

## NETTOYAGE, DECAPAGE ET PEINTURE PAR ROBOT POUR CHANTIERS NAVALS

**SAMBOU Jean-Paul, JASTREWSKI Thibaut,  
QUENEZ Jean-Marc,**

Service du Soutien de la Flotte

**VINCENT Hubert, CHOTARD Arnaud,**

DAMEN Dunkerque

**RENOUARD Stéphane<sup>[1]</sup>, LE CALVE Philippe<sup>[2]</sup>**

[1] AMBPR, [2] Anticorr Conseil

### SOMMAIRE

Les opérations de peintures en chantiers navals sont généralement sous-traitées à des sociétés spécialisées. Celles-ci rencontrent de plus en plus de défis ces dernières années : difficultés pour trouver des opérateurs, contraintes de sécurité du travail, contraintes environnementales interdisant la dispersion trop importante de poussières lors des opérations de décapage ou de peinture lors des applications, difficultés de maîtrise du planning lorsque des conditions environnementales (pluie et vent) pénalisent la dépose de peinture. En parallèle, il est devenu nécessaire de maîtriser la qualité de dépose de la peinture avec la volonté de limiter l'augmentation de la résistance à l'avancement, en programmant des nettoyages périodiques des coques. Sur les peintures autopolissantes, ces nettoyages par jets d'eau ou brossage éliminent une certaine épaisseur d'antifouling, et imposent la parfaite maîtrise de l'épaisseur déposée pour éviter toute apparition précoce de zones nues sans antifouling.

La robotisation des activités de préparation de surface et d'application peinture permet de réduire tous les problèmes à la fois : contraintes de sécurité, puisque l'opérateur reste à distance du process ; contraintes environnementales, en captant les polluants à la source et en les traitant avant rejet ; moins de personnels nécessaires ; opérations réalisables par plus forte pluie ou plus fort vent ; qualité de dépose parfaitement maîtrisée et reproductible ; amélioration de la coactivité avec d'autres opérations de chantiers dangereuses pour les personnels, grâce à des opérations largement automatisées.

Cet article présente le robot autonome développé par AMBPR, ses diverses capacités, les expériences déjà réalisées et les résultats d'une étude récente. Il décrit et quantifie ses capacités : captation d'effluents à la source, travail en circuit fermé, recyclant environ 90% d'eau, des pertes d'abrasif ne dépassant pas 2 % et son aptitude à baisser la dispersion de peinture de 46 % à 3 %. L'ensemble de ces travaux contribue à la validation globale de l'efficacité et du respect des contraintes environnementales par ce robot original conçu initialement pour les chantiers navals.

### SUMMARY

#### CLEANING, SCRAPING AND PAINTING ROBOT FOR SHIPYARDS

Yard painting operations are subcontracted to specialized companies. The difficulties have multiplied in recent years: difficulty in finding painters, safety constraints, environmental constraints prohibiting the excessive dispersion of paint during the deposit, planning difficulty due to harsh environmental conditions (rain and wind) that force to postpone painting operation. At the same time, the need for

quality control of paint deposition appears with the desire to optimize the ship resistance by controlling fouling and scheduling the periodic cleaning of the hulls. This periodic cleaning consumes a certain thickness of antifouling and implies a perfect control of the painting deposit thickness to avoid any early appearance of bare areas without neither antifouling nor anti-corrosion layer.

The painter robot makes it possible to reduce all the problems at once. safety constraint satisfied since the operator drives the robot remotely; environmental constraint by sucking all the discharges and polluting, less staff required, operations made possible even by heavy rain or wind, perfectly controlled and reproducible deposit quality, possible co-activity with other work that are dangerous for staff thanks to largely automated operations without painters. The article presents the robot developed by AMBPR, its various capabilities, the experiments already carried out a recent experiment demonstrating global performance including both the efficiency and environmental constraints compliancy

## 1. INTRODUCTION

La possibilité d'utiliser un robot de nettoyage, de décapage et de peinture existe depuis plus de 40 ans dans le secteur de l'automobile. Aujourd'hui les solutions robotisées sont suffisamment mûres pour être appliquées en milieu extérieur sur les navires. Un gain important est attendu sur plusieurs plans.

Les nouvelles contraintes sont les suivantes :

- Risque Covid ou autres imprévus opérateurs : moins de dépendance avec la réduction du besoin en peintres notamment en provenance de pays étrangers. Durcissement des règles HSCT : le robot remplace le travailleur en hauteur et évite de l'exposer aux overspray générés par l'application peinture
- Durcissement des règles environnementales : le robot aspire les déchets à la source et ne rejette que des effluents traités

Les avantages économiques sont les suivants :

- Souplesses d'emploi : temps d'application réduit ; travail par vent ou pluie faible possible sans dégradation de la qualité ; coactivité possible.
- Rapport qualité/cout : moins de peinture dépensée à iso surface peinte, meilleure qualité d'application

L'article présente une solution développée par AMBPR appelée le « Greendock Robot ». Il s'agit du premier robot capable de réaliser les opérations de lavage, décapage et peinture, avec des fonctions autonomes intégrées. D'autres systèmes mécanisés, généralement téléopérés et spécialisés sur une seule opération existent depuis un certain temps par exemple le décapage à l'abrasif et surtout le décapage à l'eau UHP.

Puis une démonstration de l'efficacité du robot et de la maîtrise de pollution est présentée. La démonstration a lieu à DAMEN Dunkerque et est organisée dans la perspective du traitement d'un navire à quai.

Il a été mis en œuvre l'application des 4 processus des opérations de carénage des bâtiments de surface pour le domaine de la maîtrise de la corrosion par systèmes de peinture à savoir :

- Le lavage
- Le décapage à l'abrasif
- Le décapage à l'eau UHP
- L'application de la peinture (avec et sans système de captation)

## 2. DESCRIPTION DU « GREENDOCK ROBOT » D'AMPBR : UN ROBOT AUTONOME PORTE-OUTILS ADAPTABLE AUX STANDARDS DE CHANTIERS NAVALS

### *Un robot autonome*

GreenDock Robot relève de la famille des robots autonomes porte outils. Pour assurer l'autonomie, la précision et l'exhaustivité de couverture lors de son travail, il est équipé de capteurs de deux types.

Les premiers – télémètres laser 2D – lui permettent d’acquérir une « image » de la surface à traiter. Les seconds équipent des vérins où ils agissent en proprioception et pour contrôler la position de chacun des composants – plateau, nacelle, bras articulé, porte-outils... – dans l’espace.

L’ensemble des perceptions provenant des capteurs permet au robot, par le biais d’un passage par l’unité de contrôle préprogrammé, d’ajuster sa position en actionnant des manipulateurs cartésiens, et de déplacer l’outil de travail en actionnant d’autres manipulateurs (cartésiens ou axiaux). La combinaison de ces manipulateurs assure au GreenDock Robot une mobilité inégalée : 10 axes cartésiens et poly-articulés. Ainsi, il s’approche du geste humain dans son adaptabilité, tout en restant à distance idoine entre la buse et la surface à traiter pour respecter à la fois la contrainte de l’absence de point d’appui et les stipulations des standards métier.

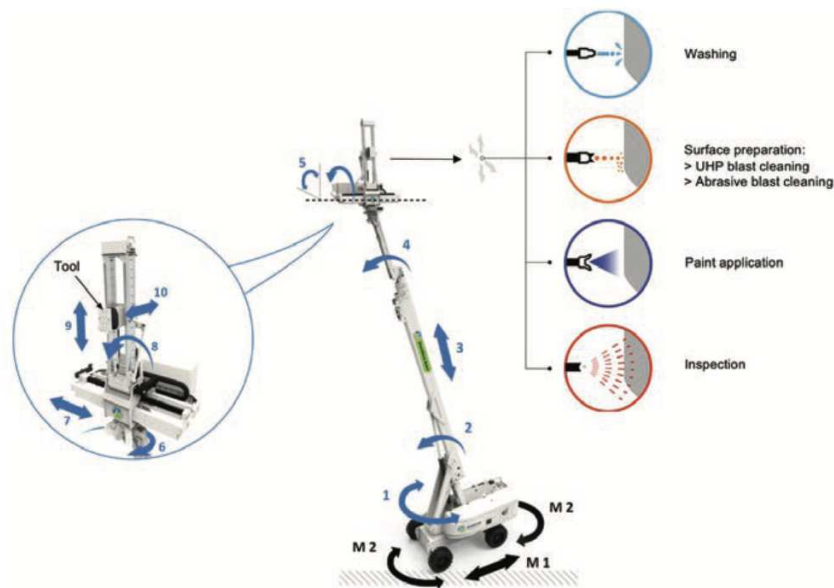


Figure 1: GreenDock Robot peut porter divers outils. La précision de son travail est assurée par 10 axes de mouvements complémentaires.

