



Principes de démantèlement des Chaufferies Nucléaires Embarquées à bord des sous-marins français

Philippe DUBOIS – Clara WOHLEBER
Grenoble, le 16/04/2024



SOMMAIRE

1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir



1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir

QUOI ? : Les Chaufferies Nucléaires Embarquées sur les bâtiments français

◆ À bord des Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins (SNLE)

Première génération type Le Redoutable	Deuxième génération type Le Triomphant
Le Redoutable (1971 – 1991)	Le Triomphant (Mis en service en 1997)
Le Terrible (1973 – 1996)	Le Téméraire (Mis en service en 1999)
Le Foudroyant (1974 – 1998)	Le Vigilant (Mis en service en 2004)
L'Indomptable (1976 – 2005)	Le Terrible (Mis en service en 2010)
Le Tonnant (1980 – 1999)	
L'Inflexible (1985 – 2008)	

◆ À bord des Sous-marins Nucléaires d'Attaque (SNA)

Première génération type Rubis	Deuxième génération type Suffren
Le Rubis (1983 – 2022)	Le Suffren (2022 –)
Le Saphir (1984 – 2019)	Le Duguay-Trouin (2023 -)
Le Casabianca (1987 – 2024)	Le Tourville (2024 -)
L'Émeraude (1988 – 2025)	Le De Grasse
L'Améthyste (1992 – 2027)	Le Rubis
La Perle (1993 – 2031)	Le Casabianca

◆ À bord du porte-avions Charles de Gaulle

- 2 CNE (analogues à celles des SNLE type Le Triomphant) mises en service en 2000



OÙ ? Le port militaire de Cherbourg

- ◆ Base navale de Cherbourg : construction et démantèlement des sous-marins nucléaires français



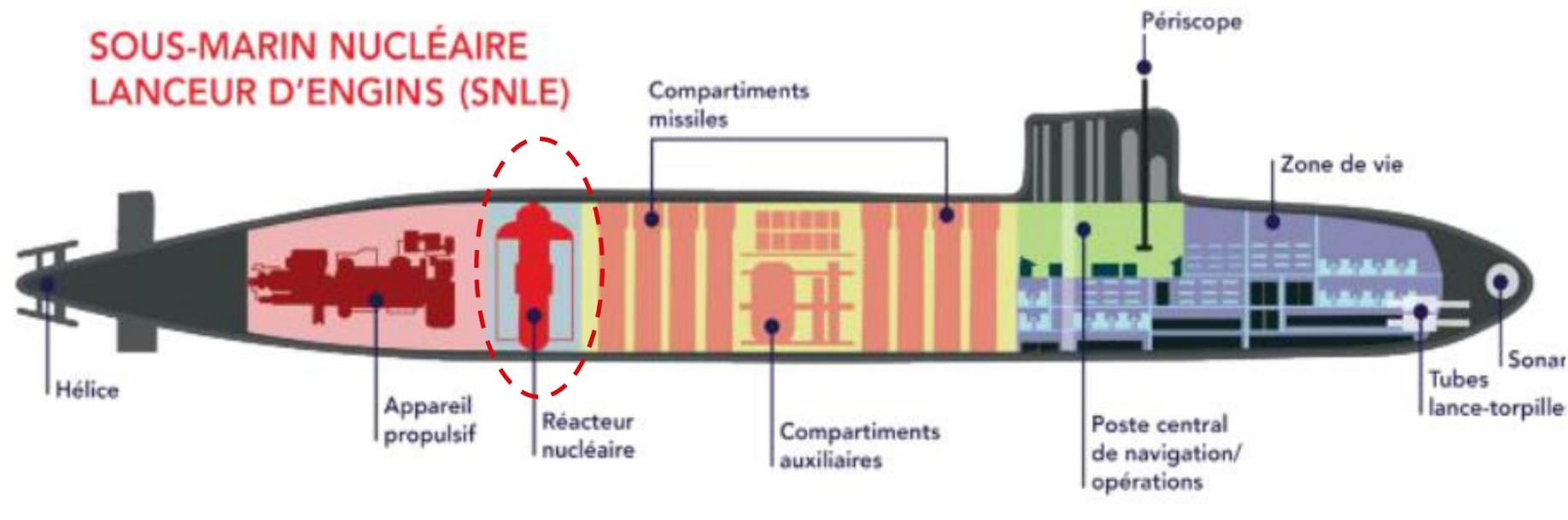
QUI ? Organisation : les différents acteurs

