

MÉMOIRE DE STAGE DE FIN D'ETUDE

Effacité et durabilité du couplage de solutions innovantes pour lutter contre le biofouling des ouvrages de production d'électricité en milieu aquatique



Présenté par Aude DUPIN

Pour l'obtention du **DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGROPARISTECH**

Dans le cadre de la dominante d'approfondissement : **IEVU (Ingénierie des espaces végétalisés urbains)**

Stage effectué du 09/03/2020 au 22/09/2020

À **EDF LAB PARIS CHATOU**, 6 Quai Waltier 78401 Chatou

Enseignant référent responsable de stage : Madame Aurélie BALIARDA

Maîtres de stage : Mesdames Céline BOUTELEUX, Géraldine NOGARO, Sylvie SOREAU

Soutenu le 13/10/2020

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

④ Engagement :

Je soussigné (e) Aude DUPIN

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Paris le 14/09/2020

Signature :



Remerciements :

Je tiens à remercier, d'une part, mes tutrices de stage Mesdames Céline Bouteleux, Géraldine Nogaro et Sylvie Soreau des groupes P76 et P77¹ du Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF R&D d'avoir commandité ce stage qui témoigne d'une très belle initiative mise en place au sein du groupe afin de mener l'entreprise vers une production plus durable. Je les remercie, d'autre part, pour leur encadrement et leurs conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail malgré les conditions si particulières. Je remercie également Monsieur Thibaut Neveux du groupe P77 pour sa patience et sa pédagogie.

Je remercie chaleureusement mon enseignant référent Madame Aurélie Baliarda du département SVS d'AgroParisTech, pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa compréhension qui m'ont beaucoup aidée dans cette période un peu compliquée.

Je tiens finalement à remercier profondément mes professeurs de dominante IEVU Monsieur Xavier Guiomar et Mesdames Christine Aubry et Marie-Reine Fleisch du département SIAFEE d'AgroParisTech de m'avoir permis de m'écarter des sentiers de l'agriculture urbaine pour entreprendre ce stage atypique.

Sources des images de la page de garde (de gauche à droite, de haut en bas) :

Simulation visuelle du projet Provence grand large <https://www.provencegrandlarge.fr/le-projet/simulation-visuelle/>

<https://www.nationalgeographic.fr/environnement/afrique-ruec-vers-lenergie-nucleaire>

<https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/comment-fonctionne-une-centrale-hydroelectrique>

¹ Le groupe P76 ou « Gestion Hydro-Environnementale des Ouvrages » est un des groupes de recherche du laboratoire LNHE d'EDF R&D, Géraldine Nogaro en fait partie. Céline Bouteleux et Sylvie Soreau travaillent dans le groupe P77 ou « Chimie Microbiologie Eau et Environnement ».

Table des matières

Remerciements	3
Liste des abréviations	7
Introduction	8
1 Problématique et attendus du stage	9
1.1 EDF et le biofouling.....	9
1.1.1 Qu'est-ce que le biofouling ?.....	9
1.1.2 Quels sont les impacts du biofouling chez EDF ?	11
1.1.3 Le contexte règlementaire.....	15
1.2 Démarche du stage et méthodes.....	16
1.2.1 La recherche et la synthèse bibliographique : méthode et attendus.....	16
1.2.2 L'analyse technico-économique : méthode et attendus	17
1.2.3 L'analyse des données de la « biobox » : méthode et attendus	18
2 Recherche des solutions de lutte alternatives : synthèse bibliographique	19
2.1.1 Ciblage des besoins d'EDF.....	19
2.1.2 Panorama des solutions alternatives	20
2.1.3 Sélection de solutions retenues pour étude.....	22
3 Analyse technico-économique (ATE)	29
3.1 Méthodologie d'analyse technico-économique	29
3.2 Ciblage de l'étude : définitions des zones d'étude.....	30
3.2.1 Point sur l'organisation interne d'EDF.....	30
3.2.2 Identification des zones d'étude	30
3.3 Caractéristiques des solutions à mettre en œuvre sur les sites	32
3.4 Cas d'étude et solutions proposées	35
3.5 Evaluation des différentes solutions	36
3.6 Comparaison des solutions entre elles	37
3.6.1 Illustration de la méthode d'exploitation des résultats avec l'exemple des centrales hydroélectriques CHE	37

3.6.2	Résultats pour les autres cas d'étude	39
3.7	Discussions des résultats	42
4	Comparaison de l'efficacité de différents revêtements : analyse des données de la « biobox »	42
4.1	Adaptation de la méthode d'analyse	42
4.2	Résultats	44
4.3	Perspectives.....	46
4.3.1	Mesure de l'adhérence des organismes	46
4.3.2	Mesure de la colonisation des échantillons : problème des interstices.....	46
4.3.3	Automatisation de l'analyse des clichés	46
5	Discussion générale	48
5.1	Continuer une veille scientifique des technologies innovantes	48
5.2	Organiser une consultation biofouling interne à EDF	48
5.3	Dimensionner la maintenance à partir d'une limite de biofouling à fixer	49
5.4	Tests à réaliser pour la fiche innovation	49
5.4.1	Test sur le robot	49
5.4.2	Test de nettoyage avec le robot	49
5.4.3	Autres tests.....	50
	Conclusion	51
	Bibliographie	52
	Liste des contacts.....	56
	Table des annexes.....	58
	English summary	84
	Résumé en français.....	85

Table des illustrations

Figure 1 : Les différentes phases du biofouling	9
Figure 2 : (A) Exemples d'organismes impliqués dans le microfouling. (B) Exemples d'organismes impliqués dans le macrofouling (C) Compléments sur les bivalves	10
Figure 3 : Le fonctionnement d'une centrale nucléaire	12
Figure 4 : Illustrations de biofouling dans des circuits de refroidissement EDF	13
Figure 5 : Le biofouling des éoliennes flottantes.	13
Figure 6 : Le biofouling des CHE	14
Figure 7 : Évaluation du CAPEX initial, des dépenses subséquentes (OPEX) et des recettes au cours de la durée de vie économique d'un projet	18
Figure 8 : a. Photographie de la biobox avant immersion dans le canal d'amenée ; b. Photographie de la biobox ouverte	19
Figure 9 : Photo prise d'un coupon recouvert du revêtement silicone PPG Si 1290, visite d'octobre 2019	19
Figure 10 : Panorama des solutions trouvées (production personnelle).....	21
Figure 11 : Schéma présentant le principe de système antifouling acoustique	26
Figure 12: Le phénomène de cavitation induit par les ondes ultrasons.....	26
Figure 13 : Le système de jet d'eau cavitationnel MSS Cavitation cleaner de VideoRay.....	27
Figure 14 : L'outil de nettoyage FlexiClean développée par Lateral.....	28
Figure 15 : Zones sensibles des différents sites de production	33
Figure 16 : Centrale hydroélectrique - Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités.	39
Figure 17 : Eolien flottant - Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités.....	40
Figure 18 : CNPE Conduite en béton - Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités.	41
Figure 19 : CNPE Grille de puits - Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités	41
Figure 20 : Photo prise d'un coupon recouvert du revêtement silicone PPG Si 1290, visite d'octobre 2019 (Photo EDF). Extrait de la note d'observation : « Moules autour sur les interstices (entre les coupons) (3 à 4 cm), Revêtement propre ».....	43
Figure 21 : Suivi de l'indice de colonisation des biobox (indice N moyen +/- erreur standard).....	45
Figure 22 : Focus sur les revêtements non biocides. Suivi de l'indice de colonisation des biobox (indice N moyen +/- erreur standard)	46

Liste des abréviations

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

ATE : Analyse Technico-Economique

AUV : Autonomous Underwater Vehicle

BPR : Biocidal Products Regulation

CHE : Centrale Hydroélectrique

CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Electricité

COV : Composé Organique Volatil

CRF : Circuit de Refroidissement

EDF : Electricité de France

EDF R&D : EDF Recherche & Développement

EDF SA : EDF Société Anonyme

LNHE : Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

OMI : Organisation Maritime Internationale

PGL : Provence Grand Large

ROV: Remotely Operated underwater Vehicle

TAC: Total Annualized Cost

TBT: Tributylétains

TRL: Technology Readiness Level

US : Ultrasons

VAN : Valeur Actualisée Nette

Introduction

Le groupe EDF est le premier producteur d'électricité en France, il produit l'énergie sous forme nucléaire, fossile et renouvelable avec notamment un parc nucléaire comptant 19 Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE), plus de 400 centrales hydroélectriques et la filiale EDF Renouvelables qui vise à développer, entre autres, les énergies renouvelables marines avec des parcs d'éolien flottant.

Les ouvrages de production d'électricité immergés (circuits de refroidissement des centrales électriques, éolien flottant, conduites sous-marines, etc.) sont sujets au développement du biofouling c'est-à-dire à la colonisation et l'encrassement par des organismes vivants (microorganismes et macroorganismes d'origine animale ou végétale). Le biofouling peut fortement perturber le fonctionnement des installations (baisse de disponibilité, pertes de performance, corrosion précoce, etc.) et entraîner des pertes financières non négligeables. De nombreuses solutions existent dans l'industrie pour lutter contre le biofouling (solutions dites antifouling) avec notamment l'utilisation de traitements biocides comme par exemple l'électrochloration.

Dans un contexte réglementaire de plus en plus contraignant vis-à-vis de l'utilisation des produits biocides, et dans l'objectif de limiter l'impact environnemental dû aux traitements chimiques, la recherche de solutions antifouling alternatives et/ou complémentaires à la chloration, aujourd'hui largement utilisée, représente un fort enjeu pour EDF. De plus, les hausses de températures dues au réchauffement climatique sont susceptibles de favoriser le biofouling à l'avenir, ce qui rend la recherche de solutions alternatives encore plus pressante. Ce stage, qui s'est déroulé au sein d'un des centres de Recherche et Développement d'EDF (EDF Lab Chatou), s'inscrit dans cette démarche. L'objectif principal de ce stage est d'étudier l'efficacité et la durabilité du couplage de solutions innovantes pour lutter contre le biofouling des ouvrages de production d'électricité en milieu aquatique.

Pour cela il s'agit, dans un premier temps, d'identifier les solutions alternatives et de sélectionner les mieux adaptées aux cas d'étude via une synthèse bibliographique. Dans un second temps, une analyse technico-économique permet d'évaluer la mise en œuvre des différentes technologies sélectionnées utilisées seules ou en couplage. Dans un troisième et dernier temps, une analyse de données collectées sur l'efficacité de différents revêtements antifouling permet de compléter l'étude. Le travail réalisé sera ensuite globalement mis en perspective pour donner quelques pistes d'approfondissement à plus long terme.

1 Problématique et attendus du stage

Toute structure immergée est le support de développement du biofouling. Les installations EDF en eau douce ou en eau de mer sont particulièrement sensibles au développement du biofouling. C'est pourquoi une démarche a été mise en place en interne afin d'étudier comment ce problème pourrait être géré de façon durable. Cette partie fait un état des lieux du problème du biofouling dans les installations en eau naturelle d'EDF, de la façon dont il est actuellement pris en charge et décrit la démarche du stage.

1.1 EDF et le biofouling

1.1.1 Qu'est-ce que le biofouling ?

Le biofouling, ou encrassement biologique, correspond à la formation d'une couche d'organismes vivants sur une surface en contact permanent ou fréquent avec de l'eau. Le processus de biofouling démarre dès l'instant où une surface est immergée. Par souci de simplicité, les termes anglais « biofouling » et « antifouling » seront utilisés faute de termes équivalents en français.

Le biofouling se compose de quatre étapes principales (Lejars et al 2012) détaillées dans les paragraphes ci-dessous et illustrées en figure 1.

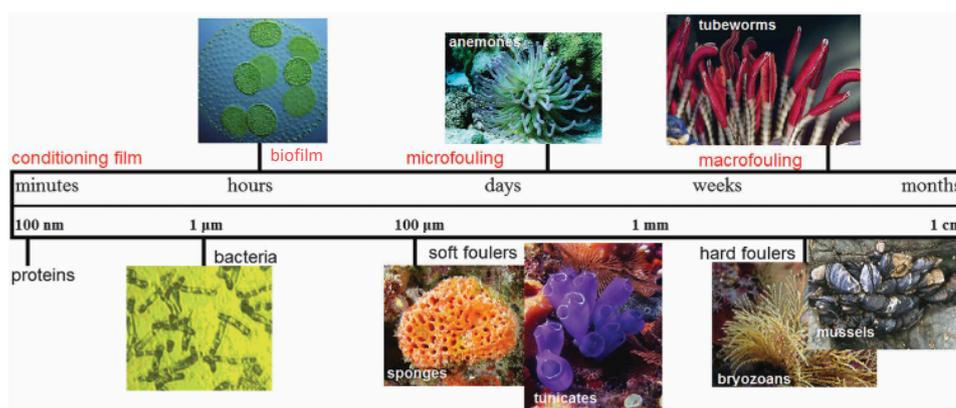


Figure 1 : Les différentes phases du biofouling (Nurioglu et al 2015)

1.1.1.1 La formation d'un film conditionnant

Lorsqu'une surface est immergée en milieu aqueux, une couche de molécules organiques dissoutes est adsorbée. Ce film conditionnant est constitué de protéines, polysaccharides et glycoprotéines (Lejars et al 2012; Callow et Callow 2011; Nurioglu et al 2015). Ce film se forme en quelques minutes et sera le support des colonisations biologiques primaires, secondaires et tertiaires.

1.1.1.2 La colonisation primaire ou formation d'un biofilm

Cette étape correspond à l'installation et à la croissance de bactéries pionnières formant ainsi un biofilm en quelques heures. La formation de biofilm se fait en plusieurs étapes :

- Tout d'abord des bactéries planctoniques se fixent sur la surface. Cette adhésion est basée sur des interactions faibles non covalentes de type Van der Waals ou électrostatique et est réversible (Lejars

et al 2012). Cette première adhésion dépend des caractéristiques physico chimiques du substrat et de la surface des bactéries, elle permet aux bactéries d'« inspecter » la surface (Vanysacker et al. 2014).

- Ensuite les bactéries se fixent de manière permanente au support par des liaisons covalentes via leurs appendices cellulaires et la sécrétion d'une matrice d'exoprotéines (Lejars et al 2012; Nurioglu et al 2015). Cette matrice a un rôle très important puisqu'elle est le support des échanges entre les bactéries.
- Enfin, quand le biofilm bactérien est mature, il fonctionne comme un écosystème complexe et peut atteindre jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur sous des conditions de croissances optimales (Flemming et al. 2016).

1.1.1.3 La colonisation secondaire ou microfouling

Le film conditionnant et le biofilm bactérien correspondent au premier stade du microfouling. Le film bactérien sert de support à l'installation d'organismes unicellulaires eucaryotes. En quelques semaines, des diatomées, des spores de macroalgues et de protozoaires s'agrègent (Nurioglu et al 2015).

1.1.1.4 La colonisation tertiaire ou formation du macrofouling

Des macroorganismes colonisent ensuite le milieu comme, par exemple en milieu marin : les macroalgues (ulve), des invertébrés « mous» (hydraires, bryozoaires, coraux, éponges, anémones) et des invertébrés «durs» (munis d'une coquille) comme des mollusques bivalves (moules, huitres), des arthropodes crustacés (balanes) ou des annélides polychètes (vers tubicoles) (figure 2).

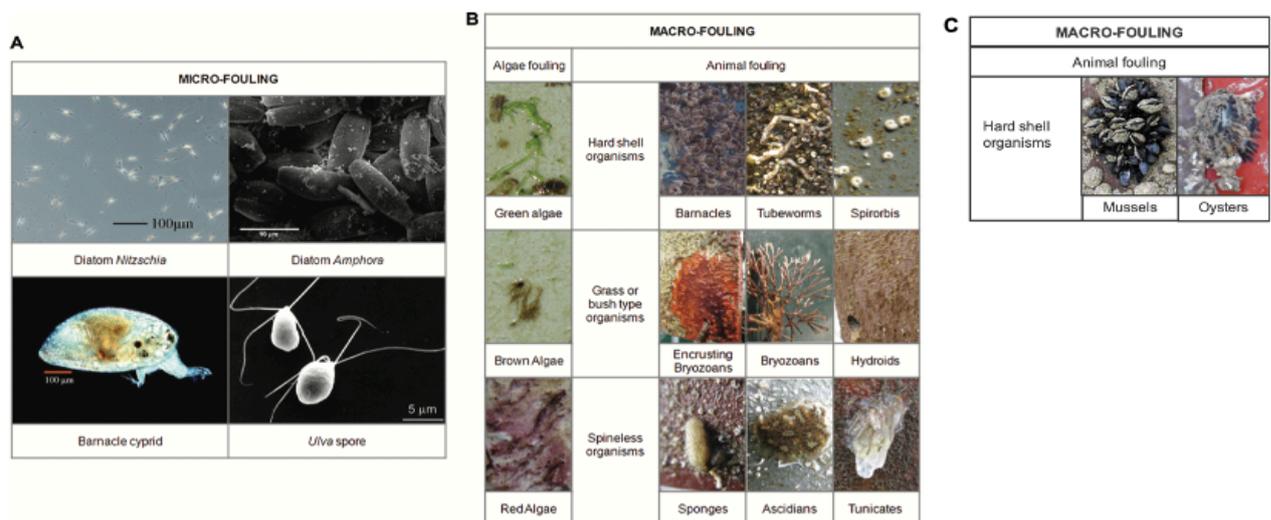


Figure 2 : (A) Exemples d'organismes impliqués dans le microfouling. (B) Exemples d'organismes impliqués dans le macrofouling (Lejars et al 2012) (C) Compléments sur les bivalves (photos biobox EDF)

Le processus de colonisation du biofouling est un processus dynamique dans le temps, les différentes étapes peuvent avoir lieu en simultanément. En effet, les spores mobiles d'algues sont capables de s'installer sur une surface propre en quelques minutes. De même, les larves de certaines espèces de bryozoaires,

d'hydrides ou de balanes peuvent s'installer après quelques heures d'immersion (Callow et Callow 2011). Par ailleurs, il serait illusoire de penser que bloquer la formation du biofilm permettrait d'empêcher le développement du micro ou macrofouling puisque certaines espèces comme les diatomées peuvent se développer sur des surfaces propres (Nurioglu et al 2015). Toutefois, la formation du biofilm aide l'installation des stades de colonisation suivants. Les organismes impliqués dans le biofouling seront désignés par les termes organismes colonisateurs ou encrassants indifféremment.

1.1.2 Quels sont les impacts du biofouling chez EDF ?

1.1.2.1 Le biofouling chez EDF

La présence de biofouling sur les structures industrielles peut perturber leur fonctionnement en augmentant, par exemple, la masse de la structure initialement prévue lors du dimensionnement du système, en posant des problèmes de corrosion précoce ou en limitant le pompage de l'eau.

1.1.2.2 Les conséquences pour EDF

1.1.2.2.1 Le biofouling dans les CNPE

Un CNPE produit de l'électricité à partir de chaleur selon le principe des machines thermiques : il est constitué d'une source chaude (le réacteur nucléaire) et d'une source froide (l'environnement aquatique). Ces deux sources sont reliées l'une à l'autre par trois circuits thermiques : primaire, secondaire et tertiaire. Ce troisième circuit, indépendant des deux premiers, est aussi appelé circuit de refroidissement. Il permet de transformer en eau la vapeur du circuit secondaire. Il est alimenté par une source froide (mer ou rivière) et peut être ouvert (en cas de fort débit de la source froide) ou fermé avec des aéroréfrigérants, au bord de certaines rivières (Figure 3). Le circuit de refroidissement (CRF) fonctionne de la manière suivante : de l'eau (environ 50 m³ par seconde pour un circuit ouvert) est prélevée dans l'environnement (mer ou rivière) pour assurer le refroidissement des équipements via le condenseur. Une fois l'opération de refroidissement effectuée, l'eau qui n'est jamais entrée en contact avec la radioactivité, est restituée dans la mer ou le fleuve, à une température légèrement plus élevée. L'eau rejetée est soumise à une réglementation européenne qui impose un suivi strict en termes de température et de qualité physico-chimique.

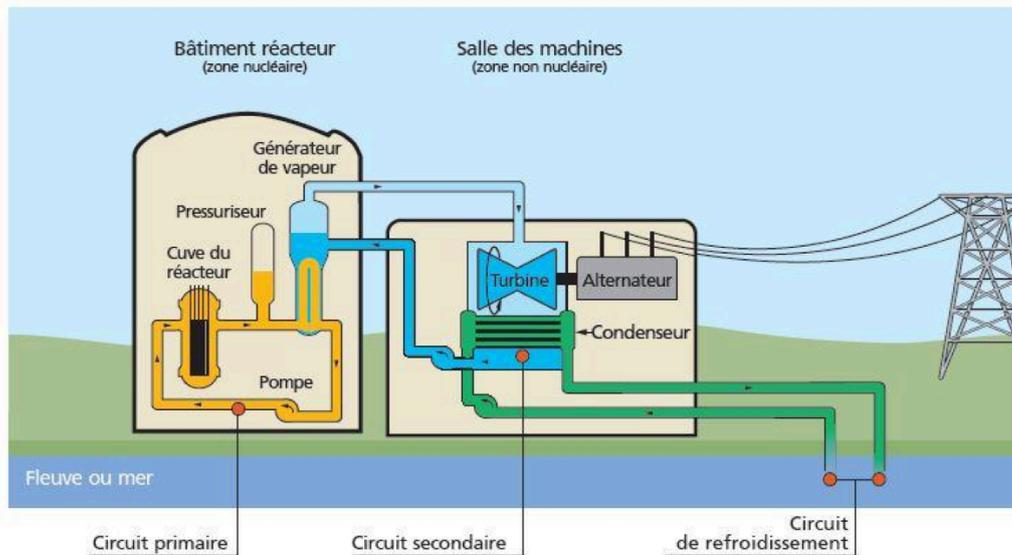


Figure 3 : Le fonctionnement d'une centrale nucléaire (EDF, Note d'information : LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE NUCLÉAIRE, 2018, https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/Notes%20d%27information/note_production_nucleaire_2018.pdf, consulté le 18 mai 2020)

Le biofouling pose des problèmes variés au sein des circuits de refroidissement (figure 4) :

- Le microfouling, du fait de l'épaississement des biofilms dans les échangeurs de chaleur (condenseur), peut réduire la conductivité thermique et les échanges de chaleur au sein des circuits de refroidissement, et donc les performances des ouvrages de production d'électricité ce qui augmente les coûts de production.
- Le macrofouling se développe préférentiellement en entrée de circuit dans la partie non échauffée et peut entraîner des pertes de charges dans le circuit et des colmatages. Ces colmatages peuvent conduire à des arrêts de fonctionnement des matériels et donc à des pertes de performances et à des coûts de maintenance.
- Le biofouling peut aussi favoriser la corrosion et la dégradation des matériaux ce qui augmente les coûts d'exploitation et de maintenance.

		
<p>Biofilm dans un tube de condenseur</p>	<p>Moules installées sur les pré-grilles de la prise d'eau d'un CNPE en bord de mer</p>	<p>Moules installées dans la boîte à eau² d'un condenseur</p>

Figure 4 : Illustrations de biofouling dans des circuits de refroidissement EDF (Photos EDF)

1.1.2.2.2 Le biofouling sur les flotteurs d'éolienne

Les flotteurs d'éolienne peuvent être le support de biofouling (figure 5). Ce phénomène est pris en compte dans le dimensionnement des futurs équipements : les flotteurs sont surdimensionnés afin de pouvoir supporter une charge importante de biofouling. Selon sa localisation sur la structure, le biofouling peut entraîner un déséquilibre de la structure ainsi qu'une dégradation des flotteurs ce qui pourrait limiter la durée de vie des équipements.

	
<p>Eolienne flottante (Simulation visuelle du projet Provence grand large https://www.provencegrandlarge.fr/le-projet/simulation-visuelle/)</p>	<p>Bouée colonisée par des moules zébrées (Biofouling, https://en.wikipedia.org/wiki/Biofouling). Cette bouée n'est pas une structure d'éolienne mais cela permet de se rendre compte du biofouling sur une structure flottante.</p>

Figure 5 : Le biofouling des éoliennes flottantes.

² Une boîte à eau est une sorte de couvercle qui permet de canaliser l'eau dans le condenseur.

1.1.2.2.3 Le biofouling dans les centrales hydroélectriques (CHE)

Les CHE d'EDF connaissent aussi des problèmes de biofouling notamment au niveau des grilles de prise d'eau des barrages et au niveau des circuits de réfrigération (Figure 6).

