

Le 16 septembre 2008

RAPPORT n° 1228 A

Fiche demandeur :

Mise en page : Régine Hocquette

BREST – 29, Finistère (Bretagne) Musée national de la marine Définition d'un protocole pour la conservation-restauration du sous-marin SeeHund

François MIRAMBET, Ingénieur de recherche, pôle scientifique « Métal »

Destinataires :

M. Michel CLEMENT, directeur de l'Architecture et du Patrimoine
s/c de Mme Danièle DEAL, sous-directeur des monuments historiques et espaces protégés
182 rue Saint Honoré - 75033 Paris cedex 1

Mme Marjolaine MOUROT, conservatrice en chef
Chef du service conservation
Musée National de la Marine – Palais de Chaillot – 17 place du Trocadéro – 75116 Paris

M. Jean-Daniel PARISSET, conservateur des archives et de la bibliothèque du patrimoine
Hôtel de Croisilles - 12 rue du Parc Royal - 75003 Paris

Introduction

En début d'année 2008, une mission d'expertise a été effectuée à l'antenne de Brest du Musée national de la marine, située dans le château.

Cette visite a été réalisée à la demande du service de conservation du Musée national de la marine dans le but d'effectuer un bilan sanitaire d'un sous-marin de type Seehund et proposer des actions en matière de conservation-restauration. Ce sous-marin est présenté depuis 1990 en extérieur dans le château de Brest, face à la mer, sans protection particulière (fig. 1).

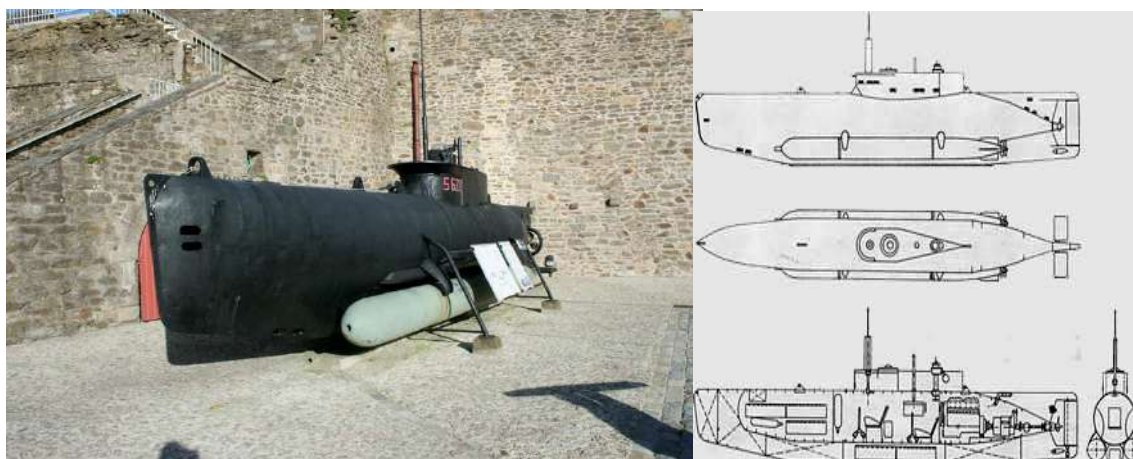


Fig.1. Vue générale et plan du sous-marin Seehund exposé au château de Brest
NUM20080472

Entre 1990 et 2008, un certain nombre d'interventions de conservation ont été réalisées, soit par les personnels des musées, soit par des personnels des ateliers militaires de la Flotte.

Ces interventions ont principalement porté sur la réfection de tôles de la coque, du massif et de l'étrave ainsi que sur des ré-applications de films de peinture sur des zones altérées. Un travail important a également été effectué sur la partie arrière. Celui-ci a conduit au remplacement du carter d'hélice fortement corrodé par une pièce en résine (sans doute de type polyester).

Un dernier constat d'état a été effectué par le laboratoire Arc'antique en 2004. Celui-ci a permis de mettre en évidence des problèmes d'altération importants au niveau du plancher interne du sous marin certainement liés à des zones de rétention d'eau, ainsi que nombreuses dégradations du « feuil » de peinture qui, de ce fait, n'assure plus son rôle protecteur.

I - Bilan sanitaire

Au cours de notre visite un examen des parties externes et internes a pu être réalisé. En ce qui concerne les zones internes, seule la partie située sous le kiosque a pu être examinée de manière approfondie.

