

Nom du candidat :

Prénoms :

N° Candidat : A BCPST -

Noms des auteurs

STALLER Enora

KHALFOUN Sofia

KOKUS Elis

MATTER Alice

Dominante BIOLOGIE

Dominante GÉOLOGIE

MIXTE

Surligner la dominante du TIPE

en cas de travail commun :

BANQUE AGRO-VETO - Session 2024 T.I.P.E.

Maximum 8 pages (illustrations comprises), Times New Roman 12 ou Arial 10, interligne simple.

20 000 caractères maximum

IMPORTANT : n'inscrire sur cette couverture aucune référence à l'établissement scolaire

TITRE : Comparaison de deux types d'antifouling pour sport de voiles

RÉSUMÉ (en six lignes) :

En empêchant l'accrochage d'organismes et d'impuretés sur les coques de voiliers, les peintures antifouling préservent leurs performances, mais soulèvent la question de la pollution du milieu aquatique. C'est pourquoi nous avons comparé l'efficacité des formules avec et sans biocides de ces peintures, en immergeant des plaques peintes, puis en quantifiant le fouling adhérent, puis celui se décrochant dans des conditions variables. Nous avons constaté que les antifouling sont inefficaces les premières semaines, mais ceux sans biocides gagnent en efficacité après plusieurs semaines.

Nombre de caractères (espace compris) : 13 015

INTRODUCTION :

Le fouling est un terme anglophone désignant le phénomène d'encrassement d'une coque de bateaux, par accumulation de particules ou d'organismes, ce qui en modifie ses performances hydrodynamiques [1]. Pour l'éviter, une couche de peinture anti-accrochage, appelée antifouling, peut être appliquée. L'antifouling est notamment utilisé pour le traitement des coques des voiliers de course. En effet, le fouling diminue l'hydrodynamisme des voiliers et donc leurs performances en augmentant la masse du bateau et la surface de frottement.

90% des antifouling commercialisés sont à base de biocides (page 14 de [2]). Ces substances nocives pour les organismes (page 5 de [3]) peuvent également l'être pour les organismes marins n'étant pas sujets au fouling et participant à la biodiversité. De nombreuses réglementations sur l'utilisation des antifouling ont donc été mises en place (page 2 de [4]).

Des alternatives à base de silicone ont été mises au point. Leur efficacité repose sur une action purement physique d'inhibition de l'accrochage des organismes. Néanmoins, cette alternative reste peu utilisée d'après les responsables des centres de voiles que nous avons contactés. Ce manque d'attrait pour ces "nouveaux" antifouling serait lié à un préjugé des utilisateurs selon lequel les antifouling contenant des biocides seraient plus efficaces que ceux n'en contenant pas. Une difficulté d'application et un coût plus élevé sont également des aspects limitant l'usage des antifouling sans biocides [4].

Les deux antifouling, avec et sans biocides, ont des modes d'utilisation différents. En effet, pour être efficace, l'application d'antifouling sans biocides doit être régulièrement couplée à un essuyage de la coque, (page 4 de [4]). Cette action est contraignante car l'essuyage doit se faire régulièrement lorsque le voilier reste amarré (page 16 de [6]).

Dans ce TIPE, nous comparons l'efficacité de deux antifouling, l'un contenant des biocides et l'autre n'en contenant pas, afin de savoir si cette idée reçue sur les "nouveaux antifouling" peut être non confortée par l'expérience.

Nous avons placé des échantillons de matériaux recouverts d'antifouling en conditions immergées réelles et analysé le fouling formé.

I. Dispositif expérimental

a) Montage des plaques

Les deux antifouling sont testés sur des plaques de PVC (matériau généralement utilisé pour la coque des voiliers). Monsieur Lollivier de l'entreprise Nautix, que nous avons démarché, a accepté de nous envoyer des plaques sur lesquelles ont été déposés un antifouling avec biocides (Nautix A4 Yachting blanc), un antifouling sans biocides (Seajet Pellerclean transparent) et une surface témoin sans antifouling.

Chaque surface de dépôt a été préalablement recouverte d'un primaire d'accroche pour assurer l'adhérence de l'antifouling et un tie-coat silicone a été appliqué entre le primaire et l'anti-fouling sans biocides pour assurer l'adhésion de ce dernier.

