous-marin vers sa cible.
- Veille passive** : mode d'écoute privilégié du sous-marin consistant à capter les bruits environnants sans émettre d'ondes sonar, pour rester indétectable.
- Vitesse de Discrétion** : vitesse maximale à laquelle un sous-marin peut naviguer tout en restant "invisible" pour les capteurs passifs adverses (généralement entre 5 et 12 nœuds).
- ZEE** (Zone Économique Exclusive) : espace maritime sur lequel un État côtier exerce des droits souverains en matière d'exploration et d'usage des ressources (jusqu'à 200 milles nautiques).

1.2 Films sur les sous-marin

Voici une sélection de dix films emblématiques, mêlant reconstitutions historiques poignantes et fictions haletantes, pour enrichir votre ouvrage :

Classiques Incontournables

- **Le Bateau (*Das Boot*), 1981** : la référence absolue en matière de réalisme, plongeant le spectateur dans l'enfer claustrophobe et moite d'un U-Boot allemand durant la Bataille de l'Atlantique.
- **À la poursuite d'Octobre rouge, 1990** : un thriller d'espionnage magistral où un commandant soviétique tente de faire défection vers les États-Unis avec un sous-marin nucléaire indétectable.
- **USS Alabama (*Crimson Tide*), 1995** : un huis clos sous haute tension explorant le dilemme éthique et la mutinerie autour d'un ordre de tir nucléaire non confirmé.

Histoire et Tragédies Réelles

- **K-19 : Le Piège des profondeurs, 2002** : l'histoire vraie du premier sous-marin nucléaire soviétique victime d'une avarie de réacteur, mettant en scène le sacrifice héroïque de son équipage.
- **Kursk, 2018** : une reconstitution poignante du naufrage du sous-marin russe en 2000, illustrant l'agonie des survivants et l'inertie politique tragique.
- **Torpilles sous l'Atlantique, 1957** : un duel psychologique légendaire et tactique entre le capitaine d'un destroyer américain et le commandant d'un U-Boot.

Visions Modernes et Fictions

- **Le Chant du Loup, 2019** : le fleuron du genre en France, centré sur "l'oreille d'or", un analyste acoustique capable de déceler la moindre menace dans le silence des abysses.
- **U-571, 2000** : un film d'action centré sur une mission commando visant à s'emparer d'une machine de cryptage Enigma à bord d'un sous-marin allemand en détresse.
- **Abyss, 1989** : une aventure de science-fiction où le sauvetage d'un sous-marin nucléaire échoué mène à la découverte d'une mystérieuse intelligence sous-marine.
- **20 000 lieues sous les mers, 1954** : l'adaptation culte de Jules Verne qui a immortalisé le *Nautilus* et la figure mystérieuse du Capitaine Nemo, pionnier de l'aventure subaquatique.

1.3 Livres sur les sous-marins

Voici une sélection de dix ouvrages essentiels, allant du récit de guerre authentique au chef-d'œuvre visionnaire, pour nourrir votre livre sur les sous-marins :

Les Classiques de la Fiction

- **Vingt Mille Lieues sous les mers (Jules Verne, 1870)** : l'acte de naissance du sous-marin moderne dans l'imaginaire collectif, mené par le mystérieux Capitaine Nemo et son légendaire *Nautilus*.
- **Octobre Rouge (Tom Clancy, 1984)** : le père du "techno-thriller" décrit avec une précision chirurgicale la traque d'un sous-marin soviétique furtif cherchant à passer à l'Ouest.
- **Le Bateau (Lothar-Günther Buchheim, 1973)** : un récit d'une noirceur absolue sur le quotidien étouffant et terrifiant d'un équipage d'U-Boot allemand pendant la Seconde Guerre mondiale.
- **Le Dragon sous la mer (Frank Herbert, 1956)** : bien avant *Dune*, l'auteur explore la psychose et l'espionnage à bord d'un sous-marin de haute technologie dans un futur en guerre.