1. Examen des parties extérieures

L'ensemble du sous-marin est recouvert d'un système de peinture multicouche. Sur de nombreuses zones, en particulier sur les parties basses, ce film n'assure plus son rôle de barrière entre le métal et le milieu corrosif. Les figures 2, 3 et 4 montrent que la rupture de ces films a permis à des couches de produits de corrosion de se développer au niveau de la quille sur les parties avant et arrière du bâtiment. De manière générale le film est altéré sur de nombreuses zones, ce qui facilite l'accès d'un électrolyte au niveau de métal. Cela provoque également une corrosion sous les feuillets de peinture (fig. 5).



Fig.2 et 3. Phénomènes de corrosion observés (photo de gauche - NUM20080473) à l'arrière du bâtiment au niveau de la quille et (photo de droite - NUM20080474) à l'avant sur le flanc gauche du navire.



Fig.4. Zone fortement corrodée relevée sous la barre de plongée de gauche à l'arrière du navire. NUM20080475



Fig. 5. Développement de la corrosion sous le film de peinture. NUM20080476

De fortes dégradations sont également observées sur des zones de rétention d'eau (fig. 6) en particulier à l'avant.



*Fig.6. Tôles corrodées dans des zones de rétention d'eau (partie avant basse de la coque)
(NUM20080458)*

On observe également des niveaux d'altérations relativement importants sur les parties externes, le plus souvent sur des zones difficiles d'accès présentant des pièces à la géométrie complexe. Ces dernières sont plus difficiles à protéger dans le cadre des campagnes d'entretien (fig. 7 , 8 et 9).



*Fig.7 et 8. Appendice situé au dessus des torpilles (photo de gauche - NUM20080459),
partie basse du safran (photo de droite - NUM20080460)*



*Fig. 9. Vue du dessous du carénage situé au dessus des torpilles
(NUM20080461)*

Ce constat peut être également fait pour les torpilles, le carénage d'hélice et les parties basses de la coque.

Dans différents cas, ces dégradations ont provoqué une perforation de certaines tôles sur l'arrière qui sont aujourd'hui colmatées à l'aide de films adhésifs (fig. 8).

Des altérations importantes ont pu être relevées près de l'hélice en bronze. Un couplage galvanique avec les éléments en acier de la coque a provoqué une accélération de la cinétique de corrosion de cette hélice. (fig. 10)



*Fig.10. Corrosion galvanique au niveau de l'arbre d'hélice
(NUM20080462)*

L'état des films de peinture montre que ceux-ci ont absorbé une grande quantité d'eau ce qui a favorisé la dégradation du métal. En effet, ces films de peinture très dégradés ont une perméabilité à l'oxygène et à l'eau suffisante pour entretenir à la surface du métal une vitesse de corrosion comparable à l'ambiance atmosphérique dans le cas d'un métal non recouvert.

Dans le cas du Seehund, une fois le film fortement hydraté, un chemin de conduction ionique peut s'établir jusqu'au métal par mise en contact des zones hydrophiles. A ce stade, les ions agressifs comme les ions Cl⁻ peuvent alors atteindre la zone interfaciale métal-peinture et engendrer des phénomènes de corrosion accélérés. En raison du lieu d'exposition du submersible, ce phénomène a été certainement fortement accentué.

Depuis des années, l'entretien du sous-marin a consisté à appliquer périodiquement un nouveau film sur des feuillets de peinture déjà dégradés (fig. 11). Dans ces conditions, il n'a pas été possible de garantir une bonne conservation du métal sous-jacent compte tenu du degré de corrosivité de la zone d'exposition (présence d'aérosols chargés en chlore).



*Fig.11. Zone de délamination du feuil supérieur de peinture
(NUM20080463)*

Ces différentes constatations montrent qu'aujourd'hui la protection des parties externes n'est plus correctement assurée par les films de peinture anciens.