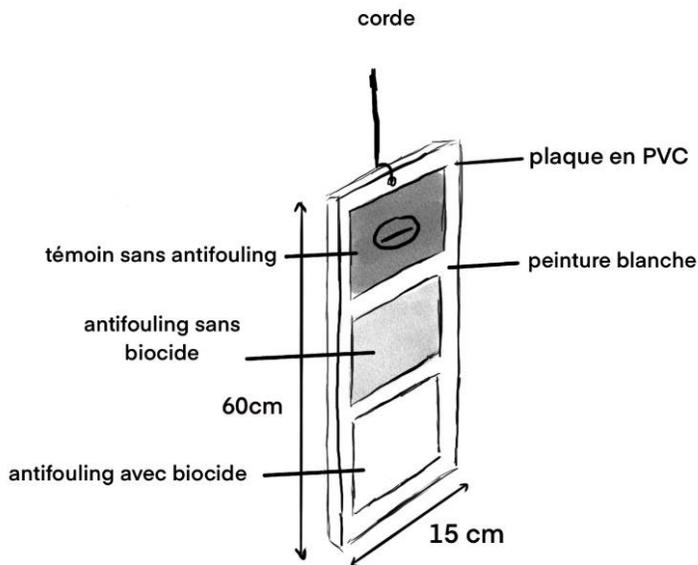


Figure 1 : schéma des plaques traitées

b) Mise à l'eau

Nous avons immergé les plaques dans l'Ill (un bras du Rhin) à Strasbourg de fin novembre 2023 jusqu'à mars 2024. Un poids permet de maintenir la plaque verticalement dans l'eau de malgré le courant.

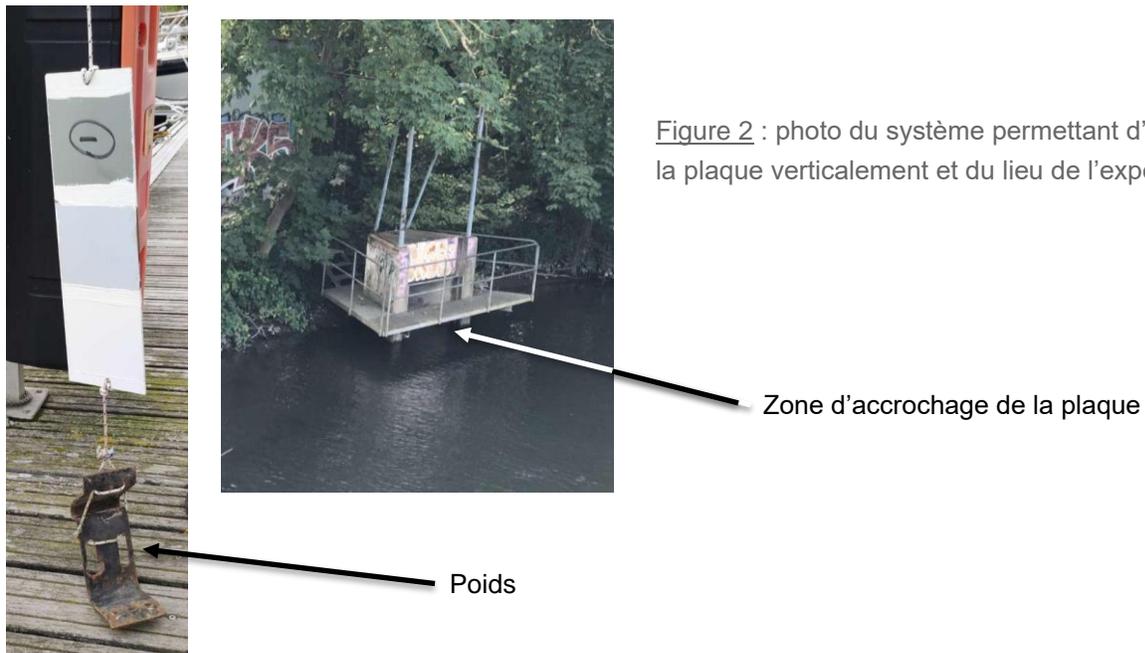


Figure 2 : photo du système permettant d'accrocher la plaque verticalement et du lieu de l'expérience.

c) Déroulement des expériences

Nous avons étudié de deux manières différentes l'efficacité de chaque traitement au cours du temps car les modes d'actions des deux antifouling diffèrent.