### ***Un robot porte-outil pensé pour laver, décaper et peindre des navires***

GreenDock Robot prépare les carènes des navires pour la peinture – lave et décape – et peint. Les paramètres de pression, d’angle, de distance et de vitesse d’avance pour chacun des outils permettent d’adapter le robot à la tâche à accomplir selon l’état du navire, les standards du métier ou des peintures utilisées.

Nota : à l’heure actuelle, le robot ne permet de traiter que des surfaces planes ou à faibles courbures, orientées au maximum à +30/-30° par rapport à un plan vertical. Il ne permet pas de traiter des singularités de coque. Des améliorations sont en cours d’étude pour atteindre des inclinaisons plus fortes et pour traiter des singularités.

Opération	Pression	Angle	Distance	Vitesse d’avance
Lavage	Jusqu’à 350 bar, buse tournante	90°	Ajustable, selon l’état du navire	Ajustable
Décapage UHP	Jusqu’à 2600 bar, buse tournante	90°	2 cm	Lente, ajustable selon le résultat souhaité
Décapage abrasif	10 bar	70°	40 cm	Lente, ajustable selon le résultat souhaité et la peinture à enlever
Peinture airless	Jusqu’à 250 bar	90°	25 cm	Ajustable selon les recommandations pour la peinture utilisée (viscosité) et la taille de la buse

Tableau 1: GreenDock Robot travaille selon les standards de la profession

### ***Un robot facile à intégrer dans un chantier naval***

Le robot a été pensé pour une utilisation par le monde de la navale. Équipement par des lignes d'outils et le pilotage par la console sont intuitifs et ont déjà été appris avec facilité à des peintres. Le téléopérateur intervient que dans les phases d'approche et pour définir la zone d'intervention du robot. Il est ensuite libéré pour d'autres tâches.

GreenDock robot a été développé sur la base d'une nacelle Haulotte, un standard dans les chantiers navals. Ceci lui permet de travailler, dans une gamme de hauteurs allant de jusqu'à 28 mètres.

Sa conception en fait un équipement robuste, fournissant un travail répétable, le tout dans des conditions de sécurité ouvrant la possibilité à la co-activité pendant les phases de lavage, décapage et peinture.

## **3. EXPERIMENTATION D'EFFICACITE ET DE MAITRISE DE LA POLLUTION**

### **3.1. Description du démonstrateur : un lieu de test en plein air au chantier de Dunkerque mis à disposition par Damen**

#### ***Le support***



Figure 2: Définition sur le démonstrateur de 2 zones de 16m<sup>2</sup>

Le démonstrateur est composé d'une plaque soudée de 96 m<sup>2</sup> sur la paroi d'un mur extérieur d'un atelier dans le chantier de Damen Dunkerque. La plaque présente les caractéristiques suivantes :

<b>Caractéristiques</b>	<b>Résultats</b>	<b>Normes</b>
Rugosité	Moyen (G)	ISO 8503-1
Degré de soin	Sa 2 ½	ISO 8501-1
Concentration en sels solubles	12 mg/m <sup>2</sup>	ISO 8502-6 et 9
Poussières	1S1	ISO 8502-3

#### ***Compétence humaine***

L'opérateur manuel d'application de la peinture est certifié ACQPA N2.

La supervision des préparations de surface et de l'application du système de peinture a été réalisée par un inspecteur ACQPA / FROSIO niveau III depuis 24 ans.

### 3.2. Comparaison entre l'application robot et l'application humaine quant à la consommation de peinture

Les systèmes de peinture retenue dans le cadre de cette expérimentation sont les systèmes des œuvres mortes (OM) et des œuvres vives (OV) d'un navire. Le fabricant du système de peinture est Jotun. Seule la peinture antisalissure (couche finale du système peinture des OV) est d'un autre fabricant : Chugoku.

La surface recouverte par les 2 systèmes de peinture est de 16 m<sup>2</sup> par surface d'application.

- La surface de gauche a été appliquée par un opérateur certifié ACQPA en application manuelle se tenant dans une nacelle et accompagné d'un conducteur de nacelle. (Zone Manuel).
- La surface de droite a été appliquée au robot sans intervention humaine dès le début d'application. La nacelle robotisée est pilotée par un pilote de robot dans la phase d'approche du navire. Il fait ensuite pointer au bras robotisé le début et la fin de la zone à traiter. Le robot travaille ensuite en autonomie.



La zone d'application se décompose en 2 localisations distinctes relatives aux 2 systèmes de peinture. La partie supérieure est composée du système des œuvres mortes ( finition bleue) et la partie inférieure est composée du système des œuvres vives (antifouling rouge)

A gauche : application manuelle, à droite application robot

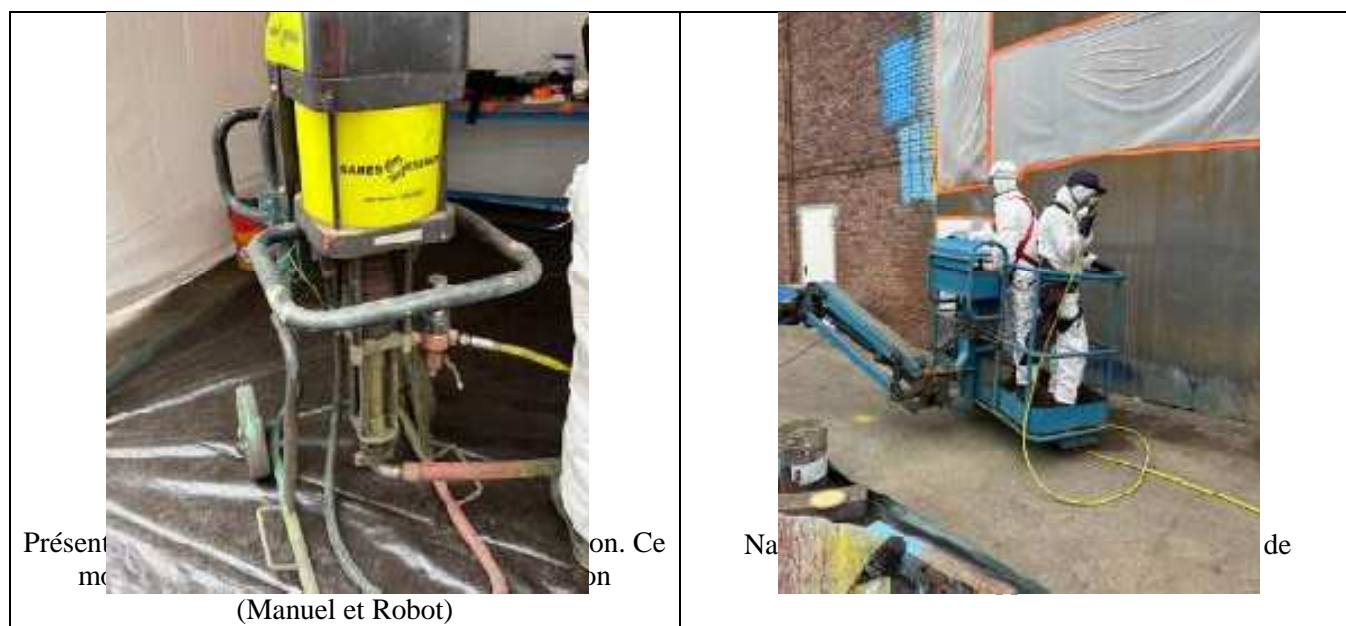
Figure 3: État des surfaces appliquées

Les systèmes de peinture sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

Fabricants	Œuvres vives (OV)		Œuvres mortes (OM)	
	Peintures	Épaisseurs nominales sèches	Peintures	Épaisseurs nominales sèches
JOTUN	Jotamastic 90 alu	100 – 300 µm <b>125 µm</b>	Jotamastic 90 alu	100 – 300 µm <b>125 µm</b>
	Jotamastic 90 grey	100 – 300 µm <b>125 µm</b>	Jotamastic 90 grey	100 – 300 µm <b>125 µm</b>
	Safeguard universel ES	80 – 225 µm <b>100 µm</b>	Hartop XP	50 – 100 µm <b>60 µm</b>
CHUGOKU	Sea grandprix 660 HS	75 – 165 µm <b>100 µm</b>		
<b>Épaisseurs nominales sèches</b>		<b>450 µm</b>	<b>Épaisseurs sèches</b>	<b>310 µm</b>

