



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

CanmetENERGY

Aborder les défis des climats froids pour les systèmes énergétiques extracôtiers : Revue de la littérature pertinente et analyse des lacunes pour le Canada atlantique

Préparé par :

Kaniz Sultana, ingénieure de recherche

Ryan Kilpatrick, ingénieur de recherche senior

CanmetÉNERGIE-Ottawa, Ressources naturelles Canada

Juillet 2025

« CanmetÉNERGIE-Ottawa dirige le développement de solutions en sciences et technologie énergétiques pour le bénéfice environnemental et économique des Canadiens et des Canadiennes. »

Canada

Avertissement

Ressources naturelles Canada et aucun de ses employés ne font aucune garantie, formelle ou tacite, et n'assument aucune responsabilité légale ou autre à l'égard de l'exactitude, de l'exhaustivité ou de l'utilité du contenu du rapport. Toute référence dans le rapport à quelque produit, processus, service ou organisation que ce soit ne constitue pas nécessairement une approbation, une recommandation ou une préférence de la part de Ressources naturelles Canada. Les points de vue et les opinions des auteurs exprimés dans ce rapport ne sont pas et ne reflètent pas nécessairement ceux de Ressources naturelles Canada.

Cat. N° M154-192/2025F-PDF

ISBN 978-0-660-79156-2

<https://doi.org/10.4095/g348744>

© Sa Majesté le roi du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2025

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au Bureau de la recherche et du développement énergétiques (BRDE) pour son soutien financier, qui a rendu cette recherche possible. Nous tenons également à exprimer notre sincère appréciation à l'équipe responsable des éoliennes extracôtières et à nos collègues pour leurs précieuses idées, leur soutien technique et leurs discussions constructives tout au long du projet. De plus, nous reconnaissons les contributions de nos collaborateurs institutionnels et industriels pour leur orientation et leur expertise. Leurs efforts collectifs ont été essentiels à l'avancement de ce travail.

Résumé

Conformément aux efforts mondiaux, le Canada a mis en œuvre de solides stratégies en vue d'exploiter les ressources extracôtières dans le cadre de son engagement à atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Alors que le pays explore le développement de la capacité énergétique extracôtière dans des endroits où existent des conditions hivernales rigoureuses, la gestion des risques de givrage prend une importance stratégique pour le développement durable dans les climats froids.

Cette recherche aborde ces défis en examinant deux principaux types de risques de givrage, qui peuvent affecter les structures extracôtières : le givrage atmosphérique et le givrage causé par les embruns marins. Bien que des décennies d'études aient été consacrées à ce sujet, de nombreux paramètres clés et la physique connexe restent insuffisamment compris. Pour caractériser ces lacunes en matière de connaissances, une revue de la littérature exhaustive est réalisée afin de fournir une analyse détaillée des phénomènes de givrage et de l'interaction complexe entre les facteurs météorologiques, océaniques et structurels. De plus, l'efficacité des modèles empiriques, semi-empiriques et numériques disponibles pour prédire les événements de givrage est évaluée, soulignant la nécessité de mesures sur le terrain afin d'obtenir des évaluations de risque plus précises.

Les renseignements générés par la présente analyse contribueront à l'élaboration de cartes de risque de verglas régionales spécifiques aux conditions climatiques froides, ainsi qu'à l'établissement d'un cadre de collecte de données, cohérent et fiable, pour les futures campagnes sur le terrain du Canada atlantique. Ces résultats seront essentiels pour soutenir le déploiement sûr, fiable et efficace des systèmes énergétiques extracôtiers, y compris les technologies hybrides, comme l'éolien, les vagues, les marées et les systèmes photovoltaïques solaires flottants.

Le présent projet bénéficiera à divers intervenants, y compris aux agences gouvernementales, aux développeurs d'énergie, aux communautés locales et autochtones, aux investisseurs privés, aux chercheurs et aux organisations environnementales en améliorant la planification énergétique extracôtière durable. En fin de compte, ce travail ouvre la voie pour atteindre la sécurité et la durabilité énergétiques dans les régions froides du Canada.

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
Résumé	ii
1. Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Structure de la revue de la littérature	1
2. Défis des climats froids dans les structures extracôtières	2
2.1 Classification du givrage.....	2
3. Givrage atmosphérique.....	4
3.1 Physique du givrage atmosphérique : Études de fond	4
3.1.1 Givrage causé par le passage de nuages	4
3.1.2 Précipitation et givrage	6
3.1.3 Givre de surface.....	6
3.2 Givre atmosphérique : Côtier par rapport à extracôtier	7
3.3 Études antérieures sur la prévision des phénomènes extracôtiers de givrage atmosphérique.....	8
3.3.1 Prévisions de glace par évaluations climatologiques et régionales au Canada	8
3.3.1.1..... Approches empiriques et semi-empiriques (1970-2000)	8
3.3.1.2..... Approches empiriques et semi-empiriques (après 2000)	9
3.3.2 Avancement de la modélisation de la prévision du givre	11
3.3.2.1..... Approches empiriques et semi-empiriques	11
3.3.2.2..... Évaluation des approches computationnelles (après les années 1970)	12
4. Givrage d’embruns marins	15

4.1	Physique du givrage d’embruns marin : Études de fond	15
4.1.1	Éclaboussures des vagues	15
4.1.2	Embruns générés par le vent.....	16
4.2	Études antérieures sur la génération d’embruns marins ou avant impact	16
4.2.1	Caractéristiques des vagues	17
4.2.2	Flux d’embruns.....	18
4.2.3	Teneur en eau liquide (TEL).....	19
4.2.4	Distribution de la taille des gouttelettes.....	20
4.2.5	Direction du vent et turbulence	21
4.3	Études antérieures sur les phénomènes de givrage après impact ou marin.....	21
4.3.1	Température de l’air et humidité relative.....	22
4.3.2	Température de l’eau.....	23
4.3.3	Salinité de l’eau	24
4.3.4	Rugosité de surface et topographie des structures extracôtières	24
5.	Conclusions et recommandations.....	26
5.1	Contributions et lacunes dans les connaissances	26
5.1.1	Classification complète des risques de givrage pour les projets énergétiques extracôtiers ..	26
5.1.2	Caractérisation du givrage atmosphérique.....	26
5.1.3	Caractérisation du givrage causé par les embruns marins.....	27
5.1.4	Développement d’un cadre complet de collecte de données sur le climat froid	28
5.2	Recommandations pour la recherche future.....	30
6.	Bibliographie	31

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Composantes d'éoliennes touchées par différents types de givrage (adapté de [5])	3
Tableau 3.1 : Conditions météorologiques lors des événements de givrage atmosphérique	6
Tableau 3.2 : Givrage atmosphérique en fonction de la taille des gouttelettes et de la teneur en eau liquide dans l'air	6
Tableau 3.3 : Aperçu des modèles empiriques et semi-empiriques utilisés pour prédire les phénomènes de givrage atmosphérique et les paramètres météorologiques requis	10
Tableau 3.4 : Aperçu des modèles de simulation du givrage et de leurs paramètres météorologiques requis	13
Tableau 4.1 : Paramètres inclus dans les caractéristiques des vagues.....	16
Tableau 4.2 : Aperçu des données sur le vent, les vagues et les embruns mesurées sur l'île Tarsiut [104]	18
Tableau 4.3 : Gouttelettes générées par les embruns marins.....	19
Tableau 4.4 : Renseignements sur la salinité de l'eau de mer [163-166].....	23
Tableau 4.5 : Analyse des modèles de givrage marin existant	24
Tableau 5.1 : Matrice de collecte de données intégrée pour l'évaluation des risques liés au climat froid	27

Liste des figures

Figure 2.1 : Effet du givrage sur la structure des éoliennes extracôtières (adapté de [23])	2
Figure 2.2 : Classification des phénomènes de givrage susceptibles d'affecter les systèmes énergétiques extracôtiers	3
Figure 3.1 : Mécanisme de croissance du givre	5
Figure 3.2 : Mécanisme de croissance du verglas.....	5
Figure 3.3 : Facteurs affectant le givrage environnemental des éoliennes extracôtières (adapté de [85])	7
Figure 3.4 : Carte de l'indice de gravité du givrage pour février (1979-2020) [59]	9
Figure 3.5 : Zone du rotor affectée par la glace représentative, telle que définie par la hauteur de givrage du rotor, où h_{ri} est la hauteur de givrage du rotor [65]	11
Figure 3.6 : Le capteur de surveillance de la glace IC-1 d'Icetek [87]	11
Figure 4.1 : Interaction des structures des vagues dans la mer du Nord (adapté de [179])	14
Figure 4.2 : Physique de la génération et du transport des embruns sur la plateforme (adapté de [90])	14
Figure 4.3 : Embruns marins sur une plateforme pétrolière extracôtière (adapté de [183]).....	15
Figure 4.4 : Paramètres importants pour le processus de génération et de transport des embruns	16
Figure 4.5 : Fonction de distribution de concentration des gouttelettes d'embruns marins (dC/dr) [99]	17
Figure 4.6 : Taille recommandée pour les gouttelettes d'éclaboussures des vagues	19
Figure 4.7 : (a) CPE (gauche) et PME (droite) montés sur un navire [121], (b) CIP et l'anémomètre sonique [122]	20
Figure 4.8 : Variables clés influençant le processus de givrage causé par les embruns marins	21
Figure 4.9 : Effet de la température de la mer sur le taux de givrage [149].....	22
Figure 4.10 : Dynamique des gouttelettes et processus de gel sur (i) un substrat nu (ii) un substrat recouvert [167, 169]	24
Figure 5.1 : Cadre souhaité des résultats de recherche sur le climat froid	28

1. Introduction

1.1 Contexte

Les vastes côtes du Canada et ses conditions climatiques distinctes offrent d'importantes opportunités pour déployer des systèmes énergétiques extracôtiers, en particulier au Canada atlantique. Des provinces comme la Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve-et-Labrador possèdent un immense potentiel éolien extracôtier, la Nouvelle-Écosse s'engageant à offrir des baux pour une capacité de cinq gigawatts d'énergie éolienne d'ici 2030 [1], et Terre-Neuve-et-Labrador abritant certaines des plus importantes ressources éoliennes en Amérique du Nord [2].

Malgré ce potentiel, les climats froids posent des défis uniques, notamment des risques de givrage, tels que le givrage atmosphérique, le givrage causé par les embruns marins et la présence de glace de mer. Ces facteurs ont une importante incidence sur la sécurité, la faisabilité et l'efficacité des installations extracôtières.

