

L'applications des matériaux superhydrophobes pour réduire les effets du givrage sur les installations maritimes

Applications of superhydrophobic materials to reduce the effects of icing on maritime installations

DIAKITE Daouda Assa

Doctorant au Département de chimie physique et colloïdale à l'Université d'Etat Russe de Pétrole et de Gaz dénommée I. M. Gubkin de Moscou (Fédération de Russie).

Enseignant-chercheur à l'Université Gamal Abdel Nasser de Conakry, République de Guinée.

NOVIKOV Andrei Alexandrovitch

Enseignant-chercheur au Département de chimie physique et colloïdale de l'Université d'Etat Russe de Pétrole et de Gaz dénommée I. M. Gubkin.

Date de soumission : 21/05/2025

Date d'acceptation : 19/06/2025

Pour citer cet article :

DIAKITE. D.A. & NOVIKOV. A. A. (2025) «L'applications des matériaux superhydrophobes pour réduire les effets du givrage sur les installations maritimes», Revue Internationale du chercheur « Volume 6 : Numéro 2 » pp : 1247-1275

Résumé

La formation et l'accumulation de glace sur les surfaces des navires et des structures offshores sont une menace pour la stabilité structurelle des infrastructures et peuvent entraîner des pertes en vies humaines. Les méthodes conventionnelles de dégivrage et d'antigivrage sont fortement consommatrices d'énergie, polluantes et peu efficace. C'est pourquoi, de nouveaux matériaux superhydrophobes antigivrants passifs sont utilisés dans de nombreuses applications pour prévenir l'accumulation et l'adhérence de la glace sur les surfaces afin d'améliorer l'efficacité énergétique, réduire les coûts d'exploitation et minimiser les risques d'accidents. Cet article passe en revue le phénomène de mouillage des surfaces solides. Les avantages et les inconvénients des modèles existants sont résumés. Les nouvelles technologies de ces dernières années de la recherche sur les revêtements superhydrophobes dotés de propriétés autonettoyantes, antibuée, antigel, anticorrosion, antisalissures, auto-réparateurs et auto-cicatrisants dans le domaine du givrage et de l'antigivrage sont mentionnées. Les revêtements superhydrophobes photothermiques et les revêtements superhydrophobes électrothermiques sont très prometteurs pour l'antigivrage passif et le dégivrage actif.

Mots clés : mouillage, givrage, superhydrophobe, antigivrage, dégivrage.

Abstract

The formation and accumulation of ice on the surfaces of ships and offshore structures is a threat to the structural stability of infrastructures and can lead to loss of human lives. Conventional defrosting and anti-icing methods are highly energy-consuming, polluting and inefficient. This is why new passive anti-icing superhydrophobic materials are used in many applications to prevent the accumulation and adhesion of ice on surfaces in order to improve energy efficiency, reduce operating costs and minimize the risk of accidents. This article reviews the phenomenon of wetting of solid surfaces. The advantages and disadvantages of existing models are summarized. The new technologies of recent years of research on superhydrophobic coatings with self-cleaning, anti-fog, anti-freeze, anti-corrosion, anti-fouling, self-repairing and self-healing properties in the field of icing and anti-icing are mentioned. Photothermal superhydrophobic coatings and electrothermal superhydrophobic coatings show great promise for passive anti-icing and active de-icing.

Key words: wetting, icing, superhydrophobic, anti-icing, de-icing.

Introduction

L'accumulation de glace a des effets importants sur diverses structures maritimes, en particulier celles situées dans des environnements océaniques froids (Luo et al., 2024). Dans un environnement à basse température, les propriétés des matériaux de structure varient considérablement, ce qui affecte les caractéristiques dynamiques de ces structures (Ibrahim et al., 2007). Les navires opérant en eaux glaciaires doivent supporter des charges supplémentaires dues à la neige sur leurs systèmes de propulsion et leurs appendices. De plus, le froid peut réduire l'efficacité de nombreux composants du navire, des machines de pont et des équipements de sauvetage nautique. La force de la neige peut également mettre en danger les structures et le littoral.

La formation de glace sur les infrastructures maritimes est due à divers facteurs tels que les embruns, la neige, le verglas, le givre. Les régions océaniques froides posent de nombreux défis environnementaux qui menacent la stabilité des navires et des structures maritimes, ainsi que la sécurité des personnes (Dehghani-Sanij et al., 2017). Les principales causes de givrage sur les navires et les structures offshore sont l'eau atmosphérique ou sèche (précipitations de pluie, de neige, de grêle et de bruine) et le givrage marin causé par la neige. Les embruns et les vagues sont les principales sources d'eau pénétrant dans les navires et les structures marines, ce qui peut entraîner un givrage dangereux. Le givrage des superstructures dû aux embruns, ainsi que le givrage atmosphérique dû à la neige, à la pluie verglaçante, à la bruine, au givre, à la neige fondante et à la glace, compromettent la sécurité de fonctionnement des plates-formes offshore et des navires de ravitaillement (Ryerson, 2009; Wan et al., 2023). Les mesures préventives visant à empêcher la formation de glace et l'adhérence aux surfaces sont importantes dans diverses applications car elles contribuent à accroître la sécurité opérationnelle, l'efficacité énergétique et à réduire les coûts d'exploitation. Le développement de revêtements antigivrants passifs est hautement souhaitable, car les stratégies actuelles d'antigivrage sont énergivores et coûteuses (Alizadeh et al., 2012). Les revêtements superhydrophobes sont considérés comme une stratégie antigivrage passive prometteuse, mais les mécanismes qui retardent la formation de glace sur ces surfaces nécessitent des études plus approfondies. L'utilisation de revêtements antigivrants peut réduire considérablement la consommation d'énergie et améliorer la sécurité dans diverses infrastructures, systèmes de transport et de refroidissement (Kim et al., 2012).

Les récents travaux de développement de surfaces anti-glace se sont principalement concentrés sur les surfaces superhydrophobes inspirées des feuilles de lotus. Cependant, ces surfaces se dégradent en cas de forte humidité en raison de la condensation de l'eau et de la formation de givre, ce qui entraîne une augmentation de l'adhérence glaciaire en raison de leur grande surface. Un défi de longue date consiste à concevoir des matériaux capables de minimiser, voire d'éliminer, la formation de glace à leur surface (Stone, 2012). Les récents travaux s'appuient sur les avancées des surfaces superhydrophobes, car elles ont tendance à repousser l'eau. Une solution efficace consiste à empêcher la formation de glace lorsqu'un substrat plus froid est exposé à des gouttelettes d'eau ou à de la vapeur d'eau. En cas de forte humidité, les surfaces superhydrophobes favorisent une accumulation importante de glace.

Objectif

L'objectif de cette présente revue est d'évaluer les risques liés au givrage sur les côtes maritimes et proposer des méthodes pour améliorer la sécurité des navires et des installations côtières par l'utilisation des avancées technologiques disponibles pour le dégivrage et l'antigivrage des structures.

Méthodologie

La méthode utilisée dans cet article consiste à analyser les phénomènes de mouillage des surfaces solides en appuyant sur les modèles d'équations de Young, de Dupré, de Wenzel et Cassie-Baxter décrits dans la littérature et à passer en revue les dernières avancées dans le développement de revêtements superhydrophobes résistants à l'usure et auto-cicatrisants utilisés pour le dégivrage et l'antigivrage de glace sur les structures maritimes, aéronautiques et électriques.

Problématique

Pour lutter contre les effets de l'accumulation de glace sur les installations côtières et maritimes, le Code de la pollution édicte des recommandations en matière de conception, de construction et d'équipement pour une surveillance régulière et le déglacage, ce qui augmente les coûts de fabrication et d'exploitation. Par conséquent, il était nécessaire de développer de nouvelles solutions de conception. Les surfaces superhydrophobes avec rugosité créent des poches d'air, ce qui réduit le contact entre la surface solide et l'eau, aidant à éliminer les gouttelettes avant qu'elles ne gèlent (Huang et al., 2022). Ainsi, les traitements de surface visant à réduire l'adhérence de la

glace d'eau peuvent apporter des avantages opérationnels significatifs. Les questions de recherche suivantes ont pu être posées et analysées :

- L'utilisation de revêtements antigivrage est-elle une approche efficace pour résoudre le problème de formation de givre sur les surfaces ?
- Les matériaux superhydrophobes constituent-ils des axes et des orientations des recherches futures dans le domaine de dégivrage et de l'antigivrage ?