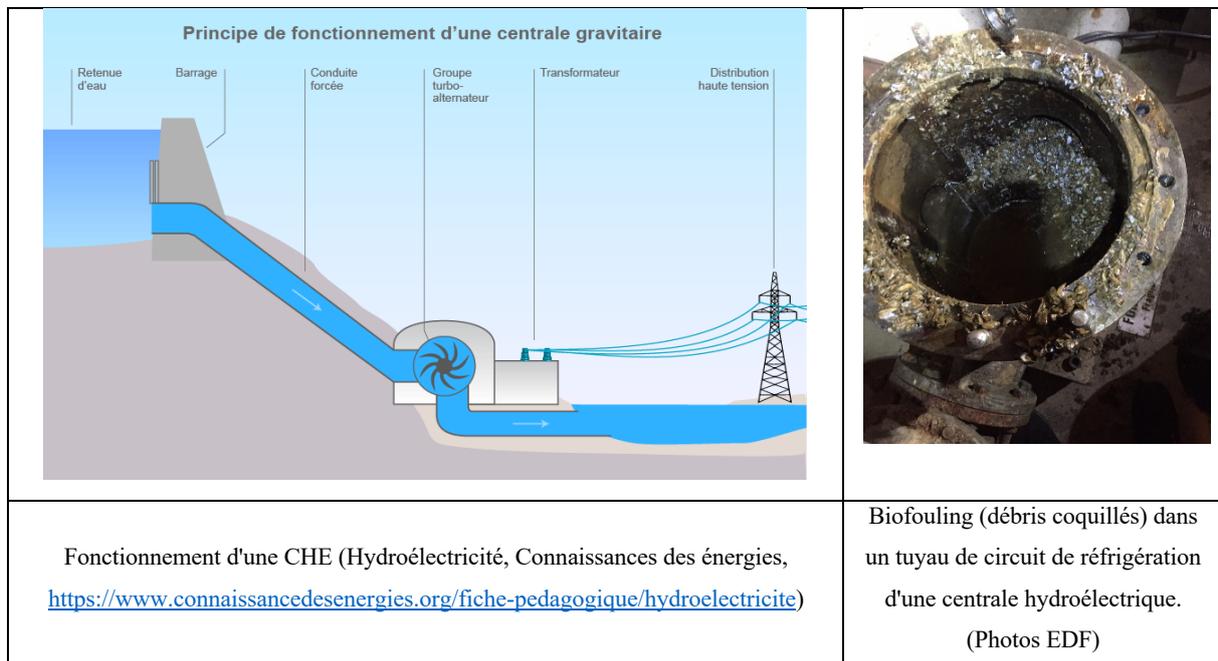


Figure 6 : Le biofouling des CHE

1.1.2.3 Méthodes actuellement mises en œuvre à EDF pour lutter contre le biofouling

1.1.2.3.1 Les CNPE

Pour maîtriser le développement du biofouling, en particulier en amont des échangeurs de chaleur, et dans les échangeurs eux-mêmes, EDF utilise actuellement des méthodes curatives et préventives :

- Des solutions physiques comme les filtres (tambours filtrants, grilles...), un surdimensionnement du débit d'eau dans le système de refroidissement, des nettoyages automatisés des tubes de condenseurs, des nettoyages mécaniques des parois et grilles des systèmes lors des arrêts de tranches tous les 12 à 18 mois.
- Des solutions chimiques comme la production de chlore in situ par électrochloration uniquement pour les sites en bord de mer (annexe 1).

1.1.2.3.2 Autres installations EDF

Dans le cas des centrales hydroélectriques, en eau douce donc, il n'y pas de solution de traitement permanent. Seules des actions de nettoyage curatives sont mises en œuvre (par exemple, des plongeurs interviennent ponctuellement pour nettoyer les grilles). Dans le cas des centrales hydroélectriques et des éoliennes flottantes, il est nécessaire de trouver des solutions plus durables pour lutter contre le biofouling puisque l'électrochloration n'est pas une solution durable du fait des contraintes environnementales.

1.1.3 Le contexte réglementaire

1.1.3.1 Le biofouling : un problème historique

Le développement du biofouling est un problème généralisé qui touche de nombreux domaines (industries pétrolière et gazière offshore, navale, agroalimentaire, industrie papetière, traitements des eaux, etc.). Le secteur naval est particulièrement actif dans ce domaine. Le biofouling n'est pas une problématique récente : depuis l'antiquité et le développement des flottes, les navires ou autres structures marines sont impactées par le biofouling. La lutte antifouling est pratiquée depuis plusieurs siècles. Néanmoins au cours des XIXe et XXe siècles, le développement du commerce maritime international a entraîné, entre autres, le développement de revêtements antifouling à appliquer sur les surfaces immergées pour limiter le développement des espèces encrassantes et les coûts importants que cela engendre (réparation des coques de bateaux, surconsommation de carburants, etc.). La plupart de ces traitements ont une action antifouling très efficace mais causent de gros dégâts environnementaux notamment dus au fait que leur toxicité ne se limite pas aux espèces ciblées et que les substances peuvent persister durablement dans l'environnement ce qui peut causer des dégâts à long terme. C'est le cas des organoétains (dont le tributylétain (TBT)) dont l'utilisation est à l'origine d'un scandale sanitaire dans les années 80 – 90 (annexe 2). Ce scandale a mené à une réelle prise de conscience au niveau européen et mondial des problématiques environnementales que peut engendrer l'utilisation non contrôlée de produits biocides ce qui a mené à la mise en place d'une réglementation sur les produits biocides.

1.1.3.2 Le contexte réglementaire actuel

Aujourd'hui, la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides en Europe sont encadrés par le règlement européen (UE) n° 528/2012 (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, produits biocides). Ce règlement, appelé aussi BPR (Biocidal Products Regulation) encadre la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides dans l'objectif, notamment, d'éviter les effets à long terme comme l'accumulation de substances toxiques et persistantes dans l'environnement ou dans les organismes (bioaccumulation) ou encore les effets cancérigènes ou toxiques pour la reproduction des organismes. La mise en œuvre de ce règlement se fait en deux étapes :

- Par une évaluation des substances actives biocides ; si les critères réglementaires sont respectés, la substance peut être approuvée par la Commission Européenne.
- Par une évaluation subséquente des produits (c'est-à-dire les formulations des substances actives) qui peut éventuellement déboucher sous réserve de validation à une autorisation nationale ou européenne de mise sur le marché (AMM). En France, les AMM sont délivrées par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES).

Étant données les tendances actuelles, il est probable que, dans les années à venir, la réglementation en vigueur devienne plus stricte vis à vis des produits antifouling biocides. C'est pourquoi la recherche de

solutions alternatives aux traitements biocides qui soient à la fois efficaces et respectueuses de l'environnement représente un fort enjeu pour EDF.

1.2 Démarche du stage et méthodes

C'est dans ce contexte réglementaire qu'EDF R&D a lancé une initiative ayant pour objectif de trouver des moyens pour lutter contre le biofouling de façon plus respectueuse de l'environnement. L'objectif de ce stage est d'étudier l'efficacité et la durabilité de solutions innovantes utilisées seules ou associées entre elles pour lutter contre le biofouling des ouvrages de production d'électricité en milieu aquatique. Il a été choisi de mener cette étude sur différents types de sites de production d'électricité afin de couvrir un large panel d'installations : l'éolien flottant, les CNPE et les CHE. Il a été envisagé au départ d'inclure le photovoltaïque flottant comme quatrième cas d'étude mais en raison de manque d'informations et de retours d'expérience, ce cas n'a finalement pas été retenu pour l'étude. Le stage se découpe en trois temps :

- La réalisation d'une synthèse bibliographique afin de recenser les technologies alternatives aux traitements biocides pour lutter contre le biofouling.
- La réalisation d'une analyse technico-économique des solutions individuelles et des couplages retenus afin d'évaluer la faisabilité de mise en œuvre sur un ou plusieurs sites industriels (éolien flottant, circuits de refroidissement des CNPE, CHE).
- Une analyse des données collectées sur l'efficacité de différents revêtements antifouling actuellement testés in situ sur un site EDF (étude « biobox »).

1.2.1 La recherche et la synthèse bibliographique : méthode et attendus

L'objectif de cette recherche et synthèse bibliographique est de recenser les solutions de lutte innovantes alternatives aux traitements biocides et de sélectionner parmi celles-ci les plus pertinentes pour nos cas d'études. L'idée est, dans la mesure du possible, de trouver des technologies qui peuvent être combinées afin d'optimiser leurs performances antifouling. Le travail s'est organisé en deux temps : il a fallu dans un premier temps étudier la problématique biofouling chez EDF pour identifier les besoins et dans un second temps un panorama des solutions alternatives a été réalisé. Pour cibler les besoins EDF, il a fallu se renseigner sur les différents cas d'étude et les problématiques biofouling rencontrées en s'appuyant sur la lecture de documents internes. Ensuite, les différentes solutions de lutte contre le biofouling ont été recensées en s'appuyant sur des rapports de ministères de la marine (ou équivalents) de différents pays sur la lutte contre le biofouling ou encore des revues et articles scientifiques provenant d'une première bibliographie rassemblée par EDF complétée par une recherche via des équations de mots clés (par exemple, « marine biofouling » control AND solution* OR technolog ? OR strateg ? OR methods) en interrogeant les bases de données Science Direct, Google Scholar, EBSCO Host et Web of science. Cela a permis d'identifier des solutions de tout niveau de maturité. Pour approfondir cette recherche bibliographique scientifique et obtenir plus d'informations sur les solutions commercialisées, une recherche Google complémentaire a été réalisée.

1.2.2 L'analyse technico-économique : méthode et attendus

L'objectif de l'analyse technico-économique est d'évaluer la mise en place des solutions préalablement sélectionnées (utilisées seules ou combinées) sur les différents sites de production d'électricité afin de les comparer entre elles. Pour cela, il a été choisi de s'appuyer sur une méthode de calcul économique proposée par Neveux et al (2020). Le calcul technico-économique permet d'évaluer différents investissements potentiels sur la durée d'un projet industriel (fixée par le porteur de projet). La démarche générale à adopter est la suivante :

- Identifier les caractéristiques techniques du site sur lequel le projet est mis en place (géométrie, accessibilité...).
- Déterminer l'investissement global (ou CAPEX) que représente la mise en place des différentes solutions sur le site en prenant en compte le coût du matériel ainsi que les frais d'étude, d'ingénierie, des frais de démarrage, des aléas (Figure 7).
- Déterminer les coûts d'exploitation (OPEX).
- Évaluer les incertitudes liées à la méconnaissance technologique du procédé (aléas « maturité ») et à l'avancement du projet (aléas « projet »). La démarche pour évaluer les incertitudes est présentée en annexe 3.
- Déterminer la distribution statistique d'un indicateur économique actualisée^{3, 4} intégrant CAPEX, OPEX et aléas. La notion d'actualisation est détaillée en annexe 3.

Afin d'évaluer les différents projets, il est préconisé d'utiliser des indicateurs économiques. Dans cette étude, il a été choisi d'utiliser le « *Total Annual Cost* » (ou TAC) qui permet pour chaque projet d'évaluer le coût annuel actualisé de celui-ci (en année de référence 2020). Le TAC se calcule ainsi :

$$TAC = CAPEX * f_a + OPEX$$

Le TAC est donc la somme des investissements initiaux nécessaires pour mettre en place la solution (voir figure 7) et des coûts d'exploitation générés sur la durée de vie du projet. Le facteur d'actualisation f_a permet de ramener ces flux de trésorerie ayant lieu à des temps différents à une même année de référence (ici, 2020). L'objectif est de calculer le TAC de chaque projet et de les comparer entre afin de voir quelles solutions (individuelles ou combinées) sont les plus rentables.

La méthode présentée est la méthode générale, il a fallu l'adapter selon les spécificités de notre étude. Les résultats sont présentés en partie 3.

³ Un indicateur économique est un outil calculé à partir, entre autres, du CAPEX et de l'OPEX d'un projet qui permet d'évaluer la rentabilité de ce projet.

⁴ L'actualisation découle de la prise en considération de la valeur temporelle de la monnaie : celle-ci a en effet une valeur différente selon qu'elle soit disponible immédiatement ou plus tard : 1€ aujourd'hui est préférable à 1€ dans un an car il est possible de le placer aujourd'hui à a (taux d'actualisation) pour obtenir $1(1+a)$ € dans un an, $1(1+a)^2$ € dans deux ans. A l'inverse, 1€ reçu dans 2 ans revient à $1/(1+a)^2$ € maintenant. L'annexe 3 donne plus d'informations sur la valeur du taux d'actualisation.

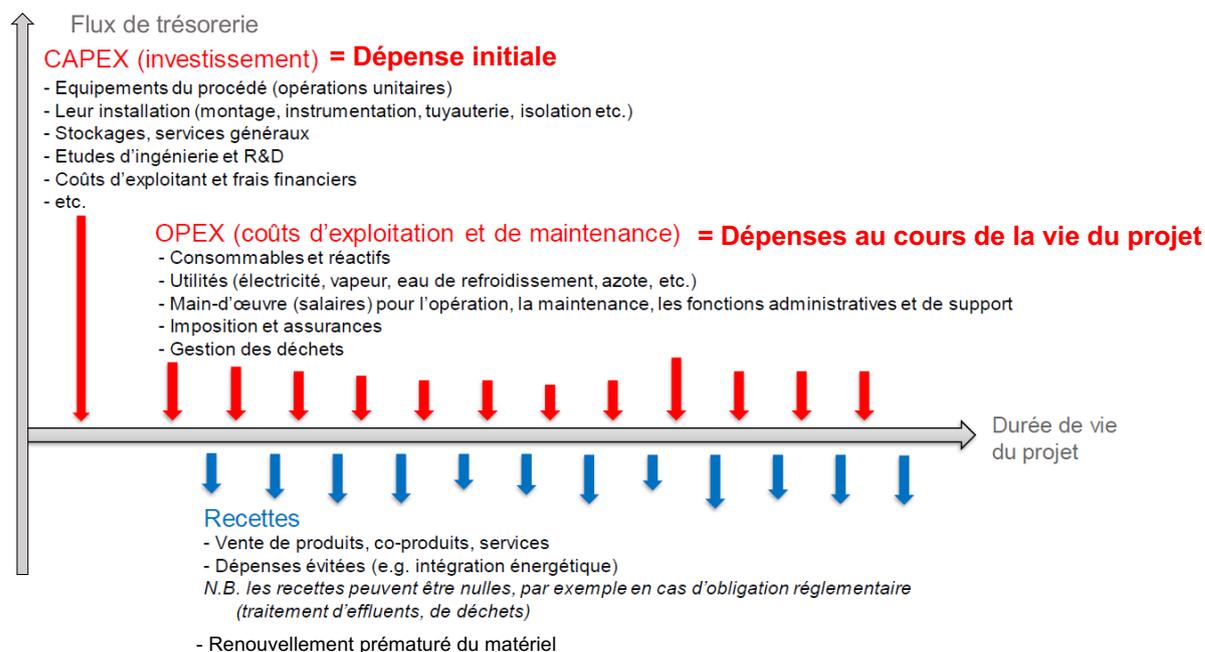


Figure 7 : Évaluation du CAPEX initial, des dépenses subséquentes (OPEX) et des recettes au cours de la durée de vie économique d'un projet (Source : Neveux et al, 2020 et ajout de quelques modifications)

1.2.3 L'analyse des données de la « biobox » : méthode et attendus

Afin de répondre aux besoins immédiats des sites industriels en termes de lutte contre le biofouling, EDF R&D a développé un dispositif permettant d'évaluer l'efficacité de revêtements antifouling biocides et non biocides appelé « biobox ». La biobox est un dispositif de test de différents revêtements antifouling déployé en juin 2019 dans le canal d'amenée⁵ du CNPE de Gravelines (Nord). L'objectif est de tester l'efficacité des revêtements antifouling sur des coupons en béton en les immergeant dans le canal d'amenée et en suivant régulièrement leur état de colonisation (1 fois par mois). La biobox est une boîte fermée dans laquelle sont disposés 48 coupons de béton recouverts ou pas d'un revêtement antifouling. 8 revêtements différents sont testés dont 7 peintures antifouling (dont 3 biocides et 4 non biocides) et un revêtement adhésif et comparés avec des coupons témoins sans revêtement (cf. annexe 4). Pour simuler les conditions d'écoulement de l'eau dans un circuit de refroidissement, la biobox est immergée en créant un flux d'eau à l'intérieur (figure 8). Chaque mois, une équipe EDF se rend sur place pour sortir la biobox de l'eau, rincer les coupons et les prendre en photo afin d'évaluer l'état de colonisation (figure 9). La prise de photos s'accompagne d'observations détaillées concernant l'état de colonisation de chaque coupon. Le dispositif de biobox a démarré en juillet 2019 et a fonctionné jusqu'en février 2020. Il y a donc 8 séries successives de photos et observations associées pour permettre d'évaluer l'efficacité des différents revêtements. Il s'agit donc d'exploiter les données récoltées par la biobox pour pouvoir comparer les résultats.

⁵ Le canal d'amenée d'un CNPE est la partie amont de la source froide qui permet d'amener l'eau de la mer au CNPE.

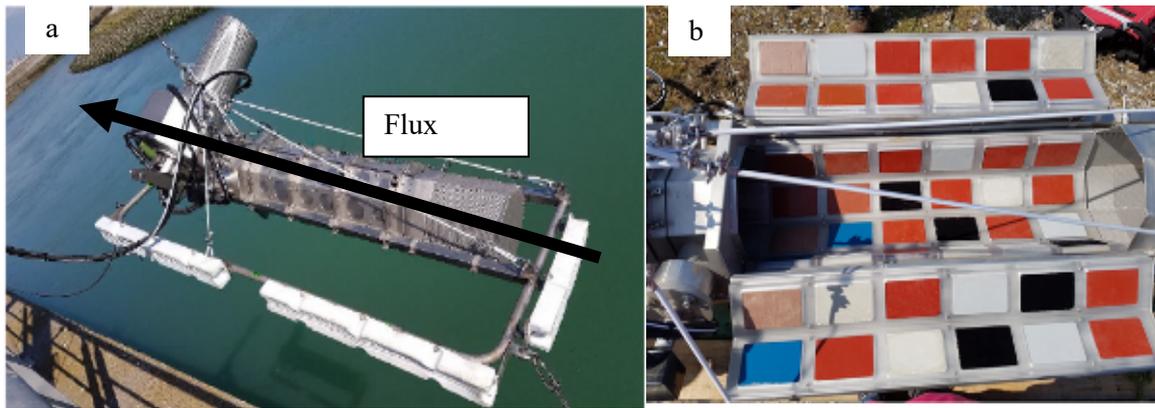


Figure 8 : a. Photographie de la biobox avant immersion dans le canal d'amenée ; b. Photographie de la biobox ouverte (photos EDF)



Figure 9 : Photo prise d'un coupon recouvert du revêtement silicone PPG Si 1290, visite d'octobre 2019 (Photo EDF). Extrait de la note d'observation : « Moules autour sur les interstices (entre les coupons) (3 à 4 cm), Revêtement propre »

2 Recherche des solutions de lutte alternatives : synthèse bibliographique

Ce travail de recherche bibliographique a permis d'aboutir à la rédaction d'une synthèse d'environ 80 pages (jointe au rapport) publiée en interne à EDF. Il a été choisi d'en présenter les principaux résultats ici : un panorama des solutions trouvées dans la littérature avec ensuite un focus sur les solutions jugées les plus intéressantes et adaptées pour cette étude.

2.1.1 Ciblage des besoins d'EDF

La recherche bibliographique a permis d'identifier quelques besoins d'EDF et d'exclure certaines pistes de recherche de traitement antifouling comme le traitement biocide de la masse d'eau (par exemple la chloration) pratiqué dans certains milieux industriels ou les techniques de nettoyage manuel (en

opposition aux techniques robotisées) qui représentent un risque humain trop important. Cela a permis de réduire le champ de la recherche bibliographique.

2.1.2 Panorama des solutions alternatives

La figure 10 donne un aperçu de la diversité des techniques de lutte contre le biofouling recensées. Les techniques sont classées en deux grandes catégories : les méthodes qui permettent d'éviter l'installation du biofouling dites préventives et les techniques permettant d'éliminer les organismes colonisateurs installés dites curatives. Cependant ces deux catégories ne sont pas exclusives et certaines technologies peuvent à la fois être utilisées de manière préventive et curative. Les solutions présentées dans ce graphique sont principalement utilisées dans le domaine naval et les industries offshore. Les traitements biocides comme le chlore par exemple ne sont volontairement pas mentionnés. Le terme revêtement désigne ici une matrice polymère incorporant ou pas des particules. Les termes peinture, revêtement et coating sont utilisés indifféremment. Chaque solution est détaillée dans la synthèse bibliographique avec une explication du principe de fonctionnement, quelques éléments d'efficacité et les références commerciales si disponibles.

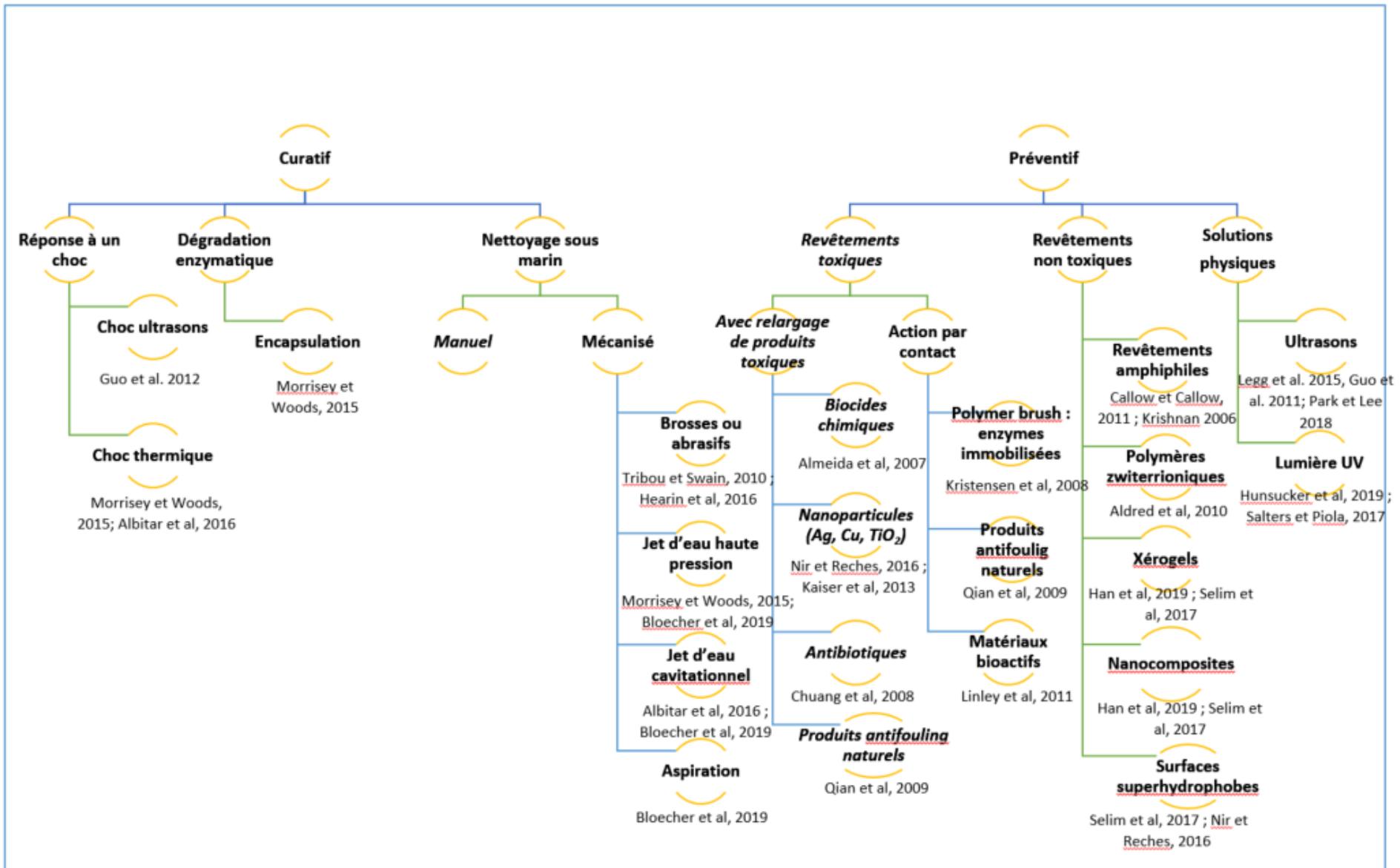


Figure 10 : Panorama des solutions trouvées (production personnelle). En italique les techniques jugées non adaptées et qui ne sont pas détaillées dans la synthèse. Sous chaque technique, les articles ou revues scientifiques s’y référant

2.1.3 Sélection de solutions retenues pour étude

Les informations obtenues bien que partielles dans certains cas ont permis de discriminer les différentes solutions entre elles. Les tableaux des annexes 4 et 5 rassemblent les informations principales sur les différentes techniques curatives et préventives. Le tableau 1 synthétise les informations importantes par type de traitement (mode d'action, faisabilité de mise en œuvre, couplage possible et impact environnemental). Au vu de la faisabilité de mise en œuvre, la maturité des technologies et les possibilités de couplage, trois solutions sont sélectionnées :

- Les revêtements non biocides
- Les systèmes ultrasons
- Les robots de nettoyage

Tableau 1 : Synthèse des principales caractéristiques des solutions alternatives (Production personnelle)

Type de traitement	Mode d'action	Efficacité/durabilité	Impact environnemental		Faisabilité de mise en œuvre	Couplage
			+	-		
Revêtement non biocide	Rend la surface impropre à l'installation par divers moyens selon le type de revêtement	Testé sur de nombreux navires et les biobox → a priori très efficace. Garantie 7-8 ans en général	Pas de biocides	Possibilité d'émissions de COV ⁶	Peinture fluide → OK sous réserve d'accès à la structure à peindre	Système de nettoyage robotisé Système ultrasons
Ultrasons	Transmission onde US dans les tissus biologiques → dégâts	Efficacité dépend de la bonne installation du système. Système avec un générateur relié à des émetteurs par des câbles. En général, garantie 10 ans mais beaucoup de matériel, risque de maintenance importante	Pas d'émissions de substances biocides dans le milieu	Peut perturber la biodiversité environnante mais atténuation rapide de l'intensité acoustique avec la distance	Système est dimensionné selon la géométrie de la structure → OK sous réserve d'autorisation	Système de nettoyage robotisé
Lumière UV-C (100 -280 nm)	Action germicide de la lumière UV-C	Semble assez efficace selon les études (Salters et Piola, 2017 ; Hunsucker et al, 2019). Solution non maure, aucune information sur la durabilité.	Pas d'émissions de substances biocides dans le milieu	Peut perturber la biodiversité environnante Consomme beaucoup d'énergie pour traiter des grandes surfaces.	Complicé car le traitement est efficace si il est appliqué à quelques millimètres de la surface.	Peut endommager certains revêtements N'est pas appliqué sur la surface donc a priori compatible avec un système de nettoyage

⁶ Les COV sont des composés organiques volatils réagissant avec les oxydes nitreux dans l'atmosphère pour former de l'ozone ce qui est néfaste pour l'environnement et l'homme.