2. Examen des parties internes

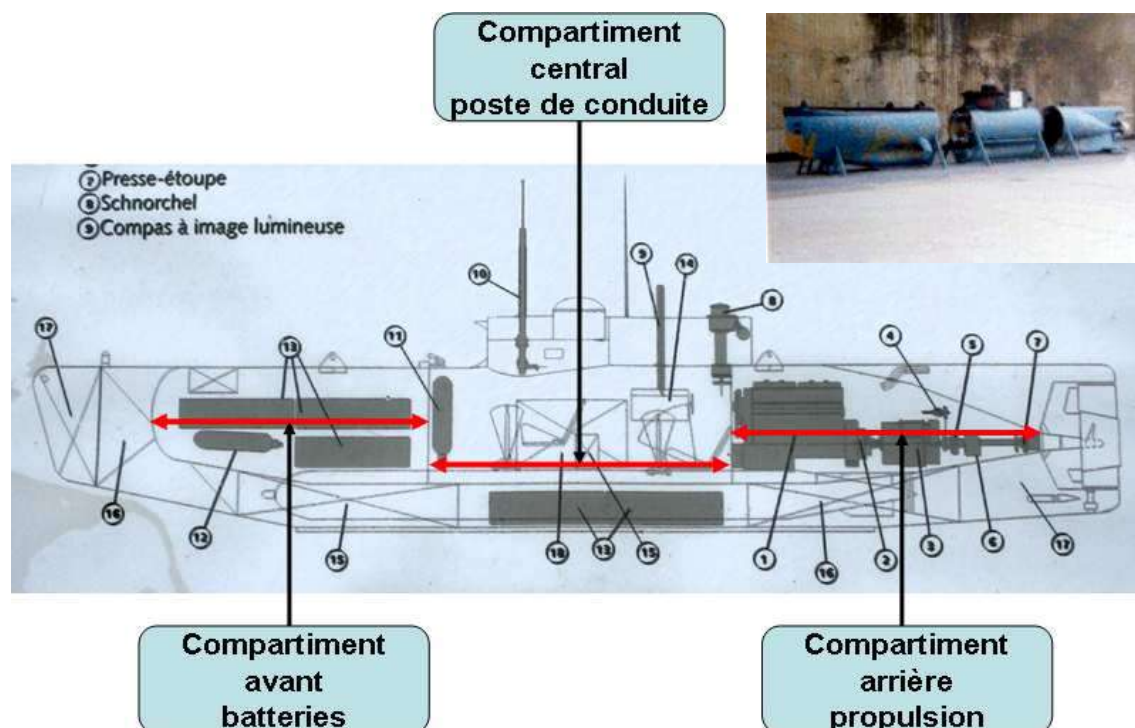


Fig.12. Plan des parties internes du sous-marin.

La photographie (fig. 12) prise lors des grosses opérations de protection entreprises en 1989 montre que le navire peut être divisé en trois sections distinctes. Ces parties sont démontables et cela, dans l'hypothèse d'une remise en peinture, pourrait permettre de faciliter les opérations de sablage.

Les figures 13 et 14 montrent l'état de conservation actuel de la partie avant du sous-marin.

Cette section avant rassemble des râteliers pour le stockage des batteries destinée à l'alimentation en plongée. Aujourd'hui ces batteries ont disparu. Cette zone difficilement accessible ne semble pas trop dégradée. La surface interne du compartiment paraît en bon état puisqu'une simple corrosion de surface peut-être observée.



Fig. 13 et 14. Vues du compartiment avant du sous-marin
(NUM20080464 et NUM20080465)

La partie centrale est située sous le kiosque, là où se trouvait le poste de contrôle du bâtiment. Nos investigations ont montré que la zone interne la plus dégradée se situait juste en dessous de l'écouille. Lors de très fortes précipitations, le manque d'étanchéité au niveau de l'écouille permet à l'eau de s'infiltrer et de s'écouler jusqu'au plancher. A cet endroit, un film peut se former conduisant ainsi à une accélération des cinétiques de corrosion.

Au cours du temps, la tôle du plancher s'est entièrement corrodée et le métal a complètement disparu. Aujourd'hui, seules subsistent, et cela sur une grande surface, des feuilles de produits de corrosion (fig. 15 et 16).



Fig. 15 et 16. Vues du plancher dans le compartiment central
(NUM20080466 et NUM20080467)

L'important niveau de dégradation observé est lié aux faibles épaisseurs des tôles de plancher. Dans cet environnement, la corrosion atmosphérique du fer progresse lors de cycles humidification/séchage caractérisant la condensation périodique d'un électrolyte, suivie de son évaporation.