Bien que des aperçus préliminaires sur la glace de mer et ses répercussions potentielles pour l'énergie éolienne extracôtère aient été explorés dans des études précédentes par CanmetÉNERGIE-Ottawa [3] et dans des contributions aux rapports d'évaluation régionale pour la Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve-et-Labrador [4], le présent rapport se concentre plutôt sur les phénomènes physiques et les pratiques de modélisation associés au givrage atmosphérique et au givrage causé par les embruns marins.

1.2 Objectifs

La présente revue de la littérature vise principalement à explorer et à aborder les défis liés au climat froid, qui peuvent affecter les systèmes énergétiques extracôtiers au Canada atlantique, en mettant particulièrement l'accent sur les risques de givrage. La revue établit les objectifs suivants :

- Combiner les résultats des études existantes afin de fournir une compréhension exhaustive de la manière dont le givrage atmosphérique et le givrage causé par les embruns marins affectent mutuellement les systèmes énergétiques extracôtiers.
- Réaliser une revue systématique des modèles historiques et actuels de prévision du givrage afin de déterminer des lacunes clés en matière de connaissances et de soutenir l'avancement des futures cartes de risque de givrage en climat froid.
- Concevoir un cadre de collecte de données structuré afin d'orienter les futures campagnes sur le terrain, permettant le déploiement sûr, fiable et efficace de systèmes énergétiques hybrides extracôtiers.

1.3 Structure de la revue de la littérature

Le présent rapport est organisé comme suit : Le chapitre 2 décrit les défis auxquels sont confrontées les structures extracôtières dans les climats froids, et commence par une introduction aux types de givrage survenant sur les plateformes extracôtières. Puis, le chapitre 2 examine les paramètres clés qui influencent le processus de givrage atmosphérique en déterminer ces facteurs et en les classant par

ordre de priorité pour les futures initiatives de travail sur le terrain et de modélisation. Au chapitre 2, la revue se penche sur l'évaluation des risques associés au givrage provenant de diverses sources d'embruns marins, en comparant différentes conditions météorologiques et océaniques pour améliorer la précision des prévisions sur la gravité du givrage. Le rapport se termine par le chapitre 5, qui propose une discussion complète et présente des recommandations pour de futures recherches dans ce domaine crucial.

2. Défis des climats froids dans les structures extracôtières

2.1 Classification du givrage

Le givrage constitue un défi important dans les climats plus froids, se manifestant sous diverses formes, comme le givrage atmosphérique et le givrage causé par les embruns marins, en particulier dans les milieux extracôtiers. Ce défi est particulièrement évident dans les parcs éoliens extracôtiers exploités dans ces régions [9, 13].

Des études antérieures montrent qu'une accumulation minimale de glace sur les pales de turbines peut réduire la production d'énergie jusqu'à 20 %. Les pertes de puissance causées par des événements de givrage ont, dans certains cas, entraîné des pertes allant jusqu'à 50 % de la production annuelle d'un parc éolien [14–17]. Ces pertes diminuent non seulement l'efficacité des parcs éoliens, mais entraînent également d'importants revers financiers.

Au-delà de la production d'énergie, le givrage soulève des préoccupations en matière de sécurité publique, y compris les risques liés au givrage des plateformes, au jet de glace et aux éventuels échecs structuraux. L'impact de la glace de mer est principalement associé aux défaillances fondamentales, dont le risque peut être atténué en réalisant des études rigoureuses d'évaluation de site avant l'installation. Ces évaluations aident à déterminer des emplacements appropriés présentant des risques minimes d'icebergs ou de collisions structurelles, garantissant que les turbines fonctionnent efficacement et de façon sécuritaire.

La figure 2.1 et le tableau 2.1 illustrent comment le givrage affecte les structures extracôtiers, indiquant en détail les impacts sur les composantes des turbines et la production globale d'énergie, tout en montrant que la glace de mer a un effet négligeable sur les parties supérieures de la structure, telles que les pales, la nacelle, le moyeu et les anémomètres.

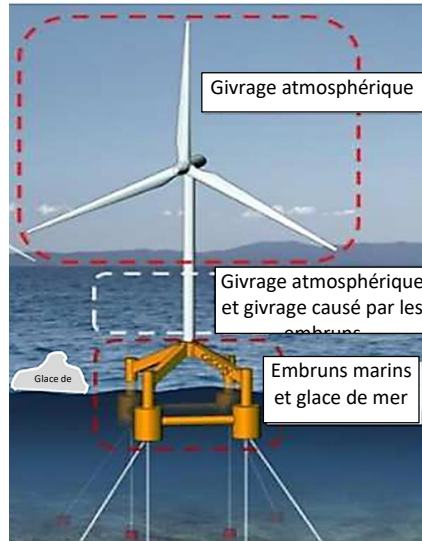


Figure 2.1 : Effet du givrage sur la structure des éoliennes extracôtières (adapté de [23])

Tableau 2.1 : Composantes d'éoliennes touchées par différents types de givrage (adapté de [5])

Types de givrage	Composantes d'éoliennes ou structures extracôtières				Sécurité publique et risque
	Pales	Nacelle	Mat	Fondation	
Givrage atmosphérique	✓	✓	✓		✓
Givrage causé par les embruns	✓		✓	✓	✓
Glace de mer				✓	

Selon ces examens [18–22], la figure 2.2 démontre une classification des différents types de givrage, chaque type étant décrit en détail dans les chapitres suivants.

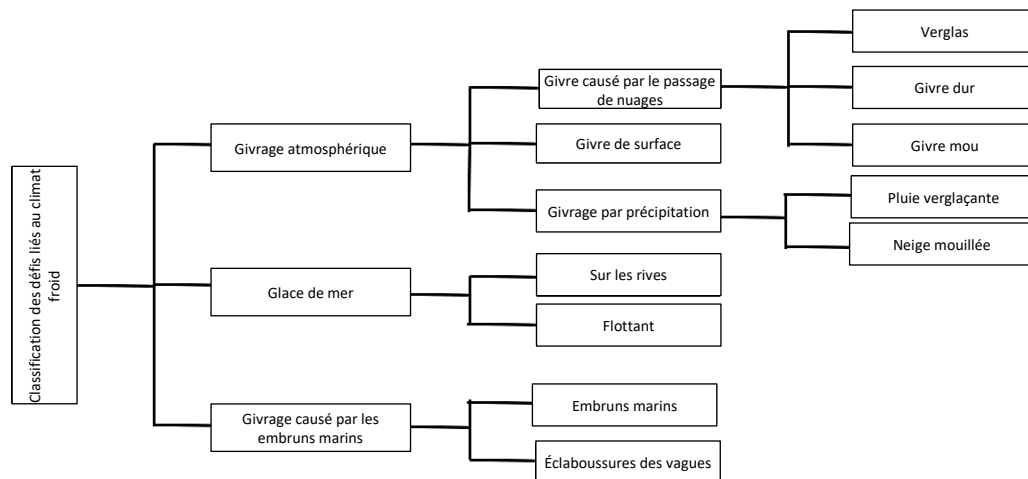


Figure 2.2 : Classification des phénomènes de givrage susceptibles d'affecter les systèmes énergétiques extracôtiers

3. Givrage atmosphérique

3.1 Physique du givrage atmosphérique : Études de fond

Le givrage atmosphérique fait référence à l'accumulation de glace ou de neige sur des structures exposées à l'atmosphère dans des conditions météorologiques spécifiques [24]. Ce phénomène est particulièrement répandu dans les climats froids.

Dans les environnements terrestres, le givrage atmosphérique affecte principalement les parties supérieures des éoliennes, telles que les pales et la nacelle. Cependant, dans des environnements extracôtiers, le givrage peut également affecter les structures du mat et de la plateforme. Cela inclut l'accumulation de glace sur le mât, ce qui peut entraîner une augmentation des charges structurelles et la formation de glace sur les plateformes, posant des risques opérationnels et de sécurité.

Dans les régions à climat froid, trois principaux types de givrage atmosphérique peuvent se produire sur les éoliennes : le givrage causé par le passage de nuages, le givre par précipitation et le givre de surface. Parmi les divers facteurs influents, les conditions météorologiques sont particulièrement significatives dans la formation du givrage atmosphérique et seront discutées en détail dans les sections suivantes.

3.1.1 Givrage causé par le passage de nuages

Le givrage causé par le passage de nuages se produit à des températures atmosphériques basses, lorsque de gouttelettes de liquide surfondues dans les nuages gèlent au contact d'une surface [30, 31]. Le processus est divisé en deux stades : avant impact et après impact. Le stade avant l'impact implique le mouvement des gouttelettes et leur refroidissement pendant leur parcours atmosphérique, tandis que le stade après impact comprend des processus tels que l'étalement, le gel et le ruissellement après que les gouttelettes ont frappé une surface. Les gouttelettes peuvent soit geler à la surface, soit dévier, en fonction de divers facteurs. Le givrage causé par le passage de nuages est en outre classé en deux formes : le givre et le verglas [32, 33, 31, 34].

Le givrage est un phénomène de croissance sèche, qui se produit lorsque des gouttelettes d'eau liquide surfondues sont transportées par un débit d'air et gèlent immédiatement en touchant une surface. Ce type de givrage se forme généralement à des altitudes plus élevées et peut se produire à des températures aussi basses que -20°C . Les facteurs clés influençant la formation de givre comprennent la taille des gouttelettes, des niveaux élevés de surfusion et la dissipation rapide de la chaleur latente de fusion [35]. Le givrage est en outre divisé en givre mou et en givre dur.

Le givrage mou se forme en raison d'une perte de chaleur plus rapide, causant la formation d'une couche blanche et opaque, souvent déposée sur les bords et les points des objets. Le givrage dur, causé par une perte de chaleur plus lente, forme une masse granulaire plus dense et opaque, et les structures côtières exposées à des embruns surfondus subissent souvent un givrage dur [36, 33].

Des études provenant du Japon indiquent que le givrage est fréquent sur les structures maritimes [37]. La figure 3.1 illustre les phénomènes de givrage.

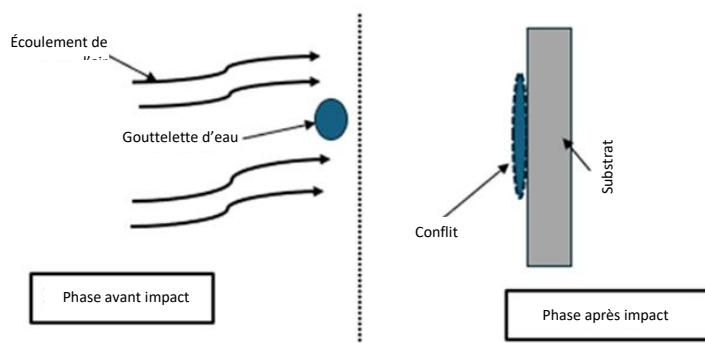


Figure 3.1 : Mécanisme de croissance du givre

Le givrage, également connu sous le nom de glace limpide ou de glace transparente, est un type de glace, qui est constitué d'une couche lisse, homogène et transparente qui adhère fortement aux surfaces [35, 32, 34]. Cela se produit lorsque des gouttelettes surfondues restent à l'état liquide suffisamment longtemps pour se répandre en un mince film avant de geler [33]. Ce type de danger météorologique se produit généralement à des altitudes plus basses et se forme à des températures comprises entre 0 °C et -3 °C [38], bien que la fourchette puisse s'étendre jusqu'à -6 °C [28].