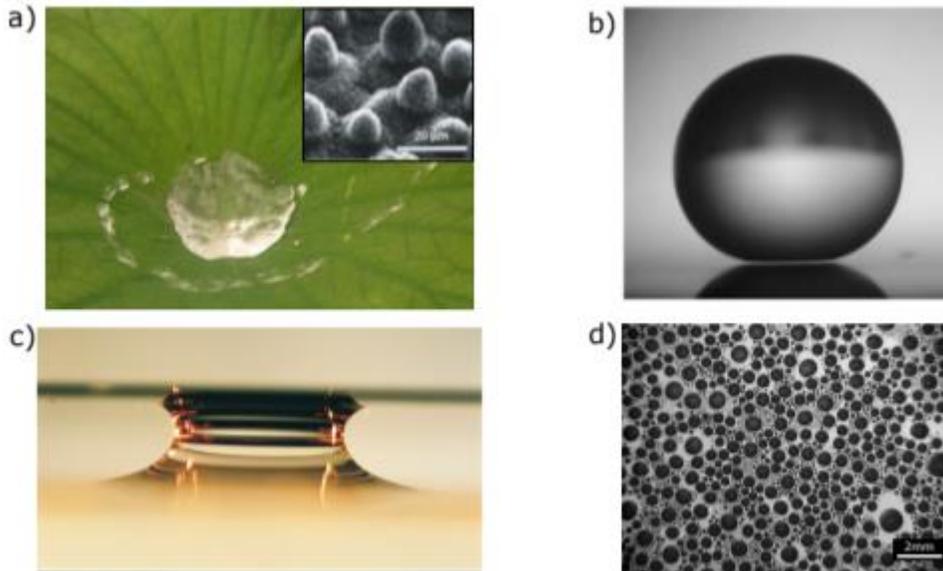
Le plan donc de cet article est axé sur deux principales parties : la revue littéraire qui porte sur les régimes de mouillage des surfaces des matériaux solides et les dernières technologies utilisées dans la lutte et la prévention de la formation et l'accumulation de la glace.

1. Revue littéraire : Phénomènes de mouillage des surfaces solides

Lors de l'étude du comportement des gouttelettes d'eau sur divers substrats, il a été constaté que leur forme et leur étalement dépendent des propriétés de la surface. Sur une surface de verre propre, la goutte s'étale uniformément, tandis que sur une feuille de lotus, elle conserve une forme sphérique (Betti, 2022). Entre deux surfaces solides, une goutte est capable de former des ponts liquides (Figure 1.c). Le mouillage est caractérisé par la capacité d'un liquide à recouvrir une surface solide, qui est déterminée par l'angle de contact entre la goutte et la surface. Un angle de contact plus petit favorise une plus grande propagation de la gouttelette. Des études ont montré que les propriétés superhydrophobes des feuilles de lotus sont dues à la rugosité micro- et nanostructurée, ainsi qu'à la nature hydrophobe de la surface (Figure 1.a). Dans les années 2000, avec le développement des technologies de microfabrication, les premiers matériaux superhydrophobes artificiels ont été créés en laboratoire. La figure 1.b montre un exemple d'une telle surface. La faible adhérence de l'eau produit des gouttelettes qui roulent facilement, rebondissent à l'impact et présentent une friction réduite. Cela les rend résistants aux taches, antibactériens, antibuée et offre des performances aérodynamiques améliorées. L'étude de ces phénomènes présente un intérêt considérable tant d'un point de vue fondamental que pour les applications pratiques. Il s'agit fondamentalement d'un domaine complexe impliquant des aspects thermodynamiques, hydrodynamiques et mécaniques, ainsi que la science des matériaux et les phénomènes de surface. D'un point de vue industriel, les propriétés mouillantes sont

importantes dans les industries aéronautique, cosmétique et textile, où sont développés des revêtements antigivrages, des vêtements imperméables et des matériaux hydrofuges.

Figure 1: a) Surface d'une feuille de lotus à différentes échelles. b) Une goutte sur une surface superhydrophobe, en maintenant sur le sommet de pilier micrométrique. c) Un pont capillaire formé entre un bain et une surface plane. d) La buée formée par condensation à travers un zoom.



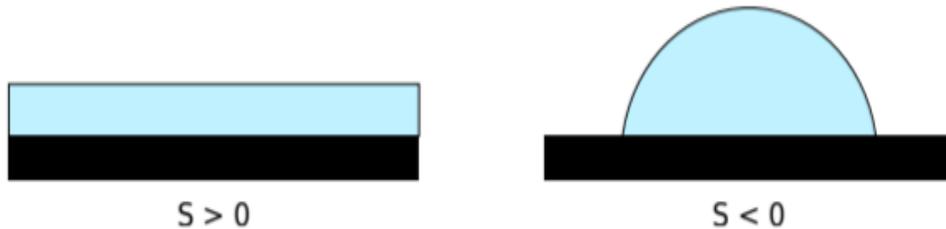
Source : Mouillage dynamique : surfaces superhydrophobes et coalescences induites par vibrations. These de doctorat, Université Côte d'Azur.

Le mouillage statique a été bien étudié dans la littérature, en particulier sur les surfaces lisses. Cependant, les problèmes liés à l'influence des déformations locales des gouttelettes et de la rugosité sur l'angle de contact au niveau de la ligne de contact restent non résolus. Le mouillage statique n'est qu'une partie du problème, car dans des conditions réelles, les gouttelettes se déplacent souvent le long des surfaces, par exemple lorsqu'une gouttelette glisse sur un mur ou lorsqu'un revêtement liquide est appliqué. Dans de tels cas, on parle d'ancrage dynamique. L'angle de contact dépend de la vitesse de la ligne de contact et de la nature du mouvement : forcé ou libre, permanent ou temporaire. Ces dépendances sont déterminées par l'hystérésis de l'angle de contact, qui montre que l'angle dépend de la direction du mouvement du liquide le long du solide. Des défauts microscopiques à la surface provoquent diverses déformations locales de

la ligne de contact en fonction du sens du mouvement (vers l'avant ou vers l'arrière). L'hystérésis caractérise la capacité d'un solide à résister au mouvement de la ligne de contact et évalue quantitativement le frottement d'un liquide.

Le mouillage est l'étude de l'interaction d'un liquide avec un système triphasé composé d'un solide, d'un liquide et d'un gaz. Lorsqu'une goutte de liquide est appliquée sur une surface solide, on observe deux types de mouillage (voir figure 2) : le mouillage complet, dans lequel le liquide s'étale entièrement sur la surface, formant un film, et le mouillage partiel, dans lequel la goutte prend la forme d'une goutte sphérique, partiellement en contact avec la surface.

Figure 2: Les deux situations de mouillage en fonction du paramètre d'étalements.



Source : Mouillage dynamique : surfaces superhydrophobes et coalescences induites par vibrations. Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur.

1.1 Equation de Young

L'équation de Young décrit le comportement d'une gouttelette de liquide sur une surface solide où elle forme un angle de contact au point triple (le point de contact entre les phases solide, liquide et gazeuse). Ce phénomène est illustré dans la figure 3.A. Pour une surface solide parfaitement lisse et chimiquement homogène, il existe une relation entre l'angle de contact et les tensions superficielles des trois phases (solide, liquide et gaz). L'équation de Young, formulée en 1805, permet de déterminer la valeur de l'angle de contact dans des conditions d'équilibre des forces :

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SL} - \gamma_{SG}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

où Θ est l'angle de contact d'équilibre ; γ_{SL} , γ_{SG} et γ_{LV} sont respectivement les tensions interfaciales entre les phases solide et liquide, les phases solide et gazeuse, les phases liquide et gazeuse.

Dans le modèle de Young, le liquide déposé sur la surface solide ne doit pas s'étaler sur celle-ci ($\gamma_{LV} \gg \gamma_{SG}$), ni réagir avec la surface testée, ni provoquer des réarrangements ou modifier sa composition et sa structure c'est-à-dire que les caractéristiques de force γ_{SL} , γ_{SG} et γ_{LV} ne doivent pas changer au fil du temps (St. Petersburg State Institute of Technology et al., 2023).