- ◆ **Autorité de Sûreté**
 - DSND
- ◆ **Exploitants nucléaires (arrêté exploitant du 20 août 2015) :**
 - Autorité de conception d'ensemble : **DGA** (INBS et Dém)
 - Autorité de conception : **CEA/DAM/DPN**
 - Chaîne de mise en œuvre :
 - Exploitant délégué (resp chaîne mise en œuvre) : **DGA** (INBS et Dém)
 - Autorité Militaire Territoriale : **Marine Nationale**
 - Responsable d'installation : **DGA/DO/ETAC**
 - Fonction de soutien : **Gendarmerie Maritime**
 - Assistance à l'autorité de conception CEA et à l'exploitant délégué DGA : **STXN**
- ◆ **Maîtrises d'ouvrage**
 - Études et expertises : **CEA/DAM/DPN**
 - Travaux : **DGA/DUM COE**
 - Assistance aux Maîtrises d'ouvrage et coordination : **STXN**
- ◆ **Maîtrises d'œuvre**
 - Expertises radiologiques : **CEA/DEN/CAD/LMN, CEA/DEN/CAD/LARC**
 - Études : **TechnicAtome**
 - Travaux : **Naval Group**
- ◆ **Traitement et stockage des déchets ultimes**
 - **ANDRA, CYCLIFE (CENTRACO)**

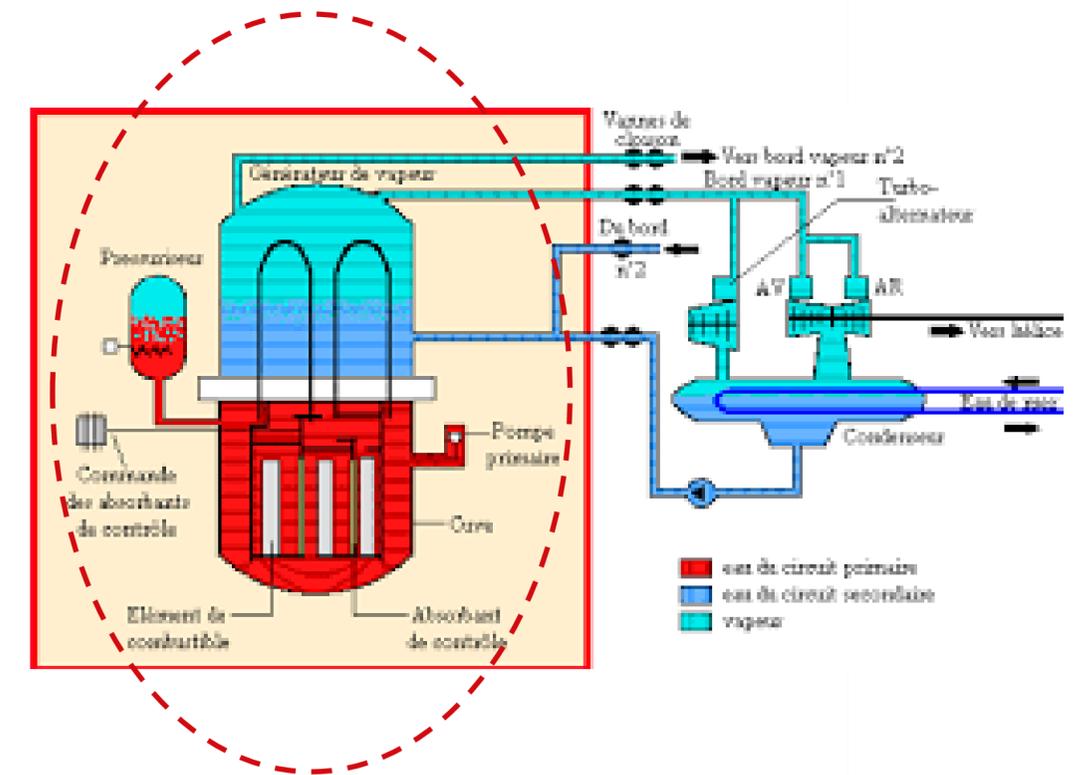


POURQUOI ? Les objectifs du démantèlement des Bâtiments à Propulsion Nucléaire

- ◆ Déconstruire l'ensemble du bâtiment, catégoriser les déchets et les évacuer vers les bonnes filières de traitement notamment en ce qui concerne les déchets radioactifs et toxiques de façon à ne créer aucun risque inacceptable auprès des populations et de l'environnement



Vue en coupe d'un sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) de classe Le Triomphant, outil principal de la dissuasion nucléaire française.