Tableau 2: Les 2 systèmes de peinture

Les états de surface de l'application des 2 zones sont proches en aspect et ne présentent pas de défauts d'altération du film de peinture. Le film est bien fermé sans défaut d'aspect.



Présent  
me

on. Ce  
on

Na

de

(Manuel et Robot)

### Comparaison du taux de transfert entre application manuelle et application robot

A la fin de la phase 1 d'application de la Jotamastic Alu, la consommation de peinture sur une surface de 16 mètres carrés du robot a été de 5,485 kg tandis que celle pour l'application manuelle est de 5,972 kg sur une surface équivalente soit une réduction de **8 %**  $= (5,972 - 5,485) / 5,972$  de consommation grâce au robot. La mesure de la quantité de peinture appliquée est faite par pesée (pour des raisons pratiques, le pot de peinture est pesé dès que le pistolet est prêt et repesé à la fin de l'application).

La perte de peinture en manuel de  $5,972 - 5,485 = 0,487$  kg liquide (l'extrait sec massique est estimé à 80% soit 0,39 kg en sec). Cela vient du fait d'un traitement en une passe pour le robot tandis qu'il faut 3 ou 4 passes en manuel pour une surface équivalente.

### Calcul du taux de transfert

$$\text{Taux de transfert} = \frac{\text{Masse de peinture sèche déposée}}{\text{Masse de peinture sèche consommée}}$$

**Nota :** Le calcul du taux de transfert a été fait avec la densité de la peinture liquide (= 1,4 kg/l) alors qu'il faudrait prendre en compte la masse volumique du film sec.

	Masse peinture	Épaisseurs déposées	Masse de peinture sèche déposée	Taux de transfert
Peinture	Jotamastic 90 alu			
Surface	$32 \text{ m}^2 = 16 \text{ m}^2$ pour chaque cas manuel et robot			
Application Airless au <b>Robot</b>	5,485 kg soit en sec = $5,485 * 0,8 = 4,388$ kg	127µm	$= 127 \mu\text{m} * 16 \text{ m}^2 * 1,4 = 2,845 \text{ kg}$ de sec	$= (2,845 / 4,388) = \mathbf{0,65}$
Application Airless <b>manuelle</b>	5,972 kg soit en sec = $5,972 * 0,8 = 4,778$ kg	115µm	$= 115 \mu\text{m} * 16 \text{ m}^2 * 1,4 = 2,576 \text{ kg}$	$= (2,576 / 4,778) = \mathbf{0,54}$

Le taux de transfert est favorable à l'application par le robot ou les pertes sont évaluées à 35% par rapport à 46% en manuel.

## *Pollution par overspray*

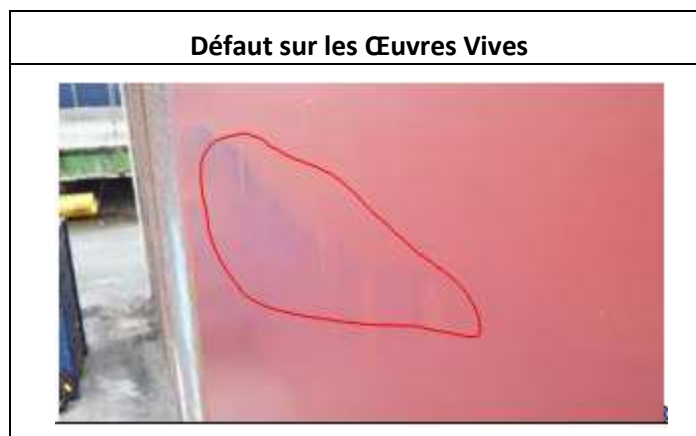


Figure 3: État de surface des applications de la peinture pour les OM et OV

Sur le système de peinture des OV et pour l'application Manuel, on voit nettement un overspray de la peinture des OM qui a pollué la surface. Cette observation ne s'applique pas sur l'application Robot.

Le calcul de pollution par overspray est estimé dans le paragraphe 8.3.

### **4. TEST DE LAVAGE**

Le lavage à l'eau douce permet d'enlever le voile biologique qui se développe sur les OV d'un navire pour éviter que ce dernier ne sèche et ne vienne ensuite entraver le bon fonctionnement de la peinture antisalissure et limiter le relargage des substances actives (biocides). Il constitue également l'étape préalable pour l'inspection permettant de déterminer les défauts et quantifier les travaux de réfection.

Lors de ce lavage, il est possible en plus des espèces organiques, d'enlever une partie de biocides et de pigments (cuivre) et aussi de solubiliser les sels (NaCl).

L'eau de lavage contient des sels (de mer, NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>) des matières organiques (voile biologique), des biocides (substances actives des peintures antifouling) ainsi que des pigments (cuivre, zinc, TiO<sub>2</sub>...). Il est aussi possible de retrouver une partie de la résine (Leach layer = couche de peinture hydrolysée).

Des fortes dégradations et de l'enrouillement, des oxydes de fer et des décollements complets de la peinture sont aussi à envisager.

De ce constat, il est nécessaire de traiter l'eau de lavage avant de la rejeter dans le milieu naturel. Le traitement de l'eau est d'autant plus facile que le moyen de lavage ici utilisé permet une captation des eaux de lavage à la source. Les autres initiatives de récupération des effluents de lavage en fond de bassin par la mise en œuvre de batardeaux sont limitées et partiellement efficaces.

Enfin, le traitement et la réutilisation de l'eau en cycle fermé est possible, limitant ainsi la consommation d'eau de manière importante (voir chapitre 6).

#### **4.1. Description de l'opération de lavage**

Le lavage des zones recouvertes par les systèmes de peinture a été entrepris.

Cette opération a consisté à laver la surface recouverte des 2 systèmes de peinture en utilisant les paramètres suivants :

Caractéristiques	Détails
Pompe	HAMMELMANN 400B (4 buses)
Débit d'eau	40 l/mn
Pression de lavage	300 bars
Surface lavée	32 m <sup>2</sup>
Consommation d'eau	423 l
Eau de fuite dans bac de rétention	1,4 l

Tableau 3: Paramètres de lavage



Figure 4: Photo de présentation du lavage



Le lavage de la surface est possible sans endommager la peinture de finition. Cependant, pour les œuvres vives, on observe aux points de départ du cycle de lavage (position statique du robot) un enlèvement circulaire de la peinture. Ce constat vient du fait que la peinture n'était pas entièrement sèche avant le début de l'essai.

Les fuites sont constituées uniquement par de l'eau propre. Les eaux de lavage sont aspirées (sans fuite), pendant la séquence de lavage avec projection d'eau. Les consommations d'eau ont été mesurées par l'installation de compteurs.

#### 4.2. Efficacité de la captation

La quantité d'eau perdue, néanmoins récupérée dans les bacs de rétention, est de **1,4 l soit 0.33%**, de la quantité totale d'eau utilisé **423 l d'eau pour 32 m<sup>2</sup>**. Cette perte est créée au moment du déplacement du robot quand il change de surface de travail (carré de 1,44 m<sup>2</sup>) hors phase de travail de projection et aspiration d'eau.

