



**MINISTÈRE
DES ARMÉES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



LE TITANE DANS LES APPLICATIONS NAVALES MILITAIRES

Journées Titane
10 et 11 octobre 2023



FRANCE TITANE
The French Titanium Association



Sommaire

LE TITANE DANS LES APPLICATIONS NAVALES MILITAIRES

1. Pourquoi choisir le titane en construction navale militaire ?
2. Principales nuances de titane utilisées
3. Principaux frein au développement du titane en construction navale militaire
4. Applications – domaine « Propulsion »
5. Applications – domaine « Echangeurs et Circuits »
 - Titane moulé
 - Titane et fabrication additive
 - Titane roulé-soudé pour tubes d'échangeur de chaleur
6. Applications – domaine « Coque et structure de sous-marin »
7. Applications – domaine « Protection - Blindage »
8. Orientations



► Pourquoi choisir le Titane en construction navale militaire ?

- ✓ Exceptionnelle résistance à la corrosion en milieu Eau de Mer :
 - A l'ambiante et jusqu' à 90°C, insensible à la **corrosion caverneuse**,
 - Insensible à la **corrosion par le biofilm**.
- ✓ Faible densité : $d = 4,51$ (par rapport aux alliages de Fer, Cuivre ou Nickel)
- ✓ Caractéristiques mécaniques élevées
 - pour les alliages ($\alpha + \beta$) comme le TA6V ou le 5111
- ✓ Résistance élevée à l'érosion : abrasion et cavitation
- ✓ Amagnétique
- ✓ Recyclable



Pourquoi choisir le Titane en construction navale militaire ?

Propriétés	Applications principales	Intérêts/avantages attendus
Résistance spécifique élevée (Rm/d)	Coques SM Echangeurs Propulseurs	Gain de masse / Profondeur d'immersion accrue Réduction des volumes Devis de masse global SM / gain en partie arrière
Résistance à la corrosion par l'eau de mer : bonne	Circuits EdM Echangeurs Propulseurs Coques SM	Durée de vie accrue du bâtiment / Diminution maintenance / Entretien faible et espacé / Coût de possession amélioré Sécurité de fonctionnement accrue / Fiabilité Diminution du besoin de protection cathodique
Fatigue - Bon comportement en milieu marin	Coques SM Circuits Echangeurs Propulseurs	Sécurité de fonctionnement accrue Fiabilité Durabilité
Propriétés amagnétiques	Coques SM Propulseurs	Diminution de la signature magnétique du SM Diminution du risque de détection MAD
Résistance au choc : bonne	Coques SM Propulseurs Blindage coques BS	Agressions de la coque (torpille à charge creuse) Résistance aux fortunes de mer Blindage par doublante de zones sensibles
Dilatation linéique : faible	Circuits Echangeurs	Diminution des contraintes internes en fonctionnement
Résistance à l'érosion : excellente	Circuits Echangeurs Propulseurs	Dimensionnement / Vitesse de circulation accrue / Entretien réduit / Augmentation de la durée de vie Résistance à l'érosion-cavitation

Principales nuances de Titane utilisées

Propriétés	Nuances / Etat								
	T 40 Grade 2 Forgé α	T 60 Grade 4 Forgé α	TA6V Grade 5 Forgé $\alpha+\beta$	TA6V ELI Grade 23 Forgé $\alpha+\beta$	TA3V ELI Grade 9 Forgé $\alpha+\beta$	TD5AC* Corona 5 Forgé $\alpha/\alpha\beta$	TA4V2 IIT3B Forgé $\alpha+\beta$	Ti 5111 Grade 32	TA6V Grade 5 Moulé $\alpha+\beta$
d	4,51	4,51	4,43	4,43	4,50	4,54	4,38	4,43	4,43
E (GPa)	107,5	108	114	114	112	114 - 117	114 - 119	110	105 - 120
R_{p0,2} (MPa)	≥ 290	≥ 440	≥ 830	≥ 760	≥ 520	≈ 850	≥ 650	755	≥ 840
R_m (MPa)	390 - 540	540 - 740	900 - 1160	≥ 835	≥ 620	900 - 950	700 - 900	830	≥ 930
A (%)	≥ 20	≥ 15	≥ 8	≥ 8	≥ 15	17	≥ 10	8	≥ 6,5
Z (%)	≥ 30	≥ 25	≥ 20	≥ 20	≥ 30	≥ 39	≥ 16	20	8,5
K_{1c} (MPa√m)	≈ 90	≈ 85	≥ 60	≥ 70	≥ 50	124 - 192 (K _{1j})	125 - 166 (K _{1j})	113	≥ 97
Norme T. Th.	GAM 22 recuit	GAM 22 recuit	GAM 22 recuit	GAM 22 recuit	GAM 22 recuit	R 96/30 recuit	S - 95034 recuit		PV-3788
Applications navales (réelles ou potentielles)	Echangeurs (Tubes, coquilles)	Echangeurs (Tubes, coquilles et plaques)	Echangeurs Coque SM,	Echangeurs, Propulseurs	Echangeurs, Propulseurs	Coque SM	Coque SM	Echangeurs Circuits EdM	Propulseurs, Sectionne- ments circuit EdM