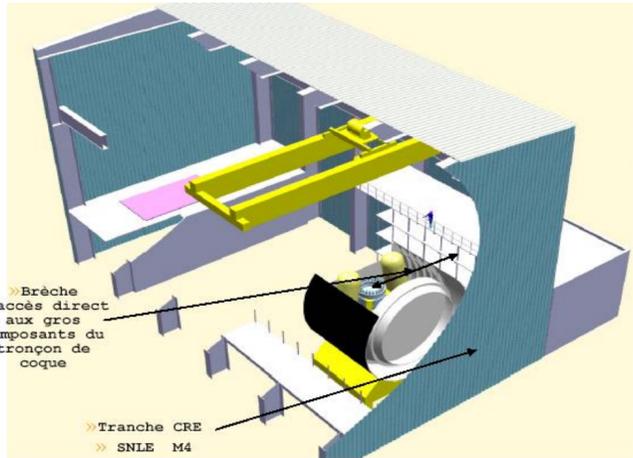
- ◆ **TOUT DOIT DISPARAÎTRE !**

COMMENT ? Préparation d'une opération de démantèlement

- ◆ L'obtention de l'autorisation de démantèlement des BPN français nécessite la production d'un certain nombre de dossiers
- ◆ Pour l'autorisation d'exploitation de l'INBS du HOMET:
 - Rédaction du Dossier de Sûreté INBS HOMET (DGA, STXN)
 - Instruction du Dossier de sûreté INBS HOMET (DSND)
 - Travaux de mise à niveau du Homet (DGA, SID)
- ◆ Pour l'Autorisation de démantèlement des BPN
 - Rédaction des procédures de démantèlement (STXN, CEA)
 - Rédaction du Dossier de Sûreté de démantèlement des BPN (STXN, CEA, DGA)
 - Instruction du Dossier de Sûreté (DSND)
- ◆ Pour la mise en place d'un contrat
 - Marché de démantèlement (DGA)



Processus complet de démantèlement



Démantèlement de niveau 3 tranche réacteur



Mise à l'Arrêt Définitif
Démantèlement de niveau 1 et 2



Découpe de la tranche réacteur



Remise dans le domaine public



Déconstruction

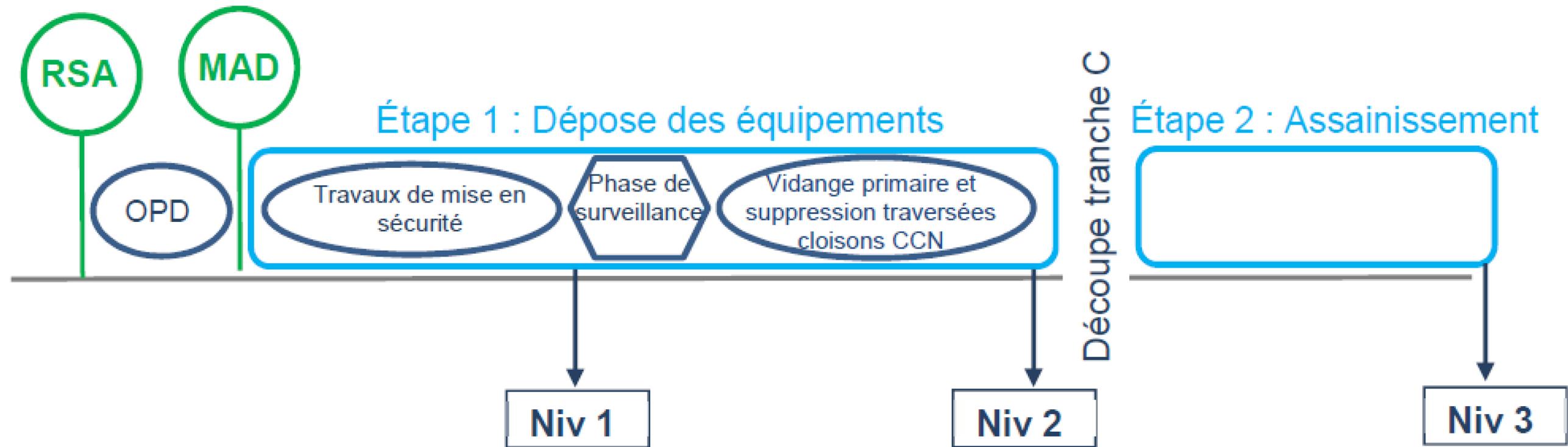




1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir



Les étapes du démantèlement (Instruction DSND n°18)