1.2 Equation de Dupré

Le changement d'énergie de Gibbs lors du contact entre deux phases liquide et solide est la différence entre l'énergie de Gibbs de l'état final et de l'état initial :

$$\Delta G = G_K - G_H = \gamma_{SL} - \gamma_{SG} - \gamma_{LV} \quad (2)$$

En mettant en contact les deux phases (solide et liquide), l'énergie de Gibbs diminue d'une quantité égale au travail d'adhésion W_A ($\Delta G = -W_A$) :

$$W_A = \gamma_{SG} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (3)$$

La formule (3) est l'équation de Dupré. Le travail d'adhésion W_A est fonction de la tension superficielle des phases. Plus la tension superficielle des phases liquide et solide à la limite avec l'air γ_{SG}, γ_{LV} est élevée et plus la tension superficielle à la limite liquide-solide γ_{SL} est faible, plus le travail d'adhésion W_A est important, et vice versa.

En combinant les équations (1) et (3), on obtient l'équation de Dupré-Young (4) qui relie le travail d'adhésion d'un liquide (W_A) sur un solide à l'angle de contact Θ de l'équation de Young.

$$W_A = \gamma_{LV} \left(1 + \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}\right) = \gamma_{LV} (1 + \cos\Theta) \quad (4)$$

La formation d'une interface entre les phases liquide et solide mis en contact entraîne une diminution du travail d'adhésion du liquide (W_A) à un solide. La force d'interaction cohésive est caractérisée par la tension superficielle γ qui est le travail nécessaire pour former une unité de surface. La division d'un liquide entraîne la formation de deux unités de surface et le travail de

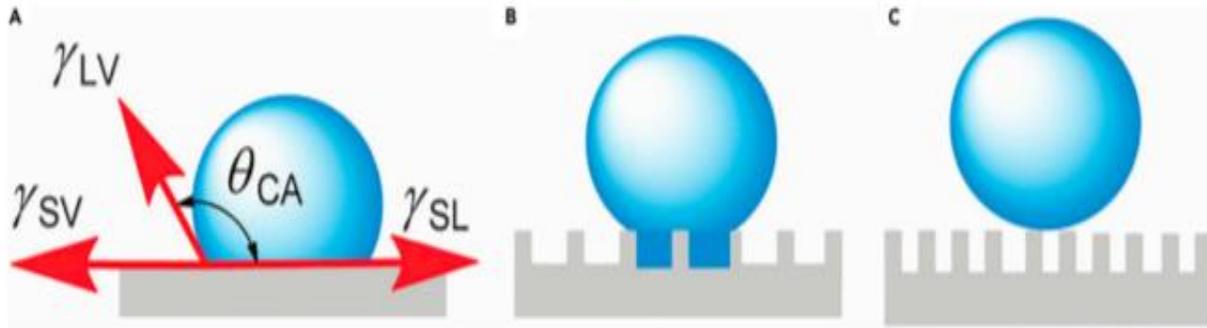
cohésion (W_C) est $2\gamma_{LV}$. Le travail d'adhésion du liquide (W_A) à un solide est relié au travail de cohésion (W_C) par l'équation (5) en remplaçant γ_{LV} par W_C dans l'équation (4).

$$\frac{W_A}{W_K} = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (5)$$

Lorsque les valeurs de l'angle contact θ sont faibles, alors le travail d'adhésion sera élevé. Ce qui nécessite l'apport d'une quantité d'énergie importante pour séparer le liquide du solide. Si $\theta = 180^\circ$, alors $W_A = 0$, ce qui signifie qu'aucun travail n'est appliqué pour séparer la goutte d'eau sphérique d'une surface solide et avec un angle d'inclinaison de 1° , elle peut facilement rouler et se détacher de la surface.

L'équation de Young n'est valable que pour les surfaces solides idéales avec une composition chimique uniforme et une régularité absolue, en l'absence d'interaction chimique ou d'adsorption de vapeur et de liquide, et également dans la formation d'un seul angle de contact (Erbil, 2020; He and Guo, 2021). Cependant, dans des conditions réelles, la plupart des surfaces ne répondent pas à ces paramètres idéalisés. Les principaux facteurs qui compliquent le comportement des surfaces solides sont leur rugosité, leur hétérogénéité chimique, leur contamination par des particules étrangères et l'influence de la taille des gouttelettes. Dans le cas de surfaces rugueuses, l'équation de Young n'est pas applicable. Deux modèles alternatifs sont utilisés pour décrire le mouillage sur des surfaces rugueuses : le modèle d'état de Wenzel et le modèle d'état de Cassie-Baxter représentés respectivement dans les figures 3B et 3C.

Figure 3: Illustration schématique des modèles théoriques de mouillage
 Illustration schématique d'une gouttelette déposée sur un substrat plan (A) et des substrats rugueux (B) et (C). Selon la rugosité de la surface, la goutte se trouve soit dans le régime de Wenzel (B), soit dans le régime de Cassie-Baxter (C).



Source: Superhydrophobic materials used for anti-icing
 Theory, application, and development – ScienceDirect.

1.3 Équation de Wenzel

En 1936, Wenzel propose une modification de l'équation de Young qui prend en compte l'influence de la rugosité d'une surface solide sur le mouillage. Il a suggéré que pour un volume de goutte donné, l'interaction globale du liquide avec la surface serait plus intense sur une surface rugueuse que sur une surface lisse (Erbil, 2020). Dans le cas d'une surface rugueuse, le liquide pénètre dans le microrelief, remplissant complètement les dépressions (voir Figure 3B). Cet aspect de la mouillabilité est décrit par l'équation de Wenzel :

$$\cos\theta_w = r \frac{\gamma_{SL} - \gamma_{SG}}{\gamma_{LV}} = r \cos\theta \quad (6)$$

où θ_w est l'angle de contact apparent de la surface rugueuse qui correspond à l'état d'équilibre stable, θ est l'angle de contact d'équilibre sur la surface plane et lisse du même matériau et r est le facteur de rugosité (rapport entre l'aire réelle de la surface solide et l'aire projetée) et la valeur de r est toujours supérieure à 1 pour toute surface qui possède une rugosité au niveau moléculaire.

Lorsque la valeur du paramètre de rugosité r dépasse l'unité, l'angle de contact (Θ_w) augmente avec l'augmentation de la rugosité pour les surfaces hydrophobes. Dans le cas des surfaces hydrophiles, au contraire, Θ_w diminue avec l'augmentation de la rugosité. L'état de Wenzel décrit le modèle selon lequel les surfaces hydrophobes deviennent plus hydrophobes avec une rugosité croissante (lorsque l'angle de contact Θ dépasse 90° , l'angle Θ_w dépasse toujours Θ). Pour les surfaces hydrophiles, la tendance inverse est observée : avec une rugosité croissante, elles deviennent plus hydrophiles si l'angle de mouillage Θ est inférieur à 90° , tandis que Θ_w dépasse toujours Θ (Cong et al., 2023).

Cependant, grâce à un traitement spécialisé de matériaux hydrophiles, des revêtements superhydrophobes peuvent être obtenus. Cela suggère que la théorie de Wenzel présente certaines limites. De plus, le modèle de Wenzel n'est pas applicable à un certain nombre d'autres phénomènes de mouillage naturels, notamment l'effet lotus et les interactions avec des surfaces solides constituées de différents composants chimiques (He and Guo, 2021; Cong et al., 2023).

1.4 Équation de Cassie-Baxter

L'équation de Cassie-Baxter a été développée en 1944 pour décrire l'interaction des gouttelettes de liquide avec des surfaces solides rugueuses contenant des inhomogénéités. Cette équation prend en compte les limites inhérentes au modèle de Wenzel. Lorsqu'une goutte de liquide entre en contact avec une surface rugueuse, de l'air est emprisonné dans les creux de la surface, ce qui conduit à la formation d'une ligne de contact triphasée. Au niveau de cette ligne de contact, des interfaces apparaissent entre la surface solide et le liquide, ainsi qu'entre le liquide et l'air emprisonné. En conséquence, l'angle de contact de la gouttelette est divisé en deux composantes : l'angle entre la surface du liquide et la surface du solide, et l'angle entre la surface du liquide et l'air dans les rainures. L'angle de contact apparent Θ^* pour le modèle Cassie-Baxter peut être exprimé comme suit :

$$\cos \Theta^* = f_1 \cos \Theta_1 + f_2 \cos \Theta_2 = f_1 \cos \Theta_1 + (1 - f_1) \cos \Theta_2 \quad (7)$$

Où f_1 et f_2 sont respectivement les fractions de surface de contact solide-liquide et liquide-gaz ; Θ_1 et Θ_2 sont respectivement les angles de contact solide-liquide et liquide-gaz.