* forgeage β (960°C) avec passage du transus sous corroyage - TT 860-910°C / 1h - air - recuit 710°C / 8h - air

Principaux freins au développement du titane

- ✓ **Coût élevé** (élaboration et mise en œuvre)
- ✓ Mise en œuvre souvent délicate voire difficile :
 - **Soudage,**
 - Formage (texture)
- ✓ Sensible à la rupture différée
- ✓ Sensible à l'effet d'entaille
- ✓ Ductilité relativement faible
- ✓ Coefficient de frottement médiocre
- ✓ Bio compatible => sensible à l'encrassement par « fouling »
- ✓ Risque de couplage galvanique en milieu eau de mer avec les autres nuances métallurgiques (moins nobles)



Domaine « Propulseurs »

- ✓ **Favorable au devis de masse (partie arrière du navire) à tenue mécanique équivalente**
 - résistance mécanique élevée
 - densité faible
- ✓ **Bonne tenue dans le milieu de service**
 - résistance à la corrosion et à l'érosion de cavitation
 - bon comportement en fatigue en eau de mer
- ✓ **Réduction de la signature magnétique du navire**
- ✓ **Diminution du coût global de possession**

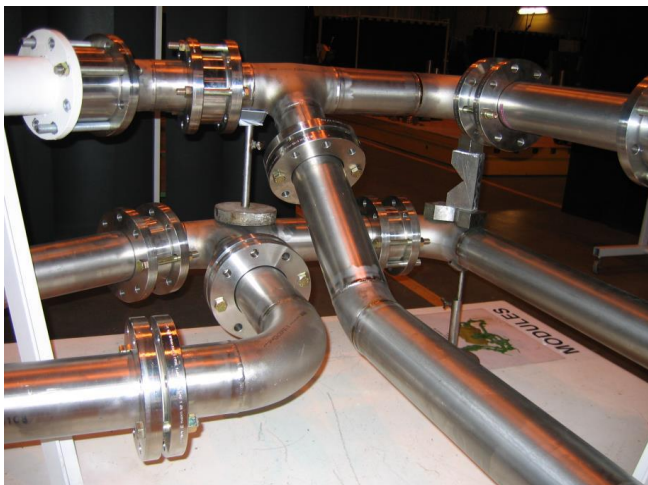
Domaine « Echangeurs et Circuits »

- ✓ **Diminuer la sensibilité des systèmes aux phénomènes de corrosion, d'érosion-cavitation**
 - pour **augmenter leur fiabilité et leur disponibilité**
 - pour **augmenter leur durée de vie**
- ✓ **Réduire les contraintes internes de fonctionnement grâce au faible coefficient de dilatation thermique**
- ✓ **Diminuer l'encombrement grâce à des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées**