L'eau récupérée est claire et ne présente pas de particules de peinture. Le récupérateur d'eau sous le filtre de l'aspirateur a collecté des particules de peinture. Cette présence de peinture vient du fait que le temps de séchage entre la fin de l'application du système de peinture et le début de l'opération de lavage n'était pas suffisante. Cette remarque ne remet pas en cause la capacité du procédé de lavage à garantir le zéro rejet.

#### 4.3. Performance environnementale

Les analyses des eaux du réseau et de l'eau de fuite lors de l'opération de lavage se trouvent ci-dessous :

			Eau de ville	Lavage	Exigences SSF
Paramètres	Méthode	Unité	Résultat	Résultat	
Aspect Limpide			Limpide	Limpide	
pH*	NF EN ISO 10523	U. pH	7,3	7,4	5,5 à 9
Température de mesure du pH		°C	18,7	18,6	
Matières en suspension (filtre : MN85/70 BF)*	NF EN 872	mg/l	< 2.0	4,1	100
Carbone organique total : NPOC*	NF EN 1484	mg/l	< 0.50	1,73	70
Fer (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20	383	5000
Cuivre (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	21,8	95,3	5000
Zinc (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	62,4	133	2000
Étain (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20.0	< 20.0	100
Aluminium (ICP-MS)*	NF EN ISO 17294-2	µg/l	< 20.0	34	Suivi
Plomb (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20.0	< 20.0	Suivi
Chrome (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 10.0	< 10.0	Suivi
Nickel (ICP-AES)* NF EN ISO 11885	NF EN ISO 11885	µg/l	< 10.0	< 10.0	Suivi

**Notas :**

L'ensemble des valeurs relatives aux eaux de fuites du lavage est conforme aux exigences de SSF en matière de la qualité de l'eau de rejet dans le milieu naturel.

Les écarts viennent du fait que les bacs de rétention, bien que lavés préalablement, pouvaient contenir des poussières.

## **5. DECAPAGE A L'EAU UHP**

En prérequis au décapage à l'eau UHP, il n'est pas nécessaire de laver la surface. Cette technique pulvérise de l'eau à 2500 bars sur la surface de la structure à décaper. Les anciennes peintures, les contaminants (sels, les oxydes ...) sont atomisés par l'eau sous ultra haute pression. La technique retenue ici par captation des effluents à la source limite le temps de contact de l'eau avec la surface. Il n'y a pas de constitution oxydation flash à la surface. L'état de surface obtenu par ce procédé est parfait, il est sans poussière, sans oxyde, avec la restitution d'un profil d'ancrage antérieur. Cet état de surface va permettre de garantir l'adhérence par ancrage de la peinture. Il permet l'application du primaire juste après la fin du décapage.

Enfin, le traitement et l'utilisation de l'eau en cycle fermé est possible, limitant ainsi la consommation d'eau de manière importante (système Nomad'o dont la performance est résumé en chapitre 6).

### **5.1. Description du procédé de décapage à l'eau UHP**

Cette opération a consisté à décaper la surface recouverte des 2 systèmes de peinture en utilisant les paramètres suivants :

<b>Caractéristiques</b>	<b>Détails</b>
Pompe	HAMMELMANN 2600b (18 buses)
Débit d'eau	17 l/mn
Pression de décapage à l'eau UHP	2600 bars
Surface décapée	32 m <sup>2</sup>
Consommation d'eau	3972 l
Eau de fuite dans bac de rétention	12,86 l soit 0,3% de la quantité d'eau utilisée

Tableau 4: Paramètres de décapage à l'eau UHP

Les consommations d'eau ont été mesurées par l'installation de compteurs.

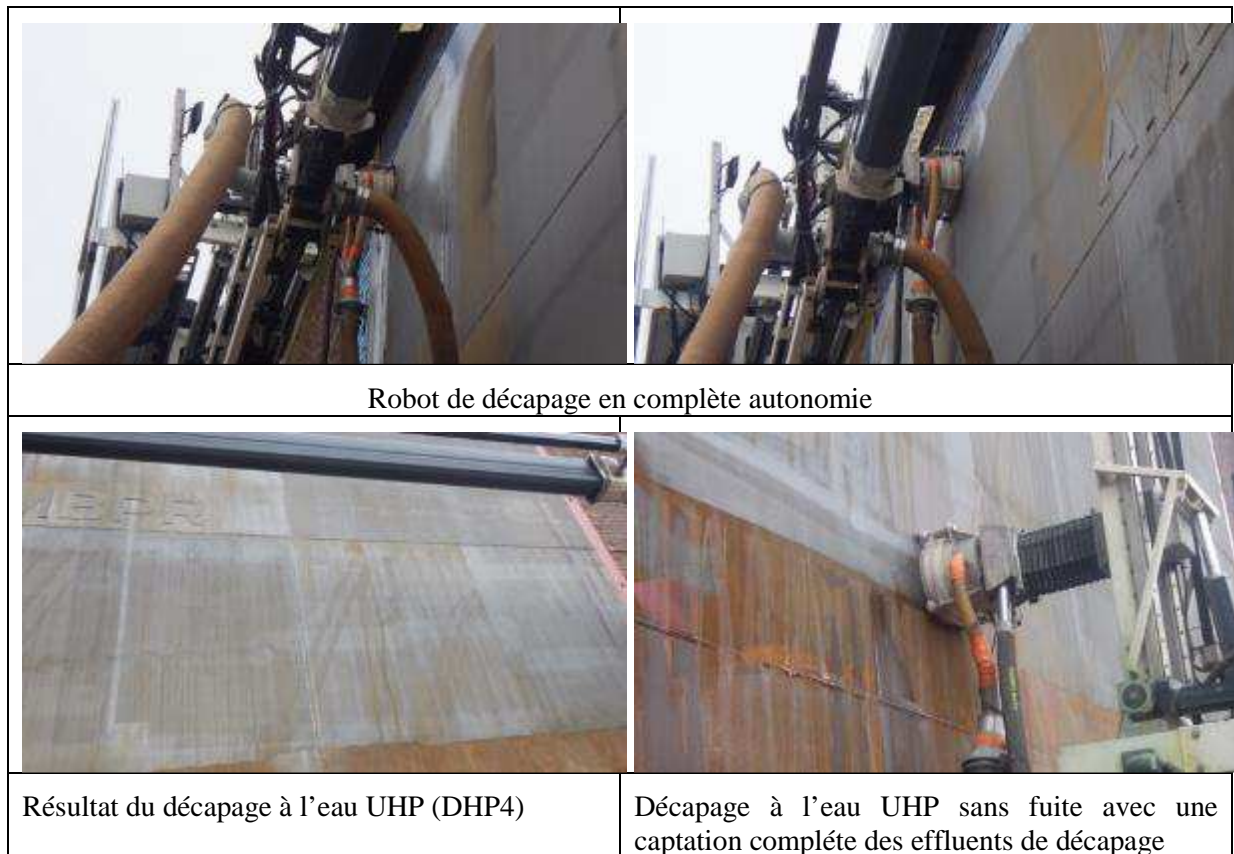


Figure 5: Photo du robot en action et du résultat suite au décapage de la zone d'essai du démonstrateur

## 5.2. Efficacité du procédé de décapage à l'eau UHP

### *Degré de soin et oxydation flash*

Le robot permet d'enlever la totalité des peintures existantes et de d'atteindre l'exigence de DHP4 selon NF T 35-520.