L'expression de Cassie-Baxter est utilisée pour estimer la prédiction de contact d'une goutte sur des surfaces hétérogènes piégeant de l'air dans les rainures. Cependant, elle ne décrit pas l'effet de l'ondulation du point triple sur les valeurs de Θ . En supposant que l'angle de contact entre l'air et la goutte de liquide est $\theta_2 = 180^\circ$, soit $\cos \theta_2 = -1$; en insérant cette valeur dans l'équation (7), on obtient :

$$\cos \theta^* = f_1 (\cos \theta_1 + 1) - 1 \quad (8)$$

L'équation de Cassie-Baxter décrit l'effet par lequel l'air emprisonné dans les micro-rainures d'une surface solide empêche l'invasion de liquide dans la microstructure des matériaux superhydrophobes. L'augmentation de la rugosité de la surface entraîne une augmentation du volume d'air restant dans les rainures. Par conséquent, minimiser la proportion de la surface de contact réelle entre les solides permet d'obtenir un degré élevé de superhydrophobicité, caractérisé par un angle de mouillage important (Vazirinasab et al., 2018). Ce concept est d'une importance capitale pour optimiser les propriétés hydrophobes et hydrophiles des matériaux en prenant en compte l'influence de la rugosité microstructurale sur l'angle de contact statique.

Lors de l'analyse du comportement des gouttelettes sur des surfaces à forte rugosité, il est nécessaire de prendre en compte les effets dynamiques associés à leur mouvement. L'hydrophobicité dynamique est définie comme la capacité d'une surface à provoquer le glissement du liquide. Les interactions intermoléculaires d'un liquide avec une surface rugueuse conduisent à l'apparition d'hystérésis (Fillion et al., 2014; Vazirinasab et al., 2018). Le modèle de Wenzel convient dans les situations de faible rugosité avec des angles de contact statiques et d'avancement importants et des angles de contact de recul faibles, ce qui conduit à une hystérésis et un frottement statique élevés des gouttelettes d'eau sur la surface, tandis que le modèle Cassie-Baxter décrit le comportement sur des surfaces à forte rugosité, où de grands angles de contact et une faible hystérésis sont caractéristiques, ce qui est typique des matériaux superhydrophobes.

2. Technologies actuelles de dégivrage et d'antigivrage des installations côtières

La prévention et le contrôle de l'accumulation de glace sur les installations côtières, les navires et les plates-formes pétrolières offshore constituent une tâche majeure nécessitant des ressources importantes. Actuellement, les processus physiques et chimiques qui contribuent à la formation de glace sont activement étudiés et diverses méthodes, actives et passives, sont développées pour lutter contre le givrage et le prévenir. Ces méthodes visent à réduire l'intensité de la formation de glace et à augmenter la résistance des structures aux effets de la glace (Azimi Yancheshme et al., 2020).

Figure 4: Vue d'un cargo dans le port de Québec, Canada (janvier 2010) recouvert d'une très épaisse couche de glace.



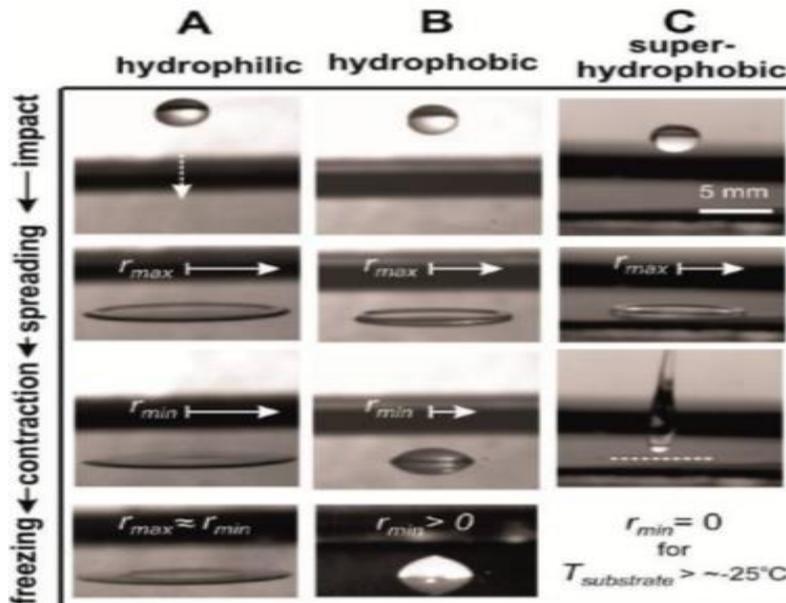
Source: Sea spray icing phenomena on marine vessels and offshore structures: Review and formulation.

Les méthodes de dégivrage actives (l'application d'énergie externe), notamment le dégivrage électrothermique, mécanique et chimique, présentent un certain nombre d'inconvénients, tels qu'une consommation d'énergie élevée, un risque d'incendie, des coûts de développement et de mise en œuvre importants et un impact négatif sur l'environnement. Ces aspects limitent leur application, notamment dans le contexte des exigences modernes en matière d'économie d'énergie et de sécurité environnementale (Zhang et al., 2017). Pour faire face aux inconvénients

négatifs de dégivrage actif, une attention de plus en plus grande est accordée à l'étude des méthodes de dégivrage passif, qui consistent à empêcher la formation de glace sans utiliser d'énergie externe. Ces méthodes visent à modifier chimiquement ou physiquement la surface des matériaux, ce qui permet de prévenir ou retarder la formation de cristaux de glace, réduire l'adhérence de la glace à la surface et les coûts énergétiques, de minimiser l'impact sur l'environnement. Les méthodes passives représentent un domaine de recherche prometteur qui peut contribuer au développement de solutions efficaces et respectueuses de l'environnement pour le dégivrage.

Des chercheurs inspirés par des phénomènes naturels ont développé des matériaux aux propriétés superhydrophobes conçus pour protéger contre la glace et empêcher le givrage. Ces surfaces sont caractérisées par un angle de contact supérieur à 150° et un angle de glissement inférieur à 10° (Teisala and Butt, 2019). Leur structure comprend des éléments de taille micro et nano qui retiennent des poches d'air lorsqu'une goutte de liquide tombe, créant un contact triphasé selon le modèle Cassie-Baxter entre solide, liquide et gaz (Liu et al., 2014). La couche d'air réduit l'adhérence de la gouttelette à la surface et favorise son glissement lorsque la surface superhydrophobe est inclinée. Les matériaux superhydrophobes sont conçus pour faire rebondir les gouttelettes de liquide sur eux en peu de temps. Cet effet est dû à la faible hystérésis de l'angle de contact ($\Theta < 5^\circ$) des surfaces superhydrophobes. Lors de l'impact, la goutte forme une fine couche qui stocke l'énergie cinétique, qui se transforme ensuite en une forme sphérique et rebondit complètement sur la surface (Lv et al., 2014; Zhang et al., 2017). L'efficacité du rebond des gouttelettes dépend de facteurs tels que la rugosité de la surface, la mouillabilité, la température du substrat et les conditions environnementales (Josserand and Thoroddsen, 2016; Jin et al., 2018). La figure 5 montre que les gouttelettes ne pénètrent pas complètement la surface lorsqu'elles heurtent des matériaux hydrophiles et hydrophobes, ce qui conduit à leur gel. En revanche, les gouttelettes sur les surfaces superhydrophobes rebondissent, les empêchant de coller et de geler (Cong et al., 2023).

Figure 5: Continuous dynamic action of a 15 μL water droplet impacting different cooling surfaces from height of 10 cm.



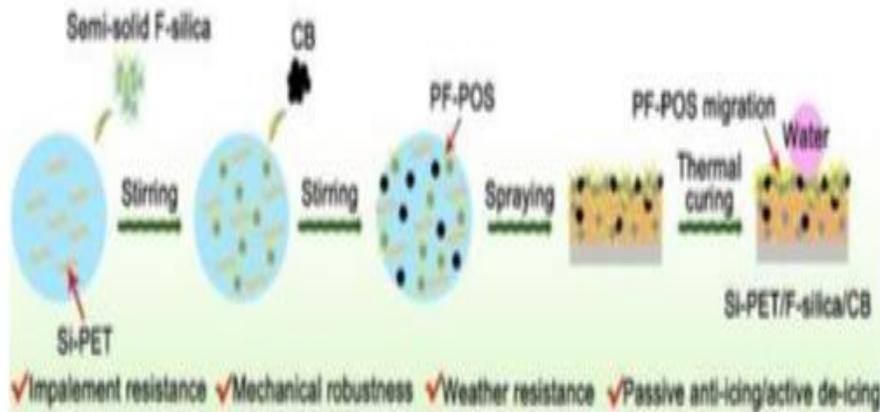
Source: Research Progress of Superhydrophobic Materials in the Field of Anti-/De-Icing and Their Preparation.