Le verglas est plus dense que l'accumulation de givre, caractérisée par des tailles de gouttelettes relativement plus grandes, une légère surfusion et une dissipation plus lente de la chaleur latente de fusion [35]. La figure 3.2 illustre les phénomènes du verglas.

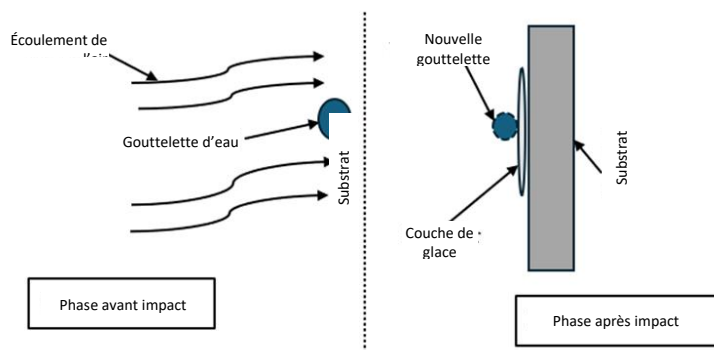


Figure 3.2 : Mécanisme de croissance du verglas

Un rapport du Conseil national de recherches du Canada souligne que, contrairement à de nombreuses autres régions du Canada, la moitié est de Terre-Neuve et le sud du golfe du Saint-Laurent connaissent des événements de verglas fréquents et prolongés. Cette situation découle principalement de leur exposition aux masses d'air atlantiques humides, qui créent des conditions idéales pour des pluies verglaçantes prolongées et l'accumulation de glace [35].

3.1.2 Précipitation et givrage

Ce type de givrage résulte de la pluie verglaçante, du crachin ou de la neige mouillée [39, 40, 31]. Le taux d'accumulation de ce type de givrage peut dépasser celui causé par des conditions de givre causé par le passage de nuages.

La pluie verglaçante est composée entièrement de gouttelettes liquides et se produit lorsque la pluie tombe sur une surface dont la température est comprise entre 0° et –5 °C, entraînant un gel immédiat [41]. La durée des événements de précipitations verglaçantes est généralement de 1 à 2 heures, bien qu'il ne soit pas inhabituel que des événements durent plus de 8 heures [41]. Au Canada, la pluie verglaçante se produit plus fréquemment entre octobre et mai [42, 43], la fréquence la plus élevée étant en mars [41].

La neige humide se compose de cristaux de neige partiellement fondus contenant une petite quantité d'eau liquide, où la teneur en eau liquide est influencée par la concentration dans l'air environnant. Sans tenir compte des précipitations, la teneur en eau liquide (TEL) représente principalement la teneur en eau dans les nuages et le brouillard [32]. La neige mouillée est généralement collante et adhère aux surfaces, un phénomène qui se produit couramment lorsque les températures de l'air se situent entre 0 °C et 3 °C [31]. Dans certaines régions du Canada, en particulier dans les provinces de l'ouest comme l'Alberta, d'importantes charges de glace résultent de la neige mouillée gelée [44, 45].

3.1.3 Givre de surface

Ce type de givrage est communément appelé simplement givre, se forme lorsque la vapeur d'eau se solidifie directement sur une surface froide. Ce phénomène se produit généralement dans des conditions de faible vent et d'humidité relative élevée (au-dessus de 90 %) [32, 46, 33]. Malgré sa faible densité et sa persistance limitée, le givre de surface peut affecter les estimations de production d'énergie des éoliennes [47]. Bien que le givrage ne soit pas rare à des températures de l'air inférieures à –20 °C au-dessus de la mer [48, 49, 50], le givre de surface se forme le plus souvent dans ces conditions [51].

Bien que de nombreux paramètres influencent le givrage atmosphérique, seuls quelques facteurs clés, notamment la température ambiante, la vitesse du vent, la taille des gouttelettes et la teneur en eau liquide, ont été étudiés. Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent un résumé complet des données disponibles [52, 38, 27, 28, 53]. Toutefois, des lacunes importantes subsistent, notamment dans la définition des fourchettes de vitesse du vent et de diamètre des gouttelettes pour le givre produit par les précipitations et le givre de surface. De plus, aucune plage spécifique n'a été trouvée pour la teneur en eau liquide, soulignant la nécessité de recherches supplémentaires dans ces domaines.

Tableau 3.1 : Conditions météorologiques lors des événements de givrage atmosphérique

Givrage causé par le passage de nuages	Source	Température de l'air (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Diamètre des gouttelettes (µm)
Givre dur	Gouttelette d'eau	De 0 à -15	De 5 à 10	
		De -3 à -10		De 3 à 28
Givre mou	Gouttelette d'eau	De -5 à -25	De 1 à 5	
		De -8 à -14		De 2 à 20
Verglas	Gouttelette d'eau	De 0 à -6	De 1 à 20	

		De 0 à -5		De 8 à 39
Précipitation	Gouttelette d'eau	De 0 à -3		
Neige mouillée	Flocons de neige	De 0 à 3		
Givre de surface	Vapeur d'eau	en dessous de -20		

Tableau 3.2 Givrage atmosphérique en fonction de la teneur en eau liquide dans l'air

Givrage causé par le passage de nuages	Teneur en eau liquide dans l'air
Givre dur	Moyen
Givre mou	Faible
Verglas	Élevé
Pluie verglaçante	Moyen
Neige mouillée	Très élevée

3.2 Givre atmosphérique : Côtier par rapport à extracôtier

Les conditions environnementales qui contribuent à la formation de glace varient considérablement entre les milieux côtiers et extracôtiers. La figure 3.3 présente un environnement extracôtier, mettant en évidence des paramètres clés, comme le brouillard marin, les gouttelettes d'eau salée, l'humidité au-dessus de la mer et les particules de sel dans l'air.

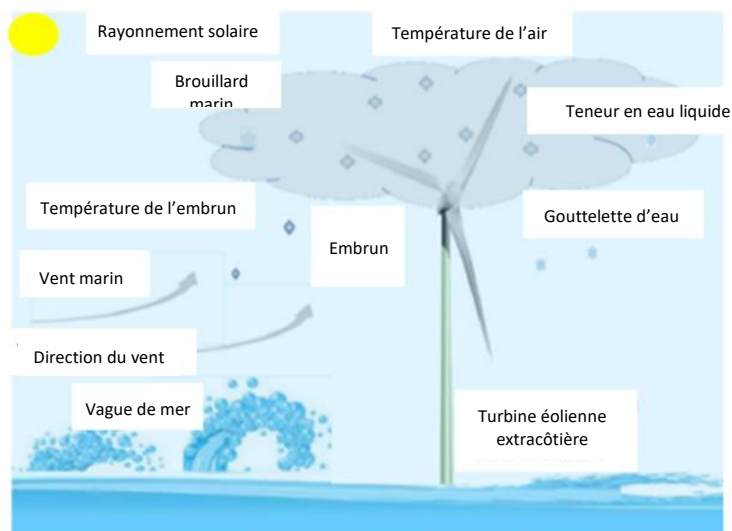


Figure 3.3 : Facteurs affectant le givrage environnemental pour les éoliennes extracôtiers (adapté de [85])

Les régions extracôtiers connaissent fréquemment du brouillard marin, en particulier pendant les mois d'hiver. Le brouillard marin contribue à une concentration plus élevée d'eau liquide surfondue dans l'atmosphère, ce qui est un facteur essentiel dans la formation de glace. Des gouttelettes d'eau

surfondues restent sous forme liquide à des températures inférieures à zéro et peuvent geler rapidement au contact des surfaces des turbines, entraînant une accrétion de glace.

De plus, les vents marins génèrent des gouttelettes d'eau de mer au moyen des embruns et de l'action des vagues. Ces gouttelettes restent en suspension dans l'air, augmentant les niveaux de salinité dans l'environnement atmosphérique entourant les structures extracôtières. Une salinité élevée peut modifier le point de congélation de l'eau et influencer les propriétés d'adhésion de la glace [84], ce qui peut entraîner des formations de glace plus persistantes par rapport aux scénarios d'eau pure généralement observés en région côtière. De plus, l'humidité au-dessus de la mer présente une plus grande variabilité sur une large gamme par rapport aux environnements terrestres. Cette variabilité peut entraîner des conditions de givrage fluctuantes, rendant plus difficiles la prévision et la gestion de l'accumulation de glace sur les structures extracôtières.

Enfin, la présence de particules de sel dans l'air au-dessus de la surface de la mer joue un rôle crucial dans la formation de la glace. Ces particules servent de sites de nucléation pour la formation de glace, modifiant les processus microphysiques en cause dans le givrage. De plus, l'air salin influence des phénomènes tels que le brouillard marin et les brouillards d'évaporation, qui, à leur tour, influencent les taux de précipitation et les modèles d'accrétion de glace sur les pales des turbines [184-185].

3.3 Études antérieures sur la prévision des phénomènes extracôtiers de givrage atmosphérique

Au cours de la dernière décennie, des avancées significatives ont été réalisées dans les méthodes de prévision avant impact des accumulations de glace atmosphérique. Les efforts de recherche se sont traditionnellement concentrés sur le givrage côtier des turbines et le givrage d'eau douce lié à l'aviation. Cette section passe en revue les études antérieures et les approches méthodologiques pour prévoir le givrage atmosphérique, mettant en évidence à la fois leurs réalisations et leurs limites inhérentes.

Les chercheurs ont utilisé un large éventail d'ensembles de données climatologiques, de cadres analytiques et de techniques de modélisation novatrices. Collectivement, ces approches fournissent de précieux renseignements sur les processus derrière le givrage atmosphérique et contribuent à une compréhension plus large de la manière dont ces phénomènes se manifestent sous diverses conditions météorologiques.

3.3.1 Prévisions de glace par évaluations climatologiques et régionales au Canada

3.3.1.1 Approches empiriques et semi-empiriques (1970-2000)

L'une des premières tentatives de délimitation de la répartition spatiale des précipitations verglaçantes a été réalisée par Yip [54], qui a produit des documents cartographiques des précipitations verglaçantes à travers le Canada en utilisant un ensemble de données de 30 ans. Pour ce travail, un modèle semi-empirique, développé par Chaîné et Castonguay [55], a été adopté en supposant une fraction de gel (c'est-à-dire le pourcentage d'eau qui gèle après l'impact) d'une unité et une densité de glace transparente de $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$.