Echangeurs et Circuits - PA Charles de Gaulle

Remplacement d'un circuit eau de mer en Cu Ni par un circuit en titane T-40



@crédit Naval Group



@crédit Naval Group



@crédit Naval Group

**Montage à blanc du circuit
en atelier avant montage à bord**

Echangeurs et Circuits - PA Charles de Gaulle



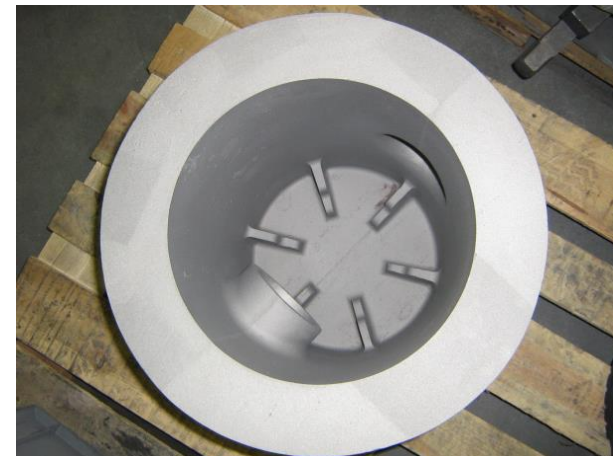
▲ Filtres circuits eau de mer en Titane T-40 moulé (système anti fouling)



@crédit Naval Group



@crédit Naval Group



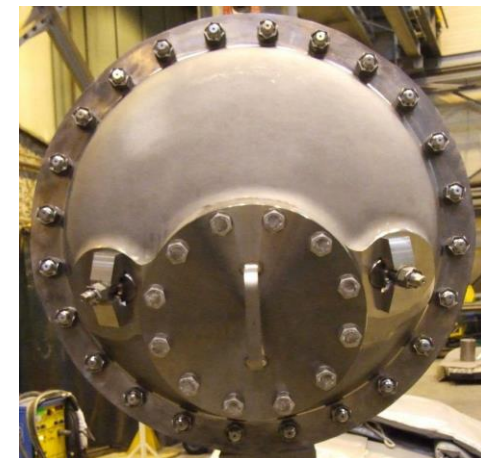
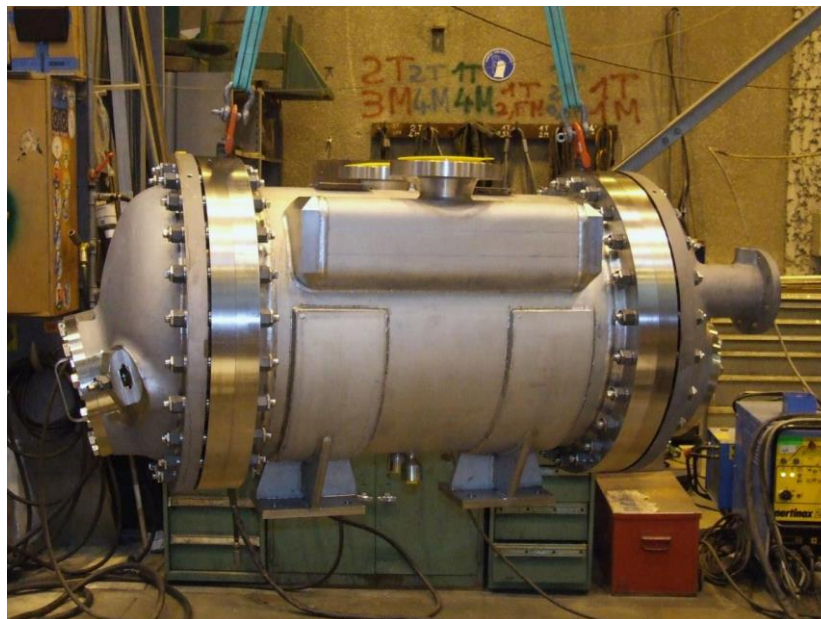
@crédit Naval Group

PA CdG – Echangeur thermique

Coquilles T-40 moulé ; Plaque à tubes T-60 ; Faisceau tubulaire T-40



@crédit Naval Group



@crédit Naval Group



Condenseur principal de SNLE 2G



@crédit Naval Group

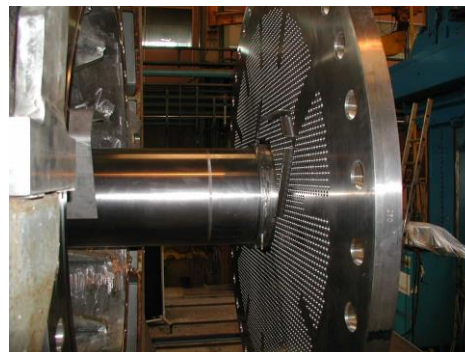
Vue d'ensemble du condenseur principal

- ✓ Coquilles : TA6V ELI forgé
- ✓ Plaque à tubes : T-60 forgé
- ✓ Tube central : T-40 extrudé