Récits Historiques et Témoignages

- **Casabianca (Commandant L'Herminier, 1953)** : l'épopée héroïque du sous-marin français qui s'échappa de Toulon en 1942 pour rejoindre la lutte aux côtés des Alliés.
- **Blind Man's Bluff (Sherry Sontag & Christopher Drew, 1998)** : l'ouvrage de référence sur l'histoire secrète de l'espionnage sous-marin américain durant la Guerre froide.
- **Commandant de sous-marins (Amiral François Dupont, 2019)** : Le témoignage captivant de l'officier qui fut le premier commandant du SNLE *Le Triomphant*, dévoilant les coulisses de la dissuasion nucléaire.
- **Iron Coffins (Herbert A. Werner, 1969)** : l'un des rares témoignages de survivants des U-Boote, offrant une vision crue et réaliste de la défaite navale allemande.

Explorations et Techniques

- **Histoire des sous-marins : Des origines à nos jours (J.-M. Mathey & A. Sheldon-Duplaix, 2002)** : la "bible" historique et technique pour comprendre l'évolution de ces navires à travers les siècles.
- **Le jour ne se lève pas pour nous (Robert Merle, 1986)** : un récit immersif né d'un séjour de l'auteur à bord d'un sous-marin nucléaire français, capturant l'essence humaine de la vie "sous la tranche".

1.4 Sites sur les sous-marins

Sites francophones

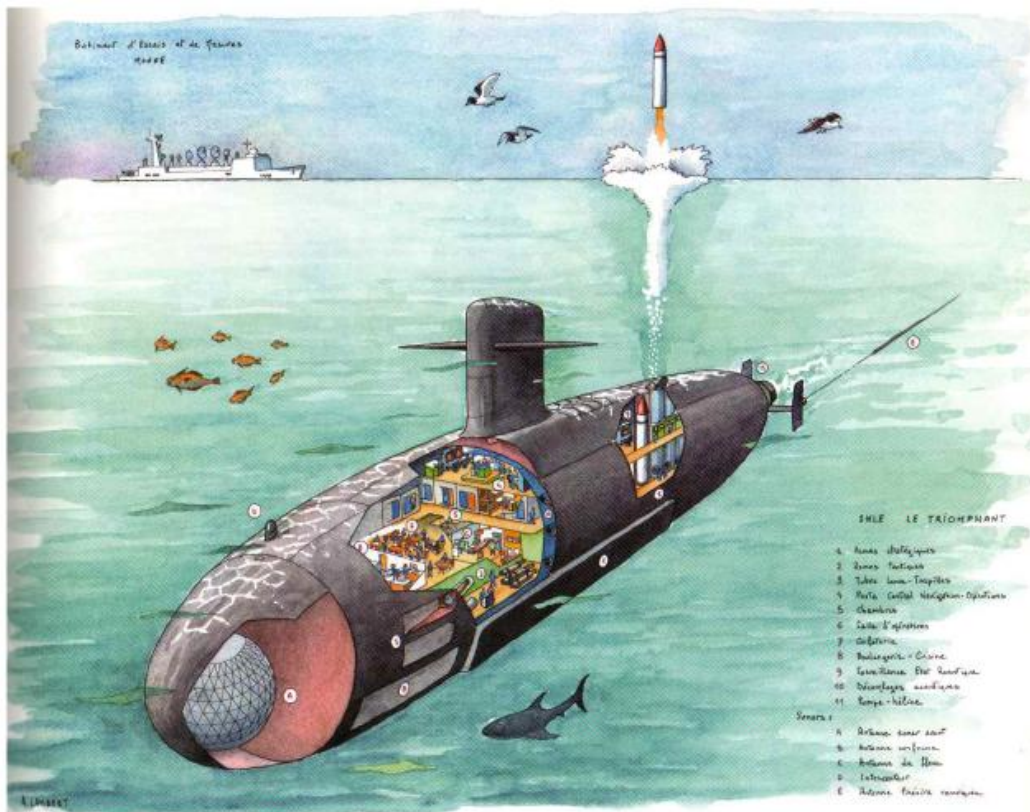
- **Modern Submarines** — base de données détaillée des sous-marins modernes et historiques, avec photos, articles et analyses.
<https://modern-submarines.com/> (modern-submarines.com)
- **Histoire des sous-marins — Wikipédia (fr)** — grande synthèse encyclopédique sur l'évolution des sous-marins depuis leurs origines jusqu'à aujourd'hui. ([Wikipédia](#))
- **Histoire des sous-marins (Fred et Jamy / AGASM)** — approche vulgarisée sur le fonctionnement, la vie à bord et l'histoire des sous-marins. ([AGASM-Sous-marins](#))
- **Le Portail des sous-marins** — site d'information généraliste sur les flottes sous-marines, technologies et actualités (infos variées, à compléter avec prudence car moins spécialisé). ([corlobe.tk](#))
- **Le portail navires & sous-marins (NavSource Online)** — une bibliothèque en ligne avec archives photographiques et historiques sur des sous-marins célèbres. ([navsource.net](#))
- **Naval Group – Section Sous-marins** – vue d'ensemble très complète sur les missions, technologies, enjeux stratégiques et capacités industrielles françaises.
[Naval Group](#)
- **Sous-Marin.fr** — répertoire de films, séries et représentations de sous-marins, utile pour l'histoire culturelle des submersibles.
<https://www.sous-marin.fr/> ([sous-marin.fr](#))
- **Unterseeboot.fr** — histoire des sous-marins allemands de la Seconde Guerre mondiale et galerie de photos.
<https://unterseeboot.fr/> ([unterseeboot.fr](#))
- **Wikipédia : Royal Navy Submarine Museum** — présentation du musée et de l'histoire internationale des sous-marins (page en français).
https://fr.wikipedia.org/wiki/Royal_Navy_Submarine_Museum ([Wikipédia](#))
- **Marine Nationale / pages partenaires** — souvent plusieurs sites institutionnels ou musées proposent des ressources historiques et techniques (par ex. archives navales du ministère).
<https://www.defense.gouv.fr/marine> ([modern-submarines.com](#))
- **Navires Historiques & Flottes** — divers blogs et portails francophones qui abordent l'histoire navale incluant les sous-marins (souvent liens compilés).
<https://www.histomar.net/> ([modern-submarines.com](#))