Choc thermique	Application eau chaude (70°C) pour tuer les organismes	Assez efficace contre tous les stades de biofouling. Selon les études, un à deux fois par an suffit pour les navires en station dans les ports.	Pas d'émissions de substances biocides dans le milieu	Consomme beaucoup d'énergie pour chauffer l'eau Induit des rejets thermiques.	Si on dispose d'un robot adapté, OK Non compatible avec les matériels des CNPE	Probablement pas compatible avec les revêtements N'est pas appliqué sur la surface donc a priori compatible avec un système de nettoyage
Encapsulation	Le drap (bâche de polyéthylène) qui enveloppe la surface prive d'oxygène, de nutriments et de lumière les organismes piégés → mort des organismes	Efficace contre tous les stades de biofouling. Un drap ne peut être utilisé qu'une seule fois.	Pas d'émissions de substances biocides dans le milieu	Il faut récupérer et traiter les eaux anoxiques. Bâches en polyéthylène → peuvent générer pollution plastique.	Ok pour des petites surfaces	Peut endommager certains revêtements La surface n'est pas accessible à un système de nettoyage étant enveloppée sous un drap.
Nettoyage robotisé	Action de nettoyage mécanique	Grande variété de robots et d'outils de nettoyage plus ou moins efficaces (voir partie 2.2.3.3 ci-dessous). En général les robots sont garantis quelques années	Pas d'émissions de substances biocides dans le milieu	Il faut récupérer et traiter les déchets issus du nettoyage lorsqu'utilisé en curatif. Beaucoup de robots fonctionnent sur batterie, il faut privilégier les robots fonctionnant avec une alimentation électrique	Grande variété de robots, possibilité de faire faire des robots sur mesure adaptés aux attentes des clients	Peut être utilisé sur un revêtement à condition d'adapter les techniques de nettoyage

2.1.3.1 Les revêtements non biocides

Deux stratégies pour la conception de surfaces antifouling non biocides existent, à savoir :

- Empêcher l'attachement des organismes sur la surface ; ce type de revêtement est appelé revêtement non-stick.
- Réduire la force d'adhésion des organismes attachés afin qu'ils puissent se détacher facilement par la force d'un flux d'eau ou d'un nettoyage léger de surface. Ce sont les revêtements foul-release.

Ces deux approches étant non exclusives, ce type de revêtements sera désigné par le terme foul-release dans les deux cas.

Dans les deux cas, les propriétés physico-chimiques du matériau de revêtement sont modifiées afin que :

- Soit les organismes perçoivent la surface comme inhospitalière et ne s'y installent pas.
- Soit les interactions moléculaires entre la surface et les molécules adhésives des organismes soient diminuées provoquant alors une faible adhésion.

Pour arriver à cela, on peut soit jouer sur les propriétés physico-chimiques du polymère qui constitue le revêtement (caractère hydrophile ou hydrophobe, charge du polymère, élasticité...) soit structurer la surface. Les revêtements non https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/Notes%20d%27information/note_production_nucleaire_2018.pdf biocides

classiques sont fabriqués à partir de silicone ou de fluoropolymère. Des revêtements plus innovants existent mais ne sont encore qu'à l'état de recherche (voir annexe 4).

2.1.3.2 Les systèmes ultrasons

Les systèmes ultrasons consistent à placer des émetteurs ultrasons sur la surface et à la faire vibrer (figure 11). Elle agit alors comme une table d'harmonie avec le milieu environnant (Park et Lee 2018). Dans le cas des coques de navire, le générateur émet un signal électrique qui est ensuite converti en ondes acoustiques par le transducteur localisé sur la coque du navire. L'onde ultrasons (onde acoustique de fréquence supérieure à 16 kHz) en se propageant peut engendrer des dégâts que ce soit par simple transmission de l'onde de pression ou à cause d'un phénomène appelé la cavitation⁷ (figure 12). Le dimensionnement des systèmes ultrasons dépend de la surface à traiter ainsi que sa géométrie, en effet

⁷En se propageant, une onde induit une succession de compression/détente et des micros courants qui peuvent endommager les tissus. Lorsque l'énergie de l'onde ultrasonore est suffisante, des bulles de gaz ou de vapeur se forment dans l'eau lors de la phase de dépression : c'est le phénomène de cavitation. Ces bulles implosent et génèrent une onde de choc qui endommage les cellules des organismes. La cavitation est observée uniquement sous certaines conditions appelées seuil de cavitation qui correspond, pour une fréquence donnée, à l'intensité de pression acoustique des ondes nécessaire pour induire la cavitation.

il faut prévoir une quantité et une disposition de matériel différente pour traiter une surface plane ou une grille de même surface.

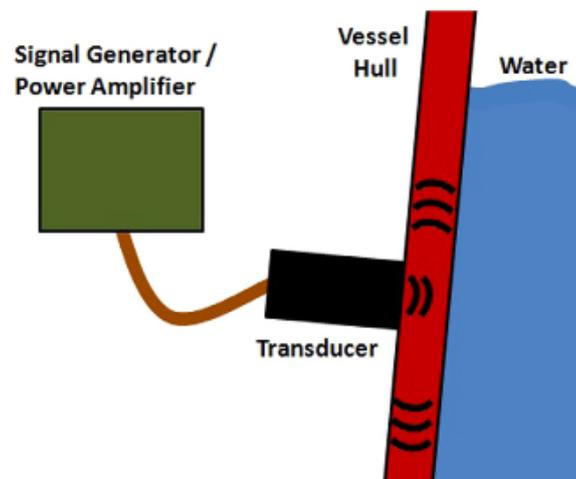


Figure 11 : Schéma présentant le principe de système antifouling acoustique (Legg et al. 2015)

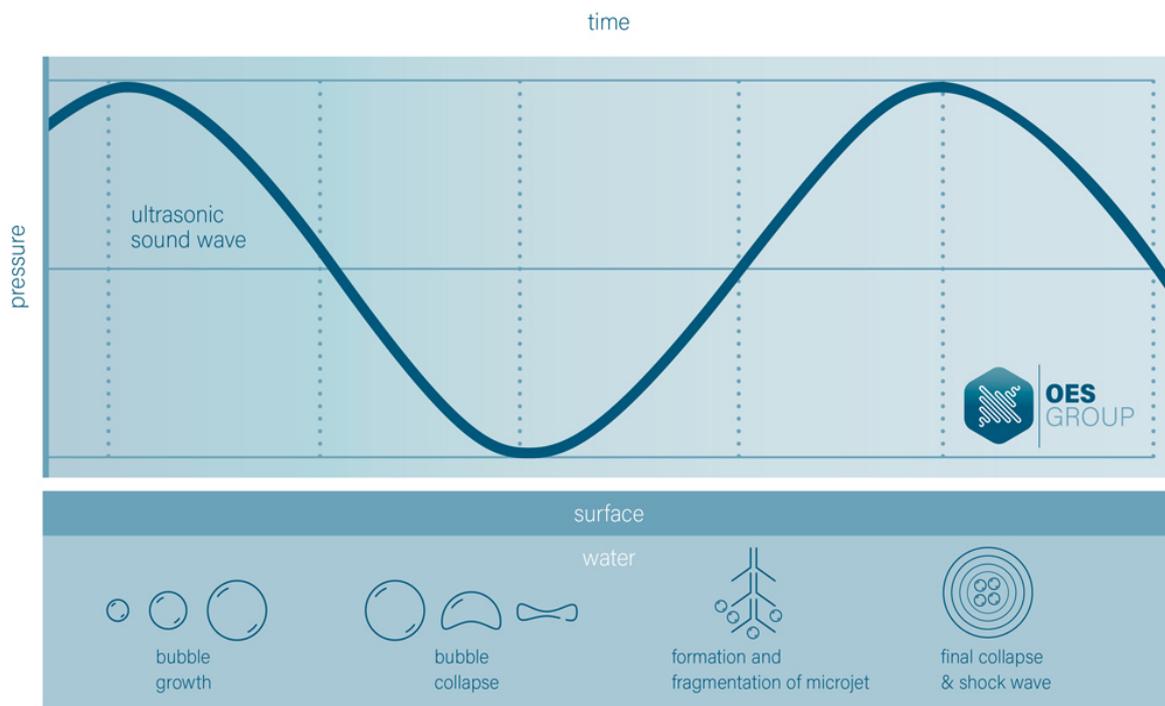


Figure 12: Le phénomène de cavitation induit par les ondes ultrasons (OES group. Image téléchargée de <https://oesgrouppltd.com/ultrasonic-anti-fouling/>).

2.1.3.3 Les systèmes de nettoyage

Les systèmes de nettoyage débarrassent les surfaces des biosalissures ce qui entraîne la production de déchets de nettoyage. Les déchets issus du nettoyage doivent être impérativement collectés dans le cas carénage⁸ des bateaux. Depuis la Loi sur l'eau de 1992, il est interdit d'effectuer cette action en laissant les effluents s'écouler dans le milieu naturel. Les travaux d'entretien et de réparation de la coque doivent donc s'effectuer sur des aires de carénage, où les effluents sont récupérés et stockés dans des cuves avant un rejet des eaux dans le milieu⁹. Faute de réglementation spécifique à notre cas, il faudrait appliquer le principe de précaution et récupérer les déchets issus du nettoyage.

2.1.3.3.1 Les techniques de nettoyage

Il existe une grande variété de techniques de nettoyage :

- Utilisation de brosses
- Nettoyage par aspiration : la tête de nettoyage applique une pression négative sur la surface qui aspire et arrache le biofouling.
- Utilisation de jets d'eau haute pression (entre 200 – 1000 bar)
- Utilisation d'un jet d'eau avec un système de cavitation (les buses qui dispensent le jet d'eau ont une configuration spéciale qui induit la formation de micro-bulles d'air ou de vapeur au sein du jet d'eau (Albitar et al. 2016) ; figure 13)



Figure 13 : Le système de jet d'eau cavitationnel MSS Cavitation cleaner de VideoRay (source : VideoRay, <https://www.videoray.com/accessories-options/options/mss-cavitation-cleaner.html>). Le jet d'eau de 150 bars sort par la buse et est appliqué sur la surface à nettoyer. La moindre pression (comparé à un jet d'eau haute pression) permet de préserver la surface.

- Nettoyage par application d'une turbulence de surface (application d'une turbulence en surface qui permet un nettoyage doux; figure 14).

⁸ Le carénage est l'action de nettoyer la coque d'un navire.

⁹ Guillaume Nardin (Géomer – UMR 6554 LETG CNRS, Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer), [Un SIG pour connaître et pour gérer la plaisance dans le Finistère], Revue Norois 2008/1 (n° 206), 200 pages, Éditeur Presses universitaires de Rennes, (ISBN 9782753506909)

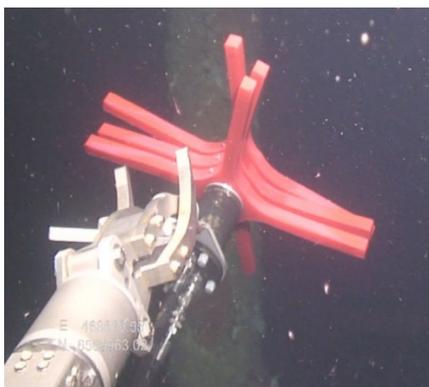


Figure 14 : L’outil de nettoyage FlexiClean développée par Lateral (source : Lateral, <http://www.lateral.no/flexiclean.html>). Les croix par leur rotation créent une turbulence à la surface qui nettoie la surface.

Bloecher et al. (2019) ont réalisé une étude de comparaison des différentes techniques de nettoyage (hormis la dernière présentée) qui montre que le système de nettoyage de jet par cavitation est celui qui combine le plus d’efficacité et qui respecte le mieux l’intégrité du revêtement. De plus, selon de nombreux retours d’expérience, les outils type FlexiClean allient aussi efficacité et respect du revêtement. Ces deux techniques de nettoyage semblent particulièrement adaptées dans le cas où l’on souhaite utiliser un système de nettoyage en complément d’un revêtement.

2.1.3.3.2 Les systèmes de nettoyage robotisés

L’utilisation de robots de nettoyage est une piste très intéressante pour EDF puisque cela permet de s’affranchir des problèmes que présente le recours à des plongeurs (sécurité, limites physiques, coûts...). Il existe différents types de robots nettoyage : les ROV et les AUV. Les ROV (ou Remotely Operated underwater Vehicle) sont des petits robots sous-marins contrôlés à distance via une télécommande qui est général reliée au robot par un câble (ou ombilical). Les AUV (ou Autonomous Underwater Vehicle) sont des robots qui se déplacent et interviennent dans l’eau de manière autonome contrairement aux ROV. Il existe différentes catégories de ROV selon le travail à accomplir¹⁰ :

- les ROV d’observation sont utilisés dans un but d’observation pour vérifier l’état des structures.
- les ROV de travail sont utilisés dans un but d’intervention, ils sont en général équipés de bras hydrauliques ou électriques et d’outils leur permettant d’effectuer les travaux spécifiques (remplacement de pièces, manipulation de vannes, soudure...). Ces robots sont particulièrement utilisés pour la maintenance de structures offshore.

¹⁰ Véhicule sous marin téléguidé. Wikipédia, l’encyclopédie libre. Page consultée le 3 septembre 2020 https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_sous-marin_t%C3%A9l%C3%A9guid%C3%A9#Versions_%C2%AB_Open_%C2%BB

Il existe une grande variété de ROV selon la taille allant du ROV portable de quelques kilos (mini ROV) à plusieurs centaines de kilos. Quelques ROV sont présentés en annexe 6.

3 Analyse technico-économique (ATE)

3.1 Méthodologie d'analyse technico-économique

La méthode de calcul technico-économique présentée en partie 1.2.2 et annexe 3 est développée pour évaluer des projets industriels avec une durée de vie économique bien déterminée et des objectifs de résultats bien définis par le porteur de projet. L'objectif de cette étude est d'évaluer les coûts et les bénéfices associés à la mise en place de différentes solutions innovantes de lutte contre le biofouling (identifiées dans la partie 2) sur les différents cas d'étude par comparaison aux pratiques actuelles. Pour mener à bien notre étude, il faut adapter la méthode de calcul technico-économique sur différents points :

- La problématique du biofouling est généralisée sur la grande majorité des surfaces immergées des sites industriels, il a été choisi de cibler l'étude sur des zones particulières des installations afin de pouvoir plus facilement évaluer l'OPEX et le CAPEX. Pour cela, des zones « sensibles » sont identifiées pour chaque type d'installation industrielle EDF retenu (éolien flottant, CNPE, centrale hydroélectrique). L'étude se concentrera sur ces zones précises.
- L'impact économique du biofouling sur la production d'électricité n'étant pas bien connu, il est difficile d'inclure dans l'analyse un volet « amélioration des rendements » puisqu'il n'y a pas d'objectif de résultat bien défini. Il n'est pas facile, dans ces conditions, d'évaluer si une solution est rentable dans l'absolu. Il faut plutôt travailler en relatif et comparer les projets entre eux en réduisant au maximum les coûts de maintenance sans savoir de quel budget on dispose pour le faire.

L'ATE se fera donc en plusieurs étapes :

- Définir, pour chaque cas d'étude, les zones sur lesquelles se concentrera l'étude en consultant en interne (les personnes consultées ont été déterminées en fonction des aléas biofouling qui sont remontés récemment à EDF R&D).
- Obtenir des informations et des éléments de coûts pour les trois types de solutions alternatives identifiées (revêtement, robot de nettoyage, système ultrasons) en réalisant des entretiens auprès de différents fournisseurs.
- Définir pour chaque zone, en prenant en compte les caractéristiques des différents sites et des solutions, des combinaisons de solutions à comparer.
- Évaluer les CAPEX et les OPEX globaux de ces différentes combinaisons
- Pour chaque zone d'étude, calculer le TAC de chaque solution à partir des OPEX et CAPEX (en prenant en compte l'actualisation) et les comparer entre elles.

3.2 Ciblage de l'étude : définitions des zones d'étude

3.2.1 Point sur l'organisation interne d'EDF

Le groupe EDF SA est structuré en entités parmi lesquelles :

- Le pôle EDF Hydro qui gère les CHE
- La filiale EDF Renouvelables qui gère les installations et les projets éoliens (terrestre et en mer) et photovoltaïques
- La Direction du Parc Nucléaire et Thermique (DPNT) qui gère, entre autres, le fonctionnement des CNPE et la Direction Ingénierie et Projets Nouveau Nucléaire (DIPNN) qui gère les nouveaux projets nucléaires.

Étant donnée la nature de nos cas d'étude, il a fallu échanger avec des interlocuteurs de chaque entité pour obtenir des informations.

3.2.2 Identification des zones d'étude

Les problèmes de biofouling se perçoivent sur le terrain. Pour chaque cas d'étude, une enquête a été réalisée auprès des interlocuteurs EDF concernés¹¹. L'objectif était d'identifier des zones particulièrement sensibles au biofouling, d'en préciser la géométrie dans la mesure du possible (en vue de faire des devis auprès de fournisseurs dans un second temps), d'obtenir des informations sur la gestion des aléas dus au biofouling et les coûts directs (coûts de maintenance, remplacement éventuel de matériel...) ou indirects (pertes de production) engendrés (tableau 2).

Tableau 2 : Tableau d'enquête pour cibler l'étude (source : production personnelle)

Les zones à traiter					Les coûts dus au biofouling	
Zones impactées par le biofouling	Description de la zone : géométrie, dimensions	Matériau(x)	Accès électricité (si jamais, besoin d'un branchement secteur)	Accès personnel (si besoin d'équipe sur place)	Quelle maintenance pour le biofouling et quels coûts ? Remplacement de matériel ?	Pertes de production associées

Plusieurs zones sensibles au biofouling ont été identifiées, une sélection parmi celles-ci a été réalisée en fonction de la quantité d'informations disponibles (tableau 3). Il s'est avéré difficile de recueillir des informations sur les coûts dus au biofouling et à l'impact sur la production d'électricité. En effet, les aléas dus au biofouling sont traités au cas par cas en menant des actions ponctuelles. Les conséquences

¹¹ Equipe Provence Grand Large (PGL) d'EDF Renouvelables pour l'éolien flottant, deux ingénieurs spécialistes de la source froide des CNPE dont un travaillant au DIPNN et un au CNPE de Cattenom (DPNT Moselle), deux d'EDF Hydro Jura Maurienne pour la CHE de l'Allement (Ain). Les noms des interlocuteurs sont répertoriés dans la liste de contact.

sur le matériel et la production ne sont pas bien documentées économiquement ni de façon systématique sur les différents sites. Cependant en contactant les personnes sur place, des éléments sur les coûts de maintenance pour des aléas ponctuels (exemple colmatage de grille) ont été récoltés ce qui permet d'avoir un ordre de grandeur d'une partie des coûts impliqués par le non traitement du biofouling. **Des données sur les pertes de performances associées au biofouling seraient à inclure pour compléter.**

Tableau 3 : Cas et zones d'étude identifiés (source : production personnelle). Les zones qui n'ont pas été retenues pour l'étude pour cause de manque d'informations sont en italique. Les termes utilisés sont des termes utilisés communément au sein d'EDF pour décrire ces zones.

Cas d'étude	Zones identifiées (cas concret)	Eléments dont on dispose
CNPE	Grilles de pertuis ¹² (CNPE Penly)	- Eléments de géométrie - Eléments de coûts de maintenance d'un aléa biofouling ¹³
	<i>Condenseur ou échangeur à plaques</i>	- <i>Géométrie</i> - <i>Pas mature sur la nécessité d'un traitement</i>
	Conduite en béton (CNPE Cattenom ¹⁴)	- Géométrie
	<i>Glissières de batardeaux¹⁵</i>	- <i>Géométrie</i> - <i>N'est pas jugé prioritaire pour l'étude selon un des ingénieurs source froide consulté</i>
Eolien flottant	Structures flottantes des éoliennes du Projet PGL	- Géométrie - Etude de choix d'investissements menée par l'équipe du projet PGL ¹⁶
CHE	Grilles de prise d'eau (Barrage de l'Allement)	- Géométrie OK - Coûts de pose de peinture ¹⁷

¹² Il s'agit de grilles de filtrage (gros débris) de la source froide en amont de la salle des machines (voir figure 3).

¹³ Lors d'une consultation interne avec un ingénieur de la DIPNN, celui-ci a relaté un incident de colmatage des grilles de pertuis du CNPE Penly et nous a fourni quelques éléments de coûts de maintenance (intervention de plongeurs)

¹⁴ Le CNPE Cattenom a contacté la R&D suite à la découverte de moules dans une de leurs conduites.

¹⁵ Les batardeaux sont des barrages destinés à la retenue d'eau provisoire dans un circuit de refroidissement.

¹⁶ Le projet PGL est un projet pilote d'éolien flottant (3 éoliennes). L'équipe en charge du projet a réalisé une ATE évaluant différentes techniques de lutte contre le biofouling (ultrasons et revêtement silicone). Le document, confidentiel, nous a été fourni pour que nous nous en inspirions pour notre étude.

¹⁷ Il y a un projet de remplacement des grilles de la CHE de l'Allement en 2021, dans ce cadre des devis pour la pose de peinture ont été réalisés. On a pu les récupérer.

3.3 Caractéristiques des solutions à mettre en œuvre sur les sites

Pour chaque type de solution antifouling, des fournisseurs potentiels ont été identifiés (voir annexe 5 pour les revêtements et les ultrasons, annexe 7 pour les ROV). Des entretiens auprès d'eux sont réalisés afin de déterminer si les solutions sont adaptées aux différents cas d'étude et d'obtenir des informations sur les coûts de mise en place. Dans tous les cas, il a été difficile d'obtenir des informations sur l'adaptabilité et le prix associé, en effet :

- Les revêtements ne sont généralement pas appliqués par les entreprises qui les produisent. L'application se fait généralement par l'intermédiaire d'entreprises prestataires. Le prix dépend donc beaucoup de la prestation demandée : décapage, nombres de couches de peinture, besoin d'un anticorrosion en plus de l'antifouling, pose de la peinture, transport, etc.
- Les ROV sont souvent réalisés sur mesure en fonction des besoins du client. Le prix dépend énormément des contraintes associées à la zone à nettoyer (géométrie, surface accidentée ou pas : présence de coudes dans une conduite, taille des barreaux pour une grille, etc.) et des attentes en termes de performance : vitesse de nettoyage, fréquence des nettoyages envisagée, niveau d'autonomie (robot télécommandé ROV ou autonome AUV), etc. Ces besoins sont difficiles à estimer car ils sont différents selon les cas d'étude et ne sont pas forcément bien identifiés à ce jour.
- Le dimensionnement et le prix associé des systèmes ultrasons dépendent beaucoup de la surface à traiter mais aussi de la géométrie de la surface (ex. surface lisse et vaste type coque de navires vs grille de prise d'eau de barrage).