- ◆ **RSA = Retrait du Service Actif**
 - Déchargement définitif du dernier cœur puis remise en place du Générateur de vapeur
- ◆ **OPD = Opérations de Préparation au Démantèlement**
 - Les opérations de préparation à la phase de démantèlement consistent à éliminer les substances dangereuses et à réduire l'inventaire radiologique et par conséquent le terme source
- ◆ **MAD = Mise à l'Arrêt Définitif**
 - Jalon lié à une autorisation du Ministre des Armées et du DSND qui marque le passage du référentiel de sûreté « exploitation » au référentiel de sûreté « démantèlement »

Déchargement du cœur

- ◆ Chargement des Éléments combustibles Irradiés dans la hotte, sous eau
- ◆ Sortie de la hotte du sous-marin vers l'Atelier de Maintenance et d'Intervention
- ◆ Transfert de la hotte depuis l'AMIP vers la Piscine du Homet sur chariot de transfert
- ◆ Entreposage des Éléments combustibles Irradiés dans leurs puits d'entreposage en piscine

- ◆ Après déchargement du cœur, il ne reste que 2 barrières :
 - Le circuit primaire (1^{ère} barrière)
 - Et l'enceinte de confinement (2^{ème} barrière)



Les étapes du démantèlement : étape 1

◆ Étape 1 : Dépose des équipements

- Comprend l'ensemble des opérations de dépose et d'évacuation des systèmes, structures et équipements de l'IANID (Installations et Activités Nucléaires Intéressant la Défense) qui permettait son fonctionnement, y compris certaines parties qui assuraient les fonctions de barrières de confinement des substances radioactives et dangereuses.

Pour les sous-marins à propulsion nucléaire, cette étape d'achève avec la découpe de la tranche réacteur. Une fois déposés, ces équipements feront l'objet d'un suivi particulier jusqu'à leur élimination dans les différentes filières déchets.

- Cette étape est divisée en deux sous-étapes, la première conduisant au niveau 1 de démantèlement et la seconde conduisant au niveau 2 de démantèlement, ces sous-étapes pouvant être séparées par une phase d'entreposage
 - Niveau 1 : Fermeture sous surveillance
 - Niveau 2 : Libération partielle et conditionnelle



Les étapes du démantèlement : étape 1, niveau 1

◆ Niveau 1 : fermeture sous surveillance

- L'installation est laissée en l'état après quelques travaux de conditionnement.
- Les règles d'exploitation sont allégées, mais la surveillance, le contrôle et l'entretien garantissent le maintien à l'état sûr
- Catégorisation des différents systèmes à bord et en particulier des circuits de la chaufferie en 4 catégories :
 - Contaminés
 - Potentiellement contaminés → nécessite d'analyser les événements de la vie du bateau
 - Douteux → nécessite d'analyser les événements de la vie du bateau
 - Propres.
- Vidange des circuits non contaminés et ne participant pas à la protection radiologique.
- Gazole du cofferdam vidangé, remplacé par de l'eau (protection radiologique)
- Circuit primaire maintenu plein d'eau (mais non pressurisé) pour décroissance radioactive
- Confinement 2^{ème} barrière
 - Condamnation des organes d'isolement 2^{ème} barrière pour limiter les transferts de contamination de l'intérieur du CCN vers l'extérieur.
 - Intérieur enceinte : ventilé et asséché pour éviter trop d'humidité qui conduirait à la corrosion des circuits.
 - Certaines traversées d'enceinte sont réutilisées pour le câblage de l'instrumentation de surveillance ajoutée.