Le modèle de Yip pour estimer l'accrétion de glace radiale sur des objets cylindriques intégrait à la fois des composantes horizontales et verticales, la composante horizontale représentant la quantité ou le

taux de précipitation observé, et la composante verticale étant considérée comme proportionnelle à la fois au taux de précipitation et à la vitesse du vent. Bien que cette approche ait fourni un cadre précoce utile, la sensibilité du modèle à la vitesse du vent et au taux de précipitation, combinée à sa dépendance à des hypothèses simplifiées telles qu'une densité de glace fixe et une fraction de gel, a limité son applicabilité dans diverses conditions environnementales. Par conséquent, les recherches ultérieures se sont orientées vers des approches de modélisation empirique pour mieux saisir les complexités des phénomènes d'accrétion de glace.

McComber et Govoni [56] ont construit des modèles fondés sur des paramètres mesurés tels que la température de l'air, la vitesse du vent et la teneur en eau liquide pour prédire les taux de croissance exponentiels du givre. Bien que ces modèles aient fourni des prévisions efficaces dans des conditions contrôlées, en particulier pour le givre, ils ont difficilement simulé avec précision les événements de pluie verglaçante. Leur travail a souligné la complexité de traduire des relations empiriques en outils opérationnels fiables, en particulier dans des scénarios météorologiques complexes et variables. Une compréhension plus approfondie est venue d'études climatologiques à grande échelle. Stuart et Isaac [57] ont élaboré des cartes de fréquence complètes des précipitations verglaçantes à travers le Canada en utilisant des données couvrant la période de 1961 à 1990. Leurs résultats ont révélé que les précipitations verglaçantes se produisent dans la plupart des régions du Canada pendant toutes les saisons, à l'exception de la côte du Pacifique et des régions les plus au nord, pendant les mois les plus froids. Fait intéressant, St. John's, Terre-Neuve, s'est révélée être la région ayant la plus haute fréquence de précipitations verglaçantes en Amérique du Nord. À Terre-Neuve, les durées cumulatives annuelles de précipitations verglaçantes, de pluie verglaçante et de bruine verglaçante sont d'environ 150 heures, 25 heures et 100 heures, respectivement.

Dans une autre étude réalisée sur le champ pétrolifère Hibernia au Canada, Horjen [58] a mentionné que l'occurrence de la pluie surfondue est fréquente et a entraîné des problèmes opérationnels importants à Terre-Neuve. Bien que cette évaluation régionale ait mis en évidence des influences météorologiques et topographiques locales, elle n'a pas réussi à examiner des tendances temporelles plus larges sur des échelles de temps prolongées.

3.3.1.2 Approches empiriques et semi-empiriques (après 2000)

Pour améliorer la compréhension du givrage atmosphérique, Lamraoui et coll. [59] ont utilisé l'ensemble de données du North American Regional Reanalysis (NARR) pour créer une évaluation climatologique mise à jour de l'indice de gravité du givre causé par le passage de nuages dans le nord-est du Québec. Leur approche de modélisation a pris en compte trois facteurs de pondération, y compris la teneur en eau liquide, la durée de l'événement de givrage et les classes de givrage, afin de caractériser efficacement l'indice de gravité du risque de givrage. Les résultats ont déterminé les pentes orientées vers l'Atlantique de la péninsule de Gaspé et de la vallée du fleuve Saint-Laurent comme des régions présentant des indices de gravité de givrage particulièrement élevés. Cette gravité accrue a été attribuée à la fréquence des pistes de tempête de verglas dans ces régions, accompagnées de vents forts soufflant principalement des directions ouest et nord-ouest.

Une carte représentative de l'indice de gravité du givrage pour le mois de février, comme le montre la figure 3.4, met en évidence que les zones au nord de la vallée du Saint-Laurent connaissent des niveaux particulièrement élevés de gravité du givrage.

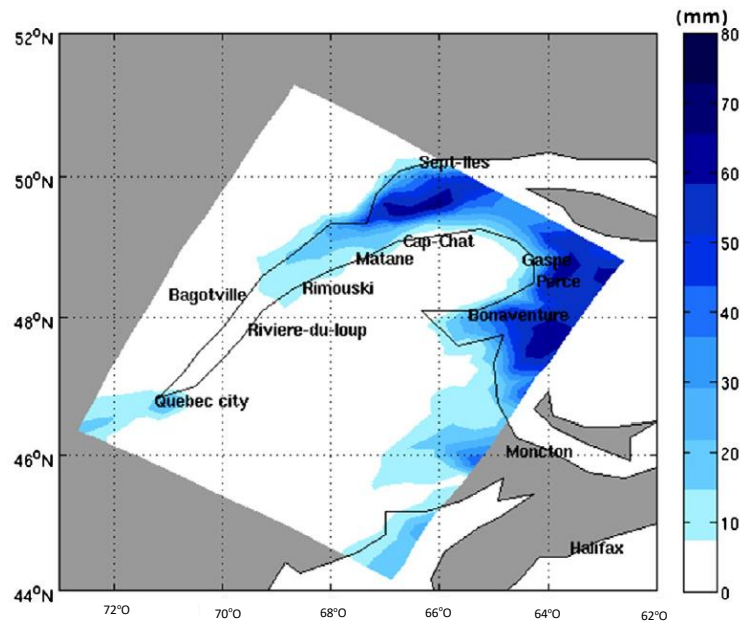


Figure 3.4 : Carte de l'indice de gravité du givrage pour février (1979-2020) [59]

Tony et coll. [60] ont utilisé l'ensemble de données de ERA5 Reanalysis pour examiner le givre par précipitation dans les régions nordiques subarctiques et arctiques. Leur analyse a révélé que, dans les régions extracôtières de l'est du Canada, y compris les Grands Bancs, la passe Flamande et le bassin Orphan, le givre par précipitation était le plus fréquent pendant l'hiver (25 à 40 % des jours), bien que les taux d'accumulation demeuraient relativement bas ($\leq 0,7$ cm/h).

Plus tard, reconnaissant les répercussions profondes du changement climatique, Bernstein et coll. [61] ont produit un rapport climatologique s'étendant sur 14 ans (1990-2003) et portant sur les conditions de verglas au Canada et aux États-Unis continentaux en intégrant des données de sondage porté par ballon avec des observations au niveau du sol de la température, de l'humidité, de la couverture nuageuse et des précipitations. S'appuyant sur des méthodes précédemment validées [62], cette approche a assuré une solide intégration de données. Toutefois, la fenêtre relativement brève de 14 ans a limité son utilité pour évaluer les changements climatiques à long terme.

Cheng et coll. [63] ont intégré des scénarios climatiques futurs dans les prévisions de givrage pour l'est du Canada en utilisant une combinaison de techniques de réduction statistique pour les résultats des modèles de circulation générale et de typage synoptique (p. ex. généralement associé aux événements de pluie verglaçante). Cette approche leur a permis de déterminer les conditions atmosphériques favorables à la pluie verglaçante et d'étendre ces projections aux périodes futures : 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100. Leurs résultats ont révélé une augmentation projetée des événements de pluie verglaçante pendant les mois d'hiver, de décembre à février, au fur et à mesure que le siècle progresse. Cette recherche révolutionnaire a établi un lien essentiel entre les prévisions climatiques à grande échelle et des phénomènes météorologiques spécifiques, offrant de précieux renseignements pour développer des stratégies visant à améliorer la résilience des infrastructures et à s'adapter aux conditions climatiques changeantes.

Enfin, pour obtenir un résumé des études clés et des méthodologies, consultez le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Aperçu des modèles empiriques et semi-empiriques utilisés pour prédire les phénomènes de givrage atmosphérique et les paramètres météorologiques requis.

Auteur(s)	Région	Domaine de recherche	Type de recherche	Paramètre utilisé								
				VV	PAM	TA	HR	CN	PR	TEL	FG	TP
Tony et coll. [60]	Canada Est	Précipitation	Climatologie									✓
Cheng et coll. 70	Canada Est	Pluie verglaçante	Cartographie	✓	✓	✓		✓	✓			
Bernstein et coll. [61]	Canada	Général	Climatologie			✓	✓	✓				✓
Stuart et Isaac [57]	Canada atlantique	Pluie verglaçante, bruine	Cartographie									
McComber et Govoni [56]	Canada	Givre, pluie verglaçante	Empirique	✓		✓				✓		
Yip [54]	Canada	Précipitation verglaçante	Cartographie	✓							✓	✓
Lamouri et coll. [59]	Est du Canada, Nord-Est du Québec	Général	Cartographie	✓						✓		

Les différentes notations sont définies comme suit :

VV=Vitesse du vent; PAM=Pression atmosphérique au niveau de la mer; TA=Température de l'air; RH=Humidité relative; CN=Couverture nuageuse; DR=Point de rosée; TEL=Teneur en eau liquide; FG=Fraction d'eau gelée; TP=Taux de précipitation

3.3.2 Avancement de la modélisation de la prévision du givre

3.3.2.1 Approches empiriques et semi-empiriques

Le risque de formation de givrage atmosphérique sur le rendement des turbines continue d'augmenter au fur et à mesure que davantage de turbines sont déployées dans des régions froides [64]. Au fur et à mesure que la conception des éoliennes évolue, avec des diamètres de rotor plus grands et des mâts plus hauts, il devient donc essentiel d'examiner la relation entre la hauteur du moyeu et la probabilité de givrage du rotor.

$$\text{Hauteur de givrage du rotor} = \text{Hauteur du moyeu de l'éolienne} \frac{\text{Diamètre du rotor}}{3} \quad (3,1)$$

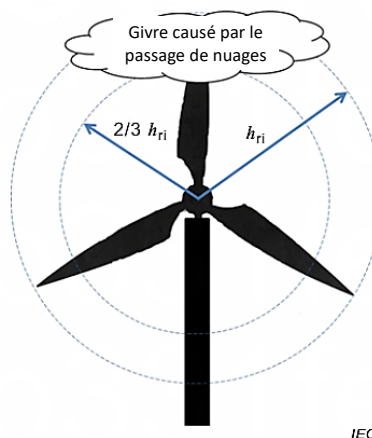


Figure 3.5 : Zone du rotor affectée par la glace représentative, telle que définie par la hauteur de givrage du rotor, où h_n est la hauteur de givrage du rotor [65]

La relation entre la hauteur du moyeu et la probabilité de givrage du rotor a été étudiée empiriquement et est abordée dans la norme IEC 61400-1 pour les éoliennes [65], qui suggère que, lorsque les hauteurs des nuages tombent en dessous de la hauteur de givrage du rotor, l'ensemble du rotor est supposé se trouver dans la couche de nuages. Bien que cette approche empirique soit reconnue dans la littérature [178], les corrélations complètes avec les paramètres environnementaux clés, tels que les profils de température, la vitesse de l'air et l'humidité, restent limitées. D'autres recherches sont essentielles pour améliorer l'hypothèse de ces estimations et pour approfondir notre compréhension des mécanismes sous-jacents.