Pendant un cycle d'humidification-séchage « typique » de quelques heures, trois phases sont distinguées (fig. 17) :

- la phase de condensation de l'électrolyte ou période de « mouillage » du matériau (phase I),
- la période humide et le début du séchage (phase II),
- la fin du séchage (phase III).

Modélisation des trois phases du cycle humidification-séchage

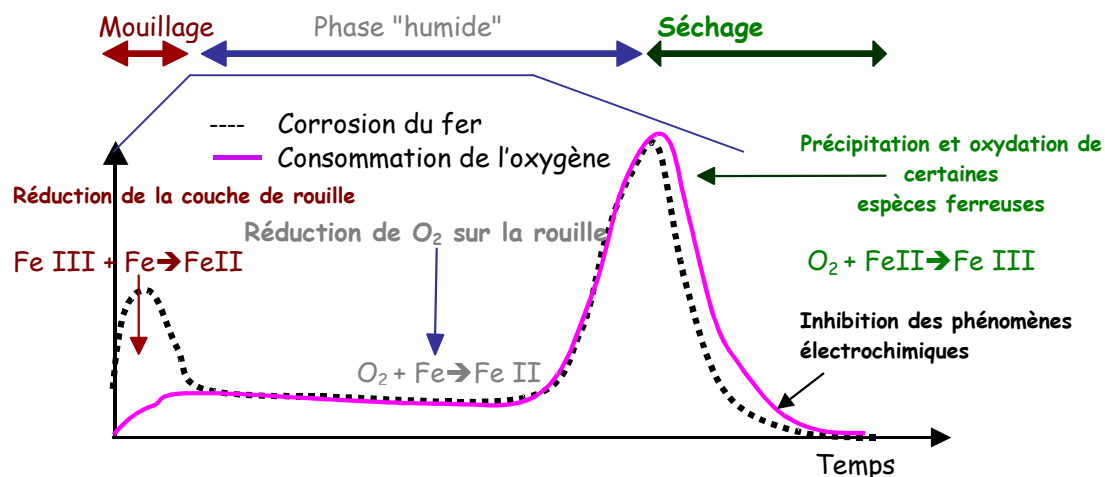


Fig. 17. Cycle d'humidification-séchage

Les cinétiques de corrosion sont liées à la fréquence de ces cycles puisque le diagramme montre que les vitesses de corrosion sont les plus élevées lors de la phase de mouillage et de séchage. Plus les épaisseurs de tôles sont faibles, plus le niveau de dégradation relevé est important. A contrario les parois du compartiment (très épaisses pour résister aux fortes pressions en plongée) sont encore en bon état bien que le film de peinture soit totalement dégradé. (fig. 18). Sur les parties latérales du compartiment, les niveaux de dégradation sont généralement faibles et de nombreux résidus de peinture sont encore visibles.



*Fig. 18. Vue des parois du compartiment central
(les boulons assurant la liaison entre les deux compartiments sont visibles à gauche de l'image).
(NUM20080468)*

La figure 19 montre l'état de conservation de la section arrière où était installé le moteur diesel. Ce compartiment est aujourd'hui pratiquement vide. Il n'y subsiste que quelques éléments de tuyauterie. Un joint détérioré peut être observé à droite, accompagné de fibres blanches.

Notre examen a montré que le niveau de conservation de cette partie était relativement bon, tout au moins pour ce qui est des parties visibles (fig. 19 et 20). Sur la figure 20, il est possible d'apercevoir en bas la zone de raccordement entre le compartiment central et le compartiment arrière.



*Fig. 19 et 20 : Vues du compartiment arrière du sous-marin
(NUM20080469 et NUM20080470)*

Dans la section arrière, au niveau des trappes boulonnées, aucune altération n'est visible bien que la face externe d'une des pièces soit fortement corrodée (fig. 21).



*Fig. 21. Vue externe de la trappe arrière.
(NUM20080471)*

En ce qui concerne la partie interne du Seehund, à l'exception du plancher situé au dessous du kiosque, les différents éléments ont plutôt bien résisté aux cycles humidification séchage. En tout cas pour les parties auxquelles nous avons pu accéder.

II - Préconisations pour les interventions de conservation-restauration

Compte tenu des conditions de conservation du sous-marin en extérieur face au vent et en présence d'aérosols contenant des teneurs en chlore élevées, la protection la plus efficace pour le sous-marin SeeHund serait une remise en peinture complète.