Niveau 1 : installations de surveillance



Paramètres surveillés :

- Température CRE* et primaire
- Hygrométrie CRE* et primaire
- Ambiance dosimétrique
- Incendie
- Fuites d'eau



* CRE = Compartiment Réacteur Echangeur





1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir



Les étapes du démantèlement : étape 1, niveau 2



Reconstitution de la 2^{ème} barrière autour du compartiment réacteur : Cloison déshabillée
Tape soudée sur traversées hydrauliques

◆ Niveau 2

- Objectif : reconstituer le confinement du compartiment réacteur vis-à-vis du reste du bateau, de manière à pouvoir séparer la tranche nucléaire du reste de la coque,
- La partie confinée est réduite au minimum l'étanchéité et la protection radiologique sont renforcées, permettant ainsi un nouvel allègement de l'entretien et de la surveillance radiologique
- Vidange des capacités et circuits en eau (opérations dosantes : initialement envisagée en niveau 1 ; repoussée en niveau 2) ; cuve et GV sont asséchés
- Vidange des capacités contenant des eaux chromatées et borées
- Ces vidanges sont entreprises dès le début de la phase de démantèlement de niveau 2 pour pouvoir intervenir sur les circuits sans risque d'épandage d'effluents

- Décalorifugeage
- Découpe et obturation des traversées de cloisons avant et arrière du compartiment chaufferie

- Dernière étape du niveau 2 : Découpe de la coque pour séparation de la tranche réacteur : sur le quai à Cachin (le Dispositif de Mise à l'Eau est utilisé pour ramener le sous-marin au niveau du quai) ; la tranche réacteur est ensuite entreposée au Homet dans un hangar dédié



Niveau 2 : Découpe de la tranche réacteur

- ◆ Placement du Sous-marin sur son dispositif de mise à l'eau
- ◆ Mise en place d'un châssis spécifique sous la tranche réacteur pour permettre son déplacement après découpe
- ◆ Mise en place de « marcheurs » sous la partie Arrière du sous-marin pour la reculer lors du dégagement de la tranche réacteur
- ◆ Découpe de la coque par oxycoupage de part et d'autre de la tranche réacteur
- ◆ Transfert de la tranche réacteur vers son hangar d'entreposage dédié



Châssis d'accueil
de la tranche réacteur



Dégagement
de la tranche réacteur



Tranche réacteur en
mouvement (700 t portées
par 3 chariots auto-moteurs)

Niveau 2 : Découpe de la tranche réacteur

- ◆ Reconstitution du sous-marin sans sa tranche réacteur pour remise à flot
 - Soudage des 2 demi-coques
 - Contrôle par ressuage de la soudure de coque
 - Remise à flot du sous-marin



Sous-marin reconstitué





1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir



◆ Étape 2 : Assainissement

- correspond aux opérations de suppression de la radioactivité résiduelle, en cohérence avec les éléments relatifs à l'état final visé par l'exploitant et approuvé par le DSND. L'objectif de l'assainissement est d'aller jusqu'au déclassement du zonage déchets.

- Pour les sous-marins : correspond à la libération de la coque pour déconstruction.
 - Niveau 3 : Libération totale et inconditionnelle
 - Tous les matériaux, les équipements et les parties de l'installation dont l'activité est restée significative sont enlevés.
 - L'installation est déclassée sans restriction du point de vue de la sûreté nucléaire : aucune surveillance ni aucun contrôle ne sont plus nécessaires.



Niveau 3 : Prérequis

- ◆ Détermination par calcul de l'activité radiologique des chaufferies pour constituer les dossiers de sûreté de démantèlement (scénarii accidentels) pour préparer le niveau 3 (futur atelier et colis ANDRA)
 - Détermination de l'activation :
 - modélisation et maillage des gros composants (panier, cuve, GV, pressuriseur...)
 - données d'entrée : composition chimique des aciers et historique de la cuve (puissance/durée)
 - codes de calcul neutroniques
 - validation par des analyses radiochimiques sur des **prélèvements** en cuve / panier-bouclier
 - Détermination de la contamination : spectrométries sur les circuits et les capacités + analyses radio-chimiques sur un prélèvement
 - Détermination des DED de chacun des composants de la cuve pour différents temps de décroissance (de 1 an à 300 ans)