Pour améliorer les systèmes de prévision du givre dans des conditions météorologiques variées, Nergica [87] a développé un capteur avancé de surveillance des conditions de givre, comme le montre la figure 3.6. Cet appareil innovant mesure non seulement les paramètres météorologiques standards, mais détecte également la teneur en eau liquide (TEL), ce qui le distingue des capteurs traditionnels. Avec la capacité d'évaluer la TEL, le capteur peut prédire différents types de givrage (p. ex. givre, verglas, neige humide) et déterminer les taux d'accumulation sur les surfaces. Ces renseignements peuvent ensuite être intégrés dans les systèmes de contrôle des turbines ou les installations de dégivrage, réduisant ainsi l'impact du givrage sur la production d'énergie éolienne et améliorant la fiabilité globale du système.



Figure 3.6 : Le capteur de surveillance de la glace IC-1 d'Icetek [87]

3.3.2.2 Évaluation des approches computationnelles (après les années 1970)

Les premières études sur les phénomènes de givrage atmosphérique se sont initialement concentrées sur des géométries et des conditions relativement simples. Zarling [66] a mené des études analytiques sur le transfert de chaleur et de masse dans des gouttelettes en chute libre, déterminant -18 °C comme une température critique pour la nucléation (c.-à-d. le stade précoce du gel). Plus tard, Sultana et coll. [67-68] ont fait progresser la compréhension du comportement de gel des gouttelettes en intégrant des propriétés thermophysiques dépendant de la température. Leurs résultats ont révélé que la formation initiale de glace peut se produire à des températures supérieures au point de congélation d'équilibre, en fonction de la taille des gouttelettes, de la température atmosphérique et de la salinité de l'eau. De telles perspectives sont essentielles pour élucider les bases mécaniques du givrage dans les gouttelettes en chute libre et affiner les modèles prédictifs.

En tant qu'une des avancées dans la modélisation de l'accrétion de la glace, Lozowski et coll. [69] ont réalisé des analyses numériques sur des surfaces cylindriques stationnaires et non chauffées,

éclaircissant les variations de l'accrétion de glace autour du cylindre dans des scénarios de givre et de verglas. Les efforts théoriques ultérieurs [70-77] ont élargi le champ d'application pour inclure les processus de croissance de glace transitoire et des phénomènes plus complexes, tels que la formation de glaçons. Poursuivant ce champ d'enquête, Szilder et Lozowski [78] ont introduit un modèle de parcours aléatoire tridimensionnel pour mieux élucider le comportement de croissance des glaçons. En intégrant des paramètres essentiels, à savoir le mouvement des gouttes, la probabilité de congélation et le détachement de gouttelettes, leur travail a permis une compréhension plus nuancée de la manière dont divers facteurs influencent la géométrie des glaçons et l'efficacité de congélation. En s'appuyant sur ces bases, Makkonen et coll. [79] ont fait progresser le cadre de modélisation grâce à un modèle à cadre flexible quasi tridimensionnel. Cette amélioration a ensuite fourni la base conceptuelle sous-jacente pour de nombreux modèles empiriques de givrage utilisés dans des études ultérieures.

Parallèlement, divers outils de simulation de givrage en deux et trois dimensions ont émergé, pour lesquels les environnements de givrage impliquent principalement des gouttelettes d'eau pure [81-83]. Des logiciels commerciaux, tels que LEWICE, FENSAP-ICE et TURBICE, représentent une évolution des capacités de modélisation computationnelle. LEWICE, un modèle bidimensionnel couramment utilisé dans les contextes de l'aviation, fournit une analyse fondamentale du givrage sur des surfaces aérodynamiques isolées. TURBICE offre une modélisation quasi tridimensionnelle avec un accent principal sur la production d'énergie éolienne, simulant le givrage sur une section représentative de la pale. En revanche, FENSAP-ICE, un outil tridimensionnel, peut modéliser l'ensemble de la pale, en intégrant pleinement les effets d'écoulement tridimensionnels. Toutefois, augmenter la fidélité dimensionnelle des simulations de givrage entraîne souvent des exigences computationnelles considérablement plus élevées. Les méthodes bidimensionnelles et quasi tridimensionnelles simplifient cette complexité en modélisant uniquement une seule pale ou en utilisant des approches d'ordre réduit, tandis que les méthodes entièrement tridimensionnelles capturent des géométries de pale plus réalistes et des variations du flux spatial, bien que cela entraîne un coût computationnel plus élevé.

Le tableau 3.4 présente un résumé de ces approches de modélisation, de leurs principaux domaines d'application et des paramètres clés, servant de guide comparatif de pointe des méthodologies de simulation de givrage.

Tableau 3.4 : Aperçu des modèles de simulation du givrage et de leurs paramètres météorologiques requis

Domaine de recherche	Type de recherche	Paramètre utilisé										
		VV	AA	VR	DG	TA	TE	PA	HR	TEL	S	TG
Précipitation	Climatologie	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
Pluie verglaçante	Cartographie	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
Général	Climatologie	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Pluie verglaçante, bruine	Cartographie	✓				✓	✓	✓		✓		✓
Givre, pluie verglaçante	Empirique	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓

Les différentes notations sont définies comme suit :

VV= Vitesse du vent; AA= Angle d'attaque; DG= Diamètre des gouttelettes; TA= Température de l'air; TE= Température de l'eau; VR= Vitesse relative; PA= Pression atmosphérique; HR= Humidité relative; TEL= Teneur en eau liquide; S= Substrat; TG= Temps de givrage

4. Givrage d'embruns marins

4.1 Physique du givrage d'embruns marin : Études de fond

Lorsque les vagues océaniques interagissent avec des structures semi-submersibles, elles génèrent des embruns marins, qui peuvent entraîner la formation de givrage. Deux processus principaux sont responsables de la formation d'embruns : l'un induit par les impacts des vagues et l'autre entraîné par le vent.

4.1.1 Éclaboussures des vagues

Les éclaboussures des vagues, également appelées embruns induits par les vagues, se produisent lorsque des vagues déferlantes frappent des structures fixes ou flottantes, comme des plateformes, des turbines et des navires. Les gouttelettes résultantes peuvent être élevées à des hauteurs considérables au-dessus de la surface de la mer, contribuant ainsi de manière significative à l'accrétion de glace [88, 89]. Les figures 4.1 et 4.2 illustrent l'interaction onde-structure et le processus de génération d'embruns.

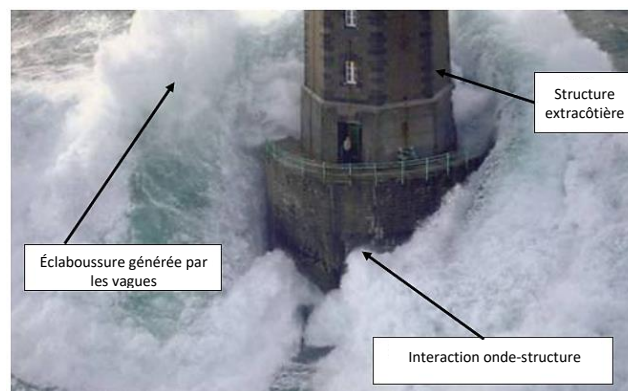


Figure 4.1 : Interaction des structures des vagues dans la mer du Nord (adapté de [179])

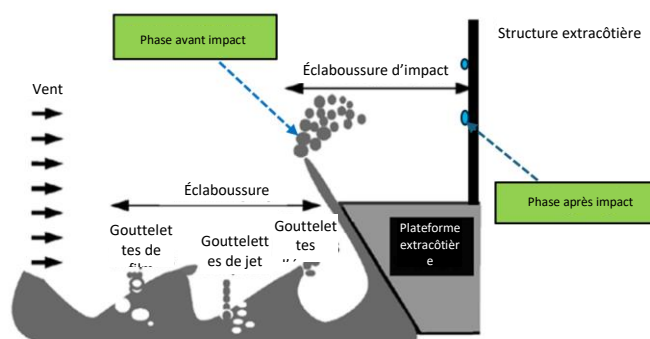


Figure 4.2 : Physique de la génération et du transport des embruns sur la plateforme (adapté de [90]).

Les chercheurs séparent généralement le phénomène en deux stades : le stade avant impact (génération d'éclaboussures et transport atmosphérique) et le stade après impact (contact avec une surface et processus de givrage). Cette segmentation aide à déterminer les variables essentielles à chaque stade, permettant des stratégies ciblées, telles que le blindage de la zone de projection et les mesures contre le givrage, ainsi qu'une amélioration de la surveillance météorologique pour prévoir les événements de givrage [91-94].

4.1.2 Embruns générés par le vent

Les embruns générés par le vent, ou embruns naturels, sont principalement produits par l'influence du vent et d'autres facteurs environnementaux. Bien qu'ils aient tendance à jouer un rôle secondaire par rapport aux embruns induits par les vagues dans le processus de givrage [91, 93-94], il est essentiel de comprendre leur formation, en particulier pour les plateformes extracôtières stationnaires.

La figure 4.3 fournit un exemple d'embruns marins sur une plateforme pétrolière extracôtière, où des embruns sont générés et atteignent l'atmosphère.



Figure 4.3 Embruns marins sur une plateforme pétrolière extracôtière (adapté de [183])

4.2 Études antérieures sur la génération d'embruns marins ou avant impact

La recherche sur l'impact des vagues sur les objets solides est depuis longtemps un sujet d'intérêt dans ce domaine. Le processus qui mène aux embruns marins est divisé en stades distincts : impact initial des vagues, formation de couches, rupture de couches, rupture de gouttelettes et trajectoires des gouttelettes [95-98]. Étant donné la nature intermittente et dépendante du temps de ces processus, une modélisation précise est essentielle pour prédire les événements de givrage.

Des recherches antérieures sur la génération d'embruns englobent des approches analytiques, empiriques et de modélisation. Fondé sur ces études, la figure 4.4 résume les principaux paramètres impliqués dans la phase avant impact des éclaboussures des vagues, des descriptions détaillées étant fournies ci-dessous.