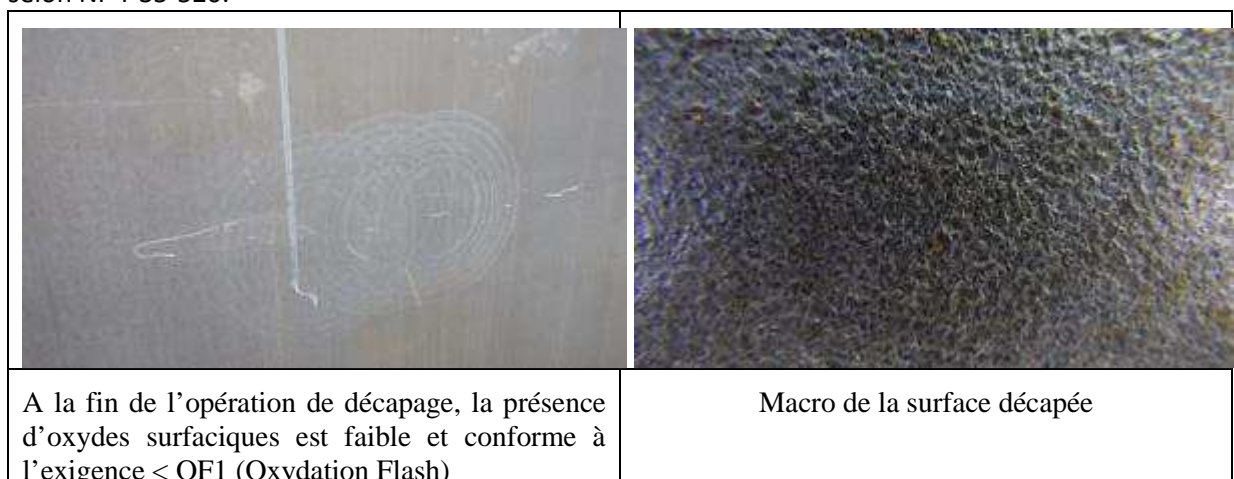


Figure 6: État de surface après décapage à l'eau UHP

Le décapage à l'eau UHP est complet et atteint l'exigence de DHP4 selon la norme NF T35 520. Le niveau d'oxydation flash est faible en particulier en raison de la captation des effluents. Il est conforme à l'exigence de la même norme et <OF1.

### ***Contaminants en sels solubles***

Mesure par diffusion des sels dans la cellule de Bresle initialisée avec de l'eau déminéralisée. Puis mesure de la conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de l'eau extraite de la cellule pour déduction de la concentration en sel

### ***Poussières***

Sur la surface décapée par l'eau UHP, il a été réalisée 4 essais à l'adhésif pour évaluer les poussières. Alors que le procédé ne génère aucune poussière, il a cependant été trouvé une quantité de poussières provenant de la contamination par une opération de production du chantier, voisine de la zone de test. Les poussières s'expliquent par la présence d'opération de décapage d'un navire en jet libre en périphérie de la zone d'essai (production dans le chantier). La pollution par les poussières de la zone est bien exogène.

### ***Synthèse***

<b>Caractéristiques</b>	<b>Exigences*</b>	<b>Résultats</b>	<b>Normes</b>	<b>Conformité</b>
Rugosité	MG	MG	ISO 8503	Conforme
Propreté de surface	DHP4	DHP4	NFT 35520	Conforme
Oxydation flash	< OF1	< OF1		Conforme
Concentration en sels solubles	<70 mg/m <sup>2</sup>	6 mg/m <sup>2</sup>	ISO 8502-6 et 9	Conforme
Poussières	<2S2	1S2	ISO 8502-3	Conforme

\*exigences de la Normdef : 002 partie 4 Qualité et acceptation des travaux de mise en œuvre pour les OM (exemple d'application)

L'ensemble des critères du référentiel Défense pour le décapage à l'eau UHP est conforme

### **5.3. Efficacité de la captation et Performance environnementale**

La quantité d'eau perdue **12.86 l** soit **0.32%** de la quantité d'eau utilisée, 3972 l pour 32 m<sup>2</sup>. Cette perte est créée au moment du déplacement du robot quand il change de surface de travail. L'eau récupérée est claire et ne présente pas de particule de peinture.

Les analyses des eaux du réseau et de l'eau de fuite se trouvent ci-dessous :

Pour rappel, les eaux de fuites sont les eaux collectées dans les bacs de rétention se trouvant en partie basse du démonstrateur lors de l'opération de décapage à l'eau UHP.

			Eau de ville	Décapage à l'eau UHP	Exigences SSF
Paramètres	Méthode	Unité	Résultat	Résultat	
Aspect Limpide			Limpide	Limpide	
pH*	NF EN ISO 10523	U. pH	7,3	7,5	5,5 à 9
Température de mesure du pH		°C	18,7	18,5	
Matières en suspension (filtre : MN85/70 BF)*	NF EN 872	mg/l	< 2.0	17	100
Carbone organique total : NPOC*	NF EN 1484	mg/l	< 0.50	2,1	70
Fer (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20	547	5000
Cuivre (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	21,8	19,3	5000
Zinc (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	62,4	122	2000
Étain (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20.0	< 20.0	100
Aluminium (ICP-MS)*	NF EN ISO 17294-2	µg/l	< 20.0	145	Suivi
Plomb (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20.0	< 20.0	Suivi
Chrome (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 10.0	< 10.0	Suivi
Nickel (ICP-AES)* NF EN ISO 11885	NF EN ISO 11885	µg/l	< 10.0	< 10.0	Suivi

### Nota :

L'ensemble des valeurs relatives aux fuites du décapage à l'eau UHP est conforme aux exigences de SSF en matière de la qualité de l'eau de rejet dans le milieu naturel.

Les écarts sur les matières en suspension MES viennent du fait que les bacs de rétention, bien que lavés préalablement, pouvaient contenir des poussières.

La présence de fer s'explique par la lixiviation (technique d'extraction de produits solubles par un solvant) de la surface métallique des oxydes de fer en surface de l'acier.

L'aluminium provient des poussières des abrasifs (oxydes d'aluminium) se trouvant en fond de bacs de rétention. Il a par ailleurs été indiqué que l'étude a été impactée par la production (décapage à l'abrasif en jet libre) du chantier (présence de poussières au décapage à l'eau UHP), opération de chantier voisine de la zone de test.

## 6. TRAITEMENT DES ÉFFLUENTS : CAPTAGE PAR LE SYSTEME NOMAD'O, FONCTIONNANT EN BOUCLE FERMÉE

### 6.1. Description du système Nomad'o

Le Greendock robot est prévu de fonctionner en boucle fermée. Cependant, le test sur le démonstrateur à Dunkerque (surface e 32 m<sup>2</sup>) ne consomme pas suffisamment d'eau pour permettre le test d'efficacité du système Nomad'o et sa compatibilité aux normes environnementales exigibles par le client. Cependant, lors d'une opération de production sur un navire CMA-CGM à Damen Dunkerque en hiver 2023, le procédé de traitement de type Nomad'o a pu être mis en œuvre en continu lors une opération de décapage sur une surface plus importante de 400 m<sup>2</sup> environ. Des mesures ont été alors effectuées permettant de valider le système.

## 6.2. Efficacité du système Nomad'o

Le système Nomad'o permet de recycler 90% de l'eau pour 400 m<sup>2</sup> traitées.

Cette performance s'inscrit dans un objectif de réduction de la consommation d'eau et complète la performance de respect des contraintes environnementales. Le système Nomad'o a été conçu pour fonctionner en haute montagne sur des conduites forcées d'eau pour lesquelles le décapage ne pouvait avoir lieu avec un approvisionnement en eau important.

(les 10% restant sont traités comme déchets : le volume de déchets à traiter est bien divisé par 10, il s'agit bien d'une économie d'eau qui s'ajoute à la performance de maîtrise des polluants).

## 6.3. Performance environnementale du système Nomad'o

Les effluents de décapage ont été captés à la source puis traités par le système de traitement des effluents Nomad'o.

Dans le tableau ci-dessous :

La colonne « eau de ville » est relative à la qualité du réseau d'eau qui alimente le système Nomad'o.

La colonne « sortie 1er filtre » est relative à de l'eau captée contenant des particules (de peinture par exemple) mais sans les solides. C'est l'eau résultant du premier filtre sans les parties solides qui est analysée.

La colonne suivante est relative à la sortie du traitement de l'eau qui devient l'entrée du lavage ou décapage (fonctionnement en boucle fermée).

Enfin, la dernière colonne est relative aux exigences de SSF.