Il faudrait donc avant tout procéder à un décapage complet des surfaces, accompagné d'une préparation des surfaces métalliques, afin de garantir une bonne tenue dans le temps du système appliqué.

A titre d'exemple nous proposons un protocole d'intervention qui pourrait être inscrit dans le cahier des charges :

1) Opération de décapage à l'aide d'abrasifs : élimination des couches de corrosion

Le décapage sera effectué par jet d'abrasif soit de types corindons bruns ou algaïdes en fonction de la résistance du substrat à décaper.

Le degré de soin attendu Ds 2,5 à 3 ou Sa 2 ½ (décapage soigné, il ne subsiste aucune trace de corrosion) (ISO 8501-1 : 1988); un soin particulier sera apporté aux zones peu accessibles.

Niveau de rugosité : moyen G.

Si le métal n'est pas rapidement protégé après décapage, il sera procédé à un nouveau nettoyage.

2) Dépoussiérage

Elimination des subjectiles utilisés lors du décapage, des résidus de peinture et des diverses poussières générées lors de l'opération.

3) Dégraissage des structures

Un dégraissage chimique, sans utilisation de produits contenant du chlore et des solvants halogénés, des parties sur lesquelles se sont déposées des salissures devra être réalisé.

4) Mise en place du système de protection

Mise en peinture à la brosse ou au pistolet en fonction du système retenu.

Le système de protection retenu sera un système « trois ou quatre couches ».

Le système de peinture appliqué devra permettre de résister à des ambiances extérieures de type C5 Ma (corrosivité très élevée (marine)).

Le système retenu sera soumis au maître d'ouvrage avant approbation définitive.

On procédera à des mesures d'hygrométrie pour éviter de déposer le film sur un support humide. La température lors de l'application devra au minimum être supérieure de 2 °C au point de rosée.

La mise en place de la couche de primaire sera effectuée rapidement après décapage pour éviter les problèmes d'oxydation.

Un contrôle des épaisseurs des couches du système de peinture retenu sera effectué.

Le mode d'application dépendra du système de protection retenu et des difficultés pour accéder à certaines zones. Les délais de recouvrement préconisés pour le système devront être respectés.

Afin de faciliter ces différentes opérations, il nous paraît indispensable de réaliser un démontage des trois parties du submersible afin de s'affranchir des contraintes liées à des opérations de décapage en milieu confiné. Par ailleurs, ce démontage permettrait de procéder à un examen des zones aujourd'hui difficilement accessibles et de garantir la bonne application des films de peinture.

Le travail devra être réalisé sous abri ou sur un site à l'abri des intempéries.

Le choix de la couleur de finition devra préalablement être défini par le maître d'ouvrage.

En ce qui concerne les pièces fortement altérées, il serait souhaitable de conserver les pièces d'origine. Quant aux tôles présentant des perforations, un renforcement à l'aide de résine époxyde pourra être mis en œuvre. L'installation de nouvelles tôles par soudure sera évitée, sauf si des questions de sécurité sont à prendre en compte. En effet, l'emploi de métaux de nature différente et la présence de soudures peuvent engendrer des phénomènes de corrosion galvanique susceptibles de conduire à l'augmentation des cinétiques de corrosion. L'ensemble de ces opérations sera soumis avant réalisation à l'approbation du maître d'ouvrage.

Dans le cas du plancher il serait possible de faire fabriquer une plaque en polymère qui serait positionnée au dessus du plancher en prenant appui sur les bords du compartiment de manière à soulager la partie centrale du plancher très altérée.

Toute modification et tout renforcement effectués feront l'objet d'un compte rendu annexé au dossier de restauration de manière à conserver les références des matériaux utilisés. Ce dossier permettra de disposer d'éléments précis lors des campagnes d'entretien et de maintenance.

Dans l'hypothèse où les travaux de remise en peinture ne pourraient pas être rapidement entrepris, une étude préalable faite sur coupons témoins pourrait être lancée dans l'optique de définir les conditions de conservation à l'intérieur du sous-marin. Cette étude faciliterait la mise en place d'une politique d'entretien et de maintenance ce qui permettrait de stopper la dégradation du plancher.

Le graphique présenté à la figure 22 décrit les deux protocoles qui pourraient être suivis en fonction du calendrier d'intervention et du délai d'attente avant mise en peinture.