L'objectif de l'étude étant a priori de réaliser une étude prospective pour sélectionner les solutions les plus prometteuses à investiguer, il s'agit de récolter des informations assez concrètes et précises sur l'efficacité et les prix des solutions avec une démarche de type gestion de projet¹⁸ ce qui n'est toutefois pas le cas ici. Les fournisseurs demandaient souvent des informations très précises sur la géométrie et les dimensions des structures qui n'étaient peu ou pas disponibles ou encore confidentielles. Cependant pour apporter des informations concrètes aux fournisseurs, un schéma des zones à traiter pour chaque cas concret a été réalisé (figure 15) ce qui a permis de récolter un certain nombre d'informations. Par exemple, cela a été particulièrement utile pour recueillir des informations sur le dimensionnement et le prix des systèmes ultrasons ou encore pour illustrer les contraintes liées à la géométrie des sites pour les ROV. Le tableau 4 synthétise les informations recueillies.

¹⁸ Le terme « démarche type gestion de projet » désigne ici une situation dans laquelle le projet est bien défini (lieu, durée), une parfaite connaissance du site et des ressources disponibles permettant de faire des devis.

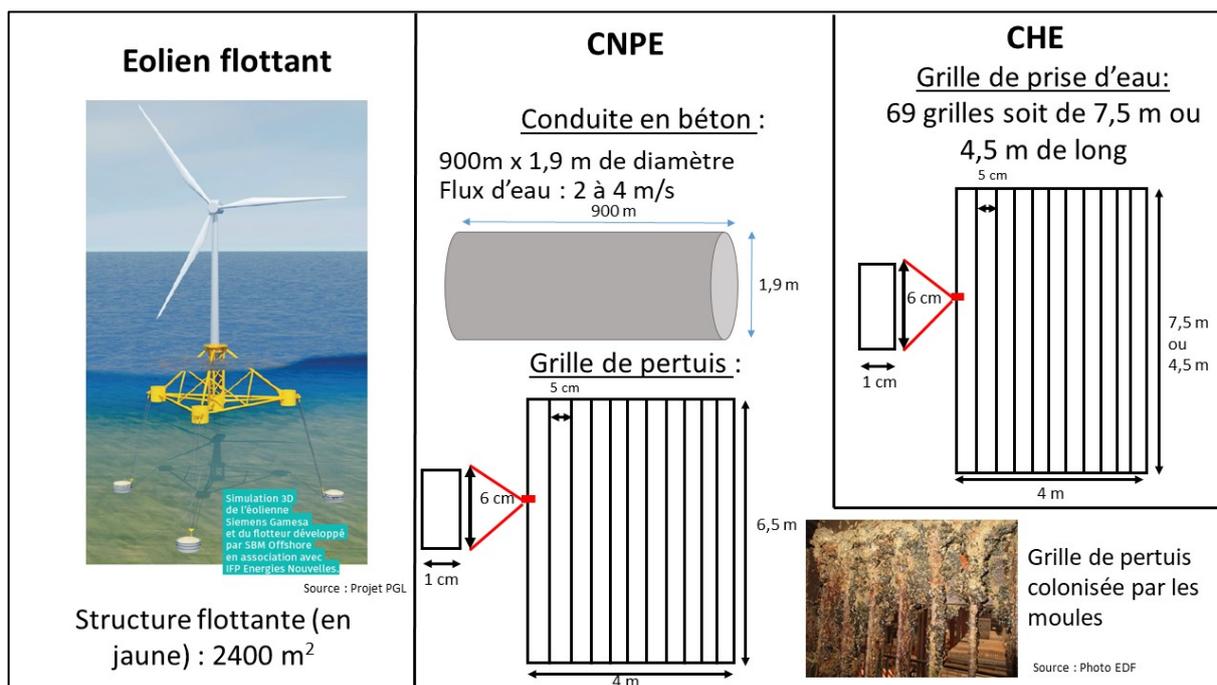


Figure 15 : Zones sensibles des différents sites de production : flotteur de l'éolien flottant, conduites et grilles des CNPE et grilles de prise d'eau de barrage hydroélectrique (Source : production personnelle). Les schémas de grilles ne sont pas à l'échelle.

Tableau 4 : Synthèse sur la faisabilité et sur les prix associés à chaque type de solutions (Source : production personnelle)

<p style="text-align: center;">Type de solutions</p>	<p style="text-align: center;">Remarques générales : éléments de coûts et grandes tendances</p>	
<p style="text-align: center;">Revêtement</p> <p>(Entretiens auprès de Jotun, PPG, Hempel ; Chiffres récupérés pour le remplacement des grilles de la CHE de l'Allement auprès d'EDF Hydro)</p>	<p style="text-align: center;">+</p> <ul style="list-style-type: none"> - Solution facile à mettre en œuvre et mature - La biobox permet de faire un choix parmi les fournisseurs - Ne consomme pas d'utilités (électricité, eau) une fois mis en place 	<p style="text-align: center;">-</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup de fournisseurs potentiels, difficile de faire un choix.

<p style="text-align: center;">Ultrasons (Entretiens avec Keelcrab, OES Group)</p>	<p>Eléments de coûts : pour les 3 structures des éoliennes PGL recouvertes en entier soit environ 7200m² : 650 k€ ; Pour un système ultrasons sur les 10 premiers mètres uniquement pour les 3 flotteurs : 105 k€. ¹⁹</p>	
	+	-
	<p>- Matériel peu cher. Petit CAPEX pour petite surface.</p> <p>- Solution bien développée pour la protection des coques de bateaux.</p>	<p>- Gros OPEX : pour couvrir de grandes surfaces, il faut beaucoup de câbles et d'émetteurs US → beaucoup de maintenance potentielle, remplacement de matériel</p> <p>- Efficacité du système dépend beaucoup de la mise en place du système et de la géométrie de la structure à traiter : si le système est mal installé, l'efficacité peut être moindre.</p>
<p style="text-align: center;">Robot nettoyeur (Entretiens Keelcrab, Cybernetix, ECA Group, Lateral)</p>	<p>Investissement important mais a priori peu de maintenance nécessaire ensuite sous réserve d'un bon entretien (rinçage du robot après chaque utilisation).</p> <p>Le prix dépend du type de robot : de 10 k€ (pour les mini ou micro ROV) à quelques centaines de milliers d'euros pour des ROV plus robustes.</p> <p>Au vue du prix, on pourrait justifier l'achat d'un ROV en interne en le mutualisant pour plusieurs sites industriels. On peut également passer par un prestataire (qui achète le robot et avec qui on passe un contrat).</p>	
	+	-
	<p>- Demande a priori peu de maintenance (petit OPEX)</p>	<p>- Pour avoir un robot adapté, avec de l'autonomie et une certaine marge de manœuvre, il</p>

¹⁹ Prix recueillis suite à devis auprès d'OES Group. Ils conseillaient d'installer un système ultrasons uniquement sur les 10 premiers mètres qui correspondent à la « splash zone » (zone de balancement des marées) plutôt que sur toute la surface d'où les deux prix différents.

	- On peut avoir assez rapidement une idée de l'efficacité et de l'adaptation des robots en les testant sur site.	faut prévoir des coûts d'investissement important. Gros CAPEX - Difficile de trouver un robot « universel » pour nos cas d'étude puisque ça implique des structures différentes.
--	--	--

3.4 Cas d'étude et solutions proposées

En tenant compte des informations exposées dans les parties 3.2 et 3.3, des combinaisons de solutions ont été proposées. Le but est de les comparer à un cas de référence qui correspond à une situation dans laquelle rien n'est fait pour lutter contre le biofouling. L'objectif est de vérifier l'intérêt d'investir dans une solution de lutte contre le biofouling. Le fait qu'un traitement ultrasons ne puisse être appliqué à une surface en béton permet de faire le choix des combinaisons de solutions à étudier (tableau 5). Les autres types de solutions (revêtement et robot nettoyeur) sont assez adaptables et peuvent être mises en place dans tous les cas d'études. Il s'agit pour chaque solution d'évaluer l'OPEX et le CAPEX. Il a été choisi de séparer les solutions « Utilisation d'un robot en interne » et « Utilisation d'un ROV avec un prestataire » car pour un robot en interne, il y a un CAPEX relativement important et peu d'OPEX (investissement dans l'achat du robot et entretien) et pour un robot avec un prestataire, il n'y a pas de CAPEX mais l'OPEX est important (paiement du contrat avec le prestataire).

Tableau 5 : Détail des combinaisons de solutions pour les différentes zones

	Eolien offshore	Centrale hydroélectrique	CNPE	
Zones identifiées	Les 3 éoliennes du projet PGL	69 grilles de prise d'eau du barrage de l'Allement (déjà recouvertes d'anticorrosion)	Conduite béton du CNPE Cattenom	8 grilles de pertuis du CNPE de Penly (déjà recouvertes d'anticorrosion)
Solution 0 (référence)	Ref du projet PGL	Pas action biofouling	Pas action biofouling	Chloration partielle
Solution 1	Revêtement (Rev)	Rev	Rev	Rev
Solution 2	Robot en interne (Rob Int)	Rob Int	Rob Int	Rob Int

Solution 3	Robot avec prestataire (Rob Pres)	Rob Pres	Rob Pres	Rob Pres
Solution 4	Ultrasons (US)	Ultrasons (US)	Rev + Rob Int	Ultrasons (US)
Solution 5	Rev+ Rob Int	Rev+ Rob Int	Rev + Rob Pres	Rev + Rob Int
Solution 6	Rev + Rob Pres	Rev + Rob Pres	Rev + Rob Pres	Rev + Rob Pres
Solution 7	Rev + US	Rev+ US	Rev + US	Rev + US

3.5 Evaluation des différentes solutions

Suite aux entretiens qui ont permis d'obtenir une idée plus précise des différentes solutions, il a été nécessaire de détailler la mise en place de chaque solution (CAPEX) afin de se rendre compte de leur complexité et d'essayer d'estimer les coûts d'exploitation impliqués sur toute la durée de vie du projet (OPEX). Les résultats sont rassemblés dans de gros tableaux en annexes 8, 9, 11 et 13. Le prix du produit ne permet pas forcément d'appréhender la complexité de mise en œuvre de chaque solution et l'évaluation des coûts comporte une marge d'erreur relativement importante. C'est pourquoi il a été choisi de détailler les coûts liés à l'OPEX et au CAPEX. Afin d'avoir une vision sur la durée, il a été choisi d'évaluer tous les projets sur 15 ans²⁰. Il n'est pas évident de lister toutes les dépenses, il faut avoir une vision globale du projet afin de voir tout ce que ça implique. Par exemple pour la solution « revêtement », il faut prendre en compte le prix de la peinture mais aussi le démontage et le transport éventuel des pièces à peindre dans les ateliers s'ils ne sont pas peints sur place, le nettoyage/décapage et la préparation de la surface, l'application des différentes couches de peinture qui, en général, est soustraite, la remise en place des pièces, etc. Il demeure beaucoup d'incertitudes liées au fait que les ressources dont disposent les différents sites (accès à l'électricité, à la main d'œuvre, etc.). De plus, comme dit précédemment (cf. partie 3.2.2), les coûts associés au biofouling sont peu connus et il existe seulement quelques informations sur des événements ponctuels. Les différentes cases des tableaux sont remplies à l'aide des informations recueillies lors des entretiens auprès des fournisseurs et en interne EDF. Ces chiffres ont ensuite été extrapolés (de façon linéaire sur la surface à traiter et/ou dans le temps) et sont accompagnés d'une large marge d'erreur. Le détail des calculs est précisé dans les tableaux des annexes 8, 9, 11 et 13. Ces tableaux sont à l'intention du personnel EDF en charge de la prise de décision pour leur fournir quelques éléments de réflexion. Les calculs sont détaillés afin d'être adaptés et précisés si nécessaire et certains postes de dépenses n'ont pas de coûts associés car ils ne sont pas connus, ils sont tout de même inscrits pour mémoire et évaluation future.

²⁰ La durée de 15 ans a été choisie en se basant sur un document réalisé par l'équipe PGL qui évalue le projet sur 15 ans.

3.6 Comparaison des solutions entre elles

3.6.1 Illustration de la méthode d'exploitation des résultats avec l'exemple des centrales hydroélectriques CHE

Par souci de simplicité, un seul cas d'étude sera présenté ici (celui de la CHE), la méthode d'analyse des résultats issues de l'ATE ne sera détaillée que pour cet exemple, les résultats seront directement donnés et discutés pour les autres cas. Il a été choisi pour comparer les solutions de mettre en regard les coûts qu'elles engendrent et leur efficacité présumée. Il est nécessaire pour cela d'estimer l'efficacité des différentes solutions, la méthode de notation est présentée dans le tableau 6 ci-dessous. Pour estimer les coûts associés à la mise en place des solutions, les OPEX (coûts d'exploitation) et les CAPEX (coûts d'investissement) globaux associés à chaque solution ont été calculés (tableau 7) à partir des données récoltées lors des entretiens et rassemblées dans le tableau en annexe 8. Afin de rendre ces données plus parlantes, il a été choisi de calculer le TAC à partir des OPEX et des CAPEX globaux moyens (voir partie 1.2.2). La méthode d'estimation des incertitudes liées à la méconnaissance technologique du procédé (aléas « maturité ») et à l'avancement du projet (aléas « projet ») présentée en annexe 3, qui est une méthode d'approche probabiliste assez poussée, n'a pas été appliquée faute de temps et de maîtrise ici. Néanmoins, en évaluant le TAC de chaque solution et en les comparant à celui de la solution de référence (S0), il est possible de faire ressortir les projets les plus rentables.

Tableau 6 : Critères de notation de l'efficacité des solutions.

Type de solutions	Notation	
	Avec ultrasons ¹	Sans ultrasons ²¹
Pas de solution (S0)	0	0
Solution simple	*-	*+
Solution double	**-	**+

²¹ Il a été choisi d'accorder plus d'efficacité au robot qu'aux ultrasons car le système ultrasons semble moins fiable que le robot dans la mesure où l'efficacité d'un traitement US dépend de l'installation du système.

Tableau 7 : Résultats de l'ATE pour le cas d'étude CHE. Le facteur d'actualisation est calculé pour une durée de vie de projet de 15 ans et un taux d'actualisation de 6% caractéristique du secteur hydroélectrique.

	Solution 0	Solution 1 : Revêtement	Solution 2 : US	Solution 3 : Rob Int	Solution 4 : Rob Pres	Solution 5 : Revêtement + US	Solution 6 : Revêtement + Rob Int	Solution 7 : Revêtement + Rob Pres
Efficacité présumée (selon le tableau 6)	00	*+	*-	*+	*+	**-	**+	**+
CAPEX global moyen (en €)	0	2,00E+05	4,00E+04	3,50E+05	0,00E+00	2,40E+05	5,50E+05	2,00E+05
OPEX global moyen (en €)	6,25E+05	1,83E+05	2,45E+05	2,00E+05	6,25E+05	1,25E+05	2,00E+05	3,13E+05
TAC (total annualized cost) en €/an	4,17E+04	3,28E+04	2,05E+04	4,94E+04	4,17E+04	3,30E+04	7,00E+04	4,14E+04
TAC Différentiel : Différences des TAC de Sn par rapport à S0 $TAC_{S_n} - TAC_{S_0}$ ²² en €/an	0,00E+00	-8,91E+03	-2,12E+04	7,70E+03	0,00E+00	-8,62E+03	2,83E+04	-2,41E+02

²² Cette valeur permet de comparer ce que coûte la solution Sn par rapport à la solution S0 en faisant la différence entre les deux. Quand la résultante est négative, cela signifie que la solution Sn est plus rentable que la solution S0.

Il a été choisi de faire une représentation graphique mettant en regard le TAC différentiel et l'efficacité présumée ce qui permet de bien discriminer les différentes solutions (figure 16). La zone encadrée en jaune correspond aux projets les plus rentables (TAC négatif) et supposés les plus efficaces. Dans le cas des CHE, les investissements les plus intéressants sont :

- La combinaison revêtement/ultrasons
- Le revêtement seul
- La combinaison revêtement/robot avec prestataire.

En effet, vu que la surface traitée est relativement faible comparé aux autres cas d'étude (hormis les grilles de pertuis de CNPE), la pose d'un revêtement vaut le coup. De plus, au vu de la surface, le système ultrason à installer est relativement simple (quelques transducteurs et un générateur) ce qui représente moins de risques de dépenses d'exploitations importantes (moins de maintenance potentielle) qu'un système US plus complexe. Le robot avec prestataire semble une bonne option aussi car cela n'implique pas de CAPEX et pas beaucoup d'OPEX étant donné que ce type de nettoyage est assez bien développé (notamment le nettoyage des grilles de barrage).

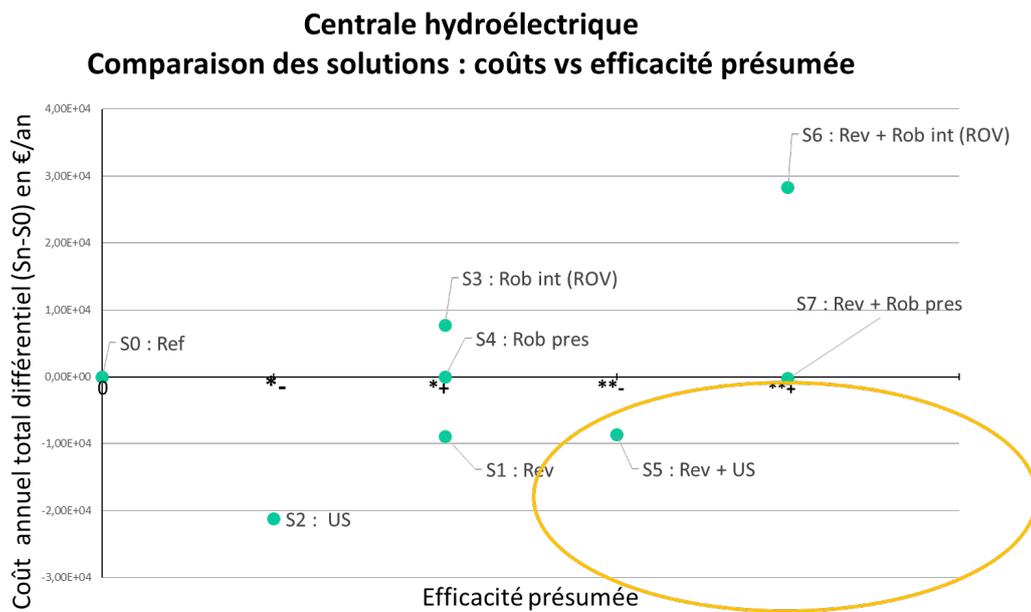


Figure 16 : Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités.

3.6.2 Résultats pour les autres cas d'étude

Les résultats pour l'éolien flottant (figure 17) semblent montrer que l'ATE ne donne pas de résultats concluants. Néanmoins les solutions S3 et S3 bis (acquisition d'un robot en interne ROV ou AUV) semblent être plus intéressantes que les autres. Dans le cas de la conduite en béton du CNPE de Cattenom (figure 18), la solution qui semble la plus intéressante est l'utilisation d'un ROV acheté en interne, de plus que l'achat du ROV peut être mutualisé pour plusieurs CNPE. Les solutions type revêtement ne semblent pas indiquées, en effet si on décide de recouvrir toute la surface des conduites, cela peut revenir

très cher (ici la surface de la conduite est de 5500 m²) ; il serait en revanche intéressant de traiter des surfaces localisées « à problème » (à définir avec les équipes sur place) ce qui reviendrait beaucoup moins cher. Pour les grilles de pertuis du CNPE de Penly (figure 19), les solutions les plus indiquées semblent être l'utilisation de revêtement (car c'est une petite surface) avec en complément un système ultrason, une prestation de nettoyage ou un robot nettoyeur acheté en interne. De même que pour les conduites en béton, l'achat du ROV peut être mutualisé. Il serait intéressant de tester l'efficacité du système ultrasons ici puisque, contrairement au cas de l'éolien flottant, le site n'est pas en pleine mer.

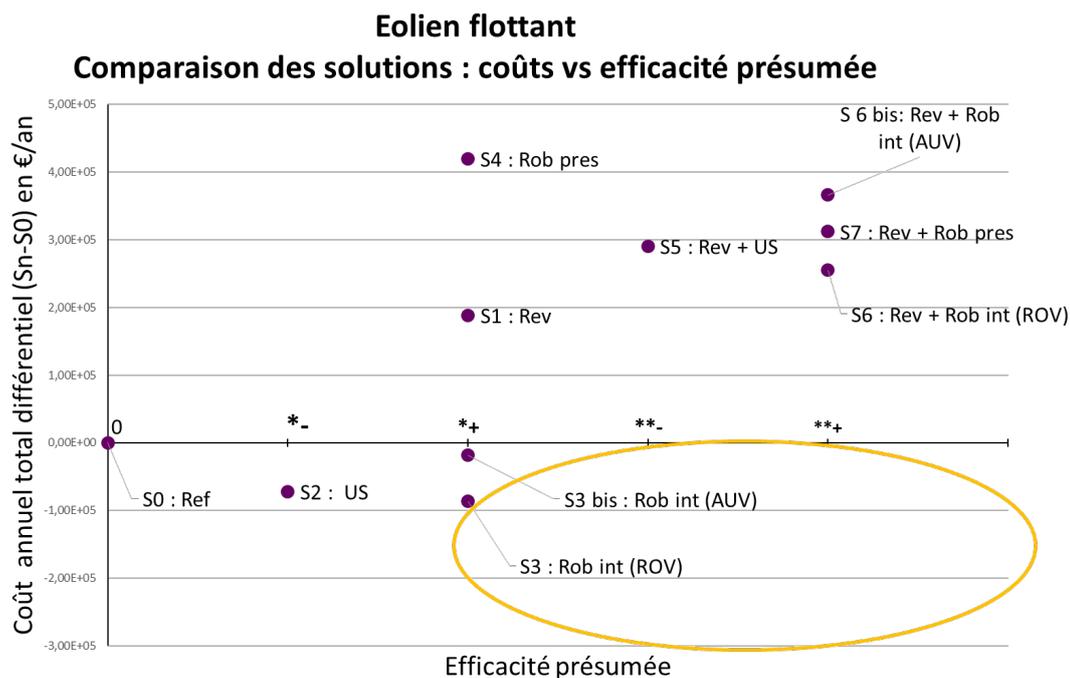


Figure 17 : Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités. Les données sont disponibles en annexes 9 et 10. Le facteur d'actualisation est calculé pour une durée de vie de projet de 15 ans et un taux d'actualisation de 15% caractéristique du secteur éolien flottant.

CNPE_Conduite béton Comparaison des solutions : coûts vs efficacité présumée

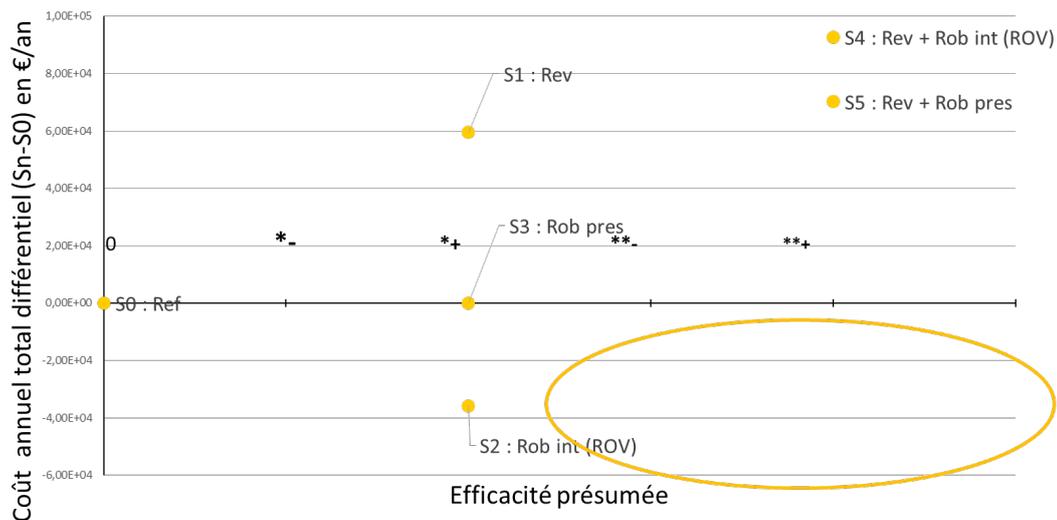


Figure 18 : Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités. Les données sont disponibles en annexes 11 et 12. Le facteur d'actualisation est calculé pour une durée de vie de projet de 15 ans et un taux d'actualisation de 8% caractéristique du secteur nucléaire.