Les revêtements sont utilisés pour fournir une protection contre les facteurs défavorables tels que la réduction de l'adhérence de la glace, la prévention de la corrosion, l'inhibition de la nucléation et la répulsion de l'eau des surfaces. Ces effets sont obtenus en créant une couche de glissement, en réduisant l'énergie de surface, en abaissant le module d'élasticité ou en libérant du fluide lubrifiant. En conséquence, le givre est soit retenu, soit éliminé par des forces externes telles que le vent ou la gravité. Cependant, les micro- et nanostructures des revêtements superhydrophobes peuvent être détruites dans des conditions de fonctionnement extrêmes, notamment à basse température, avec des vents forts et du sable abrasif. Par conséquent, le développement de revêtements dotés d'une résistance à l'usure accrue, de propriétés d'auto-cicatrisation ou de la capacité d'auto-cicatrisation est une direction importante pour résoudre ce problème (Cong et al., 2023). Les revêtements superhydrophobes jouent un rôle clé en fournissant des propriétés

d'autonettoyage et d'antigivrage pour les infrastructures fonctionnant dans des conditions extrêmes.

Les revêtements superhydrophobes photothermiques présentent un potentiel significatif pour améliorer les performances des matériaux antigivrage superhydrophobes existants. Cependant, la création de revêtements présentant une excellente résistance à l'empalement, une robustesse mécanique et une résistance aux intempéries reste une tâche complexe. Les auteurs (Wei, Liang, Mao, Li, and Zhang, 2024) ont proposé une méthode de production de revêtements superhydrophobes photothermiques durables avec les propriétés souhaitées. Ces revêtements sont synthétisés par pulvérisation d'une dispersion comprenant des nanoparticules de silicium fluoré, un adhésif polyester modifié au silicone et des nanoparticules de noir de carbone photothermique sur des alliages d'aluminium, suivi d'un durcissement thermique. Au cours du processus de durcissement, le perfluorodécylpolysiloxane migre des couches internes du revêtement vers la surface, fournissant une faible énergie de surface même en présence d'adhésif. En raison de la structure micro/nano hiérarchique, de la nanostructure dense mais rugueuse, de l'inertie chimique des composants et des propriétés adhésives, ces revêtements présentent une superhydrophobicité élevée, une résistance à la perforation, une résistance mécanique et une stabilité atmosphérique. De plus, les revêtements présentent un effet photothermique prononcé à des températures allant jusqu'à -10°C , une humidité relative de 80 % et de faibles niveaux de rayonnement solaire (0,2 unité solaire). Ces revêtements ont montré d'excellentes performances en matière d'antigivrage passif et de dégivrage actif.

Figure 6: Revêtement Si-PET/F-silice/CB préparé par pulvérisation d'une dispersion composée de F-silice, d'un adhésif Si-PET et de nanoparticules de CB photothermiques sur des plaques d'alliage d'aluminium, puis durcis thermiquement.

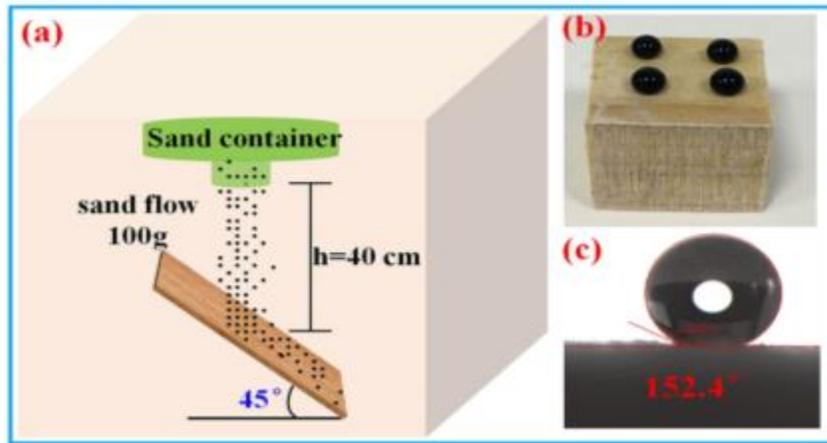


Source: Facile Preparation of Impalement Resistant, Mechanically Robust and Weather Resistant Photothermal Superhydrophobic Coatings for Anti-/De-icing.

Les auteurs (Wei, Liang, Mao, Li, Zhang, et al., 2024) ont développé des revêtements superamphiphobes avec une résistance élevée à la perforation, une stabilité mécanique et des propriétés antistatiques. Ces revêtements ont été créés en pulvérisant un mélange de noir de carbone conducteur, d'adhésif polyester modifié au silicone et de microsphères de SiO₂ fluorées sur un alliage d'aluminium. Les microsphères ont été obtenues par séparation de phase adhésive et collage ultérieur de SiO₂ fluoré. La régulation de la morphologie des revêtements, de leurs propriétés superamphiphobes, de leur résistance à la perforation et de leur stabilité mécanique a été obtenue grâce à l'utilisation de solvants ayant différents points d'ébullition. Ainsi, les revêtements obtenus ont démontré une stabilité mécanique élevée, une résistance à la perforation et des propriétés superamphiphobes. L'introduction du noir de carbone conducteur a contribué à l'amélioration des propriétés antistatiques et anti-gouttes des revêtements. De plus, les revêtements ont démontré de bonnes propriétés antigivrantes grâce à la formation d'une couche d'air stable à l'interface solide-liquide et à une réduction significative de la surface de contact entre eux.

Dans une étude consacrée à l'étude de la superhydrophobicité des matériaux en bois, les auteurs (Cao et al., 2022) ont développé un bois superhydrophobe multifonctionnel en introduisant un sol de SiO₂ et de la poudre superhydrophobe (PMHOS) dans la structure du bois. Le PMHOS a été synthétisé à partir de poly(méthylhydrogène)siloxane (PMHS) et d'éthanol. Le matériau obtenu a démontré un angle de contact avec l'eau (WCA) de 156° et un angle de glissement (SA) de 6° à température ambiante, ainsi qu'une excellente répulsion de divers liquides tels que le lait, la sauce soja, le jus et le café. La couche superhydrophobe a conservé ses propriétés après des tests mécaniques, notamment le frottement des doigts, le décollement du ruban adhésif, les rayures du couteau et l'abrasion du papier de verre. Le matériau a également démontré des propriétés antigivrantes élevées.

Figure 7: Schéma des essais d'abrasion par impact de sable tombant (a) ; d'une goutte d'eau déposée sur la surface du bois préparée après abrasion par le sable (b) et essai WCA de la surface du bois après abrasion par le sable (c).



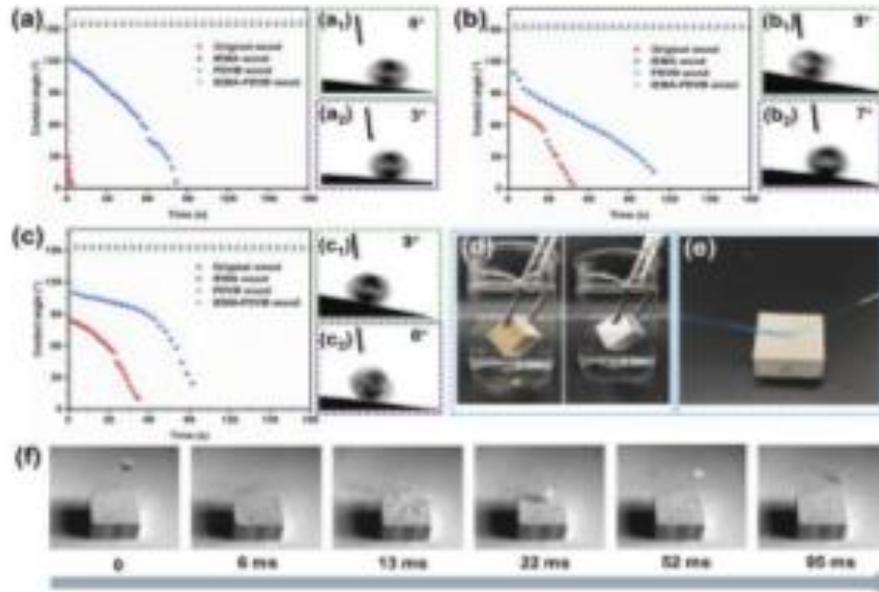
Source: Facile Fabrication of Fluorine-Free, Anti-Icing, and Multifunctional Superhydrophobic Surface on Wood Substrates.