❖ **Estimation de la quantité de fouling qui adhère par suivi photographique (programme python) :**

Nous avons pris régulièrement des photographies des plaques de fin novembre 2023 à mars 2024.

Nous avons créé un programme Python qui prend en entrée une image (photo) et renvoie la proportion de pixels plus foncés correspondant aux micro-organismes et impuretés (micro-organismes morts, débris divers, argiles...) adhérant à la plaque.

Le principe est le suivant :

En prenant, sur une même photo, la plaque immergée et une plaque témoin propre, nous avons défini un seuil de valeurs RVB à partir de la plaque témoin, sous la forme d'une liste de 3 valeurs (plus la surface sera foncée et plus les valeurs RVB seront faibles). Le programme, à partir de la photo de la plaque immergée, compte chaque pixel pour lesquelles les 3 valeurs RVB sont inférieures ou égales au seuil témoin. Puis nous divisons le nombre de pixels vérifiant la condition par le nombre total de pixels de la photo. La valeur renvoyée rend compte de la proportion d'impuretés et micro-organismes présents pour un antifouling donné.

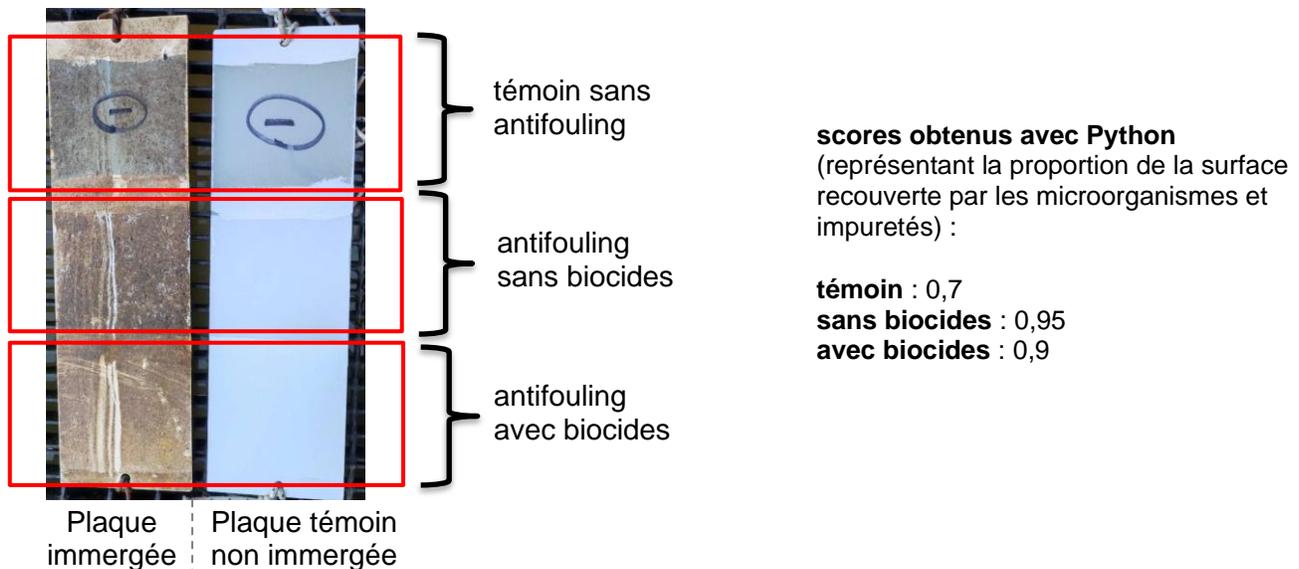


Figure 3 : exemple de photo où se trouvent à la fois la plaque d'expérience et la plaque témoin après 9 semaines d'immersion.