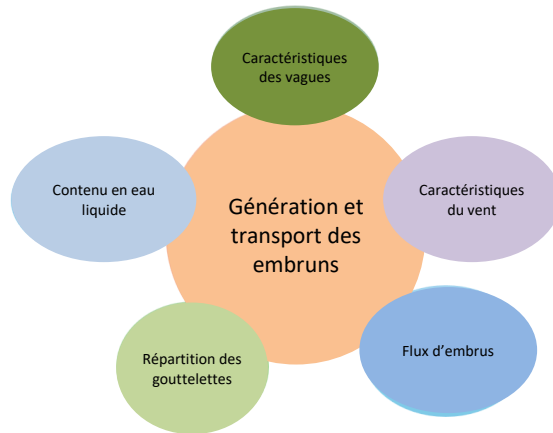


Figure 4.4 : Paramètres importants pour le processus de génération et de transport des embruns

4.2.1 Caractéristiques des vagues

Les caractéristiques des vagues sont des facteurs importants pour déterminer les caractéristiques des gouttelettes d’embruns marins. Des vagues plus grandes et plus longues ont tendance à produire des événements de rupture de vagues plus puissants (p. ex. les vagues frappant les structures extracôtières), ce qui entraîne une augmentation de la formation de gouttelettes.

Le type de déferlement des vagues, qu’il s’agisse de déversement, de plongée ou de montée, influence davantage la taille et l’énergie des gouttelettes résultantes. Les vagues plongeantes créent des gouttelettes plus grandes et plus énergiques, tandis que les vagues débordantes génèrent des gouttelettes plus petites et moins énergiques. Selon des études antérieures, les caractéristiques des vagues sont classées en plusieurs paramètres, comme il est décrit au tableau 4.1.

Tableau 4.1. Paramètres inclus dans les caractéristiques des vagues.

Facteur d’efficacité	Les paramètres comprennent
Vague	Hauteur des vagues (en m)
	Longueur des vagues (en m)
	Spectres des vagues (m^2/Hz)
	Direction de propagation des vagues (degrés)
	Vitesse des vagues (m/s)

Dans le domaine de la dynamique des embruns, la fréquence du déferlement des vagues joue un rôle important. Des vagues de fréquence plus élevée génèrent plus fréquemment des gouttelettes, augmentant le volume d’embruns, en particulier dans des conditions de vent constantes.

Une étude de terrain, réalisée de décembre 2012 à janvier 2013 par Jones et Andreas [99], a produit des données sur les embruns générés par le vent et a observé que le gradient de concentration des gouttelettes d’embruns (dC/dr) dépend à la fois de la hauteur significative des vagues ($H_{1/3}$), de la vitesse du vent (U_{10}) à 10 m et de la direction du vent. La figure 4.5 illustre les résultats.

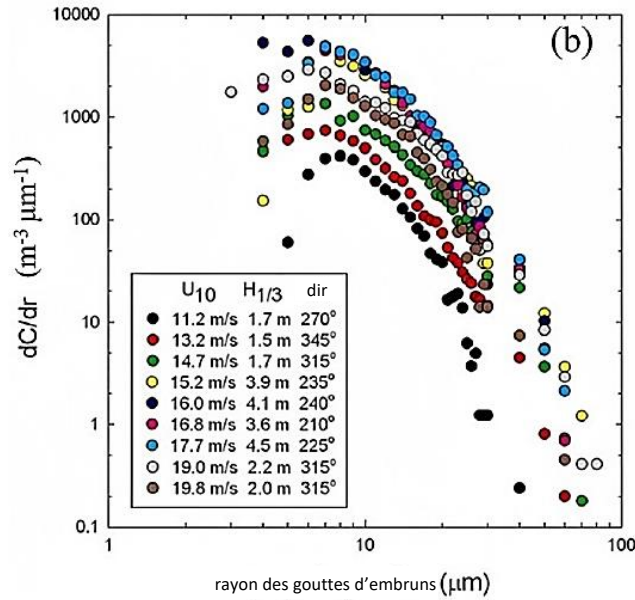


Figure 4.5 : Fonction de distribution de concentration des gouttelettes d'embruns marins (dC/dr) [99]

Pour les foreuses stationnaires, les embruns marins sont généralement concentrés entre 5 et 20 m au-dessus de la surface de l'eau [100]. Toutefois, dans les régions où des événements de grandes vagues se produisent fréquemment, comme dans l'Atlantique Nord, les embruns marins peuvent atteindre des hauteurs de 15 à 60 m au-dessus du niveau de la mer.

4.2.2 Flux d'embruns

Le flux d'eau provenant des vagues est généralement bref et localisé près de la base des structures extracôtières, tandis que les embruns induits par le vent offrent un flux continu, bien que moindre [91, 93-94].

La quantité du flux de masse totale d'embruns d'eau de mer sur un objet situé sur une plateforme marine par unité de surface pour les éclaboussures des vagues lors d'un seul événement d'embruns est donnée par (Horjen, 1983 ; Zakrzewski, 1987 [101-102]) :

$$M = EU_h w(z)_{\text{wave}} \Delta t \quad (4.1)$$

où E est l'efficacité de collision, U_h est la vitesse de la gouttelette au moment de l'impact, w est la TEL, et Δt est la durée de l'éclaboussure. Dans certaines conditions, les flux d'embruns mesurés sur des surfaces horizontales et verticales varient de 0 à $3 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{s}$ [103].

En plus de la modélisation empirique, d'anciens chercheurs ont utilisé plusieurs mesures de terrain avec divers instruments, y compris des capteurs et même des outils non conventionnels, comme des rouleaux de papier hygiénique et des couches pour bébés. Par exemple, Muzik et Kirby [104] ont enregistré des mesures d'embruns pendant la saison des eaux libres de 1982 sur l'île Tarsiut—une île artificielle confinée par des caissons dans la mer de Beaufort [105]. Leur objectif était de cartographier la distribution horizontale des embruns marins et de quantifier le volume produit lors d'événements de forts vents et de fortes vagues, les résultats étant résumés au tableau 4.2. Les auteurs ont mesuré la vitesse moyenne du vent à une hauteur de 34 m.

Tableau 4.2 : Aperçu des données sur le vent, les vagues et les embruns mesurées sur l'île Tarsiut [104]

Date	Hauteur maximale des vagues significatives enregistrées (en m)	Taux d'éclaboussures maximales enregistrés (cm/h)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse maximale du vent (m/s)
20-21 août 1982	25	61	16,6	18,9
6-8 septembre 1982	2	31	10,6	17,3
17 septembre 1982	1,75	6	5,1 (estimé)	5,1 (estimé)

Ces résultats ont ensuite été utilisés par Lozowski et coll. [106] pour affiner les algorithmes de teneur en eau liquide (TEL) et de fréquence des embruns dans le modèle de RIGICE, qui estime les charges de glace sur les plateformes de forage dans les eaux canadiennes. En s'appuyant sur ce travail, Forest et coll. [107] ont encore amélioré le modèle RIGICE04 en intégrant des données améliorées sur les embruns. Plus récemment, des outils avancés, comme des sondes d'imagerie de la couverture nuageuse (SICN), les caméras à haute vitesse et les systèmes LiDAR ont été introduits, offrant une haute résolution spatiale et temporelle pour une capture plus détaillée de la dynamique des embruns marins [108, 109].

4.2.3 Teneur en eau liquide (TEL)

La teneur en eau liquide, définie comme la masse d'eau par unité de volume d'air sec, est principalement déterminé par la hauteur des vagues. Diverses formules ont été suggérées pour la TEL en raison de l'impact des vagues et des embruns marins, mais bon nombre sont destinées aux navires marins. Les observations de terrain de Forest et coll., [107] sont les données les plus pertinentes pouvant être utilisées dans ce contexte d'objet stationnaire. Les relations empiriques dérivées des données de terrain comprennent :

TEL instantané [107] :

$$LWC(z) \leq 1,35H_{1/3}^{2/3} \exp((-0,53z)) \quad (4,2)$$

où $H_{1/3}$ est la hauteur significative des vagues, et z (m) est l'élévation au-dessus du niveau moyen de la mer, et TEL pour un seul nuage d'éclaboussure en kg/m^3 .

TEL moyen sur le temps [110] :

$$e = 0,1H \exp((H - 2z)) \quad (4,3)$$

où e est la teneur en eau liquide du nuage d'éclaboussure moyenne dans le temps, et H est la hauteur des vagues (m).

Les résultats empiriques montrent qu'à une vitesse de vent constante (7 m/s), une augmentation de la TEL est corrélée à une plus grande épaisseur de glace. Cela souligne la nécessité de mesures précises de la TEL à l'aide de capteurs directs et de modèles numériques.

4.2.4 Distribution de la taille des gouttelettes

L'impact du vent et des vagues crée diverses tailles de gouttelettes. Par exemple, dans des conditions où les vitesses du vent dépassent 4 m/s, les gouttes mesurent généralement entre environ 1 µm et 25 µm [111-112]. De plus, Jones et Andreas [113] ont observé que les embruns marins agissant sur des structures marines fixes génèrent trois types distincts de gouttelettes, dont les tailles varient d'environ 0,5 µm à 500 µm, comme il est indiqué en détail au tableau 4.3. En particulier, les gouttes de mousse plus grandes (celles de plus de 37 µm) ont été liées à des taux de givrage accrus sur ces plateformes [114].

Tableau 4.3 : Gouttelettes générées par les embruns marins

Types de gouttelettes	Taille des gouttelettes selon le rayon (µm)
petits films de gouttelettes	0.5 - 50
gouttelettes de jet	1 - 100
gouttelettes d'écume	20 - 500

Le déferlement des vagues, indépendant des embruns générés par le vent, produit son propre éventail de distributions de tailles de gouttelettes. Des enquêtes antérieures portant sur les navires [115], les structures extracôtières [116-118], et les îles [119] ont fourni de précieuses données de terrain, bien que des documents complets de la répartition verticale des gouttelettes des vitesses n'aient souvent pas été saisis. En s'appuyant sur ces études antérieures, un nouveau diagramme a été élaboré à la figure 4.6, qui suggère une taille recommandée de gouttelettes pour modéliser l'accrétion de glace sur les structures extracôtières.