CNPE_Grille de pertuis Comparaison des solutions : coûts vs efficacité présumée

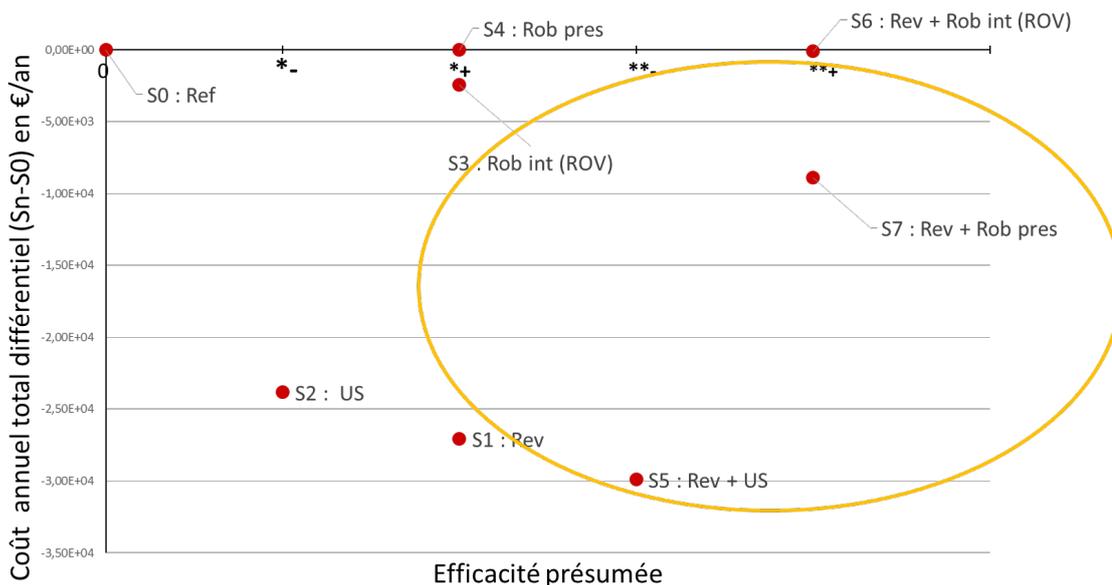


Figure 19 : Rentabilité des solutions (par rapport à la solution de référence S0) en fonction de leurs efficacités. Les données sont disponibles en annexes 13 et 14. Le facteur d'actualisation est calculé pour une durée de vie de projet de 15 ans et un taux d'actualisation de 8% caractéristique du secteur nucléaire.

3.7 Discussions des résultats

L'ATE a rempli l'objectif attendu puisque cela permet de comparer les différentes solutions entre elles et de servir d'aide à la décision pour les études à mener. Cependant comme exposé dans les parties ci-dessus, peu de chiffres sont précis et les incertitudes liées à la maturité des technologies et à l'avancement du projet n'ont été que partiellement prises en compte (en appliquant de larges marges d'erreur aux différents coûts estimés). Il a aussi fallu attribuer une efficacité aux différentes solutions afin de les discriminer. Il a été décidé, au vu des conditions de mise en œuvre, de préférer les robots nettoyeurs aux ultrasons qui semblent moins fiables, c'est un parti pris. Néanmoins sur les documents qui seront fournis à EDF, la méthodologie de l'étude et les calculs sont détaillés de façon à ce qu'il soit facile de la reprendre et de modifier les données. C'est une première étude prospective qui a vocation à être affinée. Cette étude permet de définir quelques grandes tendances et de mettre en évidence les lacunes et données nécessaires pour une évaluation plus sûre.

A ce stade, il semblerait que :

- Il est intéressant d'utiliser des revêtements pour de « petites » surfaces type grille. Ce résultat accroît l'intérêt du dispositif des biobox (voir partie 4).
- Utiliser un ROV est une solution rentable, d'autant plus que le développement de ROV est en plein essor et les prix auront tendance à décroître.
- Avoir un robot en interne semble préférable à avoir un robot avec un prestataire.
- Les systèmes ultrasons ne coûtent pas cher mais sont des dispositifs lourds pour les grandes surfaces ce qui s'accompagne d'un gros risque maintenance.

4 Comparaison de l'efficacité de différents revêtements : analyse des données de la « biobox »

Comme exposé dans la partie 1, la biobox est un dispositif de test de l'efficacité de différents revêtements qui permet de répondre aux besoins des sites industriels à court terme. L'ATE a permis de confirmer l'intérêt de la biobox puisque l'utilisation localisée de revêtements est une solution rentable pour lutter contre le biofouling.

4.1 Adaptation de la méthode d'analyse

La méthode d'analyse présentée en partie 1.2.3 ne permet pas de discriminer le type de colonisation (type bactérien, biofouling encroûtant ou pas). En effet, cette méthode ne fait pas de différence entre un coupon colonisé entièrement par un film bactérien qui est accroché mais qui n'arrache à priori pas le revêtement quand on l'enlève et une colonie de balanes ou de moules qui sont des organismes encroûtants qui sécrètent un ciment pour mieux adhérer à une surface. Il a donc été proposé de définir un nouvel indice qui prenne en compte à la fois le taux de recouvrement des échantillons et le type d'organisme : l'« indice de colonisation N » (Finistère 360°, 2019 ; Dobrestov et al, 2014). L'indice de

colonisation N a deux composantes : l'indice de recouvrement R et l'indice de gravité G, il se calcule ainsi :

$$N = R * G$$

L'indice de recouvrement R est déterminé selon la méthode de notation exposée en annexe 14 et résumée dans le tableau 9. L'indice de gravité G dépend de l'espèce : plus l'espèce adhère fortement et risque d'endommager le revêtement, plus G augmente. Les deux publications citées ci-dessus décrivent un indice G qui a ensuite été adapté à cette étude en fonction des organismes retrouvés sur les échantillons (tableau 10). L'indice G est déterminé suite à l'examen des clichés et des observations. L'indice résultant N permet d'obtenir des données semi quantitatives variant de 0 à 30. Les données d'indice N ainsi obtenues sont ensuite traitées statistiquement sur le logiciel R afin de comparer les revêtements entre eux. Pour expliquer la variable quantitative N en fonction du type de revêtement (qui est une variable qualitative), il a été choisi de faire une analyse de variance (ANOVA) à 1 facteur (type de revêtement) pour chaque date. Pour chaque date, si l'ANOVA est significative ($p < 0.05$), des tests post hoc de Tukey sont réalisés afin de comparer les revêtements deux à deux (figures 3 et 4).



Figure 20 : Photo prise d'un coupon recouvert du revêtement silicone PPG Si 1290, visite d'octobre 2019 (Photo EDF). Extrait de la note d'observation : « Moules autour sur les interstices (entre les coupons) (3 à 4 cm), Revêtement propre »

Tableau 6 : Indice de recouvrement R (source : production personnelle)

Pourcentage de recouvrement de l'échantillon	Indice de recouvrement R
Coupon propre, pas d'organismes	0
0 – 5 %	1
5 – 25 %	2
25 – 50%	3
50 – 75%	4
75 – 100%	5

Tableau 7 : Indice de gravité G (les espèces indiquées sont les espèces qui ont été observées et répertoriées dans la note d'observation). Source : production personnelle

Type d'espèces sur l'échantillon	Indice de gravité G
Rien	0
Biofilm	1
Macroorganismes non encroûtants (Hydriaires, bryozoaires)	4
Macroorganismes encroûtants (Moules, balanes, huitres, vers calcaires, anémones, napperon, palourde)	6

4.2 Résultats

Tous les revêtements de type peinture sont globalement efficaces puisqu'ils ont un effet par rapport au témoin (BB : Béton Brut) (figure 21). En revanche ; le revêtement adhésif Finsulate est nettement moins efficace que les autres. De plus, il s'avère que les revêtements non biocides sont globalement aussi efficaces que les biocides. La comparaison des revêtements non biocides entre eux indique qu'il n'y pas de différence significative entre les revêtements entre novembre 2019 et février 2020 (figure 22). Même si les différences ne sont pas statistiquement significatives, il semblerait néanmoins que les revêtements Sigmaglide 1290 de PPG et Bioclean Eco de Chugoku donnent les meilleurs résultats en termes d'action antifouling.

L'analyse des photos et le traitement statistique des résultats permettent donc de comparer les revêtements entre eux. Les principaux résultats sont que :

- Le film adhésif Finsulate ne semble pas très efficace par rapport aux témoins
- Il n'y a pas de différence significative d'efficacité entre les revêtements biocides et non biocides testés

- Parmi les revêtements non biocides : Sigmaglidle 1290 de PPG et Bioclean Eco de Chugoku donnent globalement de meilleurs résultats que les deux autres.

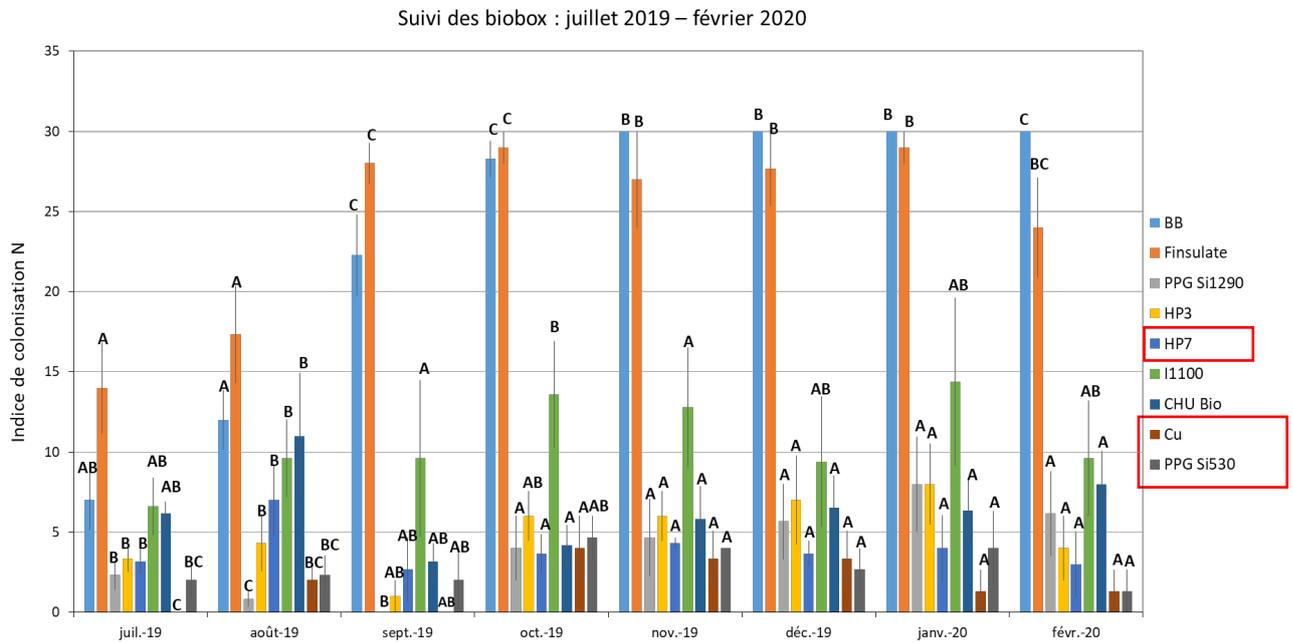


Figure 21 : Suivi de l'indice de colonisation des biobox (indice N moyen +/- erreur standard). La moyenne et l'erreur standard de l'indice N ont été calculées pour chaque type de revêtement et pour chaque date d'observation. Les groupements A, B et C ont été réalisés avec un test de Tukey. Chaque lettre (A, B et C) correspond à un groupe significativement différent des autres ; quand deux revêtements ont une lettre en commun, ils ne sont pas considérés comme significativement différents l'un de l'autre. Les 3 revêtements biocides sont encadrés en rouge. (Source : traitement sur R, production personnelle)

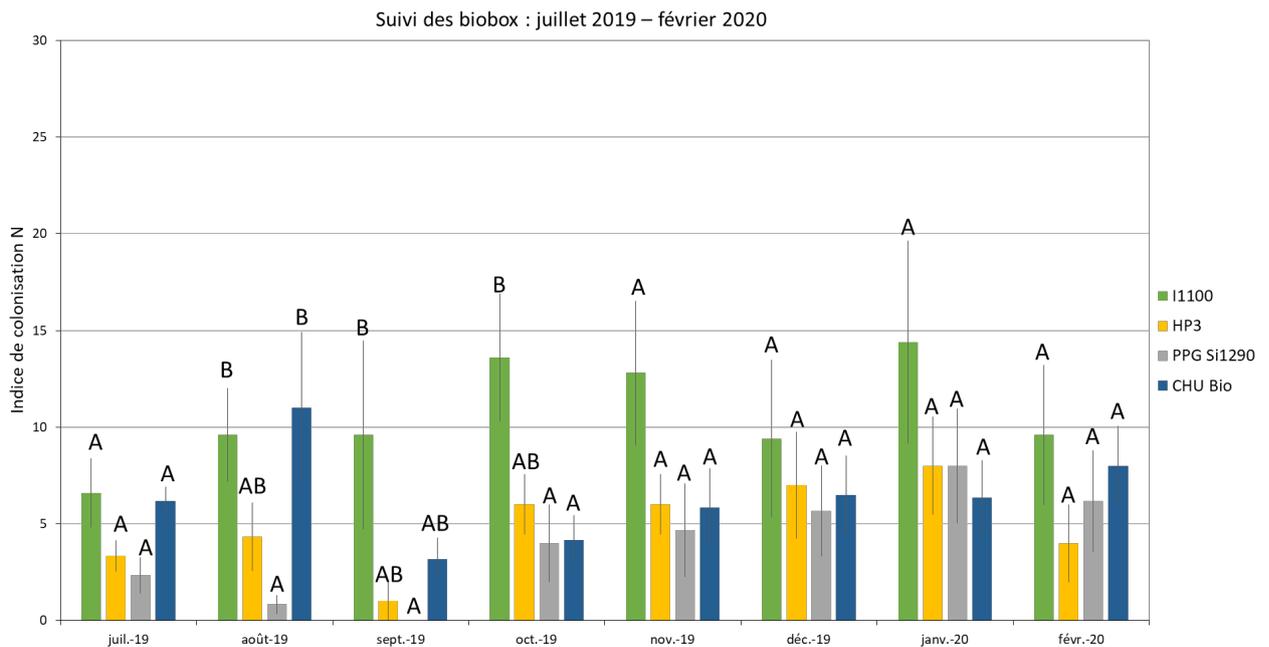


Figure 22 : Focus sur les revêtements non biocides. Suivi de l'indice de colonisation des biobox (indice N moyen +/- erreur standard). La moyenne et l'erreur standard de l'indice N ont été calculées pour chaque type de revêtement et pour chaque date. Les groupements ont été réalisés avec un test de Tukey. Chaque lettre (A et B) correspond à un groupe significativement différent des autres ; quand deux revêtements ont une lettre en commun ils ne sont pas considérés comme significativement différents l'un de l'autre. (Source : traitement sur R, production personnelle).

4.3 Perspectives

Les méthodes de suivi et d'analyse pourraient être optimisées selon 3 axes.

4.3.1 Mesure de l'adhérence des organismes

Il convient de rappeler ici que les clichés et la note d'observations ne suffisent pas pour avoir une idée précise de l'adhérence des organismes sur les échantillons. Une mesure complémentaire serait de réaliser des tests de nettoyage d'intensité croissante comme 1. Rinçage à l'eau, 2. Passage du doigt, 3. Passage de chiffon, 4. Raclage avec un nettoyage automatisé au jet d'eau sous-pression d'intensité croissante (prévu en fin d'étude) ou bien mesurer la contrainte nécessaire pour décrocher les différents organismes à l'aide d'un texturomètre. Ces mesures pourraient être réalisées de façon systématique pour tous les échantillons afin de consigner les résultats dans la note d'observations. Cependant ces méthodes de nettoyage sont destructrices et ne nous permettraient pas de suivre l'évolution de la colonisation de façon systématique puisque les échantillons seraient de nouveau au stade de colonisation zéro. Il pourrait néanmoins être envisagé de prévoir un plus grand nombre d'échantillons : on en garderait certains pour observer l'évolution de la colonisation et les autres pour faire des tests de nettoyage.

4.3.2 Mesure de la colonisation des échantillons : problème des interstices

Il n'est pas évident d'estimer le taux de colonisation des échantillons en raison de la présence d'interstices entre les coupons en béton qui ne sont pas traités avec un revêtement. Les organismes qui constituent le biofouling ont tendance à s'installer au niveau des interstices dans un premier temps pour les utiliser comme support préliminaire avant de migrer vers les coupons. En cas d'unique examen des photographies il vaut mieux considérer uniquement le centre des coupons pour évaluer la colonisation. Néanmoins les observations détaillées indiquant si les colonisations apparentes sur les coupons sont adhérentes sont très utiles puisqu'elles recensent cet effet « interstice ». Il serait aussi intéressant d'estimer l'épaisseur du biofouling sur les coupons en béton en appliquant, par exemple, un stylet pointu perpendiculaire à la surface des échantillons et en évaluant l'épaisseur du biofouling (méthode similaire à la jauge d'huile de moteur).

4.3.3 Automatisation de l'analyse des clichés

Etant donné le nombre de photos à traiter (minimum 384 photos, dans les faits plutôt 800 en comptant les doublons) et le facteur de subjectivité associé à l'opérateur, il serait intéressant d'automatiser la

notation des photos. Un programme pourrait déterminer le facteur de recouvrement R , détecter la présence d'organismes et l'indiquer pour que, dans un second temps, ils soient identifiés par un opérateur. Il serait possible de le faire par une macro sur le logiciel ImageJ mais il faudrait plusieurs mois pour développer et adapter la macro en question. Néanmoins, c'est une piste d'amélioration sur le long terme. Une alternative serait que plusieurs personnes notent les échantillons en parallèle, les résultats seraient ensuite confrontés afin de s'affranchir au maximum de l'effet opérateur. Dans le cas présent, une seule personne a noté la totalité des échantillons et les a repassés plusieurs fois pour s'affranchir au maximum de l'effet opérateur.

5 Discussion générale

L'étude effectuée durant le stage a permis de dresser un premier tableau sur les approches de traitement du biofouling chez EDF. La synthèse bibliographique et l'ATE ont permis d'identifier des solutions de couplages de technologies innovantes de lutte contre le biofouling et d'obtenir des éléments sur la faisabilité de leur mise en œuvre. De plus, dans une optique de mise en œuvre à court terme, le dispositif de la biobox permet de comparer des revêtements et de sélectionner ceux qui donnent de meilleurs résultats. Néanmoins, cette étude pourrait être complétée en menant différentes actions.

5.1 Continuer une veille scientifique des technologies innovantes

La recherche et la synthèse bibliographique a permis d'identifier les technologies alternatives matures pouvant être mises en œuvre dans un futur proche mais aussi des technologies prometteuses qui sont toujours à l'état de recherche. C'est notamment le cas de toutes les technologies inspirées du vivant qui sont très variées :

- Matériaux nanostructurés afin de mimer la surface de certains organismes ayant une action antifouling notamment la peau de requin²³ ou de baleine ou les feuilles de lotus.
- Utilisation d'enzymes ou autres produits naturels comme substance active antifouling, il s'agit toutefois de trouver les « bonnes enzymes ». En effet, qui dit enzyme ne veut pas dire forcément non toxique pour l'environnement.

D'autres solutions sont aussi à surveiller comme les revêtements zwitterioniques, les revêtements incorporant des LED UVC et les revêtements à base de graphène ou de nanoparticules de carbone. Ces solutions n'ont volontairement pas été citées dans la partie 2 par mesure de concision et parce qu'elles ne servaient pas directement à la suite de l'étude. Elles sont en revanche détaillées dans la synthèse bibliographique jointe au rapport.

5.2 Organiser une consultation biofouling interne à EDF

Comme exposé dans la partie 3, le manque de suivi et d'informations économiques sur l'impact du biofouling sur les installations et la production ont été un frein pour l'étude. Pour pallier cela, des tables rondes réunissant tous les acteurs en lien avec cette problématique (EDF R&D, exploitants et ingénierie EDF) pourraient être organisées. L'objectif serait multiple :

- Permettre une prise de conscience de ce problème global en mettant en lien différents sites industriels et différentes localisations.
- Organiser un dialogue efficace avec un référent biofouling pour chaque site industriel participant qui centraliserait les informations recueillies sur le site et les ferait ensuite remonter lors des tables rondes.

²³ La technologie Sharklet s'inspire du motif de la peau de requin pour structurer des matériaux mais elle n'a pas d'application dans le domaine maritime.

- Mettre en place un protocole de suivi standardisé et systématique des incidents liés au biofouling pour tous les sites industriels participants avec une description précise des incidents, de la maintenance faite, des mesures prises (si arrêt de fonctionnement, quelle durée) et, si c'est le cas, de l'impact sur la production d'électricité du site.

La remontée des incidents dus au biofouling permettra de faire un état des lieux plus précis de la problématique du biofouling chez EDF et des surcoûts.

5.3 Dimensionner la maintenance à partir d'une limite de biofouling à fixer

Les lacunes de connaissances sur la problématique biofouling ont entravé l'étude sur un autre point. Il n'y avait pas d'objectif de résultats pour l'ATE et il est difficile dans ces conditions de définir les « bonnes pratiques » c'est-à-dire la bonne fréquence d'intervention ou la bonne technologie. Ainsi, au lieu de raisonner en termes d'efficacité de nettoyage en cherchant à maximiser la performance des systèmes de nettoyage, il faudrait plutôt raisonner en termes de nettoyage suffisant. Pour cela, il faudrait définir une limite à partir de laquelle le nettoyage est dit suffisant. On pourrait par exemple laisser un circuit de refroidissement (sur site si possible ou en laboratoire avec le projet Pericles²⁴) s'encrasser, voir les conséquences sur l'efficacité du filtrage et des échanges thermiques en mimant la source froide (débris, larves d'organismes si l'expérience ne se fait pas sur site) et déterminer la limite acceptable. Par exemple : grilles avec présence de micro et macro algues acceptable mais pas d'installations de moules ou encore échangeur thermique avec un biofilm peu épais acceptable. Définir les limites dans la mesure du possible permettrait de dimensionner la maintenance afin d'éviter des coûts inutiles.

5.4 Tests à réaliser pour la fiche innovation

Le laboratoire dispose d'un mini ROV. Il serait intéressant de faire différentes batteries de tests de nettoyage avec ce robot.

5.4.1 Test sur le robot

Il faudrait réaliser dans un premier temps des tests de base en piscine, afin d'étudier la manœuvrabilité, la flottabilité, la facilité de prise en main avec et sans fonctionnement du système de nettoyage. Dans un second temps, on pourrait le tester sur site sur différents types de surface : conduite, grille... afin de voir s'il progresse bien sur la surface, si le système de nettoyage est adapté. Il faudrait aussi tester le bon fonctionnement du robot avec l'application d'un courant (jusqu'à 4 m/s)

5.4.2 Test de nettoyage avec le robot

Dans un second temps, des tests de nettoyage pourraient être réalisés sur des échantillons immergés en condition. Un test possible serait de placer en conditions réelles des plaques de béton de 1 m sur 1 m recouvertes de différents revêtements (les deux revêtements sélectionnés des biobox PPG Si 1290 et Bioclean Eco de Chugoku, le revêtement SLIPS) sur lesquelles différentes fréquences de nettoyage

²⁴ Pericles est un dispositif expérimental sur le site de Chatou simulant un circuit de refroidissement.

seraient testées (1fois/mois, 1 fois/2 mois, 1 fois/6 mois ; on peut difficilement faire plus vu les fréquences auxquelles les équipes vont sur place) ainsi que différentes techniques de nettoyage si possible (brosse, jet de cavitation, outil type FlexiClean). Un suivi de l'intégrité du revêtement pourrait également être afin d'évaluer l'effet du nettoyage sur le revêtement.

5.4.3 Autres tests

Il serait aussi intéressant de tester les ultrasons. Dans la partie 3, il a été considéré que les US étaient moins efficaces que les robots nettoyeurs car cela semblait plus compliqué à mettre en place. On pourrait par exemple définir un site de test avec au moins 4 grilles, en recouvrir deux avec un revêtement antifouling (PPG Si 1290 par exemple) et installer un système ultrason sur une grille avec et une grille sans revêtement antifouling. L'efficacité du traitement pourra être suivie en réalisant des clichés, en mesurant l'épaisseur des dépôts. On pourrait comparer ces résultats-là à ceux des tests décrits dans la partie précédente.