			Eau de ville	Sortie 1er filtre	Sortie NOMAD'O	Exigences SSF
Paramètres	Méthode	Unité	Résultat	Résultat	Résultat	
Aspect Limpide			Limpide	Trouble	Limpide	
pH*	NF EN ISO 10523	U. pH	7,3	8,3	8	5,5 à 9
Température de mesure du pH		°C	14,7	14,5	15,2	
Matières en suspension (filtre : MN85/70 BF)*	NF EN 872	mg/l	< 2.0	200	4,7	<100
Carbone organique total : NPOC*	NF EN 1484	mg/l	< 0.50	12,5	< 0.50	<70
Fer (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	1120	5250	279	<5000
Cuivre (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	60,5	20500	48,4	<5000
Zinc (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	388	4870	669	<2000
Étain (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20.0	20,7	< 20.0	<100
Aluminium (ICP-MS)*	NF EN ISO 17294-2	µg/l	110	1570	24,8	Suivi
Plomb (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 20.0	54,8	< 20.0	Suivi
Chrome (ICP-AES)*	NF EN ISO 11885	µg/l	< 10.0	< 10.0	< 10.0	Suivi
Nickel (ICP-AES)* NF EN ISO 11885 µg/l	NF EN ISO 11885	µg/l	< 10.0	12,1	10	Suivi

Tableau 4: Synthèse des analyses des eaux

### **Nota :**

On note un abaissement des teneurs en cuivre (pigments des peintures antisalissures) ainsi que du fer que l'on retrouve sous forme d'oxydes sur les coques des bâtiments de surface.

On observe une augmentation des pigments de zinc (pigments anticorrosion des peintures principalement) avec cependant un seuil en rejet conforme à l'exigence.

L'aluminium provient des pigments de type paillette d'aluminium utilisés pour l'effet barrière des peintures anticorrosion.

La présence de plomb est anormale, les peintures ne contiennent, en théorie, plus de plomb. Cependant, il a pu rester des traces de peintures antérieures imparfaitement décapées contenant du plomb (minimum de plomb des peintures anticorrosion). Cette présence de plomb dans les peintures peut venir du fait que le navire a été réparé ou fabriqué dans un chantier naval étranger ou de peinture ancienne.

## **7. DECAPAGE À L'ABRASIFS**

À partir d'une surface préalablement lavée (pour éviter d'insérer des sels en surface de l'acier), il est possible de réaliser du décapage à l'abrasif.

La projection d'un abrasif minéral ou métallique permet à l'impact de la surface d'enlever les anciennes peintures, d'enlever les oxydes, de créer un profil d'ancrage et de garantir la bonne durabilité de l'opération de maintenance.

Le système de captation des abrasifs permet d'aspirer les abrasifs, la peinture et les autres contaminants sans que ces derniers ne soient projetés dans le milieu naturel (fond de bassin par exemple).

Les bonnes pratiques environnementales imposent un coconnage complet de l'ouvrage. Suite au décapage, il est alors nécessaire de ramasser la totalité des abrasifs perdus (contaminés avec les anciennes peintures) au fond du bassin (80 kg/m<sup>2</sup> d'abrasif utilisé en maintenance par exemple)

La captation à la source de l'abrasif évite le montage d'un coconnage (échafaudage/bâchage) et la récupération fastidieuse et partielle des abrasifs utilisés.

### **7.1. Description de l'opération de décapage à l'abrasif**

#### *État de surface à décaper*

Phase préliminaire avant décapage peinture et contrôle de l'état de surface.

La surface à décaper par abrasif a été recouverte de 2 systèmes de peinture composés des gammes des Œuvres Mortes et des Œuvre Vives.

Les états initiaux avant le décapage sont définis dans le tableau ci-dessous :

<b>Caractéristiques</b>	<b>Résultats</b>	<b>Normes</b>
Graisse et corps gras	Absence	Visuel
Concentration en sels solubles	0 mg/m <sup>2</sup>	ISO 8502-6 et 9
Poussières	0	ISO 8502-3

Tableau 5: Caractérisation de la surface peinte avant décapage à l'abrasif

Les mesures de teneur en sel soluble sont requises par la norme. L'état de la surface devant être décapée par décapage à l'abrasif ne présente pas de contaminants pouvant affecter les résultats de performance du décapage.

## Les moyens industriels mis en oeuvre

Équipements	Caractéristiques
Compresseur d'air	24 000 NI/mn 12 Bars
Système d'aspiration	Munkebo 45 Kw
Réservoir sous pression	6 000 l
Type de buse	Elcometer 12mn
Pression de décapage dans le tuyau avant la buse:	<b>8 bars</b>

Nature de l'abrasif

Type d'abrasif	Silicate de Fer
Référence fabricant	Bekagrit SIBELCO

### Bacs de rétention

En partie basse de la structure à décapier, il a été placé des bacs de rétention. Ces derniers permettent de collecter l'ensemble des fuites lors des opérations de production.

Pour le procédé de décapage à l'abrasif, les bacs de rétention ont été recouverts d'un polyane permettant la récupération la plus complète possible des projections d'abrasif.

### Robot de décapage à l'abrasif

La tête de décapage à l'abrasif est installée en extrémité du bras du robot sur le porte outil. Les photos ci-dessous décrivent l'installation qui est composé d'un bras se déplaçant sur la surface à décapier. L'extrémité de ce bras se trouve la tête de décapage à l'abrasif ainsi que le système d'aspiration de l'abrasif usagé.