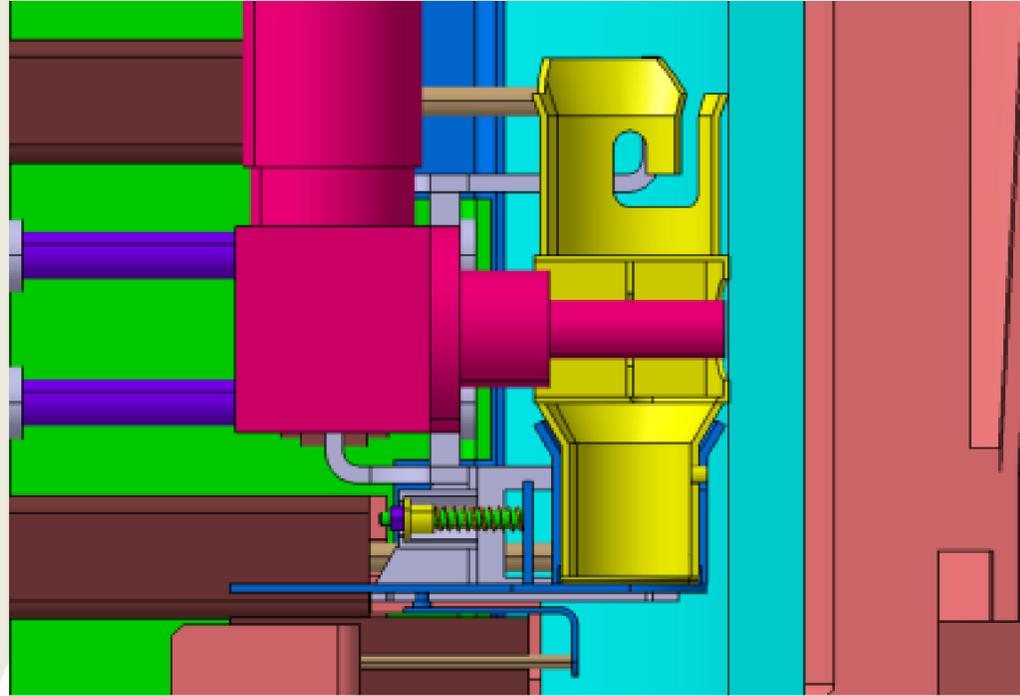
- ◆ Permet d'identifier la filière d'évacuation des déchets vers les différents centres de stockage de l'ANDRA
 - Cuve et GV évacués vers le CSFMA (Centre de Stockage de déchets de Faible et Moyenne Activité)
 - Autres gros composants et cloisons 2^{ème} barrière évacués vers le CIRES (Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage, accueillant les déchets de Très Faible Activité (TFA))

- ◆ Activité totale = activation des internes de cuve (99%) + contamination des circuits (<1%)



Niveau 3 : Prérequis

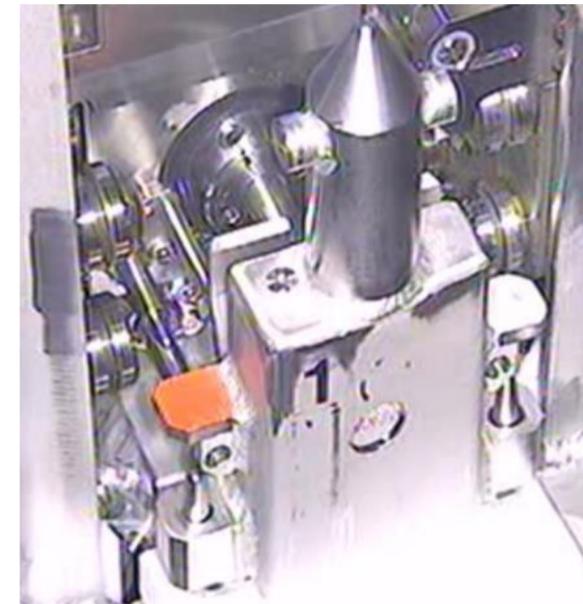
- ◆ Prélèvements en cuve de copeaux de bouclier