Ces quelques idées permettraient d'approfondir l'étude menée pendant ce stage, la faisabilité de ces différents tests restant à évaluer.

Conclusion

Le travail réalisé au cours de ce stage permet d'apporter de premiers éléments de réponse à la problématique du traitement du biofouling chez EDF pour mener des actions sur le court et le long terme. En premier lieu, l'analyse statistique des données récoltées par le dispositif des biobox permet de répondre aux besoins immédiats de certains sites industriels en identifiant les revêtements Sigmaglide 1290 de PPG et Bioclean Eco de Chugoku qui semblent être les plus efficaces parmi les huit revêtements testés sur les premiers mois de test. Par ailleurs, la synthèse bibliographique et l'étude technico économique ont permis de proposer des solutions pour un traitement durable des problématiques biofouling chez EDF en dressant un état de l'art sur les méthodes de lutte contre le biofouling autres que biocides et en étudiant la faisabilité de la mise en place de certaines d'entre elles sur différents sites industriels.

Étant donné que le domaine d'étude était au départ très large puisque cela traite une variété d'installations et de combinaisons de solutions, il a donc été nécessaire d'en réduire le champ afin d'apporter des résultats concrets. Pour cela, il a été choisi d'étudier trois solutions alternatives (revêtement, système à ultrasons et système de nettoyage) parmi toutes celles répertoriées. Il a également fallu désigner en collaboration avec des opérateurs EDF les zones d'étude c'est-à-dire les zones névralgiques sensibles au biofouling en fonction du type de site de production d'électricité. Ceci a apporté des premières réponses à la question : « Comment est-il préférable de traiter le biofouling sur tel site industriel ? ». Néanmoins, il est primordial de rappeler que les résultats présentés sont valables uniquement dans le contexte de l'étude, les calculs pour l'analyse technico-économique ont été faits pour des structures bien précises. La méthodologie d'étude exposée de ce rapport est aussi importante voire plus que les résultats obtenus puisqu'elle permet de cadrer l'étude.

Afin de mieux traiter la problématique du biofouling chez EDF à l'avenir, il est proposé de mieux appréhender l'étendue du problème ainsi que ces conséquences économiques. C'est pourquoi, dans les perspectives de cette étude, une consultation interne à EDF sous forme de « tables rondes biofouling » est préconisée afin de rassembler les attentes des différentes parties prenantes. De plus, une étude pour définir la limite acceptable du biofouling et ses conséquences sur les rendements de production d'électricité permettrait d'adapter les traitements aux besoins réels des sites industriels.

Bibliographie

Albitar, Houssam, Kinan Dandan, Anani Ananiev, et Ivan Kalaykov. 2016. « Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems ». *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13 (1). <https://doi.org/10.5772/62060>.

Aldred, Nick, Guozhu Li, Ye Gao, Anthony S. Clare, et Shaoyi Jiang. 2010. « Modulation of Barnacle (*Balanus Amphitrite* Darwin) Cyprid Settlement Behavior by Sulfobetaine and Carboxybetaine Methacrylate Polymer Coatings ». *Biofouling* 26 (6): 673-83. <https://doi.org/10.1080/08927014.2010.506677>.

Almeida, Elisabete, Teresa C. Diamantino, et Orlando de Sousa. 2007. « Marine Paints: The Particular Case of Antifouling Paints ». *Progress in Organic Coatings* 59 (1): 2-20. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.01.017>.

Bloecher, Nina, Kevin Frank, Morten Bondø, Deni Ribicic, Per Christian Endresen, Biao Su, et Oliver Floerl. 2019. « Testing of Novel Net Cleaning Technologies for Finfish Aquaculture ». *Biofouling* 35 (7): 805-17. <https://doi.org/10.1080/08927014.2019.1663413>.

Callow, James A., et Maureen E. Callow. 2011. « Trends in the Development of Environmentally Friendly Fouling-Resistant Marine Coatings ». *Nature Communications* 2 (1): 244. <https://doi.org/10.1038/ncomms1251>.

Chuang, Helen F., René C. Smith, et Paula T. Hammond. 2008. « Polyelectrolyte Multilayers for Tunable Release of Antibiotics ». *Biomacromolecules* 9 (6): 1660-68. <https://doi.org/10.1021/bm800185h>.

Dobretsov S., Thomason J., Williams D.N. (2014), *Biofouling methods*, Wiley-Blackwell edition

Finistère 360°, tourisme, nautisme et territoires ; antifouling et environnement : où en sommes-nous ? avril 2019, <https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj6vd-YpOrpAhVlzoUKHdMkBW4QFjABegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.parc-marin-iroise.fr%2FDocumentation%2FAntifouling-et-environnement-ou-en-sommes-nous%2FAntifouling-et-environnement-ou-en-sommes-nous-Rapport-04-2019&usq=AOvVaw2jZSwJsMwZCxCxZVGzCRjruo>

Flemming, Hans-Curt, Jost Wingender, Ulrich Szewzyk, Peter Steinberg, A. Rice Scott, et Staffan Kjelleberg. 2016. « Biofilms: An Emergent Form of Bacterial Life ». *Nature Reviews Microbiology* 14 (septembre): 13.

- Guo, Shifeng, Heow Pueh Lee, et Boo Cheong Khoo. 2011. « Inhibitory Effect of Ultrasound on Barnacle (*Amphibalanus Amphitrite*) Cyprid Settlement ». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 409 (1-2): 253-58. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.09.006>.
- Guo, Shifeng, Heow Pueh Lee, Serena Lay Ming Teo, et Boo Cheong Khoo. 2012. « Inhibition of Barnacle Cyprid Settlement Using Low Frequency and Intensity Ultrasound ». *Biofouling* 28 (2): 131-41. <https://doi.org/10.1080/08927014.2012.658511>.
- Han, Wei, Zhineng Wu, Yao Li, et Yingying Wang. 2019. « Graphene family nanomaterials (GFNs)—promising materials for antimicrobial coating and film: A review ». *Chemical Engineering Journal* 358 (July 2018): 1022-37. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.106>.
- Hearin, John, Kelli Z. Hunsucker, Geoffrey Swain, Harrison Gardner, Abraham Stephens, et Kody Lieberman. 2016. « Analysis of mechanical grooming at various frequencies on a large scale test panel coated with a fouling-release coating ». *Biofouling* 32 (5): 561-69. <https://doi.org/10.1080/08927014.2016.1167880>.
- Hunsucker, Kelli Z., Cierra Braga, Harrison Gardner, Michel Jongerius, Roelant Hietbrink, Bart Salters, et Geoffrey Swain. 2019. « Using ultraviolet light for improved antifouling performance on ship hull coatings ». *Biofouling* 35 (6): 658-68. <https://doi.org/10.1080/08927014.2019.1642334>.
- Kaiser, Jean Pierre, Stefano Zuin, et Peter Wick. 2013. « Is nanotechnology revolutionizing the paint and lacquer industry? A critical opinion ». *Science of the Total Environment* 442: 282-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.009>.
- Krishnan, Sitaraman, Ramakrishnan Ayothi, Alexander Hexemer, John A. Finlay, Karen E. Sohn, Ruth Perry, Christopher K. Ober, et al. 2006. « Anti-Biofouling Properties of Comblike Block Copolymers with Amphiphilic Side Chains ». *Langmuir* 22 (11): 5075-86. <https://doi.org/10.1021/la052978l>.
- Kristensen, Jakob Broberg, Rikke Louise Meyer, Brian Søgaaard Laursen, Stepan Shipovskov, Flemming Besenbacher, et Charlotte Horsmans Poulsen. 2008. « Antifouling enzymes and the biochemistry of marine settlement ». *Biotechnology Advances* 26 (5): 471-81. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.05.005>.
- Legg, M., M. K. Yücel, I. Garcia De Carellan, V. Kappatos, C. Selcuk, et T. H. Gan. 2015. « Acoustic methods for biofouling control: A review ». *Ocean Engineering* 103: 237-47. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.070>.
- Lejars, Marlène, André Margaillan, et Christine Bressy. 2012a. « Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings ». *Chemical Reviews* 112 (8): 4347-90. <https://doi.org/10.1021/cr200350v>.

- Linley, Annie, Karine Laffont, Graham Thomas, Tristan Biggs, et Tim Fileman. 2011. « ETI MA1001-Reliable Data Acquisition Platform for Tidal (ReDAPT) project: ME8.1 “Technical literature review on antifouling systems and consultation with device developers” », no March: 1-96.
- Maréchal, Jean-Philippe, et Claire Hellio. 2009. « Challenges for the Development of New Non-Toxic Antifouling Solutions ». *International Journal of Molecular Sciences* 10 (11): 4623-37. <https://doi.org/10.3390/ijms10114623>.
- Ministère de la transition écologique et solidaire, produits biocides, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/produits-biocides>, consulté le 25/05/2020.
- Morrisey, Donald, et Chris Woods. 2015. In-water cleaning technologies: review of information. Ministry for Primary Industries. Vol. 3. <http://www.mpi.govt.nz/news-and-resources/publications/>.
- Neveux T., Authier O. AUTHIER et Le Moullec Y.. « Estimation technico-économique d’innovations technologiques en génie des procédés ». A paraître en septembre 2020 dans *Techniques de l'ingénieur* (2020), J8130, rubrique "Innovations en génie des procédés".
- Nir, Sivan, et Meital Rechtes. 2016. « Bio-inspired antifouling approaches: The quest towards non-toxic and non-biocidal materials ». *Current Opinion in Biotechnology* 39: 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.12.012>.
- Nurioglu, Ayda G., A. Catarina C. Esteves, et Gijsbertus de With. 2015. « Non-Toxic, Non-Biocide-Release Antifouling Coatings Based on Molecular Structure Design for Marine Applications ». *Journal of Materials Chemistry B* 3 (32): 6547-70. <https://doi.org/10.1039/C5TB00232J>.
- Park, Ji Soo, et Jeung Hoon Lee. 2018. « Sea-trial verification of ultrasonic antifouling control ». *Biofouling* 34 (1): 98-110. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1409347>.
- Qian, Pei-Yuan, Ying Xu, et Nobushino Fusetani. 2009. « Natural Products as Antifouling Compounds: Recent Progress and Future Perspectives ». *Biofouling* 26 (2): 223-34. <https://doi.org/10.1080/08927010903470815>.
- Salters, Bart, et Richard Piola. 2017. « UVC Light for Antifouling ». *Marine Technology Society Journal* 51 (2): 59-70. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.51.2.10>.
- Selim, M. S., M. A. Shenashen, Sherif A. El-Safty, S. A. Higazy, M. M. Selim, H. Isago, et A. Elmarakbi. 2017. « Recent progress in marine foul-release polymeric nanocomposite coatings ». *Progress in Materials Science* 87: 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.02.001>.
- Tribou, Melissa, et Geoffrey Swain. 2010. « The use of proactive in-water grooming to improve the performance of ship hull antifouling coatings ». *Biofouling* 26 (1): 47-56. <https://doi.org/10.1080/08927010903290973>.

Vanysacker, Louise, Bart Boerjan, Priscilla Declerck, et Ivo F. J. Vankelecom. 2014. « Biofouling Ecology as a Means to Better Understand Membrane Biofouling ». *Applied Microbiology and Biotechnology* 98 (19): 8047-72. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5921-2>.

Liste des contacts

Personnel EDF (Nom de la personne – profession – objet de la consultation)

M Bruno CAMPOS – DNPT ingénieur source froide CNPE Cattenom – Découverte présence de moules dans une des conduites du CNPE de Cattenom → discussion avec la R&D sur les solutions qu'elle pourrait apporter au problème.

M Hervé DAVAUX – DIPNN ingénieur référent chimie source froide (en tant qu'ingénieur DIPNN a une vision globale des problématiques que rencontrent les CNPE – Consultation sur le biofouling dans les CNPE.

Mme Elisabeth DURANTEAU – équipe PGL – Consultation sur le biofouling pour l'éolien flottant

Mme Laura GUITTENY - Ingénieur environnement EDF Hydro Jura Maurienne – Entretien sur le biofouling dans les CHE

M Thibaut NEVEUX – ingénieur chez EDF R&D – Présentation de la méthode d'analyse technico économique

Chercheurs (Nom de la personne – profession – objet de la consultation)

Mme Marie-Noëlle BELLON FONTAINE – Enseignante chercheur en qualité et sécurité microbiologiques des aliments et procédés à AgroParisTech – Consultation sur les matériaux structurés antifouling

Mme Giana PERRE - Maître de conférences en physique des biomatériaux à AgroParisTech - consultation sur l'automatisation de l'analyse des clichés du dispositif des biobox

Fournisseurs (Nom du fournisseur – objet de la consultation)

Robots

Cybernetix – Joël VANDEN BOSCH - Demande d'informations sur des ROV (mail puis skype)

ECA GROUP – Philippe ROUMEGUE - Demande d'informations sur des ROV (mail puis skype)

Eelume – Dave MACKAY - Demande d'informations sur des AUV (mail puis skype)

HullBug – John DARLING – Demande d'informations sur des ROV (mail)

Keelcrab – Filippo SCARDUELLI - Demande d'informations sur des ROV (mail puis skype)

Ultrasons

EOS Group - Frits VERBRUGGEN – Demande d'infos sur les systèmes ultrasons + demande de devis grilles CNPE (Penly) et CHE (Allement)

Keelcrab - Filippo SCARDUELLI – Demande d’informations sur leur système ultrason (mail puis skype)

Revêtements

Adaptive Surface Technologies – Jon DORAN - Demande d’informations sur le revêtement SLIPS Foul Protect (mail)

Chugoku – Mickael HOP - Demande d’informations sur le revêtement Bioclean eco (mail)

Hempel – Hervé DEBURRE – Demande d’informations sur le revêtement Hempasil X3+ (mail)

Jotun – Damien PRIGENT – Demande d’informations sur le revêtement Sea Lion Resilient (mail)

PPG – Jean-Marc PORTERES – Demande d’informations sur le revêtement silicone Sigmaglide (mail)

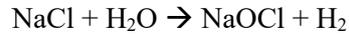
Sharklet – Nic DE HERRERA – Demande d’informations sur leur technologie Sharklet (matériau structuré en peau de requin)

Table des annexes

Annexe 1 : L'électrochloration.....	59
Annexe 2 : Les tributylétains.....	60
Annexe 3 : Compléments sur l'analyse technico-économique.....	61
Annexe 4 : le dispositif de la biobox.....	65
Annexe 5 : Les techniques alternatives préventives (1/2).....	66
Annexe 6 : Les techniques alternatives curatives.....	68
Annexe 7 : Quelques exemples de ROV.....	69
Annexe 8 : ATE pour le cas d'étude CHE (1/2).....	72
Annexe 9 : ATE pour le cas d'étude Eolien flottant (1/2).....	74
Annexe 10 : Exploitation des données issues de l'ATE pour le cas d'étude éolien flottant.....	76
Annexe 11 : ATE pour le cas d'étude Conduite béton de CNPE (1/2).....	77
Annexe 12 : Exploitation des données issues de l'ATE pour le cas d'étude Conduite béton de CNPE.....	79
Annexe 13 : ATE pour le cas d'étude Grille de pertuis de CNPE (1/2).....	80
Annexe 14 : Exploitation des données issues de l'ATE pour le cas d'étude Grilles de pertuis de CNPE.....	82
Annexe 15 : Méthode d'analyse initiale des données de la biobox.....	83

Annexe 1 : L'électrochloration

Cette méthode consiste à produire de l'hypochlorite de sodium à partir de l'eau de mer à l'aide d'électrolyseurs situés sur le site, suivant la réaction globale suivante :



L'hypochlorite de sodium ainsi produit est stocké quelques minutes avant d'être injecté dans l'eau de mer, à l'entrée du circuit de refroidissement.

L'électrochloration est employée en raison de son efficacité à large spectre, son faible coût, sa mise en œuvre facile et parce qu'elle ne nécessite de stockage important de produit. Elle permet de lutter notamment contre le développement des moules marines. Ce traitement est utilisé en prévention et non en curatif en empêchant l'installation des jeunes moules plutôt qu'en éliminant les moules adultes. Pour chaque CNPE, les rejets d'eau chlorés, en raison de leur impact potentiel sur l'environnement, sont réglementés dans des arrêtés de rejet spécifiques à chaque site.

Annexe 2 : Les tributylétains

Les tributylétains (TBT) est un groupe de composés organostanniques c'est-à-dire contenant le groupe $(C_4H_9)_3Sn$. Ce sont des produits biocides, hautement toxiques pour les végétaux et les autres organismes. Pour cette raison ils ont été les principales substances actives de certains biocides pour lutter contre un large spectre d'organismes. Ils ont été utilisés comme pesticides et dans les peintures antifouling à partir des années 60 mais surtout dans les années 70 avec l'explosion de la construction navale et de la plaisance. Il s'est ensuite avéré que les TBT étaient des perturbateurs endocriniens engendrant divers phénomènes toxiques chez les organismes. Par exemple, le phénomène d'imposex (féminisation des mâles) chez les gastéropodes comme *Nucella lapillus* a entraîné un déclin de la population dans les années 70 sur les côtes britanniques (Gibbs et Bryan 1986). De plus, il a été observé que le TBT entraînait des pertes de production conchylicole sur les côtes atlantiques françaises notamment dans le bassin d'Arcachon dans les années 80. Les effets écotoxicologiques du TBT ont été très médiatisés et documentés ce qui a entraîné une véritable prise de conscience et une interdiction partielle²⁵ de l'utilisation du TBT dans de nombreux pays dans les années 80 - 90 et une interdiction totale votée par l'OMI (Organisation Maritime Internationale) en 2001 et mise en œuvre à partir de 2008. Suite à l'interdiction de l'utilisation du TBT, de nouvelles formulations de peintures biocides riches en cuivre et en herbicides comme le diron, le chlorothalonil, le dichlorofuanid (qui catalysent l'action biocide du cuivre) ont été développées. Malgré leurs vocations à respecter de l'environnement, il a été prouvé que ces substances s'accumulent dans le milieu ce qui engendre des contaminations (Maréchal et Hellio 2009). L'étude des effets écotoxicologiques des TBT a permis une prise de conscience au niveau européen et mondial des problématiques environnementales que peuvent engendrer l'utilisation non contrôlée de produits biocides ce qui a mené à la mise en place d'une réglementation sur les produits biocides.

²⁵ Par exemple uniquement sur les coques de moins de 25 m en France en 1982 (Tributylétain. (10 mai 2020). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Page consultée le 17 mai 2020 à 10 : 25 à partir de <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tributyl%C3%A9tain&oldid=170701209>)

Annexe 3 : Compléments sur l'analyse technico-économique

CAPEX

L'investissement d'un procédé, ou CAPEX (CAPital EXpenditures), est l'ensemble des dépenses d'un projet engagées avant que celui-ci ne commence à produire. De manière synthétique, l'investissement inclut les dépenses liées à :

- L'ensemble des équipements, des travaux de génie civil et d'installation du procédé ;
- L'aménagement du site ainsi que les bâtiments liés aux fonctions support et les infrastructures d'accès au site ;
- Les études d'ingénierie et les licences d'utilisation des technologies ;
- Les provisions pour risques et aléas ;
- Les frais financiers : assurances et frais intercalaires.

OPEX

Les coûts d'exploitation, ou OPEX (OPerational EXpenditures), sont l'ensemble des dépenses chroniques d'un projet lors de l'exploitation normale du procédé.

Les coûts d'exploitation incluent les dépenses liées notamment aux aspects suivants :

- Les salaires des personnels nécessaires au fonctionnement normal du procédé, incluant les fonctions supports ;
- Les consommables et réactifs consommés et/ou transformés par le procédé ;
- La maintenance du procédé et le remplacement d'équipements ;
- La gestion des déchets produits par le procédé ;
- L'achat ou la production d'utilités (eau, vapeur, électricité, air comprimé) ;
- Les taxes de fonctionnement ;
- Les assurances.

Incertitudes liées à la maturité et à l'avancement du projet

Les démarches employées dans l'estimation d'un projet découlent de méthodes probabilistes simplifiées basées sur des valeurs économiques moyennes. Pour un procédé de maturité commerciale, la précision des résultats est reliée au volume des moyens mis en œuvre pour l'estimation : de l'estimation préliminaire basée sur des moyens estimatifs relativement simples, comme les bases de données et la veille économique, à l'estimation détaillée issue de dimensionnements complets (génie civil, mécanique, électricité, procédé, etc.) et de la consultation de prestataires de service. Pour un procédé en cours de développement, la précision de l'estimation est fonction du niveau de maturité technologique et de la fiabilité de la connaissance du procédé : nouveau concept, maquette, unité pilote, tête de série ou installation commerciale.

Deux types d'aléas sont donc considérés :

- Les aléas liés à l'avancement du projet, et donc aux méthodes d'estimation utilisées ;
- Les aléas liés au niveau de maturité technologique d'un procédé.

L'avancement du projet est pris en compte par la classe d'estimation économique résumées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 8 : Classes d'estimation en fonction de l'avancement du projet (Source : Neveux et al, 2020)

Classes d'estimation économiques	Moyens mis en œuvre
Classe V	Estimations par dires d'experts et extrapolation à partir de projets similaires.
Classe IV	Dimensionnement sommaire, méthodes déterministes uniquement sur les équipements principaux et méthodes probabilistes factorielles pour le reste des dépenses, plutôt en phase de R&D / d'ingénierie de conception, lorsque le projet n'est pas défini.
Classe III	Dimensionnement semi-détaillé du procédé, méthodes déterministes sur les dépenses les plus significatives (incluant notamment instrumentation, schéma électrique, etc.). Il s'agit d'une phase d'ingénierie quand le projet est mieux défini.
Classe II	Dimensionnement finalisé du procédé, méthodes déterministes et probabilistes uniquement pour les éléments du projet encore non définis ; la consultation est engagée.
Classe I	Projet complet finalisé avec évaluation déterministe de tous les coûts.

La maturité technologique d'une technologie est prise en compte par le « *Technology Readiness Level* » (ou TRL). Le TRL d'une technologie peut être évalué à l'aide de l'échelle présentée en figure 3.

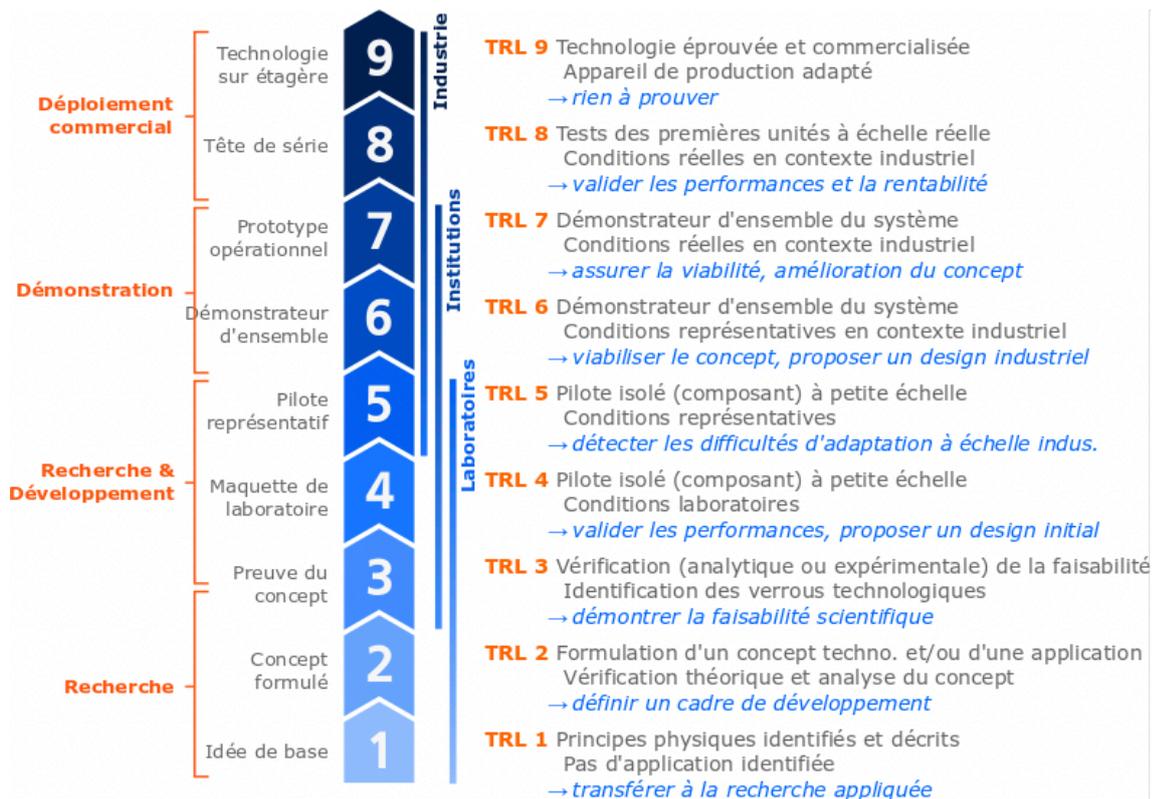


Figure 1 : Échelle de maturité technologique

Dans l'objectif de contribuer à une décision d'investissement, un calcul intégrant les incertitudes permet de quantifier le degré de confiance dans l'estimation économique. Dans le cadre d'une comparaison technologique, les procédés étudiés peuvent être de niveau de maturité et/ou de CAPEX/OPEX différents. La prise en compte des incertitudes permet alors de positionner plus efficacement les procédés entre eux.