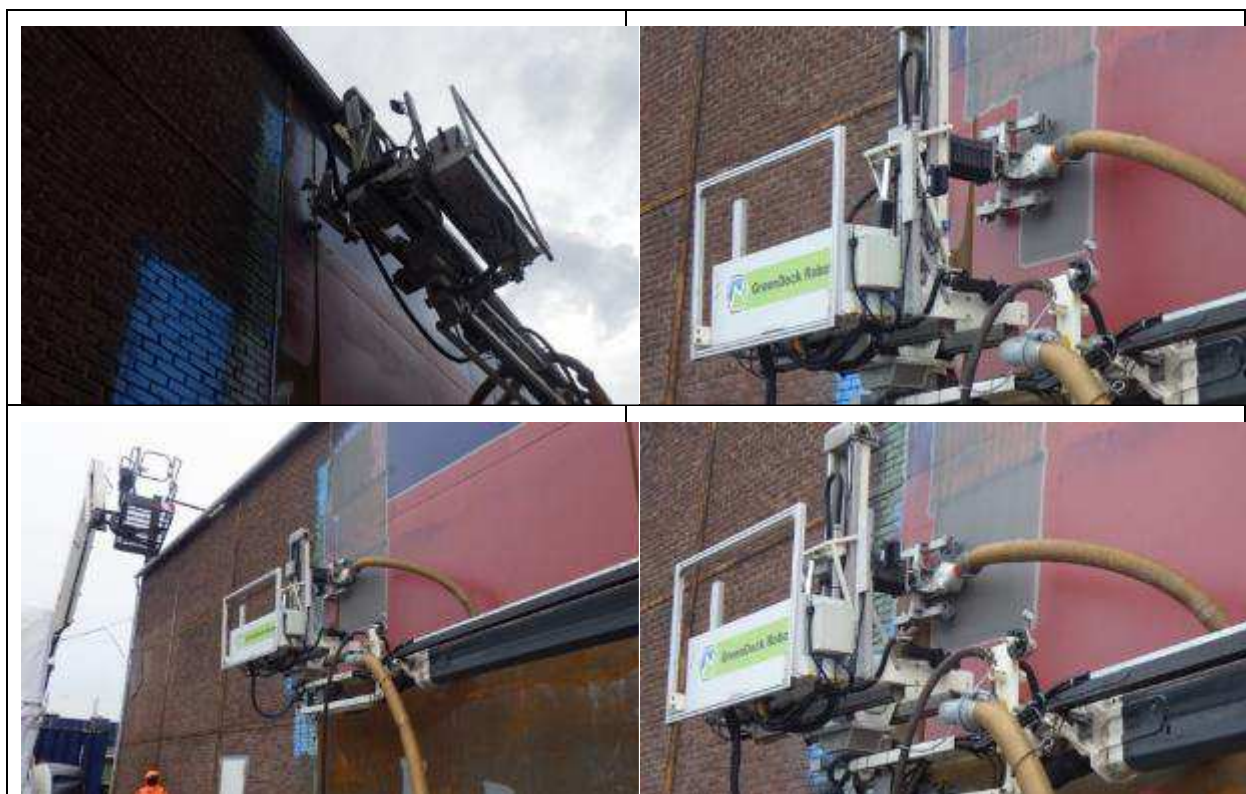

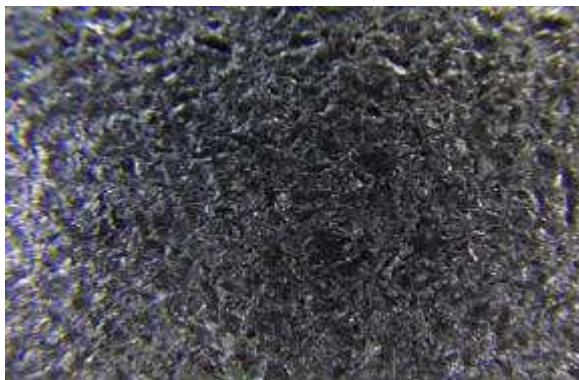


Figure 7: Le robot en phase de décapage à l'abrasif



## 7.2. Efficacité du procédé de décapage

### Le degré de soin

	
On observe nettement la zone de travail du robot et la partie de recouvrement des zones périphériques	Les macros de la surface décapée montre l'absence de peinture et d'oxydes dans les anfractuosités de l'acier

Le degré de soin Sa 2 ½ selon ISO 8501-1 a été obtenu par le procédé de décapage à l'abrasif.

### Poussières

En dépit d'une forte dépression, le dépoussiérage de la surface n'est pas parfait et selon les exigences du référentiel Défense, il serait nécessaire de procéder à un parachèvement de ce dernier par aspiration. Le procédé de parachèvement (la tête du robot muni d'une brosse et d'un rideau d'air par exemple) est une adaptation mineure permettant d'atteindre l'exigence.

### Rugosité

La rugosité obtenue est de type Moyen (G) (conforme à l'exigence). Elle est mesurée par la méthode du comparateur viso-tactile selon la norme ISO 8503-1.

### Sels solubles

Les concentrations en sels solubles sont conformes à l'exigence des normes Défense. (Elles s'obtiennent par usage de la cellule de Bresle et du conductimètre).



### Synthèse des exigences

Caractéristiques	Exigences*	Résultats	Normes	Conformité
Rugosité	MG	MG	ISO 8503	Conforme
Degré de soin	Sa 2 ½	Sa 2 ½	ISO 8501-1	Conforme
Concentration en sels solubles	<70 mg/m <sup>2</sup>	12 mg/m <sup>2</sup>	ISO 8502-6 et 9	Conforme
Poussières	<2S2	3S1	ISO 8502-3	Non Conforme

\*exigences de la Normdef : 002 partie 4 Qualité et acceptation des travaux de mise en œuvre pour les OM (exemple d'application)

Les différentes mesures réalisées lors de cet essai démontrent la maîtrise de l'outil par le choix de l'ensemble des paramètres (pression, débit, buses, abrasifs, ...) et leur mise en œuvre de manière automatique par le robot.

### 7.3. Efficacité de la captation et performance environnementale

	
Abrusif neuf	Abrusif collecté dans le bac de rétention sur le polyane. On observe la présence de peinture (rouge et bleu) dans l'abrasif et également une évolution de la granulométrie / abrasif neuf

La quantité d'abrasifs perdus dans les bacs de rétention est de 12,8 kg.

On considère que la quantité d'abrasif non aspirée et ne tombant pas dans les bacs de rétention (recouvert de polyane) correspond à la quantité collectée sur le polyane. (Soit  $12,8 \times 2 = 25,6$  kg d'abrasifs perdus en tout sur 1400 kg utilisés). C'est un constat fait à partir du volume de la collecte de l'ensemble des résidus à terre qui a été fait sans pouvoir mesurer finement la partie exacte propre aux abrasifs.

La quantité d'abrasif utilisé est de 1400 kg pour cette expérience

Le pourcentage d'abrasif non collecté par le système d'aspiration est **2% des abrasifs utilisés**. Comme il a été indiqué précédemment, ces derniers contiennent en plus de l'abrasif usagé, de la peinture provenant de la surface à décaper.

### 8. TEST DE L'APPLICATION AU ROBOT D'UN SYSTEME DE PEINTURE

La technique d'application des systèmes de peinture au robot dans le domaine de la construction et de la maintenance navale constitue une innovation majeure que seul le robot GreenDock Robot est en mesure de réaliser actuellement. La seule technique utilisée à ce jour par tous les chantiers du monde est l'application par la technique de pulvérisation Airless en manuel par un opérateur. Dans ce cas le taux de transfert de la peinture est faible et largement tributaire des conditions météo et en particulier du vent. Dans ce cas la peinture ne tombe pas par gravité mais elle est pulvérisée sous forme de « nuages » dans l'atmosphère.

#### ***Application des peintures au robot sans captation.***

Le robot d'application de la peinture permet sur un élément de surface de  $1,4\text{m}^2$  d'appliquer la peinture en une seule passe unique. Alors que pour une application classique dans des conditions venteuses en chantier naval, le taux de transfert de la peinture est faible et une grande partie de l'application de la peinture est dispersée dans l'atmosphère et n'atteint pas la surface à recouvrir.

L'impact environnemental de l'application classique est que la peinture est un polluant dont plus de 40% est diffusé dans l'atmosphère. De nombreux chantiers de construction ou de maintenance ont acté le fait de ne plus peindre au pistolet des superstructures de navire.

#### ***Application des peintures au robot avec captation.***

Pour assurer un meilleur taux de transfert et par conséquent limiter l'impact environnemental et le poids financier de l'achat de peinture, le système d'application au robot avec la captation des over spray (particules de peintures pulvérisées hors de la surface à recouvrir) permet :

- D'appliquer de la peinture avec des conditions de vents fortes,
- De réduire les over sprays,
- D'augmenter le taux de transfert,
- De capter une grande partie des over sprays dans les filtres grâce au système d'aspiration.

### 8.1. Description de l'opération

L'essai consiste à appliquer un système de peinture composée de plusieurs couches comme détaillé ci-dessous. L'application se fait au robot d'application (en autonomie) en utilisant ou pas le système de captation des over-spray permettant de limiter le brouillard de peinture projeté dans l'atmosphère.

L'essai a pour objectif de démontrer que l'application sur le démonstrateur sur 32 m<sup>2</sup> est réalisable au robot. Fort de l'expérience relative à l'application manuelle par pulvérisation, il est aussi fait une comparaison entre l'application manuelle et l'application au robot.

#### *Le système de peinture retenu pour ce test*

Le système de peinture retenu dans le cadre de cet essai est celui des OM des bâtiments de surface. Il a été également retenu d'appliquer 2 couches de peinture de finition.

Fabricants	Œuvres mortes		
	Peintures	Épaisseurs nominales	Remarque
JOTUN	Jotamastic 90 alu	100 – 300 µm <b>100 µm</b>	Application au robot <b>avec</b> captation des overspray
	Jotamastic 90 grey	100 – 300 µm <b>100 µm</b>	Application au robot <b>sans</b> captation des overspray
	Hartop XP	50 – 100 µm <b>60 µm</b>	
	Hartop XP	50 – 100 µm <b>60 µm</b>	Application au robot <b>avec</b> captation des overspray
<b>Épaisseurs nominales</b>	<b>320 µm</b>		







#### *Paramètres des applications*

Les paramètres d'application au robot respectent les différents réglages selon le type de peinture utilisé, permettant d'atteindre un film sec sans défaut d'application. Ils sont extraits d'une matrice d'essai qui a été réalisée.