❖ **Estimation de la quantité de fouling qui se détache par comptage (logiciel Mesurim 2) :**

Après chaque photo prise (à partir de la deuxième semaine d'immersion), nous avons prélevé des échantillons de fouling sur les 3 secteurs de la plaque avec un unique passage de coton-tige effectué avec une pression constante. Nous avons trempé le coton-tige dans 1 mL d'eau distillée. Nous avons ensuite prélevé 1 μL de cette solution puis nous avons réalisé un comptage sur lames de Kova du nombre d'organismes présents dans 0,1 μL [7]. Cette étape a été réalisée trois fois pour chaque condition afin de réaliser une moyenne.

Le logiciel Mesurim 2 nous a permis de compter plus efficacement qu'à l'œil nu le nombre de micro-organismes grâce aux différentes fonctionnalités réglables telles que la luminosité, le contraste, l'embossage et le négatif de l'image. L'observation a été réalisée au microscope optique au grossissement x400.

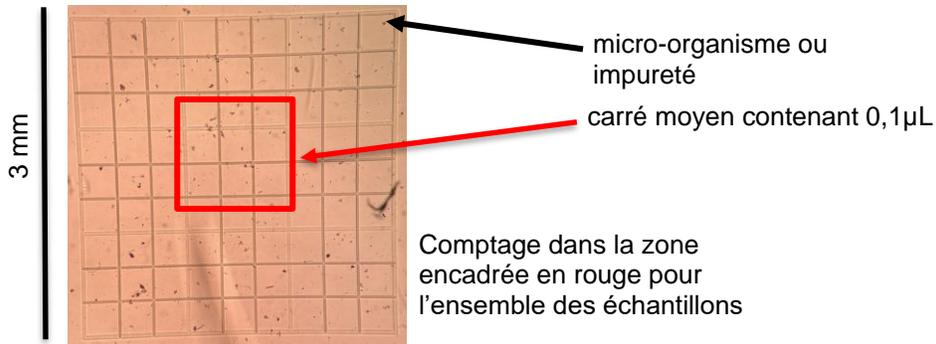


Figure 4 : Photographie du comptage de microorganismes sur lame Kova.

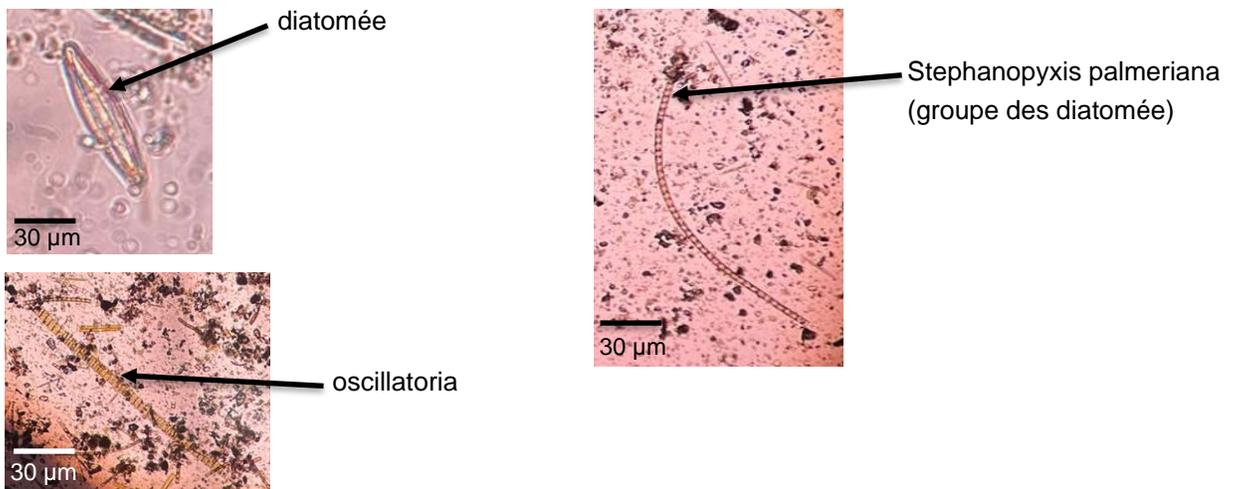


Figure 5 : Photos d'observation microscopique de micro-organismes (grossissement x400)

Afin de valider la comparaison quantitative entre les différents prélèvements lors des comptages, nous avons prélevé trois échantillons sur une plaque pour une même peinture. Ensuite, nous avons comparé les comptages sur lame Kova, ce qui nous a permis de constater que chaque échantillon contient le même ordre de grandeur du nombre d'organismes.