Pour améliorer les propriétés hydrofuges du bois, un revêtement superhydrophobe biomimétique à base de dioxyde de silicium (SiO₂) et de polydiméthylsiloxane (PDMS) a été développé. Le revêtement a été appliqué sur un substrat en bois en utilisant un procédé de double trempage avec intégration de surface, suivant le principe hybride « substrat + nanoparticules » typique de l'effet



lotus (Shen et al., 2024). Le revêtement a des propriétés programmables, une résistance et une durabilité élevées, sans changer la couleur et la texture du bois. Le mélange SiO₂/PDMS/bois présente d'excellentes propriétés hydrofuges, avec un angle de contact statique avec l'eau de 158,5° et un angle de glissement de 10°, ce qui repousse efficacement divers types de gouttelettes. Les performances du revêtement ont été confirmées sur divers substrats, notamment l'aérogel de pâte de bois et le papier de pâte de bois. Le revêtement conserve ses propriétés hydrofuges après exposition à des facteurs mécaniques (matériaux abrasifs, outils tranchants), thermiques (rayonnement UV, températures extrêmes), chimiques (acides, alcalis) et corrosifs. De plus, le revêtement possède des propriétés autonettoyantes et résiste à la contamination, ce qui le rend prometteur pour la recherche scientifique et les applications pratiques dans le domaine des interfaces superhydrophobes intelligentes biomimétiques sur le bois.

Figure 8: Performances superhydrophobes des échantillons de bois : (a, b, c) angles de contact en fonction du temps pour le bois d'origine, le bois IEMA, le bois PDVB et le bois IEMA-PDVB en section transversale, section radiale et section tangentielle, respectivement ; (d) phénomène semblable à un miroir, la gauche est le bois d'origine et la droite est le bois IEMA-PDVB ; (e) jet d'eau rebondissant sur la surface du bois IEMA-PDVB ; (f) photographies de gouttelettes d'eau impactant la surface du bois IEMA-PDVB à une hauteur



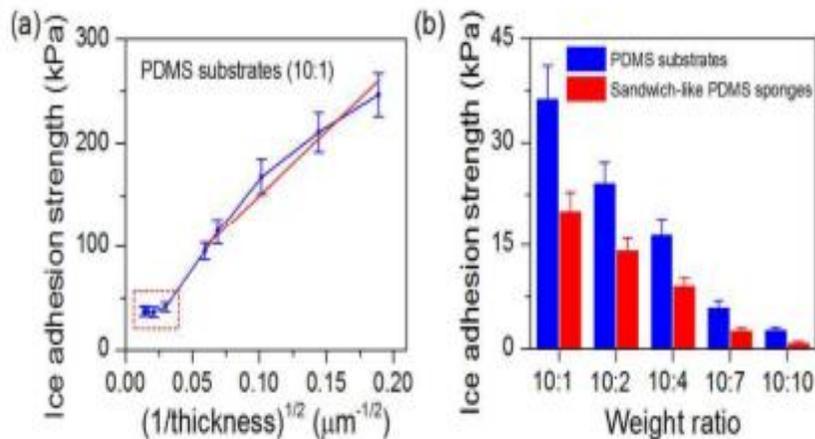
Source: Fabrication of bulk superhydrophobic wood by grafting porous poly(divinylbenzene) to wood structure using isocyanatoethyl methacrylate.

Dans le travail (Fang et al., 2024), une méthode a été développée pour synthétiser du bois superhydrophobe avec une résistance élevée à l'usure abrasive et aux influences chimiques. À cet effet, du polyvinylbenzène poreux a été introduit dans les structures cellulaires du bois, une copolymérisation par greffage a été réalisée et soumise à un traitement solvothérmal. En conséquence, des angles de mouillage et de glissement sur la surface du bois d'environ 156° et 3° respectivement ont été obtenus, tandis que les propriétés hydrophobes s'étendaient sur toute la structure du matériau. Après des dommages mécaniques importants (abrasion, sciage) et une exposition à des solvants organiques et à des environnements agressifs, les caractéristiques hydrophobes du matériau sont restées stables. Les propriétés autonettoyantes et antisalissures élevées du bois ont également été notées. De plus, des améliorations significatives de l'absorption d'eau et de la stabilité dimensionnelle du matériau ont été observées.

Un revêtement superhydrophobe basé sur le principe de « l'effet lotus » a été conçu et fabriqué par (Zhang et al., 2025). Le revêtement est créé à l'aide de micro-nanoparticules d'une structure imidazolite de zéolite (ZIF-90), synthétisées par une méthode one-pot avec ajout d'acide stéarique à longue chaîne. Ces particules ont été intégrées dans du polyvinylbutyral à température ambiante, ce qui a entraîné la formation d'une surface superhydrophobe. Le revêtement superhydrophobe a conservé ses propriétés sous une usure mécanique allant jusqu'à 400 cm, démontrant un angle de contact avec l'eau (CA) de plus de 150°. Un revêtement composite appliqué sur un alliage de magnésium a montré une résistance à la corrosion considérablement améliorée par rapport à l'alliage non revêtu. Le potentiel de l'électrode de corrosion (E_{corr}) était de -0,86 V et la densité de courant de corrosion (i_{corr}) était de $3,66 \times 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, tandis que pour l'alliage non revêtu, ces valeurs étaient respectivement de -1,53 V et $1,14 \times 10^{-4} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$. Le revêtement a également montré une résistance élevée à la corrosion avec une résistance au transfert de charge (R_{ct}) de $5,12 \times 10^9 \Omega\cdot\text{cm}^2$ après 5 jours d'exposition à une solution de NaCl à 3,5 %. De plus, le revêtement possède d'excellentes propriétés autonettoyantes et antigivrantes.

La réduction de la formation de glace sur les surfaces exposées est un facteur clé pour une variété d'applications. (He et al., 2018) ont développé une structure d'éponge sandwich à base de polydiméthylsiloxane (PDMS), qui présentait une faible adhérence de la glace de seulement 0,9 kPa pour les échantillons de PDMS pur sans additifs. Il est à noter que la faible résistance au gel du matériau est maintenue après 25 cycles de givrage et de dégivrage. Ainsi, une méthode innovante et rentable pour créer des surfaces durables à très faible adhérence du givre est proposée. La structure spongieuse du PDMS offre une combinaison de module d'élasticité réduit et de présence de fissures macroscopiques à l'interface glace-solide, ce qui réduit considérablement l'adhérence de la glace. La résistance à l'adhérence extrêmement faible du givre reste stable après 25 cycles de givrage et de dégivrage.

Figure 9: Force d'adhérence de la glace à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, mesurée sur (a) des substrats PDMS (10:1) d'épaisseurs différentes, et (b) des substrats PDMS et des éponges PDMS de type sandwich, présentant différents rapports pondéraux. L'épaisseur de tous les substrats de (b) est de $100\text{ }\mu\text{m}$.

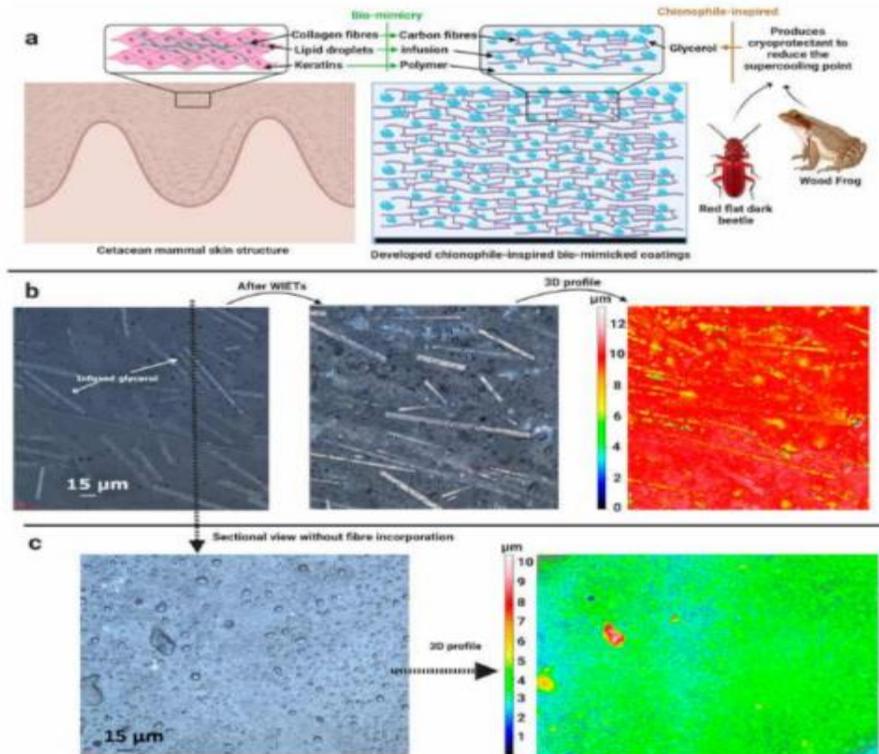


Source: Design and preparation of sandwich-like polydimethylsiloxane (PDMS) sponges with super-low ice adhesion.