Perçage et récupération des copeaux



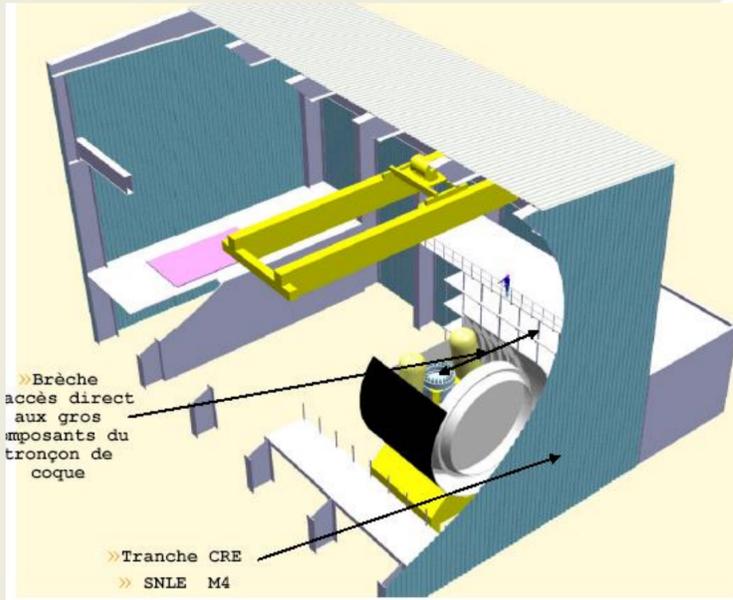
Bac à copeaux



Unité de perçage et machine de prélèvement



Niveau 3 : évacuation des déchets de la chaufferie vers les centres dédiés

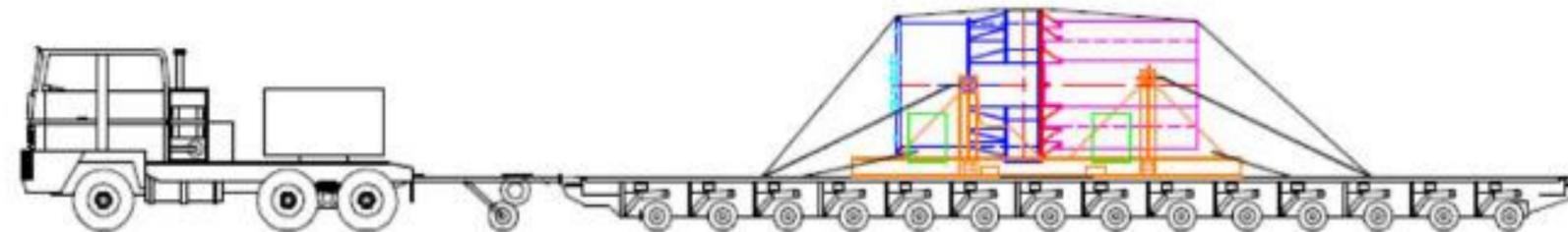


Futur atelier de niveau 3

- ◆ Mise en colis à Cherbourg des composants contaminés dans un atelier de niveau 3 qui reste à définir

◆ Exemple de la cuve :

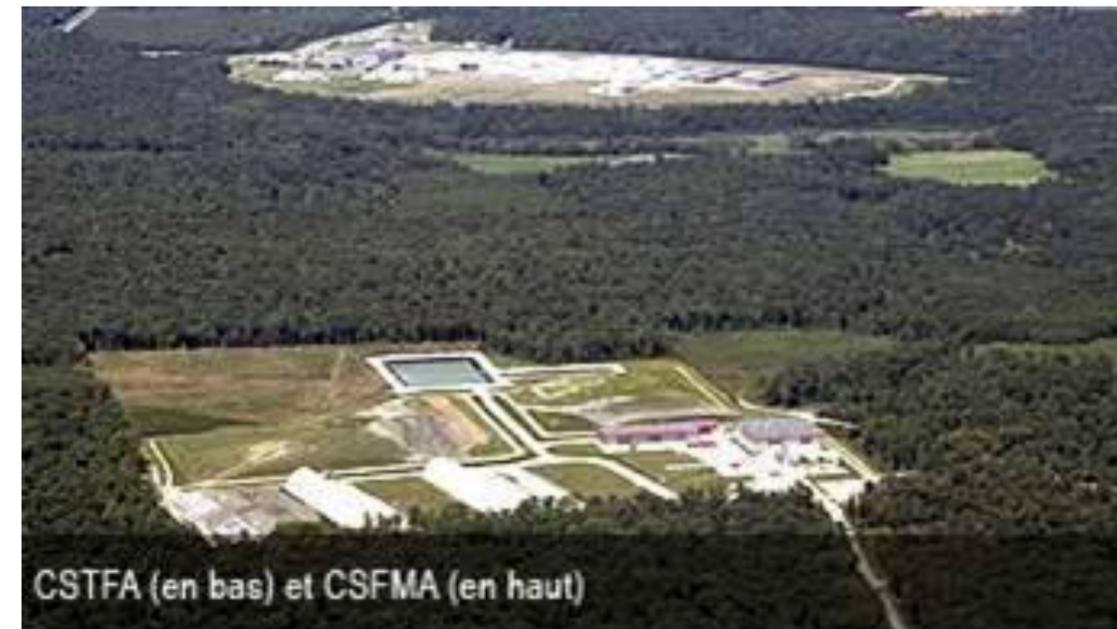
- Maintien des internes de cuve dans la cuve
- Transfert de la cuve dans un caisson au moyen d'un pont 1200kN
- Basculement du caisson sur l'emballage de transport
- Transport spécifique
 - Remorque de 24 mètres de long et 3 m de large ; plateforme 2 files de 14 lignes
 - Longueur convoi : \approx 33 mètres ; poids total roulant : \approx 220 tonnes