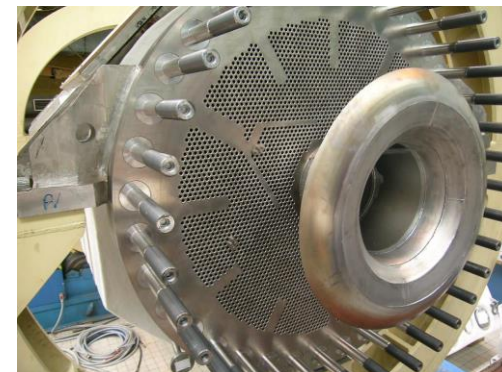
@crédit Naval Group

Coquille E/S



@crédit Naval Group

Plaque et tube central



@crédit Naval Group

Goujons et plaque et tube central

Echangeurs et Circuits

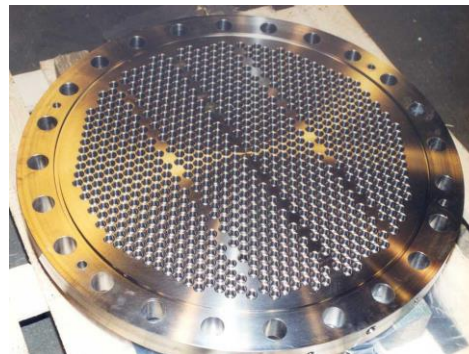


SNLE 2G – Réfrigérant EM/CJ en titane

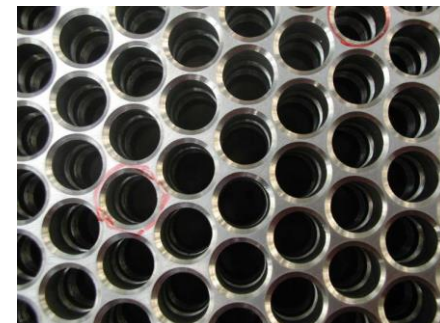


@crédit Naval Group

Vue d'ensemble d'un réfrigérant EM/CJ



@crédit Naval Group

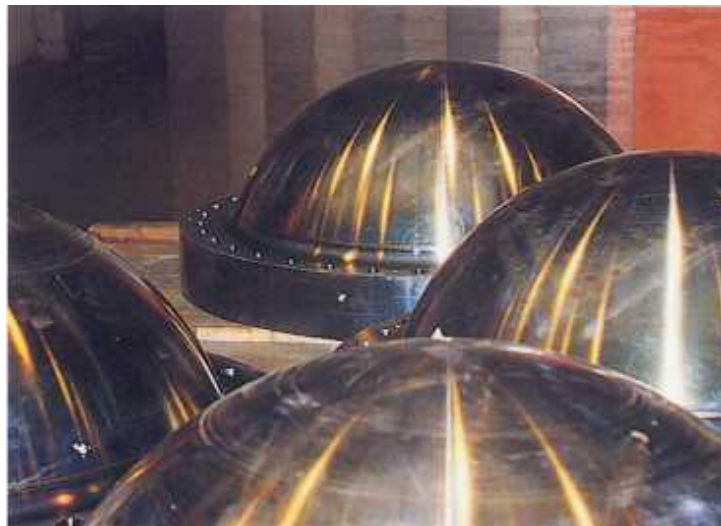


@crédit Naval Group

Plaque à tubes de réfrigérant en Titane T-60 forgé

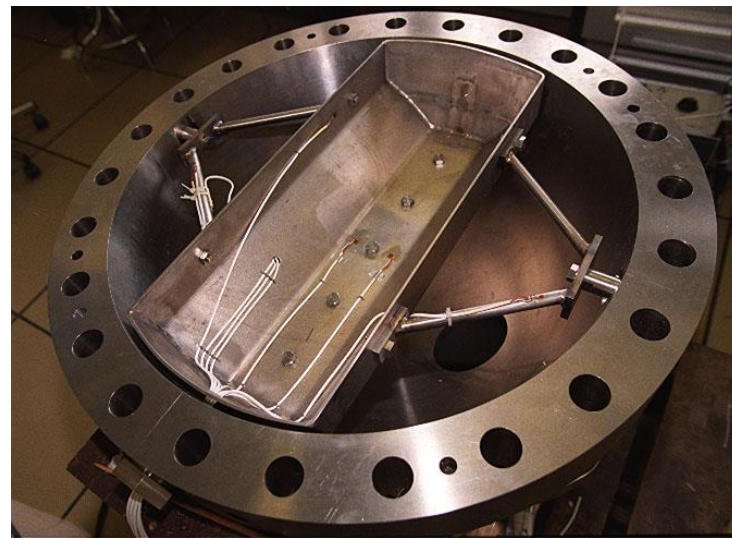


SNLE 2G – Coquilles de réfrigérant



@crédit Naval Group

Coquilles de réfrigérant en T-40 forgé



@crédit Naval Group

Vue intérieure d'une coquille de fond



Coquilles de réfrigérant

Coquille E/S et coquille de fond en T-40 moulé



@crédit Naval Group



@crédit Naval Group

Titane et Fabrication additive

Procédé WAAM : Wire Arc Additive Manufacturing

- Application appareil à pression
- Pièce massive de forte épaisseur : 2 Tonnes
- Titane nuance T-40 (grade 2)

Démonstrateur :