Dans un certain nombre d'études, le polyuréthane et le polydiméthylsiloxane sont utilisés comme matériaux de matrice, tandis que le degré de réticulation des polymères, la teneur en polymère et la composition du liant varient. Dans (Memon et al., 2023), des revêtements biomimétiques en polyuréthane renforcé de fibres imprégné de glycérine ont été développés pour assurer une superhydrophobicité à long terme et empêcher la formation de glace (Fig. 10 a). L'inclusion de fibres a contribué à une réduction des dommages de surface (Fig. 10 b), et le changement de rugosité après érosion était significativement plus faible par rapport aux revêtements en polyuréthane pur. De plus, il a été constaté que les fibres améliorent les propriétés de réinjection de fluide et de libération lente du polyuréthane renforcé de fibres et imprégné de glycérol (Fig. 10 c). Cela a permis d'atteindre l'une des valeurs les plus basses de force d'adhérence de la glace à la surface après des dommages importants, l'augmentant de 0,22 à 0,77 kPa. Lors des tests antigivrages, ces revêtements ont montré une accumulation minimale de givre et une

augmentation de 659 % du temps de cristallisation des gouttelettes d'eau par rapport aux revêtements similaires en polyuréthane pur.

Figure 10: (a) Conception du revêtement biomimétique, (b) images microstructurales des revêtements développés et du même revêtement après les essais d'érosion, incluant une image 3D, et (c) vue en coupe du même revêtement et de son profil 3D.



Source: Interdependence of Surface Roughness on Icephobic Performance.

Dans une étude menée par (Tian et al., 2023), un revêtement polydopamine superhydrophobe auto-adhésif et respectueux de l'environnement a été développé sur la base des principes du biomimétisme des moules. La croissance du revêtement a été contrôlée en optimisant la composition et les paramètres de réaction. Ses propriétés, notamment la mouillabilité, la stabilité mécanique sous différents angles, les caractéristiques antigivrantes et la capacité d'autonettoyage, ont été systématiquement étudiées. Les résultats ont montré que le revêtement atteignait un angle de contact statique idéal de $162,7^\circ$ et un angle de roulement de $5,5^\circ$ grâce à la technologie d'auto-

assemblage dans un milieu éthanol-eau. Cela est dû à la formation d'une structure de rugosité hiérarchique et à une diminution de l'énergie de surface, ce qui est confirmé par l'analyse de la morphologie et des caractéristiques chimiques. Les propriétés mécaniques du revêtement (résistance à la traction et au cisaillement) et sa résistance à l'usure abrasive (impact de sable, abrasion du papier de verre) ont démontré une compacité interne et une résistance mécanique élevées. Les tests de pelage et d'adhérence à 180° ont montré que le revêtement présente une stabilité mécanique significative et une résistance d'interface accrue (jusqu'à 27,4 MPa), soit 57,4 % de plus que celle de la résine époxy/acier. Cela est dû à la formation de liaisons chélates entre les groupes catéchol polydopaminergiques et le substrat métallique. Le revêtement a également démontré d'excellentes propriétés d'autonettoyage lorsqu'il était contaminé par de la poudre de graphite. En raison de son hydrophobicité, il a démontré une pression de surfusion plus élevée, une température de givrage réduite, un temps accru avant le début du givrage et une résistance élevée à l'adhérence de la glace (0,115 MPa), ce qui le rend prometteur pour une utilisation dans des conditions de basse température.

La surface superhydrophobe solaire thermique est une solution efficace pour prévenir le givrage et éliminer les dépôts de glace. Cependant, lors des processus cycliques de congélation et de fusion, les gouttelettes peuvent entrer dans l'état de Wenzel, ce qui augmente considérablement leur adhérence à la surface et rend leur élimination difficile. Dans (Zhang et al., 2024), une surface superhydrophobe tridimensionnelle a été développée sur de l'acier inoxydable 304 en utilisant des méthodes de gravure, d'oxydation in situ et de revêtement par centrifugation de nanoparticules de TiN. Cette surface possède une grande capacité d'absorption des rayons solaires et est conçue pour lutter efficacement contre le givrage. La structure de surface à plusieurs niveaux garantit que les gouttelettes reviennent complètement à l'état Cassie après leur fusion. L'angle de mouillage diminue de 162,5° à 136,7° lors de la congélation et augmente progressivement jusqu'à 162,1° lors de la fonte. Les oxydes métalliques et les nanoparticules de TiN contribuent également à une absorption élevée du rayonnement solaire ($\alpha_{\text{solar}} = 0,925$). La combinaison des propriétés superhydrophobes et des caractéristiques héliothermiques assure l'efficacité supérieure de la surface développée pour prévenir et éliminer le givrage.

Conclusion

Les installations des structures côtières sont fortement soumises aux charges de glaces qui peuvent constituer des défis considérables pour la navigation et la sécurité d'exploitation. Le phénomène de givrage dans les régions océaniques froides est une véritable menace pour la stabilité des infrastructures maritimes et pour la réduction de l'efficacité opérationnelle des plateformes offshore. Dans cet article, nous avons examiné les phénomènes de mouillage sur les surfaces solides et les modèles de mouillage pour se faire une idée sur les surfaces superhydrophobes utilisées pour la réduction des phénomènes de givrage qui apparaissent sur les structures des installations.

La plupart des méthodes conventionnelles de dégivrage et d'antigivrage qui incluent l'élimination physique ou chimique de la glace sont peu respectueuses de l'environnement, faiblement efficaces et sont consommatrices d'énergies avec des coûts de fabrication et d'exploitation élevés. Une approche judicieuse développée par les chercheurs consiste à prévenir la formation de la glace qui résulte de la collision gouttelette/substrat, suivie de la congélation. Il s'agit donc de développer des méthodes qui éliminent la glace par une modification de la forme ou la composition chimique de la surface des matériaux avec une faible énergie de surface.

Les surfaces superhydrophobes antigivrantes passives ou anti-glaces s'avèrent comme une alternative dans de nombreuses applications en raison de leurs capacités pour la prévention et l'élimination du givre indésirable grâce à leur énergie de surface plus faible et à leur surface de contact solide-liquide plus petite. La présence de micro/nanostructures sur les revêtements superhydrophobes réduit l'adhérence de la glace et facilite son élimination. Cependant, la morphologie microscopique d'un revêtement superhydrophobe est très facilement perturbée, ce qui conduit à sa défaillance. Étant donné que les revêtements superhydrophobes ordinaires perdent facilement leurs propriétés superhydrophobes par manque de robustesse et de résistance à l'abrasion des surfaces, la fabrication avec succès des revêtements superhydrophobes capables de régénérer l'hydrophobicité de la couche de finition et de maintenir des niveaux de rugosité initiaux semble prometteur. Pour préparer des surfaces superhydrophobes mécaniquement stables et dotés de fonctions d'auto-réparation/auto-cicatrisation, les chercheurs proposent de combiner le dégivrage actif et l'antigivrage passif.