<b>Critères</b>	<b>Paramètres</b>
Pression pompe	4,5 bars
Buse	25 -17 (721)
Pression d'application	220 bars
Vitesse de déplacement	450 (mm/s)
Dilution	0,1% thinner 17
Épaisseur humide	250 µm
Température extérieure	12°C
Température support	10°C
Température peinture	15°C
Distance buse	400 mm
Dimension d'impact	240 mm
Pas	150 mm
Chevauchement vertical	210-250 mm
Ajustement chevauchement horizontal	1/4

Le débit de peinture est de 1,7 litre/minute

Ajustement de l'application sur une zone de test : définition de la largeur du jet, de la distance d'application et de la limite de coulure de la peinture. L'ensemble de ces réglages est nécessaire pour permettre une application de qualité au robot.

Application au robot sans captation	Application au robot avec captation
<p data-bbox="220 454 730 589">Protection contre le vent permettant de peindre au robot sans contrainte de vent et permettant de capturer une part des oversprays.</p> 	
	
	

## 8.2. Efficacité du processus

### *Qualité de l'application*

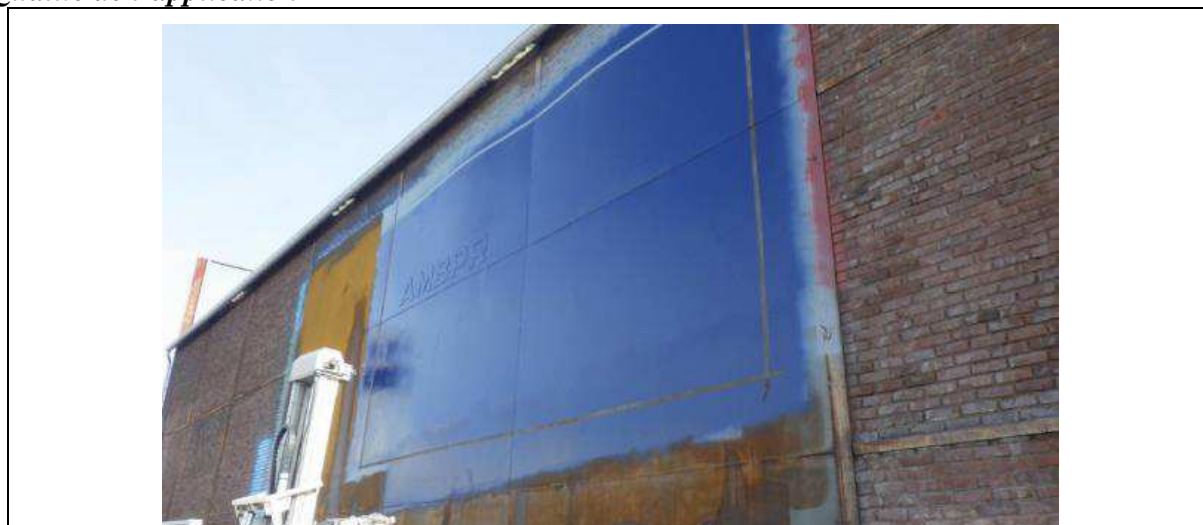


Figure 8: Application du film peinture sur la structure de façon uniforme, homogène et sans coulure.

### *Mesures des épaisseurs finales*

Les mesures sur les systèmes complets ont été effectuées à partir d'une nacelle. La mesure des épaisseurs a été réalisée par une cartographie de l'ensemble de la surface par environ 100 points de mesure. La mesure se fait par ligne et par colonne par un point tous les 0,5m environ.

Les mesures des systèmes de peinture présentées sont uniquement les résultats de l'application des 2 dernières couches de peinture.

Zones	Système peinture	Épaisseurs nominales (µm)	Nombre de mesures	Moyenne (µm)	Écart type
Finition 1 <b>sans</b> captation	OM	320	94	299	96
Finition 2 <b>avec</b> captation		320	138	363	88

La dispersion des points est proche pour les 2 modes d'application.

## 8.3. Performance environnementale

Le bac de rétention ne récupère pas de peinture liquide. Aucune fuite liquide n'est donc constatée.

La fuite est donc uniquement sous forme de pulvérisation de gouttelettes suspendues dans l'air.

On se contente de résumer la performance en terme de dissémination dans l'atmosphère sur ce qui suit sur la seule perte par overspray non récupérée disséminée dans l'atmosphère.

Nous allons démontrer dans ce qui suit que le traitement par robot réduit drastiquement la pollution par rapport au traitement au bassin à sec actuel autorisé.

En reprenant les résultats du paragraphe 3.2,

Et les gains environnementaux suivants :

- Nous avons le gain sur la peinture consommée de 8,2 %
- Le taux de transfert favorable au robot de plus de 10% (46% contre 35%),
- Pas influence du vent lors de des application robotisées (pertes pouvant aller jusqu'à 30% pour la dépose manuelle interdisant au-delà toute opération),
- Captation d'au moins 50% des over sprays dans le système AMBPR quelques soient les conditions météo grâce à la cage de protection au vent dans système d'aspiration
- Captation de plus de 90% des over sprays avec le système d'aspiration (chiffre pessimiste).

Ces résultats sont concaténés dans le tableau suivant :

	M	R	R aspiration
Poids liquide consommé	5,972	5,485	5,485
Poids sec consommé équivalent	Référence : 4,778	4,388	4,388
Poids perdu non déposé (46% de perte contre 35%)	2,202	1,5432	1,5432
Poids perdu dans l'atmosphère	2,202	0,7716	0,15432
Pollution en pourcentage du poids identique de référence	0,46	0,16	0,03

La pollution dans l'environnement est donc maximum de 3% par rapport à un volume de référence consommé en mode manuel contre 46% du volume disséminé lors de la méthode actuellement autorisée en bassin à sec et susceptible d'être poussé au large par le vent

## 9. CONCLUSIONS

### *Le lavage et le décapage à l'eau UHP*

La démonstration de l'efficacité de la captation de effluents dans les deux procédés constitue une avancée importante où les seules eaux relarguées sont les eaux de fuite (eau du réseau ou eau recyclée). La mise en œuvre des 2 procédés utilisant de l'eau a démontré leur performance et la conformité par rapport aux exigences des référentiels Défense sur les aspects qualité et environnementale.

Système Nomad'o

Les 2 procédés sont compatibles du système Nomad'o de fonctionnement en boucle fermé qui permet de limiter de manière importante (environ 90% de l'eau consommée) la consommation d'eau en restant conforme aux exigences environnementales de rejet.

### *Le décapage à l'abrasif*

La captation est plus difficile et la quantité de l'abrasif projeté en périphérie représente environ 2% de la quantité d'abrasif projetée.

La mise en œuvre du décapage à l'abrasif a démontré sa performance et la conformité par rapport aux exigences des référentiels Défense (qualité). Il sera possible par une adaptation mineure du robot de respecter les exigences de dépoussiérage des surfaces. La possibilité de capter sur une bache l'essentiel des 2% d'abrasifs non aspirés permettrait de réduire plus drastiquement la quantité d'abrasif réellement perdue.

### *Application de la peinture*

Le robot d'application des systèmes de peinture dans cette configuration d'essai fonctionne et a permis d'appliquer sur un démonstrateur des systèmes de peinture. Indiscutablement, le robot optimise le **taux de transfert** (une seule passe) alors qu'en application manuelle il est nécessaire de procéder en plusieurs passes (de 3 à 4 passes par couche).

La perte de peinture n'est que due aux oversprays. Le système de captation des oversprays par aspiration apporte un net progrès par rapport à la configuration de référence (peinture manuel) : **passage de 46 % de perte à moins de 3%.**

Tous ces procédés font de plus l'objet d'une amélioration continue : les résultats obtenus constituent l'état de l'art mais seront continuellement améliorés.

## **DISCUSSIONS**

### **Question:**

**JF. Castel (Gazocean):** Est-ce que des commandes électriques sont envisagées en retrofit ?

### **Réponse:**

La faisabilité de modifier un bras existant pour installer des manœuvres électriques est à étudier au cas par cas.