- Démonstrateur représentatif des singularités géométriques
- 150 kg
- Forte épaisseur
- MIG CMT
- Caractéristiques mécaniques supérieures aux requis du forgé selon l'ASTMB381-21
 - $R_{p0,2}$ # 350 MPa,
 - R_m # 440MPa
 - $A\%$ # 30%



@crédit Naval Group

Pièce représentative de
l'application visée

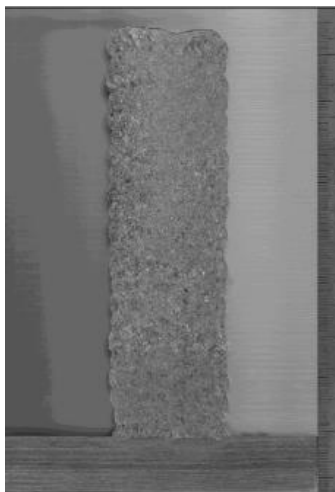
WAAM Titane – R&D Naval Group sur composant sous pression



300mm



@crédit Naval Group



@crédit Naval Group

Exemple structure grain fin
après TTH (palier 500°C)



@crédit Naval Group

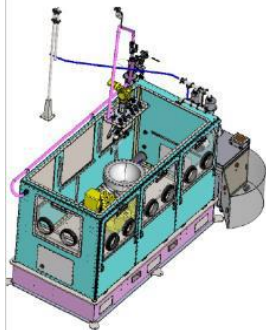
➤ Paramètres à maîtriser :

- Environnement et condition de dépôt favorable (condition d'inertage maîtrisée),
- Stratégies de dépôt,
- Fil (maîtrise de la supply chain)
- Robotisation

WAAM - Démonstrateur



Partenariat Naval Group - Institut Maupertuis

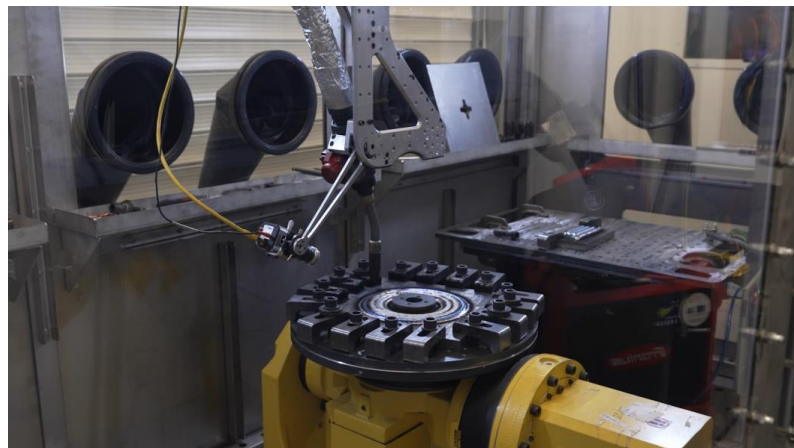


@crédit Naval Group



@crédit Naval Group

Résultat : 1 démonstrateur dia 600mm
Hauteur 500mm - Masse ~ 150 kg



@crédit Naval Group

[GCMN SG1 Coquille WAAM Titane - video.pptx](#)