Niveau 3 : traitement du colis cuve

- ◆ Études ANDRA:
 - Volet 1 : faisabilité du transport et de l'accueil
 - Volet 2 : estimation financière
 - Volet 3 : acceptabilité « sûreté » au CSFMA

- ◆ Il reste 2 points durs à lever pour permettre l'acceptation du colis cuve dans un centre de stockage de l'ANDRA



Niveau 3 : Libération des coques dans le domaine public : Démarche

- ◆ 1. Définition d'une méthodologie de remise dans le domaine public
 - Analyse fonctionnelle et historique

- ◆ 2. Expertises radiologiques sur la coque pour déterminer les « zones d'intérêt »
 - Il existe quelques points « chauds » en dehors de la zone nucléaire, de l'ordre de 15 nGy/h à comparer à la radioactivité naturelle à Cherbourg est de 100 nGy/h

- ◆ 3. Réalisation de travaux d'assainissement de la coque

- ◆ 4. Constitution du dossier de synthèse pour autorisation du DSND



Niveau 3 : Libération des coques dans le domaine public

◆ Point de situation

- Une coque a été transformée en musée : Le Redoutable (2002)
- Cinq coques ont été remises dans le domaine public :
 - Le Terrible (2011)
 - Le Tonnant (2012)
 - Le Foudroyant (2014)
 - L'Inflexible (2015)
 - L'Indomptable (2017)



Le Redoutable à la Cité de la Mer



Coques en attente à quai

Niveau 3 : Déconstruction des coques

◆ Aménagement de la zone 2016 -2018

- Opérations de déconstruction réalisées de 2018 à 2023 pour
 - Terrible
 - Tonnant
 - Indomptable
 - Foudroyant
- Opération de déconstruction en cours sur l'Inflexible





1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir



Retour d'expérience : bilan dosimétrique : doses collectives

- ◆ Prise en compte du Retour d'Expérience des opérations de démantèlement (MAD, Niveau 1 et Niveau 2) pour diminuer la dosimétrie collective au fur et à mesure du démantèlement des SNLE type LE REDOUTABLE
 - Gain d'un facteur 2,6 entre le REDOUTABLE et Le TERRIBLE sur les doses collectives intégrées lors des phases MAD + Niv1 + Niv 2
 - Gain d'un facteur 5,6 entre LE REDOUTABLE et l'INFLEXIBLE sur les doses collectives intégrées lors des phases MAD + Niv1 + Niv 2



Retour d'expérience : Coût estimatif du démantèlement d'un sous-marin

- ◆ Éléments de coût aux conditions économiques de 2015
 - Déchargement + Niveau 1 : 15M€
 - Niveau 2 : 15 M€
 - Niveau 3 chaufferie : non connu à date
 - Déconstruction de la coque : 4 M€ -1M€ de revalorisation





1. Généralités
2. Mise à l'Arrêt Définitif et travaux de démantèlement de niveau 1
3. Travaux de démantèlement de niveau 2
4. Travaux de démantèlement de niveau 3
5. Retour d'Expérience
6. Démantèlements à venir



Futurs démantèlements

Type de navires	Années de démantèlement
6 Sous-marins Nucléaires d'Attaque type Rubis	2019 à ...
4 Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins	à partir de 2035
2 chaufferies Porte-avions Charles de Gaulle	à partir de 2040
6 SNA de type Suffren (BARRACUDA)	à partir de 2060