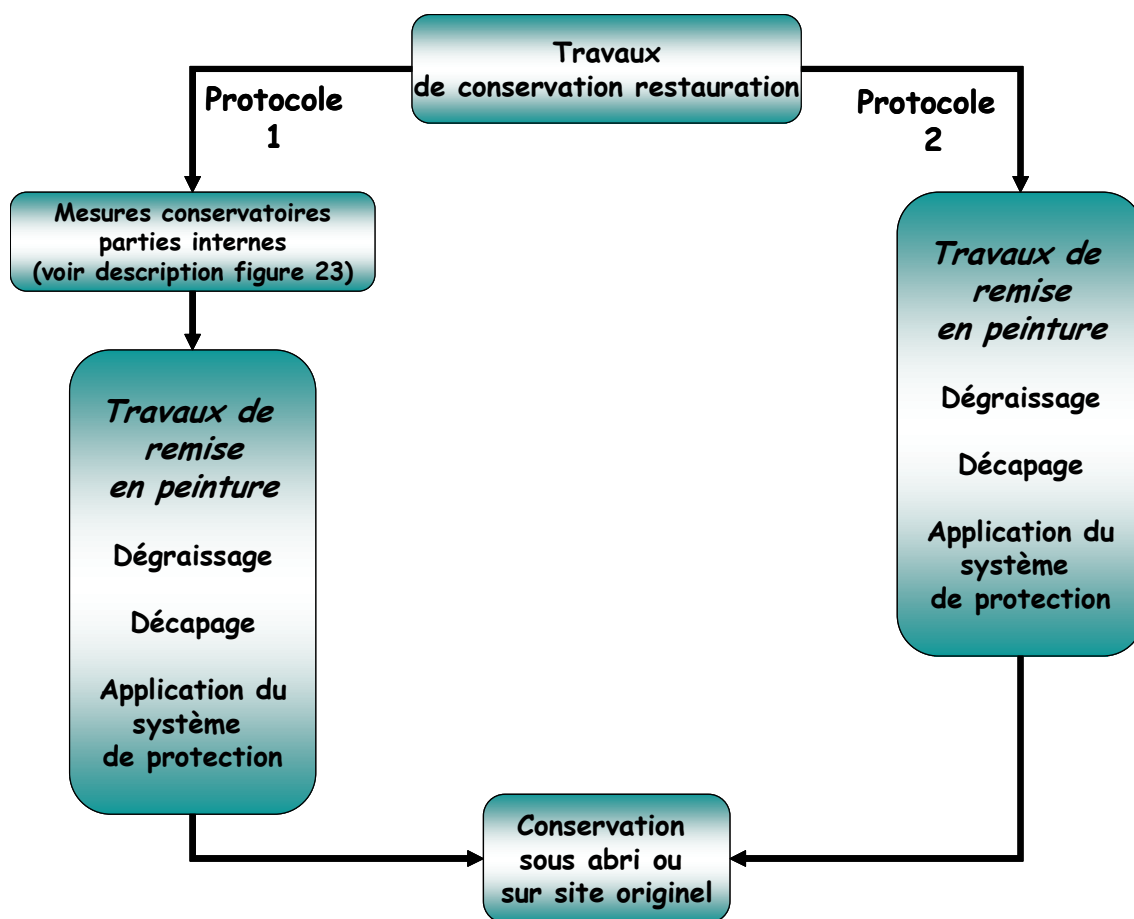


Fig. 22. Description des protocoles de conservation-restauration

En ce qui concerne l'étude sur les conditions de conservation des parties internes un descriptif des opérations est proposé à la figure 23.

Dans un premier temps un nouveau joint pourrait être mis en place au niveau du hublot afin d'éviter l'entrée d'eau chargée en sels marins. Une évaluation des conditions de conservation à l'intérieur du sous-marin pourrait ensuite être entreprise à l'aide de coupons témoins (acier, cuivre...). Le suivi des coupons serait couplé à des mesures de température et d'hygrométrie.