Démonstrateur TRL 5 :

Propriétés mécaniques :

- Rp0,2 & Rm supérieurs aux résultats issus des murs
- A% supérieurs aux résultats issus des murs
- Z% inférieurs aux résultats issus des murs
- Toutes les caractéristiques sont supérieures au requis du forgé selon ASTM B381-21

- Taux d'oxygène et d'hydrogène conforme au seuil de la norme
- Filiation de microdureté comparable aux données antérieures
- K1J non réalisé à date

▶ Tubes en titane roulé-soudé pour échangeur de chaleur

Tubes en titane T40 (grade 2)

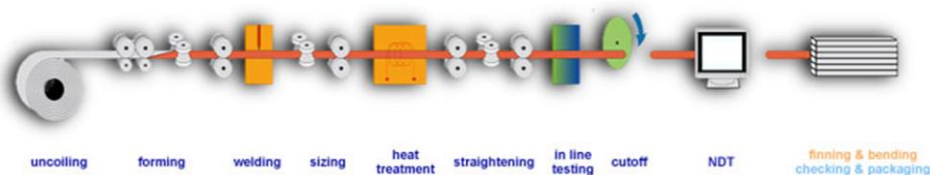
Fournisseur : NEOTISS SAS

Technologie qualifiée par Naval group en remplacement des tubes étirés sans soudure.

Application aux échangeurs de chaleur pour sous-marins

Procédé de fabrication (source NEOTISS)

our full process



@crédit Naval Group



SNA Duguay-Trouin
1^{er} SM à mettre en œuvre
la technologie titane RS
sur échangeur de chaleur

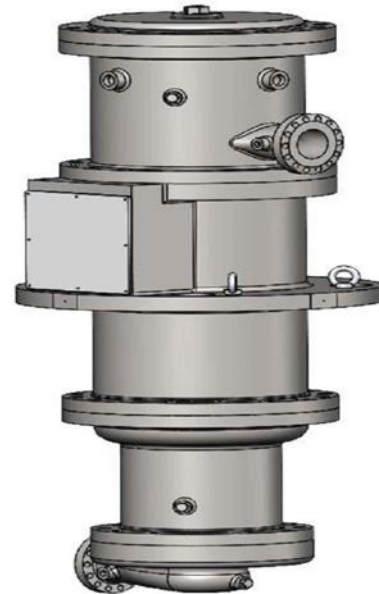
Pompe de refoulement eau de mer en Titane Moulé

Objectifs : tenue à la corrosion, résistance à la cavitation du corps et des internes, réduction de masse, durabilité

Corps de pompe et corps de refoulement : T-A6V moulé

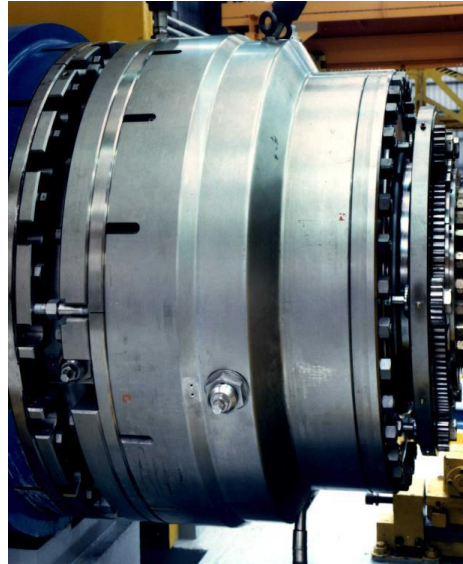
- corps de pompe : 300 kg après optimisation (limite de capacité du fabricant)
- corps de refoulement : 170 kg
- Diamètre : 900 mm