Nous avons calculé cette proportion à l'aide du programme sur 4 photos pour la même semaine afin de réaliser une moyenne.

Pour les études statistiques, les résultats ont été estimés avec un intervalle de confiance à 95%.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad IC_{95\%} = \left[\bar{X} - t_{n-1} \frac{s}{\sqrt{n-1}}, \bar{X} + t_{n-1} \frac{s}{\sqrt{n-1}} \right]$$

Avec : \bar{X} la moyenne, n le nombre de valeurs (pour les comptage $n=3$, pour les photos $n=4$), s l'écart-type, t_{n-1} le coefficient de Student (valeur tabulée).

II. Résultats d'estimation par suivi photographique de la quantité de fouling adhérent

a) Résultats expérimentaux

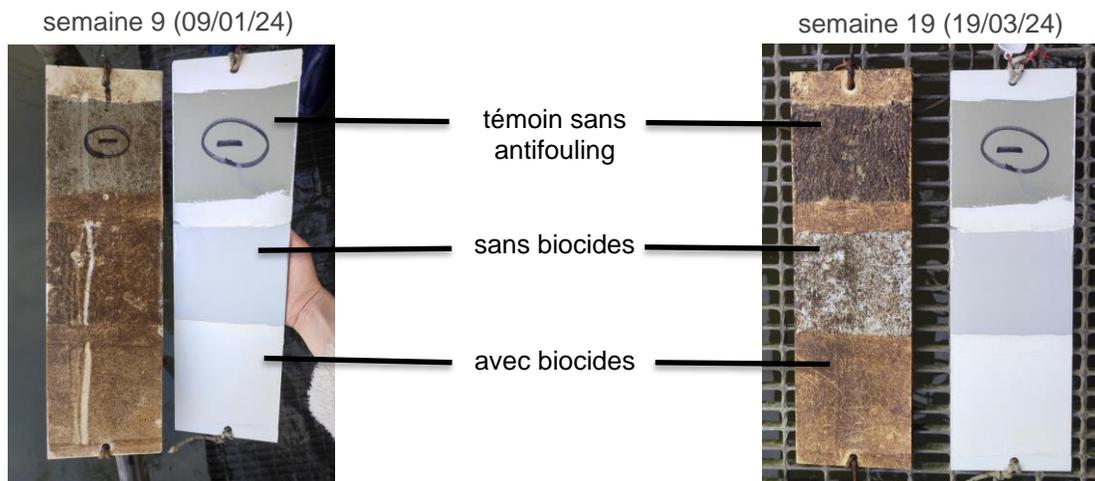
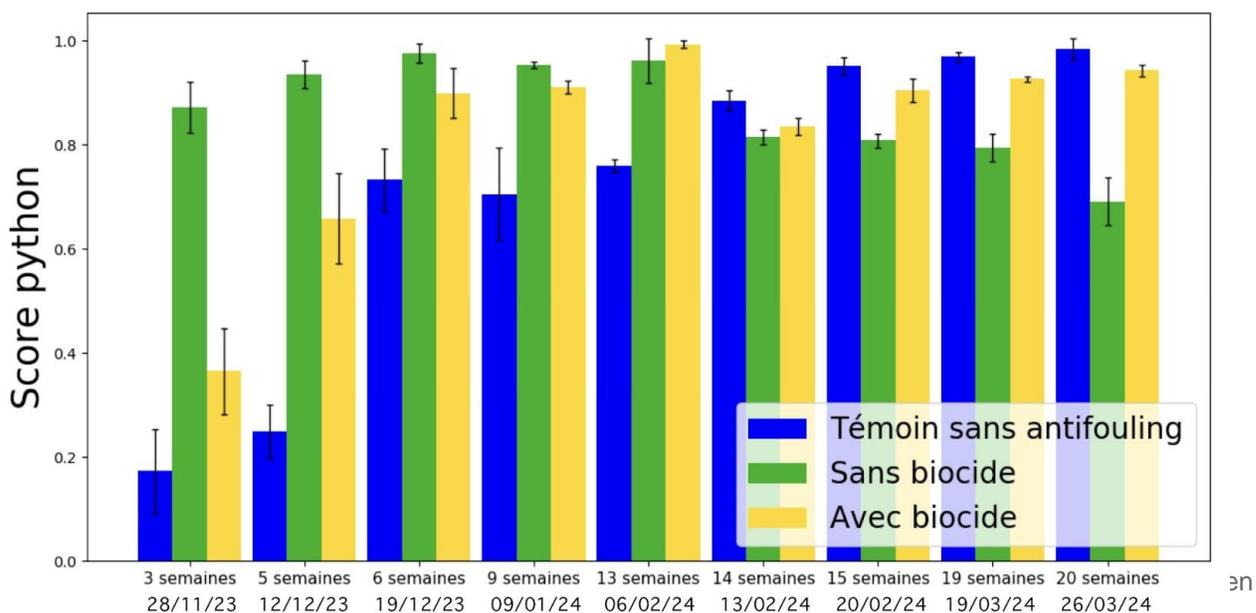