Bibliographie

1. Alizadeh, A. et al., 2012, Dynamics of ice nucleation on water repellent surfaces: Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids, v. 28, no. 6, p. 3180–3186, doi:10.1021/la2045256.
2. Azimi Yancheshme, A., G. Momen, and R. Jafari Aminabadi, 2020, Mechanisms of ice formation and propagation on superhydrophobic surfaces: A review: Advances in Colloid and Interface Science, v. 279, p. 102155, doi:10.1016/j.cis.2020.102155.
3. Betti, L., 2022, Mouillage dynamique : surfaces superhydrophobes et coalescences induites par vibrations, These de doctorat: Université Côte d'Azur.
4. Cao, M., M. Tang, W. Lin, Z. Ding, S. Cai, H. Chen, and X. Zhang, 2022, Facile Fabrication of Fluorine-Free, Anti-Icing, and Multifunctional Superhydrophobic Surface on Wood Substrates, 10: Polymers, v. 14, no. 10, p. 1953, doi:10.3390/polym14101953.
5. Cong, Q., X. Qin, T. Chen, J. Jin, C. Liu, and M. Wang, 2023, Research Progress of Superhydrophobic Materials in the Field of Anti-/De-Icing and Their Preparation: A Review: Materials (Basel, Switzerland), v. 16, no. 14, p. 5151, doi:10.3390/ma16145151.
6. Dehghani-Sanij, A. R., S. R. Dehghani, G. F. Naterer, and Y. S. Muzychka, 2017, Sea spray icing phenomena on marine vessels and offshore structures: Review and formulation: Ocean Engineering, v. 132, p. 25–39, doi:10.1016/j.oceaneng.2017.01.016.
7. Erbil, H. Y., 2020, Practical Applications of Superhydrophobic Materials and Coatings: Problems and Perspectives: Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids, v. 36, no. 10, p. 2493–2509, doi:10.1021/acs.langmuir.9b03908.
8. Fang, X., R. Liao, Kaiji Wang, M. Zheng, H. Li, R. Wang, X. Liu, Y. Dong, Kaili Wang, and J. Li, 2024, Fabrication of bulk superhydrophobic wood by grafting porous poly(divinylbenzene) to wood structure using isocyanatoethyl methacrylate: RSC Advances, v. 14, no. 22, p. 15201–15208, doi:10.1039/D4RA00889H.
9. Fillion, R. M., A. R. Riahi, and A. Edrisy, 2014, A review of icing prevention in photovoltaic devices by surface engineering: Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 32, p. 797–809, doi:10.1016/j.rser.2014.01.015.



10. He, H., and Z. Guo, 2021, Superhydrophobic materials used for anti-icing Theory, application, and development: *iScience*, v. 24, no. 11, p. 103357, doi:10.1016/j.isci.2021.103357.
11. He, Z., Y. Zhuo, J. He, and Z. Zhang, 2018, Design and preparation of sandwich-like polydimethylsiloxane (PDMS) sponges with super-low ice adhesion: *Soft Matter*, v. 14, no. 23, p. 4846–4851, doi:10.1039/C8SM00820E.
12. Huang, W., J. Huang, Z. Guo, and W. Liu, 2022, Icephobic/anti-icing properties of superhydrophobic surfaces: *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 304, p. 102658, doi:10.1016/j.cis.2022.102658.
13. Ibrahim, R. A., N. G. Chalhoub, and J. Falzarano, 2007, Interaction of Ships and Ocean Structures With Ice Loads and Stochastic Ocean Waves: *Applied Mechanics Reviews*, v. 60, no. 5, p. 246–289, doi:10.1115/1.2777172.
14. Jin, S., J. Liu, J. Lv, S. Wu, and J. Wang S, 2018, Interfacial Materials for Anti-Icing: Beyond Superhydrophobic Surfaces: *Chemistry, an Asian Journal*, v. 13, no. 11, p. 1406–1414, doi:10.1002/asia.201800241.
15. Josserand, C., and S. T. Thoroddsen, 2016, Drop Impact on a Solid Surface: *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 48, p. 365–391, doi:10.1146/annurev-fluid-122414-034401.
16. Kim, P., T.-S. Wong, J. Alvarenga, M. J. Kreder, W. E. Adorno-Martinez, and J. Aizenberg, 2012, Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance: *ACS nano*, v. 6, no. 8, p. 6569–6577, doi:10.1021/nn302310q.
17. Liu, Y., L. Moevius, X. Xu, T. Qian, J. M. Yeomans, and Z. Wang, 2014, Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces: *Nature Physics*, v. 10, no. 7, p. 515–519, doi:10.1038/nphys2980.
18. Luo, W., K. Alasvand Zarasvand, Z. Azimi Dijvejin, A. V. Nadaraja, and K. Golovin, 2024, Influence of Salinity on Surface Ice Adhesion Strength: *Advanced Materials Interfaces*, v. 11, no. 3, p. 2300606, doi:10.1002/admi.202300606.



19. Lv, J., Y. Song, L. Jiang, and J. Wang, 2014, Bio-inspired strategies for anti-icing: ACS nano, v. 8, no. 4, p. 3152–3169, doi:10.1021/nn406522n.
20. Memon, H., J. Wang, and X. Hou, 2023, Interdependence of Surface Roughness on Icephobic Performance: A Review: Materials (Basel, Switzerland), v. 16, no. 13, p. 4607, doi:10.3390/ma16134607.
21. Ryerson, C. C., 2009, Assessment of Superstructure Ice Protection as Applied to Offshore Oil Operations Safety: United States Army: Publications.
22. Shen, H., K. Zhang, D. Huang, Y. Miao, C. Lian, and X. Zhuo, 2024, Wood Surface-Embedding of Functional Monodisperse SiO₂ Microspheres for Achieving Robust, Durable, Nature-Inspired, Programmable Superrepellent Interfaces: Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids, v. 40, no. 46, p. 24550–24564, doi:10.1021/acs.langmuir.4c03178.
23. St. Petersburg State Institute of Technology, D. A. Erofeev, L. N. Mashlyakovskiy, and St. Petersburg State Institute of Technology, 2023, FABRICATION AND APPLICATION OF HYDROPHOBIC SILICON CONTAINING POLYURETHANE COATINGS. PART TWO. (REVIEW): Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), v. 64, p. 40–51, doi:10.36807/1998-9849-2023-64-90-40-51.
24. Stone, H. A., 2012, Ice-phobic surfaces that are wet: ACS nano, v. 6, no. 8, p. 6536–6540, doi:10.1021/nn303372q.
25. Teisala, H., and H.-J. Butt, 2019, Hierarchical Structures for Superhydrophobic and Superoleophobic Surfaces: Langmuir, v. 35, no. 33, p. 10689–10703, doi:10.1021/acs.langmuir.8b03088.
26. Tian, J., X. Qi, C. Li, and G. Xian, 2023, Mussel-Inspired Fabrication of an Environment-Friendly and Self-Adhesive Superhydrophobic Polydopamine Coating with Excellent Mechanical Durability, Anti-Icing and Self-Cleaning Performances: ACS applied materials & interfaces, v. 15, no. 21, p. 26000–26015, doi:10.1021/acsami.3c03577.



27. Vazirinasab, E., R. Jafari, and G. Momen, 2018, Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review: *Surface & coatings technology*, v. 341, p. 40–56, doi:10.1016/j.surfcoat.2017.11.053.
28. Wan, L., X. Liu, S. Chu, M. Wang, Z. Wang, Y. Wang, and H. Sun, 2023, Freezing characters study of the sessile seawater drop on a cold substrate: *AIP Advances*, v. 13, no. 3.
29. Wei, J., W. Liang, M. Mao, B. Li, and J. Zhang, 2024, Facile Preparation of Impalement Resistant, Mechanically Robust and Weather Resistant Photothermal Superhydrophobic Coatings for Anti-/De-icing: *Chemistry, an Asian Journal*, v. 19, no. 9, p. e202400110, doi:10.1002/asia.202400110.
30. Wei, J., W. Liang, M. Mao, B. Li, B. Zhang, and J. Zhang, 2024, Impalement-Resistant, Mechanically Stable, and Anti-Static Superamphiphobic Coatings Enabled by Solvent Regulation and Their Application in Anti-Icing: *Langmuir*, v. 40, no. 1, p. 1109–1116, doi:10.1021/acs.langmuir.3c03480.
31. Zhang, S., J. Huang, Y. Cheng, H. Yang, Z. Chen, and Y. Lai, 2017, Bioinspired Surfaces with Superwettability for Anti-Icing and Ice-Phobic Application: Concept, Mechanism, and Design: *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, v. 13, no. 48, doi:10.1002/sml.201701867.
32. Zhang, F., H. Yan, and M. Chen, 2024, Multi-Scale Superhydrophobic Surface with Excellent Stability and Solar-Thermal Performance for Highly Efficient Anti-Icing and Deicing: *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, v. 20, no. 32, p. e2312226, doi:10.1002/sml.202312226.
33. Zhang, D., Y. Zhao, Q. He, Z. Pan, and G. Ma, 2025, Development of a Zeolitic Imidazolate Framework Based Superhydrophobic Surface with Abrasion Resistance, Corrosion Protection, and Anti-icing: *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, v. 41, no. 11, p. 7478–7485, doi:10.1021/acs.langmuir.4c05041.