Pour caractériser la propagation des incertitudes, une méthode d'échantillonnage appelée Monte Carlo est recommandée. Cette méthode nécessite d'affecter des lois de probabilité à certaines données d'entrée du calcul (coût des équipements, coût environné). Pour définir les distributions statistiques des aléas « TRL » et « projet », il est généralement d'usage de se baser sur des retours d'expérience industriels. Un tel retour d'expérience est présenté par les tableaux 1 et 2.

Tableau 9 : Aléas selon la maturité d'une technologie (source : Neveux et al, 2020)

	TRL	Aléas (f_{TRL-1})	$\ln f_{TRL} = \mathcal{N}(\mu, \sigma)$	
			μ	σ
Nouveau concept	1 – 2	> +40 %	0.56	0.33
Maquette	3 – 4	+30 à +70 %	0.40	0.20
Unité pilote	5 – 6	+20 à +35 %	0.24	0.10
Tête de série	7 – 8	+5 à +20 %	0.12	0.10
Procédé de série	9	0 à +10%	0.05	0.07

Tableau 10 : Aléas selon l'avancement du projet (source : Neveux et al, 2020)

Avancement du projet	Finalité de l'évaluation	Classe AACE	Aléas ($f_{projet-1}$)	$\ln f_{projet} = \mathcal{N}(\mu, \sigma)$	
				μ	σ
0 à 2%	Faisabilité	V	-50 à +100%	0.00	1.03
1 à 15 %	Choix d'un procédé	IV	-30 à +50 %	0.00	0.54
10 à 40 %	Décision d'investir	III	-20 à +30 %	0.00	0.34
30 à 70 %	Contrôle des dépenses	II	-15 à +20 %	0.00	0.24
70 à 100 %	Validation finale	I	-10 à +15 %	0.00	0.16

Taux d'actualisation

Le taux d'actualisation, propre à chaque projet et généralement constant dans le temps, n'est pas un taux d'intérêt du capital industriel, mais renvoie à plusieurs mécanismes comme l'érosion monétaire, le contexte industriel, social et financier... Le taux d'actualisation traduit des différents mécanismes et reflète la rentabilité attendue d'un investissement. Il permet, d'une part, de considérer la valeur du temps et aussi, d'une part, le niveau de risque de l'investissement.

Trois différents types de projets sont considérés dans cette étude, les taux d'actualisation associés sont différents comme le montre le tableau 1.

Tableau 11 : Taux d'actualisation associés aux différents projets industriels. Les valeurs des différents sont fixés par les porteurs de projet et ont été récupérés auprès d'une source EDF.

Type de projet industriel	Taux d'actualisation associé
Eolien Flottant	15 %
Hydroélectrique	6%
Nucléaire	8%

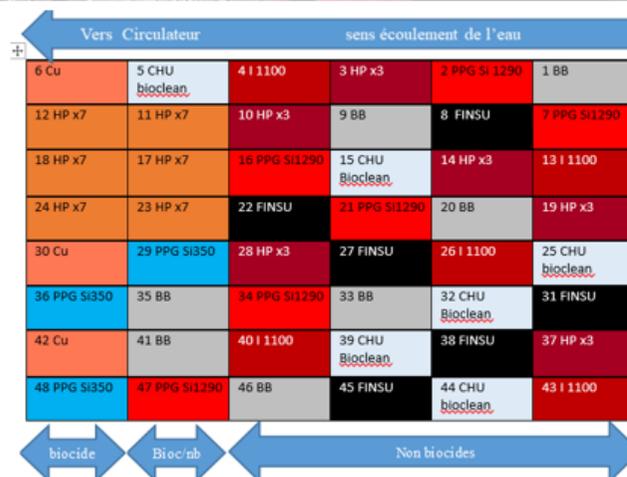
Le facteur d'actualisation se calcule à l'aide du taux d'actualisation et de la durée de vie N du projet selon la formule :

$$f_a = \frac{a(1+a)^N}{(1+a)^N - 1}$$

Les Revêtements



N°	Fournisseur	Marque	abrev	Type de Technologie	Biocide (oui/non)	Application	Nb mis en place
1	Coppercoat	Coppercoat	Cu	Résine époxy à base de cuivre	Oui	Par fournisseur	3
2	Hempel	Hempasil X3+	HPx3	Silicone	Non	Par fournisseur	6
3		Hempaguard X7	HPx7	Silicone + biocide	Oui		6
4	International	Intersleek 1100	I 1100	Fluoropoly mère	Non	Par fournisseur	5
5	Chugoku	Bioclean Eco	CHU biocl	FRC non biocide	Non	Par fournisseur	6
6	PPG	Sigmatglide 1290	PPG Si1290	Silicone FRC non biocide	Non	Par fournisseur	6
7		Sigma EcoFleet 530	PPG Si530	biocide	Oui		3
8	FINSULATE	Primaire 3M 94 + adhésif FINSULATE	FINSU	Film Adhésif fibr enylon	Non	Par EDF R&D	6
9	Témoin	Béton brut	BB	/	Non	/	7



- 8 revêtements dont 3 biocides: 7 peintures + 1 adhésif innovant - beaucoup choisis d'après des résultats d'études *in situ*
- triplicats ou sextuplats
- Coupons biocides à la sortie de la biobox

Annexe 5 : Les techniques alternatives préventives (1/2)

Type de traitement	Solutions	Disponibilité et fournisseurs potentiels	Principe d'action	Efficacité et REX	Impact environnemental	Faisabilité de la mise en œuvre	Couplage?
Revêtement non biocide	Foul release (silicone, fluropol ou PEG)	Disponible sur le marché (ex Sigmaglide de PPG, Hempasil X3+ de Hempel, CHU Bioclean de Chugoku)	NON TOXIQUE Polymères hydrophobes ou hydrophiles à empêche attachement	Efficace. Utilisé sur de nombreux navires	- Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatifs (COV) à évaluer	OK. Peinture fluide - nécessite en général un mouvement d'eau pour détacher le fouling.	- Système de nettoyage adapté - Ultrasons
Revêtement non biocide	Matrice dure (matrice époxyde, renforcé avec verre, esters...)	Disponible sur le marché (ex Ecolock et Ecospeed)	Aucune action antifouling. Revêtement renforcé plus résistant que la moyenne	Aucune efficacité NE PEUT ETRE UTILISE SEUL	- Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatifs (COV) à évaluer	OK sous réserve d'accès au site et d'autorisations	- Système de Nettoyage adapté - Ultrasons
Revêtement non biocide	Technologie SLIPS (Slippery Liquid Infused Porous surface)	Disponible (SLIPS Foul Protect d'Adaptive Surface Technologies)	Surface superhydrophobe et autonettoyante : ne se mouille pas → organismes n'adhèrent pas	Semble efficace. Plusieurs tests sur des bateaux de plaisance	- Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatifs (COV) à évaluer	OK sous réserve d'accès au site et d'autorisations	- Système de Nettoyage adapté - Ultrasons
Revêtement non biocide	Revêtement nanocomposite Superhydrophobe spécialisé pour les échangeurs thermiques	Disponible sur le marché (HeatX d'Oceanit)	Surface superhydrophobe → organismes n'adhèrent pas	Efficace. Testé dans une centrale thermique à Hawaï	- Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatifs (COV) à évaluer	OK sous réserve d'accès au site et d'autorisations	?
Revêtement non biocide	Nanocomposites : nanotube de carbone (Selim et al, 2017)	Non pas pour cette application là	Incorporation de nanotubes de carbone dans matrice polymère à augmente caractère hydrophobe du matériel	Pas de REX	- Emissions de Composés Organiques Volatifs (COV) à évaluer		
Revêtement non biocide	Technology Sharklet (Schumacher et al, 2007)	Non. Pas pour ce type Application.	Travail sur la nanotopographie → création d'une surface inhospitalière	Pas de REX	- Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatifs (COV) à évaluer		

Type de traitement	Solutions	Disponibilité et fournisseurs potentiels	Principe d'action	Efficacité	Impact environnemental	Faisabilité de la mise en œuvre	Couplage?
Revêtement non biocide / Traitement UV	Revêtement UVC LED	Non. Encore au stade recherche A suivre Azko Nobel / Philipps	Lumière UVC germinicide	Pas de REX	- Impact lumière UV sur la faune. Atténuation avec Distance mais à voir quand même		
Revêtement non biocide	Revêtement amphiphile	Oui (exemple Intersleek 1100SR de International)	Polymère ou mélange de polymère hydrophobe et Hydrophile → crée une hétérogénéité de Surface qui perturbe l'attachement	Efficace. Testé sur des navires	Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatils (COV) à évaluer	OK sous réserve d'accès au site et d'autorisations	A voir
Revêtement non biocide	Revêtement zwitterionique	Non, stade recherche	Polymère portant des groupes à la fois anioniques et cationiques à perturbe protéines adhésives	Pas de REX.	Pas de biocides - Emissions de Composés Organiques Volatils (COV) à évaluer		
Traitement UV (Hunsucker et al.2019)	Eclaire une surface avec une lampe UVC	Non. Il faudrait un robot ayant une fonction lampe UVC	Lumière UVC a une action germinicide.	Efficace uniquement si appliquée à quelques mms de la surface	- Pas de biocides MAIS - Impact sur la biodiversité enviroinnante? - Consommation d'énergie importante si on veut couvrir des grandes surfaces	Très compliqué.	A priori la lumière UV n'endommage par les revêtement. Pourrait être utilisé en complément d'un robot de nettoyage ou d'un système ultrasons
Ultrasons	Système ultrasons (avec générateur et émetteurs)	Oui. Systèmes utilisés pour les coques de bateaux (Sonihull, OES Group)	Propagation des ondes dans les liquides et tissus biologiques (avec cavitation ou pas) → perturbe l'installation	Efficace. Utilisé sur de nombreux navires	Ultrasons en milieu ouvert → perturbation de la faune? Atténuation de l'intensité des ultrasons avec la distance. Préconisation la plus faible intensité possible	OK sous réserve d'autorisation.	Compatible avec tout type de revêtement. Robot de nettoyage arracherait les émetteurs

Annexe 6 : Les techniques alternatives curatives

Type de traitement	Solutions	Disponibilité dans le commerce	Principe d'action	Efficacité	Impact environnemental	Faisabilité de la mise en œuvre	Couplage?
Ultrasons	Voir annexe 5						
Nettoyage mécanisé	Robots de nettoyage	Oui. Grande variété de robots télécommandés (ROV)	Nettoyage mécaniques par brosse, jet d'eau, aspiration, turbulence	Efficace si le nettoyage est adapté	Nettoyage hors des zones de carénage interdits, il faut récupérer les débris	Dépend de l'accessibilité du site, de la géométrie de la surface à nettoyer et de la fréquence d'intervention	Si le nettoyage est adapté, peut être utilisé en complément d'un revêtement
Thermique	Robot appliquant de l'eau chaude sur une surface	Oui. Par exemple Heat Surface Treatment HST	Application eau chaude (70°C) pour tuer les organismes	Efficace	A priori grosse consommation d'énergie pour chauffer l'eau	Si on dispose d'un robot adapté, OK	Pas information sur l'impact sur un revêtement
Encapsulation	Film enveloppant la surface à traiter	Oui	Le film prive la surface et l'eau piégée d'oxygène, de nutriments et de lumière → mort des organismes	?	Il faut récupérer et traiter les eaux anoxiques	Sur une petite surface OK	Pas information sur l'impact sur un revêtement

Annexe 7 : Quelques exemples de ROV

1. Les mini ROV

			
BlueROV2 de Blue Robotics ²⁶	Defender de VideoRay ²⁷	Falcon de SAAB Seacye ²⁸	Aquazoo de KeelCrab ²⁹

Figure 1 : Mini ROV sur le marché (sources : BlueRobotics , VideoRay, SAAB Seacye, Keelcrab)

Tableau 1 : Caractéristiques des mini ROV (Taille : longueur x largeur x hauteur). Les renseignements sont tirés de l'étude des sites internet (notes 21 à 24) et d'entretiens téléphoniques avec certains fournisseurs.

Nom du robot	Société	Description du robot (fonction première, taille, poids, profondeur)	Nettoyage ? Si oui : mode, vitesse	Mode de locomotion	Remarques
Blue2ROV	BlueRobotics	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection - 45,7 x 33,8 x 25,4 cm - 10 kg - 100 m max 	Non	Nage	
Defender	VideoRay	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection - 75.16 x 39.37 x 26.67 cm - 17 kg - 1000 m 	Non	Nage	Robot assez robuste, facilement customisable. On pourrait y adapter un système de nettoyage

²⁶https://bluerobotics.com/wp-content/uploads/2020/02/br_blurov2_datasheet_rev6.pdf

²⁷https://www.vidoray.com/images/DATASHEETS/2019_MSS_DEFENDER.pdf

²⁸[https://www.saabseacye.com/uploads/falcon-rev17\(s\)_1\).pdf](https://www.saabseacye.com/uploads/falcon-rev17(s)_1).pdf)

²⁹<https://www.keelcrab.com/en/custom-series/keelcrab-aquazoo>

Falcon	SAAB Seaeeye	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection - 100 x 50 x 60 cm - 60 kg - 300 m max 	<ul style="list-style-type: none"> - Petite brosse de nettoyage 	Nage	Robot assez robuste, facilement customisable. On pourrait y adapter un système de nettoyage
Aquazoo	Keelcrab	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection et nettoyage d'aquarium - 42,5 x 42,5 x 32 cm - 10 kg - 30 m max 	<ul style="list-style-type: none"> - Brosses en nylon et en acier (3 types) - 120 m²/h 	Evolue sur une surface	

2. ROV standard

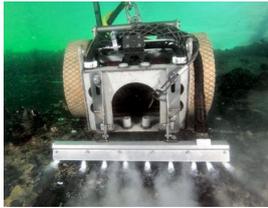
			
HullBUG de Sea Robotics ³⁰	Magnetic Hull Crawler de Cybernetix ³¹	Roving BAT de ECA Group ³²	Tiger de SAAB Seaeeye ³³

Figure1 : Quelques ROV (source : SAAB Seaeeye, ECAGroup, SeaRobotics, Cybernetix). Les sites internet dont sont issues les photographies sont indiqués dans les notes 30 à 33.

³⁰ <https://www.searobotics.com/products/hull-and-tank-cleaning>

³¹ <https://www.cybernetix.fr/our-solutions/hull-inspection-and-cleaning-robotics>

³² <https://www.ecagroup.com/en/solutions/rovingbat-hybrid-rov>

³³ <https://www.saabseaeeye.com/solutions/underwater-vehicles/tiger>

Tableau 1 : Caractéristiques de quelques ROV (production personnelle) Les renseignements sont tirés de l'étude des sites internet (notes 21 à 24), la revue de Curran et al (2016) et d'entretiens téléphoniques avec certains fournisseurs.

Nom du robot	Société	Description du robot (fonction première, taille, poids, profondeur)	Nettoyage ? Si oui : mode, vitesse	Mode de locomotion	Remarques
HullBUG	Sea Robotics	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage de coque de bateau - 149 x 106 x 73 cm - 370 kg - 50 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Brosses + jet d'eau cavitationnel - 1000 m²/h 	Nage	Brosse biomimétique
Magnetic Hull Crawler	Cybernetix	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage de coque de bateaux - 60 x 50 x 50 cm - 35 kg - 50 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Jet haute pression (1000 bar) - 100 - 200 m²/h 	Evolue sur une surface, se maintient magnétiquement	
Roving BAT	ECA Group	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage de surface - 110 x 108 x 65 cm - 135 kg - 150 m 	Jet d'eau cavitationnel	2 possibilités : nage + évolue sur une surface	
Tiger	SAAB Seaeeye	<ul style="list-style-type: none"> - Observation et inspection - 103 x 59 x 70 cm - 150 kg - 1000 m 	Option brosse de nettoyage rotative	nage	- Assez robuste pour être adapté avec des systèmes de nettoyage comme le FlexiClean par exemple

Annexe 8 : ATE pour le cas d'étude CHE (1/2)

	Solution 0 : Ref	Solution 1 : Rev	Solution 2 : US	Solution 3 : Rob int
CAPEX		<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling uniquement, pas besoin d'anticorrosion)</p> <p>200 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allement</p>	<p>Frais d'ingénierie Coût de l'équipement ultrasons Installation sur place</p> <p>Devis : pour toute la surface des grilles 24 transducteurs , OES Group</p> <p>40 k€</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot Formation de la main d'oeuvre</p> <p>200 - 500 k€</p> <p>On pourrait envisager de mutualiser le ROV en l'utilisant aussi pour d'autres centrales hydroélectriques ou CNPE.</p>
			Raccordement et alimentation électrique	<p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p>
OPEX	<p>Maintenance biofouling Fréquence surveillance : une fois tous les 3 ans --> sur 15 ans : 5 observations.</p> <p>Nettoyage : dans le cas où il y a 5 colmatages (un à chaque surveillance)</p> <p>500 - 750 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 1000 m2 de grille, on peut penser à 100 - 150 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 10 et pas 100).</p>	<p>Inspection : fréquence à définir, possibilité d'utiliser des ROV pour ça</p>	<p>Contrôle et maintenance éventuelle de système : remplacement de transducteurs, des cables entre les transducteurs... Système garanti 10 ans. 1 remplacement</p> <p>40 k€</p> <p>Surveillance tous les 3 ans, nettoyage éventuel à ce moment là (1 nettoyage pendant garantie, 2 autres après : 3 nettoyages plongeur sur 15 ans).</p> <p>150 - 215 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2 pour un nettoyage lourd. Pour un nettoyage léger complet des 1000 m2 de grille, on peut penser à 50 - 100 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là et a priori la grille est plutôt propre d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 afin de l'adapter à 1000 m2 de grille).</p>	<p>Main d'œuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence d'utilisation : 12 à 24 fois/an Main d'œuvre et couts de maintenance du robot</p>
	<p>Changement éventuel des structures endommagées Prix d'une grille</p>	<p>Surveillance tous les 3 ans, nettoyage éventuel à ce moment là. Revêtement garanti 8 ans : on peut penser à 3 nettoyages plongeur sur 15 ans)</p> <p>150 - 215 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2 pour un nettoyage lourd. Pour un nettoyage léger complet des 1000 m2 de grille, on peut penser à 50 - 100 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là et a priori la grille est plutôt propre d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 afin de l'adapter à 1000 m2 de grille).</p>	<p>Consommation électrique 2100 Watt (continu)--> sur 15 ans : 276 MWh</p> <p>27 k€ (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix KWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	<p>Gestion des déchets</p>
Impact sur les recettes	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance
	Arrêts, indisponibilités	Arrêts, indisponibilités	Arrêts, indisponibilités	Arrêts, indisponibilités

ATE pour le cas d'étude CHE (2/2)

	Solution 4 : Rob pres	Solution 5 : Rev + US	Solution 6 : Rev + rob int	Solution 7 : Rev + rob pres
CAPEX		<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling seulement)</p> <p>Pour les grilles : 200 k€</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot Formation de la main d'oeuvre</p> <p>200 - 500 k€</p> <p>On pourrait envisager de mutualiser le ROV en l'utilisant aussi pour d'autres centrales hydroélectriques ou CNPE.</p>	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 300 €/m2 (antifouling seulement)</p> <p>Pour les grilles : 200 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allement</p>
		<p>Frais d'ingénierie Coût de l'équipement ultrasons Installation sur place</p> <p>Devis : pour toute la surface des grilles 24 transducteurs</p> <p>40 k€</p>	<p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p> <p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling seulement)</p> <p>Pour les grilles : 200 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allement</p>	
OPEX	<p>Surveillance tous les 3 ans, nettoyage à ce moment là : 5 nettoyages nettoyage : plongeur ou ROV (a priori ROV moins cher)</p> <p>500 - 750 k€ (sans prendre en compte de contractualisation et adapté d'un prix plongeur)</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2 pour un nettoyage lourd. Pour un nettoyage léger complet des 1000 m2 de grille, on peut penser à 50 - 100 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là et a priori la grille est moins propre que dans le cas 4 d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 10 afin de l'adapter à 1000 m2 de grille comme dans le cas de ref).</p>	<p>Inspection et nettoyage si besoin : fréquence (1 fois/ 3 an) Contrôle et maintenance éventuelle de système : remplacement de transducteurs, des cables entre les transducteurs... Système garanti 10 ans. 1 remplacement 40 k€</p> <p>Surveillance tous les 3 ans, nettoyage éventuel à ce moment là (a priori plus effiace que cas 1 donc moins interventions de nettoyage : 1 nettoyage plongeur sur 15 ans).</p> <p>50 - 75 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2 pour un nettoyage lourd. Pour un nettoyage léger complet des 1000 m2 de grille, on peut penser à 50 - 100 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là et a priori la grille est plutôt propre d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 afin de l'adapter à 1000 m2 de grille).</p>	<p>Main d'œuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence d'utilisation : 6 fois/ an</p>	<p>Surveillance tous les 3 ans, nettoyage à ce moment là : 5 nettoyages nettoyage : plongeur ou ROV (a priori ROV moins cher)</p> <p>250 - 375 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2 pour un nettoyage lourd. Pour un nettoyage léger complet des 1000 m2 de grille, on peut penser à 50 - 100 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là et a priori la grille est plutôt propre d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 afin de l'adapter à 1000 m2 de grille).</p>
		<p>Consommation électrique 2100 Watt (continu)--> sur 15 ans : 276 MWh</p> <p>27 k€ (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	<p>Gestion des déchets</p>	
				<p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 6 fois/an, vitesse nettoyage 200 m2/h --> 30 h/an sur 15 ans : 900 - 2250 kWh</p> <p>90 - 200 € (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>
Impact sur les recettes	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance
	Arrêts, indisponibilités	Arrêts, indisponibilités	Arrêts, indisponibilités	Arrêts, indisponibilités

Annexe 9 : ATE pour le cas d'étude Eolien flottant (1/2)