Sites anglophones

- <https://www.subsim.com/> — l'un des plus anciens et riches sites anglophones sur les sous-marins, mêlant informations générales, forums et ressources historiques. ([subsim.com](#))
- **Submarine Force – Naval History and Heritage Command** — portail officiel de l'histoire des forces sous-marines de la US Navy avec de nombreux articles et ressources. ([history.navy.mil](#))

- **History of Submarines — Encyclopaedia Britannica (en)** — ressource très bien structurée expliquant l'architecture, l'histoire et l'évolution des sous-marins. ([Encyclopedia Britannica](#))
- **Submarines – Wikipedia (en)** — article encyclopédique (anglais) sur les sous-marins et leurs définitions techniques, historiques et culturelles. ([Wikipedia](#))
- **Wikipedia — History of submarines** — article détaillé sur l'évolution des sous-marins depuis leurs origines.
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_submarines ([Wikipedia](#))
- **PigBoats.com** — site historique dédié aux sous-marins de la US Navy (1900-1941) avec des récits et photos.
<https://pigboats.com/>
- **Naval-Technology.com — History of submarines** — aperçu historique et technologique des sous-marins de l'époque des U-boats aux modernes.
<https://www.naval-technology.com/features/a-history-of-submarines-from-u-boat-to-dreadnought/> ([naval-technology.com](#))
- **Covert Shores (Hi Sutton)** — blog d'analyse indépendante sur les sous-marins et la technologie navale.
<https://www.hisutton.com/> ([Covert Shores](#))
- **MarineBio — Submarines & Deep Technology** — présentation vulgarisée de l'histoire et de la technologie des sous-marins.
<https://www.marinebio.org/creatures/tools/submarines/>
- **DEFENSE MEDIA NETWORK — Submarine Development** — articles approfondis sur l'histoire et l'évolution des sous-marins.
<https://www.defensemmedianetwork.com/stories/submarine-development/>

1.5 Au revoir et merci



Livres illustrés sur la Marine écrits par Michel Perchoc et illustré par André Lambert
Extrait de "En avant toute" – Éd novembre. 2001

Chaque plongée est une question posée au silence, et parfois, le silence répond.

Les océans gardent leurs secrets, mais les sous-marins savent les écouter.

Avertissements

Ce livre est à usage familial et amical et ne fera l'objet d'aucune commercialisation.
Toutes les informations, images et dessins contenus dans ce document sont publiques.
Toutes erreurs, mauvaises interprétations seraient de mon fait.
Toute reproduction est autorisée, sauf sur document à usage commercial.