Figure 6 : Photos présentant l'évolution de l'adhérence sur les plaques au cours du temps

	Témoin	Sans biocides	Avec biocides
Semaine 9	0,7	0,95	0,9
Semaine 19	0,99	0,8	0,94

Figure 7 : Scores obtenus avec le programme Python pour les semaines 9 et 19

Un score python de 1 correspond à une surface recouverte entièrement par les micro-organismes et les impuretés. Un score python de 0 correspond à la plaque témoin propre servant de seuil.



La semaine 0 correspond à la mise à l'eau de la plaque propre, les proportions de micro-organismes accrochés y sont donc nulles pour les trois surfaces. Le nombre de semaines correspond au temps d'immersion au cours de l'expérience.

b) Analyse des résultats

Nous observons des différences significatives de la quantité de fouling selon les traitements de surface de la plaque. Selon la figure 7, au cours des premières semaines (3 à 9), une plus grande quantité de fouling est détectée sur la surface sans biocides que sur les deux autres surfaces ; de plus il y a plus de fouling sur la surface avec biocides que sur la surface témoin.

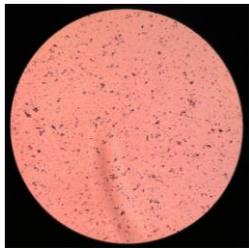
La proportion de micro-organismes et impuretés plus faible pour le témoins lors des premières semaines est étonnante car cela semble indiquer qu'il serait plus efficace de ne pas appliquer d'antifouling.

Après 14 semaines d'immersion, on constate que l'adhérence semble être plus grande sur la surface témoin que sur les deux autres (sauf pour les semaines 13 et 14 pour lesquelles les différences ne sont pas significatives) car davantage de micro-organismes et impuretés sont détectés. Par ailleurs, on constate également que l'adhérence des impuretés et micro-organismes sur la surface sans biocides devient plus faible que celle sur la surface avec biocides.

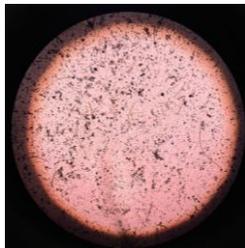
Ainsi, l'efficacité des peintures sans action d'essuyage de la coque dépend de l'échelle de temps. En effet, avant 14 semaines, les deux peintures ne sont pas efficaces dans l'inhibition de l'adhérence des organismes par rapport au témoin ; de plus la peinture sans biocides est moins efficace que celle avec biocides. Au bout de 14 semaines, l'antifouling sans biocides est plus efficace que celui avec biocides et tous deux inhibent l'adhérence des organismes par rapport à la surface témoin sans antifouling.

c) Observation du fouling

Sur la durée de nos expériences nous n'observons que du micro-fouling car le macro-fouling n'a pas le temps de se mettre en place. Il est possible d'observer à l'échelle microscopique une augmentation de la taille des éléments s'accrochant à la plaque au cours du temps du fait de la création de colonies et de la formation de biofilms :



semaine 5 (12/12/23)



semaine 13 (06/02/24)

Figure 9 : Photos d'observation microscopique de prélèvements de plaque (ici avec biocides) aux semaines 5 et 13 (grossissement x400)

L'observation microscopique permet d'émettre l'hypothèse que les colonies d'organismes plus grosses que des micro-organismes seuls, et donc plus lourdes, glissent sur la peinture sans biocides ce qui explique le fait que la proportion de surface recouverte par micro-organismes et impuretés diminue au cours du temps (figure 7).