	Solution 0 : Ref	Solution 1 : Rev (Incertitude autorisation)	Solution 2 : US	Solution 3 : Rob int		Solution 4 : Rob Pres
CAPEX		<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemande(décapage + peinture) : 200 €/m2 (couche antifouling, pas besoin d'anticorrosion) PGL : pour 3 flotteurs (7200 m2), 1,5 - 2,5 M€ (Devis pour le revêtement SigmaGlide de PPG)</p> <p>1,5 - 2,5 M€</p> <p>Source chiffres: Etude choix investissements PGL et etude changement grilles de prise d'eau de l'Allement</p>	<p>Frais d'ingénierie Coût de l'équipement ultrasons Installation sur place</p> <p>PGL : avec OES Group. Pour toute la surface des 3 flotteurs 650 k€ (+ 100 transducteurs; surement avec raccordement vu la différence de prix?) . Pour les 10 premiers mètres des 3 flotteurs : 35 k€ (env 25 transducteurs sans raccordement)</p> <p>35-650k€ (selon la surface que l'on souhaite traiter)</p> <p>Source : Etude choix investissement PGL et devis OES Group</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot</p> <p>200 - 500 k€</p>	<p>Robot type AUV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot</p> <p>500 - 1000 k€</p>	
			Raccordement à la terre (17 km) pour l'alimentation électrique	Alimentation et raccordement électrique si nécessaire		
				Coût formation main d'œuvre : en termes immobilisation		
				Prévoir le stockage du robot : petit local?		
OPEX	<p><u>Maintenance biofouling</u> PGL : 2 campagnes de nettoyage tous les 3 ans (23 jours par campagne) --> 10 interventions</p> <p>2,7 M€</p> <p>Source chiffre: Etude choix investissements PGL</p>	<p>Inspection : fréquence à définir, possibilité d'utiliser des ROV pour ça mais il faut aller sur place</p>	<p>Contrôle et maintenance éventuelle de système : remplacement de transducteurs, des câbles entre les transducteurs... Garantie 10 ans--> remplacement total peut être</p> <p>35 - 650k€ (selon la surface que l'on souhaite traiter)</p> <p>PGL : Fréquence de nettoyage : comme dans le cas 1. Nettoyage tous les 4 ans avant la fin de la garantie (7-8 ans en général) et tous les ans après --> 9 interventions</p> <p>Pour 9 campagnes de nettoyage : 350 - 450 k€</p> <p>Source chiffre : Adaption des 630 k€ pour 13 campagnes de PGL à 9 interventions (contrat avec Fleetcleaner a priori).</p>	<p>Transport, main d'œuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence utilisation : 12 fois /an, un bateau, équipe de 5 personnes</p>	<p>A priori : équipe de contrôle in shore. 1 à 2 personnes</p>	<p>Coût du service au prestataire : contrat</p> <p>On peut penser 50 - 100 k€ pour 1 intervention (détail dans sources en dessous). Fréquence intervention : Cas 4 (robot prestataire + revêtement): 1 à 2 fois/an. Ici 1 fois par 1 à 2 mois soit 8 interventions par an soit 120 interventions sur 15 ans 6 - 12 M€ (sans prendre en compte les facteurs d'échelle ou de contractualisation, instinctivement 4- 7 M€)</p> <p>Sources :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entretien avec Cybernetix 100 k€ pour 10 interventions par an (contrat inshore type barrage, 1000m2). On peut penser pour l'offshore en vue de la difficulté d'aller sur place et le matériel : 100 k€ pour 1 ou 2 intervention par an. -De plus, Etude de choix investissment de PGL (voir E 30) : 630 k€ pour 13 campagnes de nettoyage léger sur revêtement soit env 50 k€/intervention --> 50 - 100 k€/intervention
	<p>Changement éventuel des structures endommagées Prix de trois flotteurs</p>	<p>Nettoyage tous les 4 ans avant la fin de la garantie (7-8 ans en général) et tous les ans après --> 9 interventions</p> <p>PGL : contrat de nettoyage à partir de la fin de la garantie (7 ans) ; 630 k€ pour 13 campagnes de nettoyage (surement avec Fleetcleaner)</p> <p>Pour 9 campagnes de nettoyage : 350 - 450 k€</p> <p>Source chiffre : Adaption des 630 k€ pour 13 campagnes de PGL à 9 interventions.</p>	<p>Consommation électrique 2100 Watt (continu)--> sur 15 ans : 276 MWh</p> <p>27 k€ (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	Gestion des déchets		?Main d'œuvre support?
					<p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 12 fois/an, vitesse nettoyage 500m2/h (5 h par flotteur)--> > 60 h/an sur 15 ans : 1,8 - 4,5 MWh</p> <p>200 - 450 € (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	
Impacts sur les recettes	<p>? Pertes de performances si structure penche ? Arrêts ou indisponibilités du matériel éventuelles</p>	<p>Pertes de performance</p> <p>Arrêts, indisponibilités</p>	<p>Pertes de performance</p> <p>Arrêts, indisponibilités</p>	<p>Pertes de performance</p> <p>Arrêts, indisponibilités</p>		<p>Pertes de performance</p> <p>Arrêts, indisponibilités</p>

ATE pour le cas d'étude Eolien flottant (2/2)

	Solution 5 : Rev + US Incertitude autorisation revêtement, ultrasons	Solution 6 : Rev + Rob int		Solution 7 : Rev + Rob Pres
CAPEX	<p>Frais d'ingénierie Coût de l'équipement ultrasons Installation sur place</p> <p>PGL : avec OES Group. Pour toute la surface des 3 flotteurs 650 k€ (+ 100 transducteurs; surement avec raccordement vu la différence de prix?) . Pour les 10 premiers mètres des 3 flotteurs : 35 k€ (env 25 transducteurs sans raccordement)</p> <p>35-650k€ (selon la surface que l'on souhaite traiter)</p> <p>Source : Etude choix investissement PGL et devis OES Group</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot</p> <p>200 - 500 k€</p>	<p>Robot Type AUV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot</p> <p>500 - 1500 k€</p>	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemande(décapage + peinture) : 200 €/m2 (couche antifouling, pas besoin d'anticorrosion) PGL : pour 3 flotteurs (7200 m2), 1,5 - 2,5 M€ (Devis pour le revêtement SigmaGlide de PPG)</p> <p>1,5 - 2,5 M€</p> <p>Source chiffre: Etude choix investissements PGL et etude changement grilles de prise d'eau de l'Allement</p>
	<p>Raccordement à la terre (17 km) pour l'alimentation électrique</p>	<p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p>		
	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemande(décapage + peinture) : 200 €/m2 (couche antifouling, pas besoin d'anticorrosion) PGL : pour 3 flotteurs (7200 m2), 1,5 - 2,5 M€ (Devis pour le revêtement SigmaGlide de PPG)</p> <p>1,5 - 2,5 M€</p> <p>Source chiffre: Etude choix investissements PGL et etude changement grilles de prise d'eau de l'Allement</p>	<p>Coût formation main d'œuvre : en termes immobilisation</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p>	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemande(décapage + peinture) : 200 €/m2 (couche antifouling, pas besoin d'anticorrosion) PGL : pour 3 flotteurs (7200 m2), 1,5 - 2,5 M€ (Devis pour le revêtement SigmaGlide de PPG)</p> <p>1,5 - 2,5 M€</p> <p>Source chiffres: Etude choix investissements PGL et etude changement grilles de prise d'eau de l'Allement</p>	
OPEX	<p>Contrôle et maintenance éventuelle de système : remplacement de transducteurs, des cables entre les transducteurs... Garantie 10 ans--> remplacement total peut être</p> <p>35 - 650k€ (selon la surface que l'on souhaite traiter)</p> <p>Nettoyage : double systeme donc a priori assez efficace. PGL : Fréquence de nettoyage : 2 campagnes pendant 10 ans (fin de garantie) et 2 campagnes tous les 3 ans après soit <u>3 campagnes sur 15 ans.</u></p> <p>Pour 3 campagnes de nettoyage : 100 - 200 k€</p> <p>Source : Adaption des 630 k€ pour 13 campagnes de PGL pour 3 interventions et adaptation des marges d'erreurs.</p>	<p>Transport, main d'œuvre pour faire fonctionner le robot.</p> <p>Fréquence utilisation : 2 à 3 fois /an (quitte à adapter la fréquence en fonction de l'efficacité), un bateau, équipe de 2 - 5 personnes</p>	<p>A priori : équipe de contrôle in shore. 1 à 2 personnes</p>	<p>Cout du service au prestataire : contrat</p> <p>On peut penser 50 - 100 k€ pour 1 intervention (détail dans sources en dessous). Fréquence intervention : voir Cas 1 PGL (revêtement sans nettoyage proactif) Nettoyage tous les 4 ans avant la fin de la garantie (7-8 ans en général) et tous les ans après --> 9 interventions. Pour faire un nettoyage proactif : on peut envisager 1 à 2 fois tous les ans soit 15 à 30 interventions</p> <p>750 - 1,5 M€ (1 fois/an) 1,5 - 3 M€ (2 fois/an)</p> <p>Sources :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entretien avec Cybernetix 100 k€ pour 10 interventions par an (contrat inshore type barrage, 1000m2). On peut penser pour l'offshore en vue de la difficulté d'aller sur place et le matériel : 100 k€ pour 1 ou 2 intervention par an. -De plus, Etude de choix investissement de PGL (voir E 30) : 630 k€ pour 13 campagnes de nettoyage léger sur revêtement soit env 50 k€/intervention --> 50 - 100 k€/intervention
	<p>Pour les 10 premiers m: Consommation électrique 2100 Watt (continu)--> sur 15 ans : 276 MWh</p> <p>27 k€ (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	<p>Gestion des déchets</p>		<p>?Main d'œuvre support?</p>
			<p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 2 à 3 fois/an, vitesse nettoyage 500m2/h --> 15 h/an sur 15 ans : 500 - 1000 kWh</p> <p>5 - 10 € (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	
Impacts sur les recettes	<p>Pertes de performance</p>	<p>Pertes de performance</p>		<p>Pertes de performance</p>
	<p>Arrêts, indisponibilités</p>	<p>Arrêts, indisponibilités</p>		<p>Arrêts, indisponibilités</p>

Annexe 10 : Exploitation des données issues de l'ATE pour le cas d'étude éolien flottant (le TAC est calculé avec un taux d'actualisation propre au secteur éolien flottant de 15%)

	Solution 0 (Référence)	Solution 1 : Revêtement	Solution 2 : US	Solution 3 : Rob Int		Solution 4 : Rob Pres	Solution 5 : Revêtement + US	Solution 6 : Revêtement + Rob Int		Solution 7 : Revêtement + Rob Pres
Efficacité présumée	0	*+	*-	*+	*+	*+	**-	**+	**+	**+
CAPEX global moyen (en €)	0	2,00E+06	3,43E+05	3,50E+05	7,50E+05	0	2,55E+06	2,35E+06	3,00E+06	2,00E+06
OPEX global moyen (en €)	2,70E+06	4,00E+05	7,43E+05	5,00E+05	5,00E+05	9,00E+06	5,23E+05	5,00E+05	5,00E+05	2,25E+06
TAC (total annualized cost) en €/an	1,80E+05	3,69E+05	1,08E+05	9,32E+04	1,62E+05	6,00E+05	4,71E+05	4,35E+05	5,46E+05	4,92E+05
TAC Différentiel : Différences des TAC de Sn par rapport à S0 TAC_{Sn}-TAC_{S0} (en €/an)	0,00E+00	1,89E+05	-7,19E+04	-8,68E+04	-1,84E+04	4,20E+05	2,91E+05	2,55E+05	3,66E+05	3,12E+05

Annexe 11 : ATE pour le cas d'étude Conduite béton de CNPE (1/2)

	Solution 0 : Ref	Solution 1 : Rev	Solution 2 : Rob int
CAPEX		<p>Nettoyage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling)</p> <p>Pour la conduite : 1100 M€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allement</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot Formation de la main d'oeuvre 200 - 500 k€</p> <p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p>
OPEX	<p>LES CHIFFRES DONT ON DISPOSE SONT POUR DES GRILLES ET PAS DES CONDUITES BETON</p> <p>assez difficile d'adapter les chiffres pour des grilles à des conduites puisque c'est des surfaces beaucoup plus réduites où le biofouling se concentre et ce n'est sûrement pas la même répartition dans les conduites</p> <p>Maintenance biofouling Fréquence surveillance : conduite ouverte tous les 3 ans environ</p> <p>Nettoyage : dans le cas où il y a 5 colmatages (un à chaque surveillance)</p> <p>1 - 1,5 M€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Mettons que 20% de la conduite soit colonisée: on peut imaginer une intervention à 200 - 300 k€.</p>	<p>Inspection : fréquence à définir, possibilité d'utiliser des ROV pour ça. Conduite ouverte tous les 3 ans.</p>	<p>Main d'oeuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence d'utilisation : 1 fois/ 3 ans</p>
	<p>Changement éventuel des structures endommagées</p>	<p>Surveillance tous les 3 ans, nettoyage éventuel à ce moment là. Revêtement garanti 8 ans : on peut penser à 3 nettoyages plongeur sur 15 ans</p> <p>150 - 300 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Mettons que 5% de la conduite est très colonisée (4 fois moins que le cas de ref): on peut imaginer une intervention à 50 - 100 k€, on se divise pas par 4 mais plutôt par 3 la quantité de travail ne fait pas tout le prix).</p>	<p>Gestion des déchets</p>
			<p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 24 fois/an, vitesse nettoyage 200m2/h --> 500 h/an sur 15 ans : 8 - 40 MWh 800 – 4000 €</p>
Impact sur les recettes	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance
	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités

ATE pour le cas d'étude Conduite béton de CNPE (2/2)

	Solution 3 : Rob pres	Solution 4 : Rev + rob int	Solution 5 : Rev + rob pres
CAPEX		<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot Formation de la main d'oeuvre 200 - 500 k€</p> <p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p> <p>Nettoyage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling)</p> <p>Pour la conduite : 1100 M€</p>	<p>Nettoyage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allement (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling)</p> <p>Pour la conduite : 1100 M€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allement</p>
OPEX	<p>Surveillance tous les 3 ans, on ne nettoie que quand la conduite est ouverte soit 5 nettoyages en tout</p> <p>1 - 1,5 M€ (sans prendre en compte les effets de contractualisation qui baisseront sûrement le prix)</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Mettons que 20% de la conduite est très colonisée (comme dans le cas de ref); on peut imaginer une intervention à 200 - 300 k€.</p>	<p>Main d'œuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence d'utilisation : 1 fois/3 ans</p>	<p>Surveillance tous les 3 ans, on ne nettoie que quand la conduite est ouverte soit 5 nettoyages en tout</p> <p>250 - 500 k€ (sans prendre en compte les effets de contractualisation qui baisseront sûrement le prix)</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Mettons que 5% de la conduite est très colonisée (4 fois moins que le cas de ref); on peut imaginer une intervention à 50 - 100 k€, on se divise pas par 4 mais plutôt par 3 la quantité de travail ne fait pas tout le prix).</p>
		<p>Gestion des déchets</p> <p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 6 fois/an, vitesse nettoyage 200 m2/h --> 120 h/an sur 15 ans : 2 - 10 MWh 200 - 1000 €</p>	
Impact sur les recettes	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance
	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités

Annexe 12 : Exploitation des données issues de l'ATE pour le cas d'étude Conduite béton de CNPE (le TAC est calculé avec un taux d'actualisation propre au secteur nucléaire de 8%)

	Solution 0 (Référence)	Solution 1 : Revêtement	Solution 2 : Rob Int	Solution 3 : Rob Pres	Solution 4 : Revêtement + Rob Int	Solution 5 : Revêtement + Rob Pres
Efficacité présumée	0	*+	*+	*+	**+	**+
CAPEX global moyen (en €)		1,10E+06	3,50E+05	0	1,45E+06	1,10E+06
OPEX global moyen (en €)	1,25E+06	2,15E+05	1,00E+05	1,25E+06	1,00E+05	3,75E+05
TAC (total annualized cost) en €/an	8,33E+04	1,43E+05	4,76E+04	8,33E+04	1,76E+05	1,54E+05
TAC Différentiel : Différences des TAC de Sn par rapport à S0 $TAC_{Sn} - TAC_{S0}$ (en €/an)	0,00E+00	5,95E+04	-3,58E+04	0,00E+00	9,27E+04	7,02E+04

Annexe 13 : ATE pour le cas d'étude Grille de pertuis de CNPE (1/2)

	Solution 0 : Ref	Solution 1 : Rev	Solution 2 : US	Solution 3 : Rob int	Solution 4 : Rob pres
CAPEX		<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemant (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling uniquement)</p> <p>18 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allement</p>	<p>Frais d'ingénierie Coût de l'équipement ultrasons Installation sur place</p> <p>Devis : pour toute la surface des grilles 16 transducteurs</p> <p>20 k€</p> <p>Source : devis OES GROUP</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot Formation de la main d'oeuvre</p> <p>200 - 500 k€</p> <p>On pourrait envisager de mutualiser le ROV en l'utilisant aussi pour d'autres centrales hydroélectriques ou CNPE.</p> <p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p>	
			Raccordement et alimentation électrique		
OPEX	<p>Maintenance biofouling Fréquence surveillance à chaque arrêt de tranche : une fois tous les 12 à 18 mois --> sur 15 ans : 12 observations.</p> <p>Nettoyage : dans le cas où il y a 12 colmatages (un à chaque surveillance)</p> <p>600 - 900 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 8 grilles, on peut penser à 50 - 75 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 et pas 8).</p>	<p>Surveillance tous les arrêts de tranche , nettoyage éventuel à ce moment là (2 nettoyage pendant garantie, 3 autres après : 5 nettoyages plongeur sur 15 ans). NB : c'est plus fréquent por le même cas quand l'hydroélectrique, c'est juste parce que l'occasion se présente plus ici.</p> <p>250 - 375 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 8 grilles, on peut penser à 50 - 75 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 et pas 8).</p>	<p>Contrôle et maintenance éventuelle de système : remplacement de transducteurs, des cables entre les transducteurs... Système garanti 10 ans. 1 remplacement 40 k€</p> <p>Surveillance tous les arrêt de tranche , nettoyage éventuel à ce moment là (2 nettoyage pendant garantie, 3 autres après : 5 nettoyages plongeur sur 15 ans). NB : c'est plus fréquent por le m^me cas quand l'hydroélectrique, c'est juste parce que l'occasion se présente plus ici.</p> <p>250 - 375 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 8 grilles, on peut penser à 50 - 75 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 et pas 8).</p>	<p>Main d'œuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence d'utilisation : 12 à 24 fois/an Main d'œuvre et couts de maintenance du robot</p>	<p>Surveillance tous les arrêts de tranche , nettoyage à ce moment là. 12 interventions.</p> <p>600 - 900 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 8 grilles, on peut penser à 50 - 75 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 et pas 8).</p>
	Changement éventuel des structures endommagées Prix de 8 grilles		<p>Consommation électrique 2100 Watt (continu)--> sur 15 ans : 276 MWh</p> <p>27 k€ (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	Gestion des déchets	
				<p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 24 fois/an, vitesse nettoyage 200m2/h --> 250 h/an sur 15 ans : 5 - 20 MWh</p> <p>500 - 2000 €</p>	
Impact sur les recettes	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance
	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités

ATE pour le cas d'étude Grille de pertuis de CNPE (2/2)

	Solution 5 : Rev + US	Solution 6 : Rev + rob int	Solution 7 : Rev + rob pres
CAPEX	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemant (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling uniquement)</p> <p>18 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allemant</p>	<p>Robot type ROV</p> <p>Etudes d'ingénierie Coût du robot Formation de la main d'oeuvre</p> <p>200 - 500 k€</p> <p>On pourrait envisager de mutualiser le ROV en l'utilisant aussi pour d'autres CHE ou CNPE.</p> <p>Alimentation et raccordement électrique si nécessaire</p> <p>Prévoir stockage du robot : petit local?</p>	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles AlleEnt (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling uniquement)</p> <p>18 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allemant</p>
	<p>Frais d'ingénierie Coût de l'équipement ultrasons Installation sur place</p> <p>Devis : pour toute la surface des grilles 16 transducteurs</p> <p>20 k€</p> <p>Source : devis OES GROUP</p>	<p>Nettoyage et décapage de la surface si nécessaire Coût de la peinture et des différentes couches Pose de la peinture</p> <p>Changement grilles Allemant (décapage + peinture) : 200 €/m2 (antifouling uniquement)</p> <p>18 k€</p> <p>Source prix : Changement des grilles de l'Allemant</p>	
OPEX	<p>Contrôle et maintenance éventuelle de système : remplacement de transducteurs, des câbles entre les transducteurs... Système garanti 10 ans. 1 remplacement</p> <p>40 k€</p> <p>Surveillance tous les arrêts de tranche , nettoyage éventuel à ce moment là. A priori plus propre que dans les cas 1 et 2 (1 nettoyage pendant garantie, 2 autres après : 3 nettoyages sur 15 ans).</p> <p>150 - 215 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 8 grilles, on peut penser à 50 - 75 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 et pas 8).</p>	<p>Main d'oeuvre pour faire fonctionner le robot. Fréquence d'utilisation : 6 fois/ an</p>	<p>Surveillance tous les arrêts de tranche , nettoyage à ce moment là. 12 interventions.</p> <p>420 - 750 k€</p> <p>Source chiffre : Hervé Davaux, évènement colmatage de grilles de pertuis Penly nettoyage par plongeur 10 - 15 k€ par une grille de 11 m2. Pour un nettoyage complet des 8 grilles, on peut penser à 50 - 75 k€/ intervention (les plongeurs et le matériel sont déjà là, ils travaillent juste plus longtemps d'où multiplication du prix de la prestation de Penly pour 10 m2 par un facteur 5 et pas 8). Mais moins colonisée donc on peut considérer 35 - 50 k€ l'intervention</p>
	<p>Consommation électrique 2100 Watt (continu)--> sur 15 ans : 276 MWh</p> <p>27 k€ (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>	<p>Gestion des déchets</p>	
			<p>Consommation électrique</p> <p>2-5 kW fréquence 6 fois/an, vitesse nettoyage 200 m2/h --> 30 h/an sur 15 ans : 900 - 2250 kWh</p> <p>90 - 200 € (0,1 €/ kWh)</p> <p>Source : prix kWh DACE Price Booklet, Thibaut Neveux</p>
Impact sur les recettes	Pertes de performance	Pertes de performance	Pertes de performance
	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités	Arrêt, indisponibilités

Annexe 14 : Exploitation des données issues de l'ATE pour le cas d'étude Grilles de puits de CNPE (le TAC est calculé avec un taux d'actualisation propre au secteur nucléaire de 8%)

	<i>Solution 0 (Référence)</i>	Solution 1 : Revêtement	Solution 2 : US	Solution 3 : Rob Int	Solution 4 : Rob Pres	Solution 5 : Revêtement + US	Solution 6 : Revêtement + Rob Int	Solution 7 : Revêtement + Rob Pres
Efficacité présumée	0	*+	*-	*+	*+	**-	**+	**+
CAPEX global moyen (en €)		1,80E+04	2,00E+04	3,50E+05		3,80E+04	3,70E+05	1,80E+04
OPEX global moyen (en €)	7,50E+05	3,13E+05	3,58E+05	1,00E+05	7,50E+05	2,35E+05	1,00E+05	5,85E+05
TAC (total annualized cost) en €/an	5,00E+04	2,29E+04	2,62E+04	4,76E+04	5,00E+04	2,01E+04	4,99E+04	4,11E+0
TAC Différentiel : Différences des TAC de Sn par rapport à S0 TAC_{Sn}-TAC_{S0} (en €/an)	0,00E+00	-2,71E+04	-2,38E+04	-2,44E+03	0,00E+00	-2,99E+04	-1,06E+02	-8,90E+03

Annexe 15 : Méthode d'analyse initiale des données de la biobox

Indice et description					
0	1	2	3	4	5
coupon propre, pas d'organisme	quelques filaments, colonisation faible <5%	quelques organismes de petite taille, colonisation 5-25%	organismes de taille moyenne, colonisation 25-50%	colonisation importante 50-75%	coupon complètement recouvert d'organisme, colonisation 75-100%

Indice 0



Coupon PPG Si530, 29/01/2020

Indice 1



Coupon HP x3, 29/01/2020

Indice 3



Coupon HP x3, 29/01/2020

Indice 5



Coupon béton brut, 29/01/2020



Coupon HP X7, 29/01/2020



Coupon I1100, 29/01/2020

Indice 4



Coupon I1100, 19/11/2019

Indice 2



Coupon HP x3, 30/09/2019



Coupon FINSU, 29/01/2020

English summary (164 words):

Biofouling is the accumulation of microorganisms, plants, algae or crustaceans on wetted surfaces. This occurs on all submerged surfaces, EDF power production sites are not spared. Nuclear power plant cooling systems, dams' grates and wind turbine floaters are experiencing marine growth accumulation.

As biofouling is a widespread problem that can cause structural and functional deficiencies and lead to significant financial losses, many different solutions exist to prevent marine growth to settle. One of the most efficient solutions is the use of biocidal treatment. However the search for innovative ecofriendly solutions is a major challenge for EDF.

The objective of this internship is to identify innovative alternative solutions and to evaluate them in order to found out if it is possible and economically viable to implement them on different power production sites. In order to do so, a bibliographical summary and a technical and economic feasibility assessment have been made. A coating test procedure has also been set up and the results have been analysed.

Key words: biofouling, innovative solutions, non-biocidal treatments, power production, technical and economic feasibility assessment

Résumé en français (180 mots) :

Les ouvrages de production d'électricité en milieu aquatique (circuit de refroidissement des centrales électriques, éolien flottant, conduite sous-marine, etc.) sont sujets au développement du biofouling c'est-à-dire à la colonisation et l'encrassement par des organismes vivants (microorganismes et macroorganismes d'origine animale ou végétale).

Le biofouling peut fortement perturber le fonctionnement des installations (ex. baisse de disponibilité, corrosion précoce, etc.) et entraîner des pertes financières non négligeables. De nombreuses solutions existent dans les industries navales et de l'énergie pour lutter contre le biofouling notamment avec l'utilisation de traitements biocides.

La recherche de solutions innovantes, respectueuses de l'environnement et alternatives aux traitements biocides représente un fort enjeu pour EDF. L'objectif de ce stage est d'étudier la faisabilité de mise en œuvre de couplage de solutions innovantes pour lutter contre le biofouling des ouvrages de production d'électricité en milieu aquatique. Pour cela, une synthèse bibliographique et une étude technico-économique des technologies innovantes de lutte contre le biofouling ont été réalisées afin de recenser et d'évaluer les différentes techniques. Pour répondre à des besoins à plus court terme, un dispositif de test de différents revêtements a été mis en place et les données récoltées ont été analysées afin de comparer les revêtements.

Mots clés : encrassement biologique, étude technico économique, milieu marin ou eaux douces, production d'électricité, produits non biocides, technologies innovantes