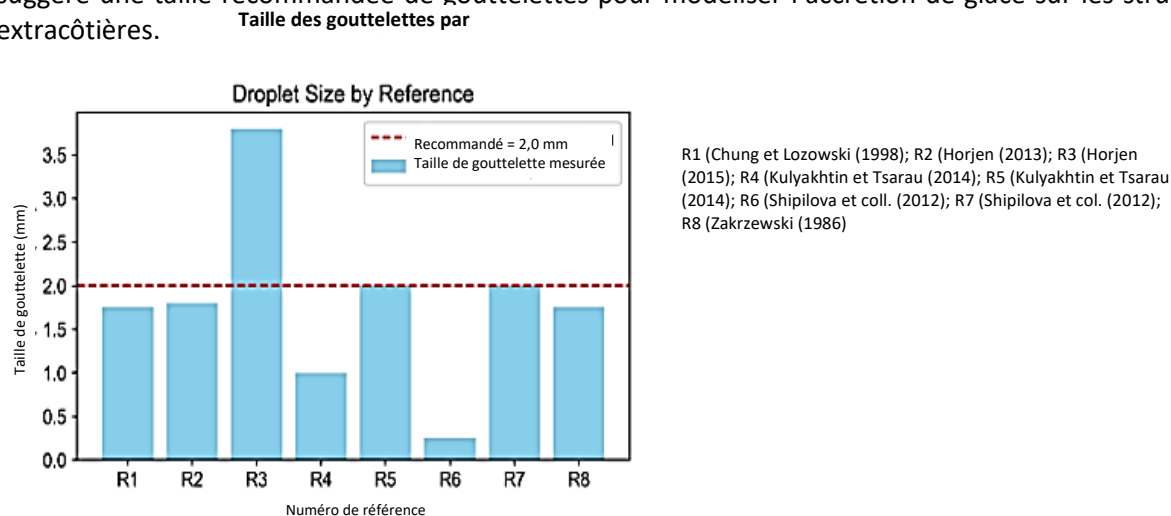


Figure 4.6 : Taille recommandée pour les gouttelettes d'éclaboussures des vagues

Pour surmonter les défis passés, des études de terrain réalisées récemment ont utilisé divers instruments, y compris des caméras à haute vitesse, des compteurs de particules d'embruns (CPE), des sondes d'imagerie de la couverture nuageuse (CIP), des pluviomètres marins de type jauge d'embruns (PME) et la vélocimétrie par images de particules numériques (VIPN), pour mesurer les tailles et les vitesses des gouttelettes. Par exemple, Ozeki et coll. [121] ont introduit des jauges spécialisées, qui

mesurent simultanément la distribution de la taille des gouttelettes et le volume de pulvérisation (figure 4.7). Toutefois, en raison de l'importante variation des gouttes d'embruns marins, allant d'aussi peu que $0,02\ \mu\text{m}$ à autant que $7,7\ \text{mm}$ de diamètre [123-124], aucun instrument unique n'est capable de capter l'ensemble du spectre.



Figure 4.7 : (a) CPE (gauche) et PMES (droite) montés sur un navire [121], (b) CIP et l'anémomètre sonique [122]

Étant donné que la plupart des techniques de mesure échantillonnent seulement une petite fraction du nuage d'embruns, ce qui peut potentiellement fausser sa distribution globale, des méthodes numériques avancées, telles que l'hydrodynamique des particules lisses (HPL) et la modélisation de la phase discrète (MPD), ont été appliquées pour simuler les interactions complexes impliquées dans la génération et le transport d'embruns.

4.2.5 Direction du vent et turbulence

Les variations de la vitesse et de la direction du vent, communément appelées cisaillement du vent, génèrent des turbulences qui influencent énormément les trajectoires des gouttes d'embruns marins. Cette turbulence perturbe le chemin prévisible des gouttelettes, les faisant se disperser de manière inégale lorsqu'elles se déplacent dans l'air. Par conséquent, le dépôt de gouttelettes sur les structures extracôtières devient très non uniforme, entraînant une formation de glace irrégulière et asymétrique.

Les recherches indiquent que l'important entraînement de gouttelettes commence généralement à des vitesses de vent dépassant $9\ \text{m/s}$ [125, 126], et une importante formation d'embruns se produit autour de $19\ \text{m/s}$ [127]. Jones et Andreas [99] ont également démontré que même de légères variations des conditions de vent peuvent affecter de manière significative la concentration des gouttes et les schémas de dépôt. De plus, des études [94, 91] révèlent que cette dispersion imprévisible augmente non seulement les charges de glace localisées, mais pose également d'importants risques pour l'intégrité structurelle et la fonctionnalité opérationnelle des installations extracôtières.

4.3 Études antérieures sur les phénomènes de givrage après impact ou marin

Le givrage marin est un phénomène complexe et à facettes multiples, qui résulte d'interactions environnementales sévères entre le vent, les éclaboussures des vagues et les infrastructures maritimes.

Lorsque les vitesses du vent dépassent environ 9 m/s, des gouttes d’embruns générées par l’impact sont projetées sur les plateformes marines [128]. Lors du contact, ces gouttelettes sont rapidement exposées à des conditions ambiantes froides, qui déclenchent une série de changements de phase par les modes de transfert de chaleur (conduction, convection et radiation), qui contribuent collectivement au processus d’accrétion de glace [129-130]. Il est possible de trouver une explication détaillée de ces équations dans des études antérieures [128, 131-147].

Le taux d’accumulation de glace, ou l’intensité de givrage, est un aspect critique du givrage marin, généralement mesuré sur une base horaire sur des structures maritimes. Ce taux est influencé par divers paramètres, et en s’appuyant sur des mesures visuelles et des facteurs de gravité météorologique, une équation simplifiée (4.4) pour la croissance du givrage causé par les embruns marins sur les structures extracôtières a été suggérée par Overland et coll., [148] et Overland [149].

$$I = \frac{v_a (T_f - T_a)}{1 + 0,4(T_s - T_f)} \quad (4,4)$$

où I est l’intensité du givrage, v_a est le vecteur vent, T_f est le seuil de température, T_a est la température de l’air et T_s est la température de l’eau de mer.

Bien que l’équation 4.4 intègre plusieurs paramètres clés, elle omet certains facteurs importants. Une telle limitation est le traitement simplifié de l’humidité relative. Pour améliorer la précision prédictive de l’intensité du givrage, les efforts de modélisation futurs et les corrélations de mesure devraient combler cette lacune. La figure 4.8 présente un exemple de paramètres de modélisation futurs potentiels, qui sont décrits plus en détail ci-dessous.

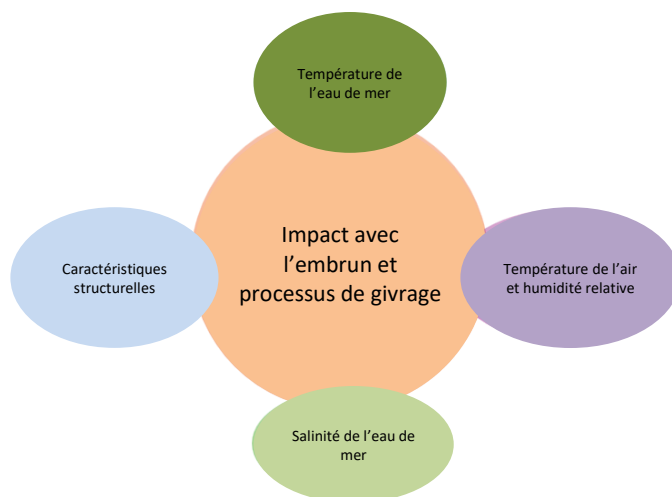


Figure 4.8 : Variables clés influençant le processus de givrage causé par les embruns marins

4.3.1 Température de l’air et humidité relative

Les conditions atmosphériques, en particulier la température de l’air et l’humidité relative, jouent un rôle crucial dans la détermination du comportement des gouttelettes d’eau sur les structures extracôtières. Des températures plus basses accélèrent le refroidissement des gouttelettes, augmentant la probabilité de geler après l’impact, tandis qu’une humidité élevée ralentit l’évaporation, permettant

aux gouttelettes de conserver leur taille et de renforcer leur potentiel de geler. La recherche historique soutient ces observations.

Par exemple, on commence à observer l'accumulation de glace à une température de l'air de -2°C , la croissance la plus rapide se produisant autour de -17°C [150-151]. De même, Lundqvist et Udin [152] ont constaté que le givrage de l'eau de mer nécessite des températures inférieures à -2°C , et Cammaert [153] a noté que le givrage causé par les embruns marins commence lorsque les températures de l'air descendent sous le point de congélation de l'eau de mer (-2°C). Fait intéressant, certaines études russes indiquent qu'à des températures inférieures à -18°C , le givrage causé par les embruns ne se produit pas, car les gouttelettes gèlent en vol et forment des cristaux de glace, empêchant l'adhésion aux navires et aux structures [154, 155, 156].

En ce qui concerne l'humidité relative, le profil vertical près de la surface de la mer reste mal caractérisé. Bien que les recherches antérieures aient souvent supposé des valeurs supérieures à 80 % [186], d'importantes lacunes dans notre compréhension persistent.

Ces écarts soulignent la nécessité d'analyses spécifiques à chaque région dans des zones aux conditions météorologiques très variables, comme l'Arctique et d'autres régions froides. De plus, comprendre les impacts à long terme du changement climatique sur ces influences atmosphériques nécessitera une analyse statistique complète.

4.3.2 Température de l'eau

Le taux de givrage est fortement influencé par les températures de l'eau de mer, comme le montre la Figure 4.9.

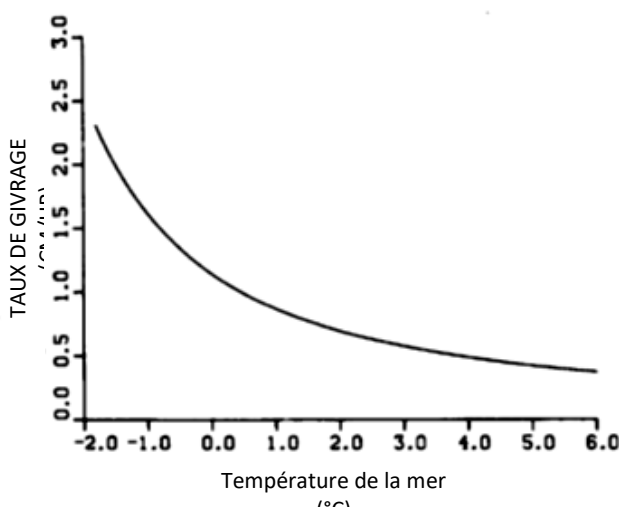


Figure 4.9 : Effet de la température de la mer sur le taux givrage [149] 22

Des études antérieures ont montré que les gouttes d'embruns sont plus susceptibles de surfondre lorsque la température de surface de la mer tombe en dessous de 7°C , à condition que la température de l'air reste en dessous du point de congélation de l'eau de mer salée ($-1,7^{\circ}\text{C}$) [157, 158, 159].