III. Résultats d'analyse de la quantité de fouling qui se détache

a) Résultats de l'expérience

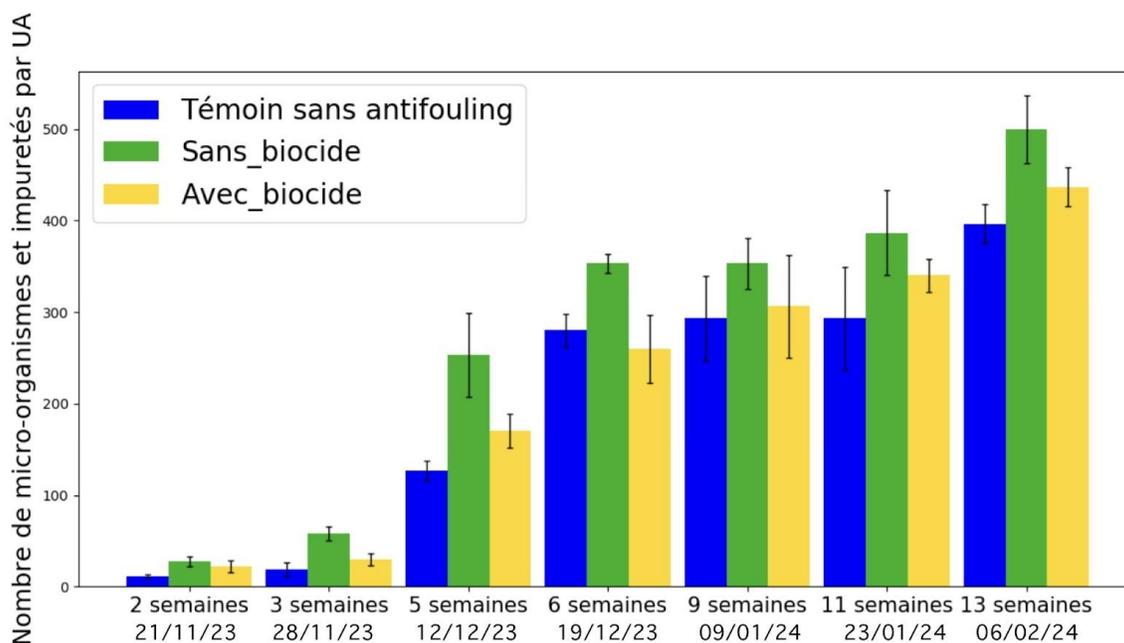


Figure 10 : Évolution de la quantité en micro-organismes et en impuretés se détachant en fonction du temps d'immersion.

La semaine 0 correspond à la mise à l'eau de la plaque propre, les proportions de micro-organismes accrochés y sont donc nulles pour les trois surfaces. Le nombre de semaines correspond au temps d'immersion au cours de l'expérience.

b) Analyse des résultats

On observe une augmentation de la quantité de micro-organismes et impuretés prélevés chaque semaine pour les trois surfaces. Ainsi, la proportion de micro-organismes sur chaque surface augmente au cours du temps. La quantité de fouling se détachant des surfaces est la même pour le témoin et l'antifouling avec biocides. Cependant, pour l'antifouling sans biocides, la quantité de micro-organismes et impuretés prélevés est significativement supérieure aux deux autres surfaces pour chaque semaine (sauf pour les semaines 1, 9 et 11). Cela indique que la surface peinte avec l'antifouling sans biocides est moins adhérente que les deux autres surfaces car le frottement induit par le coton-tige enlève plus de micro-organismes et impuretés.