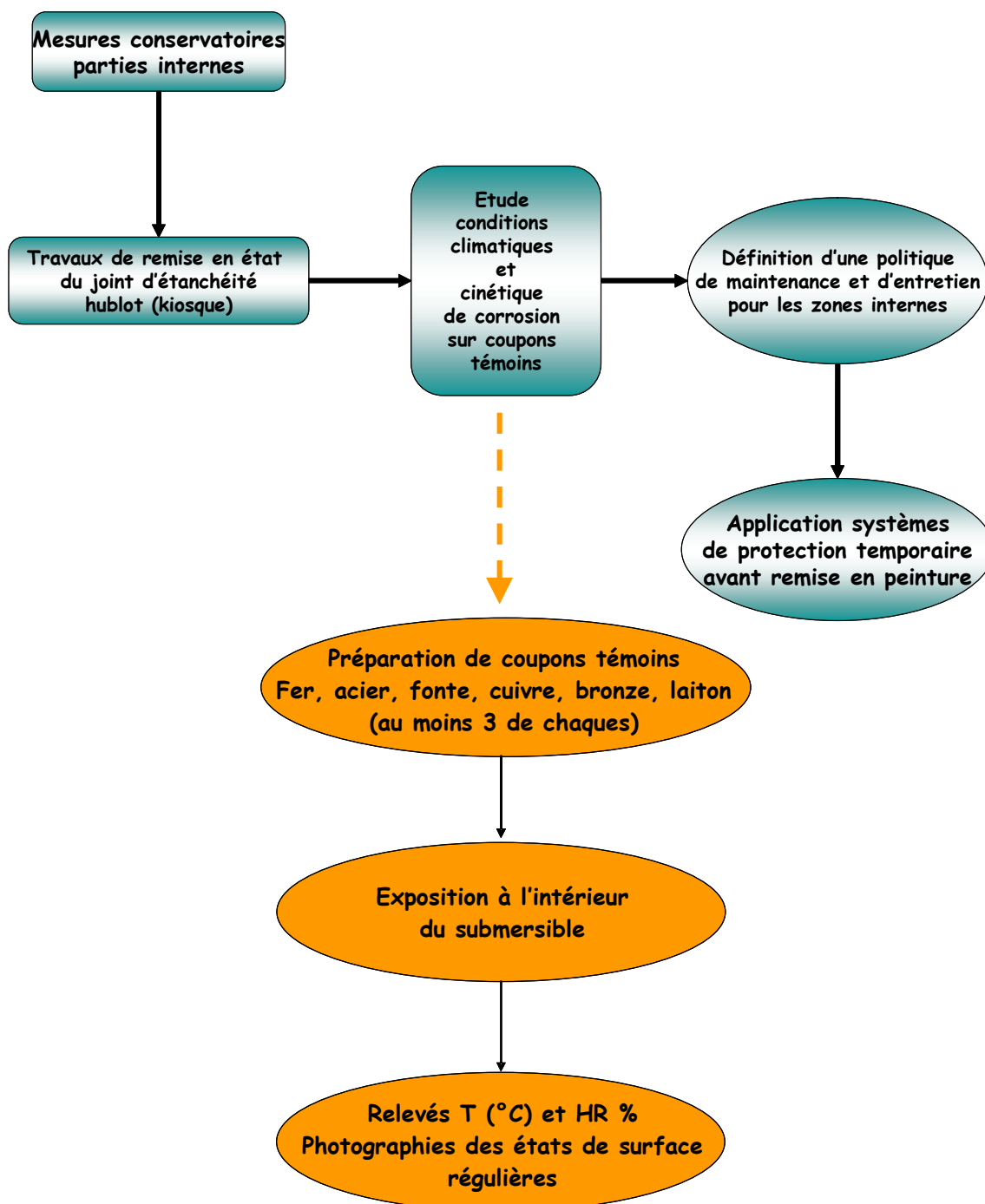


Fig. 23. Protocole relatif à la conservation des compartiments internes

La conservation sur le long terme de ce submersible nécessiterait de le placer sous abri de la pluie, afin de limiter l'action de l'eau et des polluants sur le film de peinture. Cependant le positionnement actuel près d'un bâtiment protégé au titre des monuments historiques impose un certain nombre de contraintes pour l'installation d'un abri.

Dans ces conditions, une conservation correcte impliquera, soit de déplacer le sous-marin dans un autre lieu, soit de mettre en place une politique d'entretien et de maintenance régulière destinée à limiter dans le temps la dégradation du système de protection. L'adoption de cette politique pourrait également permettre de réduire les coûts de restauration : seules de petites interventions seraient alors à programmer. Les principales interventions pourraient se limiter à des reprises localisées sur des zones où le film de peinture viendrait à se dégrader.