Internes de pompe : T-40 moulé





▶ Presse étoupe de ligne d'arbres en T-A6V forgé



@crédit Naval Group



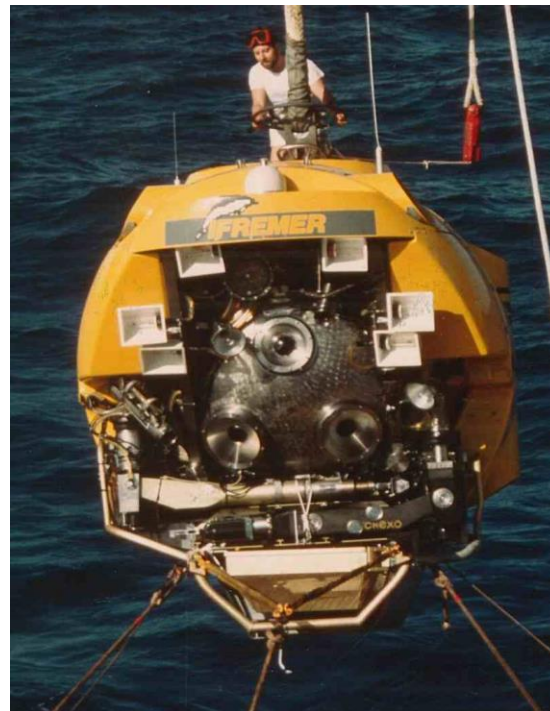
Domaine « Coques et Structures de sous-marin »

- ✓ **Accroître les immersions maximales pour :**
 - réduire la vulnérabilité (grenades et torpilles lourdes)
 - réduire la détectabilité (aérienne et surface)
 - résister aux explosions SM (aptitude à résister aux surpressions)
 - augmenter les capacités de détection passives du navire (profiter d'une bathythermie plus favorable)

- ✓ **Diminuer la signature magnétique**
 - réduction des risques de détection MAD

- ✓ **Diminuer les coûts de maintenance**

Domaine « Coques et Structures »



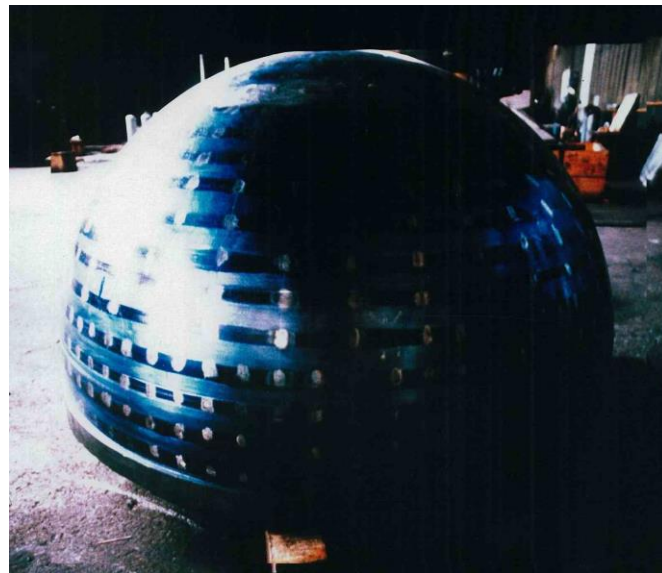
Nautil - Vue générale et sphère en TA6V ($\varnothing=2,1$ m)

Domaine « Coque et structures »



Forgeage d'une demi-sphère

Sphère du Nautille





▮ Domaine « Protection - Blindage »

✓ Intérêt du Titane :

- dureté
- bonne résistance au choc
- bonne résistance aux agressions balistiques (notamment pénétration par charge creuse)
- faible densité (pour blindage rapporté sur la structure)

✓ Nuances de matériaux potentiellement utilisables :

- Titane : TA6V, TA6V bas coût
- Acier à Blindage Naval (rapporté et structural : La Fayette, Horizon, FREMM, FDI)
- assemblage céramique - composites organiques

✓ Application : blindage TA6V en par plaques rapportées dans les soutes à munitions

Orientations

- ✓ **Optimisation de l'emploi du titane moulé comme alternative au forgé**
 - Taille des pièces
 - Qualité de réalisation

- ✓ **Développement des procédés de fabrication additive adaptés au titane et aux alliages de titane**
 - Procédé WAAM pour la fabrication de pièces massives
 - Procédé SLM pour pièces de petites dimensions nécessitant un bon état de surface

- ✓ **Développement des nuances de titane bas coût**
 - Blindage rapporté sur la structure