De ce fait, l'antifouling sans biocides est plus efficace que l'antifouling avec biocides pour une durée de 13 semaines à condition de coupler son application à une action mécanique qui correspond à l'essuyage de la coque mimé par le coton-tige. Malgré l'absence de données exploitables au-delà de 13 semaines, nous pouvons supposer que l'adhérence du fouling sur l'antifouling sans biocide reste inférieure à celles sur antifouling avec biocides et au témoin.

CONCLUSION :

Dans nos conditions d'immersion, au cours des premières semaines, ne pas mettre d'antifouling semble être le plus judicieux car les antifouling se révèlent inefficaces (figure 7).

Cependant, au-delà de 14 semaines, l'antifouling sans biocides est plus efficace que l'antifouling avec biocides (figure 7). Si l'utilisateur de voilier essuie la coque, l'antifouling sans biocides est plus efficace même avant 14 semaines car il permet un meilleur décrochement du fouling (figure 9).

Néanmoins, la durée moyenne d'amarrage au port des bateaux est de 6 mois. Il semble alors plus pertinent pour les sportifs d'utiliser un antifouling sans biocides qui est le plus efficace après plusieurs semaines.

Ainsi, le manque d'attrait pour l'utilisation d'un antifouling sans biocides dans les sports de voile pourrait s'expliquer, non pas par un manque d'efficacité, mais plutôt par une difficulté d'application ou par un coût plus élevé.

Remerciements :

Nous remercions Guillaume Lollivier, ingénieur en revêtements protecteurs marins, travaillant pour le fabricant Nautix, de nous avoir fourni les plaques utilisées lors de nos expériences. Nous le remercions également de nous avoir partagé de nombreux renseignements sur les différentes peintures, ainsi que des conseils pour mener nos expérimentations.

Nous remercions François Schlosser, professeur attaché de laboratoire de sciences physiques, pour ses précieux conseils lors de l'installation de notre expérience et le remercions également de nous avoir proposé différents outils et logiciels pour l'exploitation de nos résultats.

Nous remercions également l'école française de voile (ACAL) située à Strasbourg de nous avoir renseignées sur l'entretien des coques en eau douce.

Enfin, nous remercions Charly Puaud, cofondateur de l'association Arvik Océan (association pour la protection des océans), de nous avoir éclairées sur nos questions et guidé au commencement de notre démarche scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

Toutes les figures sont des productions personnelles.

[1] **Rousse, Florence**, *Actu Environnement : Dictionnaire* [En ligne]. SAS COGITERRA [21 juin 2018] [consulté le 17/10/2023]. Disponible sur : https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/fouling.php4

[2] **Finistère 360°**, « *Tourisme, Nautisme & Territoires* », *Antifouling et environnement, où en sommes-nous ?* [En ligne], [avril 2019], [consulté le 07/11/2024]. Disponible sur :

https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/documentation/Rapport_Antifouling-environnement2019.pdf

[3] **Comité international olympique**, *Guide du CIO sur le sport, l'environnement et le développement durable*, [En ligne], chapitre 4, section 4.3, [consulté le 07/11/2024]. Disponible sur : https://stillmed.olympics.com/media/Document%20Library/OlympicOrg/News/23012007-IOC-Guide-to-Sport-Environment-Sustainable-Development/fr_report_1114.pdf

[4] **Union des associations de navigateurs**, *Notion fondamentale sur les peintures sous-marines anti-salissures*, [En ligne], [consulté le 03/12/2023]. Disponible sur :

https://www.unan.fr/userfiles/car%C3%A9nagelerculey_1-2.

[5] Informations données par **M. Guillaume Lollivier**, ingénieur chez Nautix

[6] **Hempel**, Brochure sur l'utilisation d'un antifouling à base de silicone, [En ligne], [consulté le 21/05/2024]. Disponible sur :

<https://www.hempelyacht.com/fr-fr/-/media/Images/HempelYacht/Files/Downloads/Brochures-and-manuals-all-lang/2022/H-Y-SilicOne-Brochure-FR-2022.pdf>

[7] *Fiche technique : Utiliser une lame de comptage KOVA*, [En ligne], [consulté le 17/10/2023]. Disponible sur :

https://dboudeau.fr/site/wp-content/uploads/2012/11/fiche_utilisation_kovac.pdf