Concernant la périodicité d'examen des parties externes, elle sera fonction du futur site d'exposition. Dans le cas où le submersible serait placé sous abri, le bilan sanitaire pourrait être effectué une fois par an. Pour une exposition en extérieur une périodicité de 2 fois par an sera demandée (fig. 24) Ce travail consistera principalement en un examen visuel des parties externes pour contrôler l'apparition de dégradations des feuillets de peinture. Lorsque des altérations seront relevées un plan d'intervention sera mis en place. Cette procédure permettra de limiter le coût et l'ampleur des travaux et facilitera la conservation du substrat métallique sur le long terme.

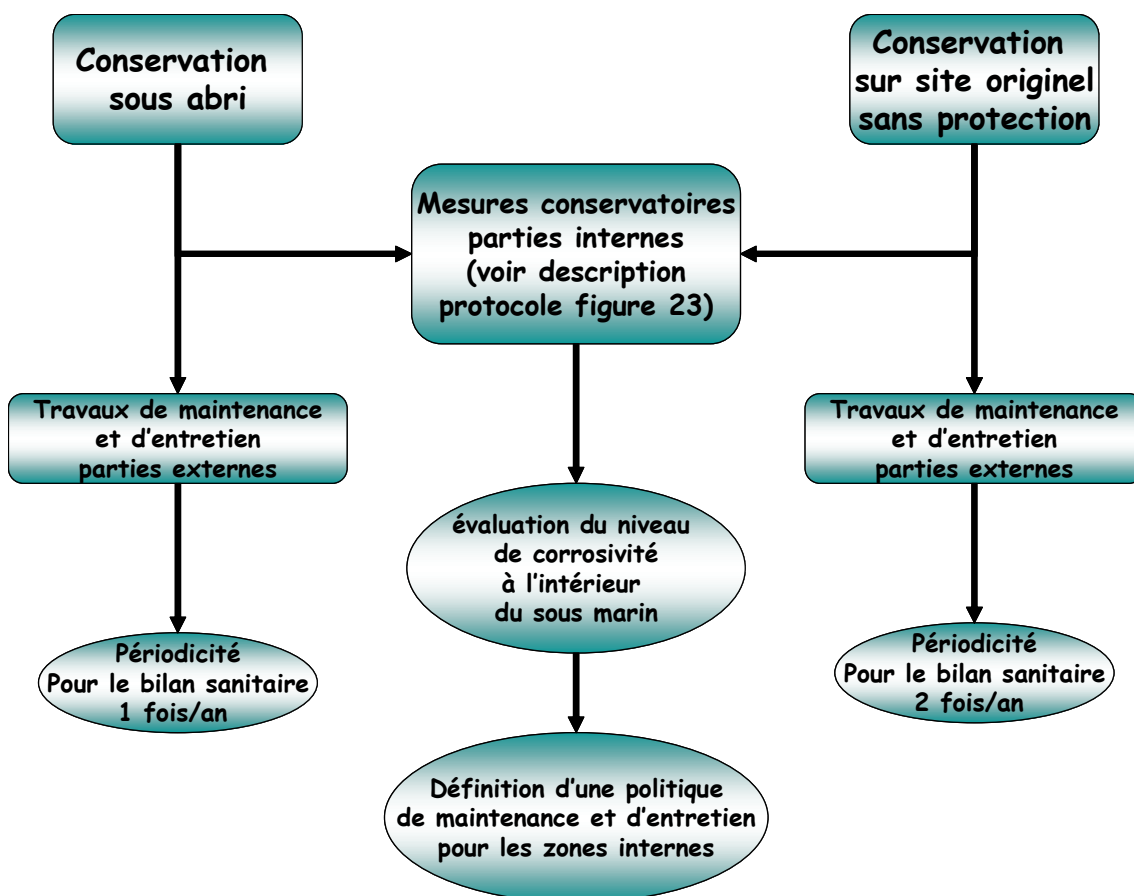


Fig. 24. Organisation des travaux de maintenance et d'entretien

Pour l'organisation et la mise en place de ces différentes opérations le laboratoire pourra vous assister et vous apporter ses conseils.