Les températures de surface de la mer varient selon les régions; par exemple, dans des zones telles que les îles Aléoutiennes, le golfe de l'Alaska, la mer de Béring et l'Arctique, la fourchette de température critique pour le givrage marin se situe entre $-2,2$ et $8,9^{\circ}\text{C}$ [153, 157; 160]. De plus, des recherches ont

suggéré que, dans la plupart des eaux canadiennes, les embruns givrants sont rares lorsque la température de la surface de la mer dépasse 5 °C, avec des températures typiques variant de -1,7 à 5 °C [161-163].

4.3.3 Salinité de l'eau

La salinité de l'eau représente un défi important dans le givrage marin, entraînant des phénomènes tels que la surfusion, la spongiosité (une structure composite de glace pure entrecoupée de poches de saumure et de bulles d'air) et le rejet de sel. Une salinité plus élevée prolonge le processus de congélation en maintenant les gouttelettes dans un état refroidi pendant une période plus longue. Par conséquent, les modèles de givrage marin s'appuient sur la température de gel d'équilibre pour tenir compte du processus de surfusion dépendant de la salinité [161] :

$$T_{eq} = -0,002 - 0,0524S_w - 0,00006S_w^2 \quad 4,5$$

où T_{eq} est la température de congélation d'équilibre et S_w est la salinité de l'eau.

Bien que des études antérieures aient souvent utilisé une valeur de salinité moyenne de 34 ppt à des fins de modélisation, la salinité réelle peut varier considérablement selon les différentes régions, comme l'illustre le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Renseignements sur la salinité dans l'eau de mer [163-166]

Lieu	Salinité (%)
Océan Atlantique	36-37
Arctique	20-35
Mer Noire	3-15
Mer Baltique	8
Golfe du Saint-Laurent	32-34
Mer Méditerranée	37-39
Mer Rouge	34-41
Salinité moyenne de l'océan considérée	34,7

Au fur et à mesure que le climat change, les recherches à venir devraient intégrer des études sur le terrain spécifiques à la région au moyen de l'échantillonnage de l'eau ou de mesures fondées sur des capteurs à différentes profondeurs. De plus, les défis posés par la spongiosité et le rejet de sel compliquent davantage les applications de givrage marin, et une compréhension plus détaillée de ces phénomènes est encore nécessaire.

4.3.4 Rugosité de surface et topographie des structures extracôtières

La géométrie [80, 86] et les propriétés de la surface [167, 168] des plateformes extracôtières sont essentielles pour déterminer le comportement des gouttes d'embruns et leur accréation de glace subséquente au contact. La forme et la configuration des surfaces, qu'elles soient planes, à bords tranchants, cylindriques ou sphériques, jouent un rôle essentiel dans l'influence de l'adhésion et de l'interaction des gouttes. Par exemple, des bords tranchants peuvent favoriser la chute de glace en raison des forces aérodynamiques, tandis que les surfaces planes ont tendance à retenir la glace plus facilement. De plus, l'angle auquel le vent interagit avec la structure a une incidence importante sur les modèles de dépôt de glace. Les structures orientées perpendiculairement aux vents dominants peuvent

présenter des dynamiques de givrage distinctes par rapport à celles alignées avec le vent, affectant finalement la distribution des charges de glace sur la plateforme.

De plus, des études soulignent que les surfaces lisses sont plus susceptibles d'accrétion rapide et importante de la glace par rapport aux surfaces rugueuses recouvertes [167-168]. Ces phénomènes sont représentés visuellement dans la Figure 4.10, illustrant les différences d'accumulation de glace selon les différents types de surface.

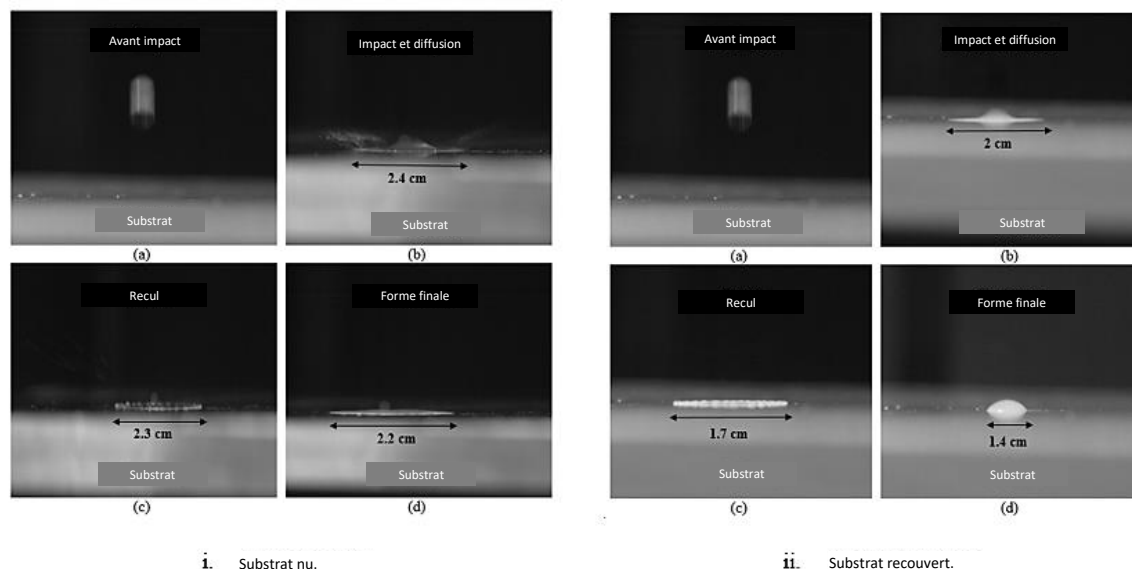


Figure 4.10 : Processus de gel des gouttelettes sur (i) un substrat nu (ii) un substrat recouvert [167, 169]

Au-delà des études empiriques, des modèles computationnels avancés ont été développés pour simuler les processus d'accrétion de la glace en intégrant la dynamique des embruns marins. Ces modèles sont classés en modèles entièrement stationnaires, modèles quasi stationnaires et modèles entièrement dépendants du temps, en fonction de la manière dont ils gèrent l'entrée de flux de masse des embruns et calculent les taux de givrage.

Les modèles entièrement stationnaires, tels que RIGICE et MINCOG, supposent un flux de masse d'embruns constant tout au long de la période de givrage, s'appuyant sur un flux moyen dans le temps sans nécessiter d'intrants spécifiques sur la fréquence ou la durée des embruns. En revanche, les modèles quasi stables, comme le modèle de navire Midgett, permettent au flux de masse des embruns de varier au fil du temps. Enfin, les modèles entièrement dépendants du temps, comme ICEMOD, tiennent pleinement compte des variations temporelles dans le processus de givrage. Alors que les modèles stationnaires dépendent principalement du flux moyen, ces types de modèles nécessitent des intrants détaillés concernant la fréquence et la durée du givrage lors de l'utilisation de la teneur en eau liquide (TEL).

Au fil du temps, ces modèles ont été améliorés avec de nouvelles données, de nouvelles interprétations et de nouveaux algorithmes. Malgré ces avancées, les sous-modèles de givrage doivent encore composer avec des limites. Les versions actuelles simplifient souvent des aspects clés, comme

l'hypothèse d'une taille constante des gouttes et l'ignorance des dynamiques complexes de la circulation de l'air, ce qui entraîne des incertitudes dans les données d'entrée [107, 176]. Pour obtenir de plus amples renseignements, veuillez consulter la comparaison résumée de ces modèles dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Analyse des modèles de givrage marin existants

Modèle	Pays	Application	Dimension	Modalités	Technique numérique	Facteurs utilisés			Validation	Exactitude
						Génération de givrage	Distribution du givrage	Modélisation du transfert de chaleur		
ICEMOD	Norvège	NE	2D	PDT	MDF	x	x	x	x	Modéré
RIGICE	Canada	SE	2D	TM	FORTAN-77	x	x	x	x	Modéré
RIGICE04	Canada	SE	2D	TM	FCE	x	x	x	x	Modéré
MARICE	Norvège	SE	3D	PDT	FVM	x	x	x	x	Élevée

Les différentes notations sont définies comme suit :

SE=Structure extracôtière; NE=Navire extracôtier; PDT=Pleinement dépendant au temps; MDF=Méthode des différences finies; TM=Temps moyen; FCE=Feuille de calcul Excel; FVM=Fin

5. Conclusions et recommandations

Le déploiement réussi de systèmes énergétiques extracôtiers dans des climats froids nécessite une compréhension approfondie des phénomènes de givrage. Ce chapitre résume les lacunes de connaissances, les contributions clés et les recommandations stratégiques pour la mise en œuvre efficace des solutions énergétiques extracôtières.

5.1 Contributions et lacunes dans les connaissances

5.1.1 Classification complète des risques de givrage pour les projets énergétiques extracôtiers

Cette revue présente un cadre complet pour classer les risques de givrage dans des conditions climatiques froides, spécifiquement adapté aux projets énergétiques extracôtiers du Canada atlantique. La classification englobe à la fois le givrage atmosphérique et le givrage causé par les embruns marins, reflétant l'ensemble du spectre des conditions de givrage pertinentes pour ces systèmes. Comme il est illustré à la figure 2.2, le cadre est structuré en catégories principales et en sous-catégories clairement définies, offrant une compréhension organisée et approfondie des divers phénomènes de givrage rencontrés dans les environnements extracôtiers. Cette approche intégrée comble une lacune importante dans la littérature existante, où de tels risques ont souvent été examinés de manière isolée ou sans une structure cohérente.

5.1.2 Caractérisation du givrage atmosphérique

Le chapitre 3 fournit une revue complète de pointe visant à faire progresser la compréhension du givrage atmosphérique et à déterminer les facteurs clés influençant l'accrétion de glace sur les infrastructures énergétiques extracôtières. La revue de la littérature existante révèle que la plupart des recherches antérieures se sont principalement concentrées sur les environnements terrestres, laissant les conditions en mer considérablement sous-explorées. Pour combler cette lacune, la présente revue examine les phénomènes de givrage extracôtiers spécifiques, comme le brouillard marin, les

gouttelettes d'eau salée et les particules de sel en suspension dans l'air. Ces paramètres soutiendront l'évaluation du risque de givrage pour les applications énergétiques extracôtières, en mettant l'accent sur les conditions spécifiques au Canada atlantique.

Dans la présente revue, on examine également les dépendances paramétriques associées à divers types de givrage atmosphérique et l'on détermine les lacunes dans les données, en particulier l'absence de valeurs seuil pour la vitesse du vent, le diamètre des gouttelettes et la teneur en eau liquide en relation avec le givre produit par les précipitations et la formation de givre de surface. Des limitations paramétriques sont également observées dans les modèles empiriques développés précédemment. Par exemple, une corrélation simplifiée utilisée dans les applications d'énergie éolienne estime la hauteur de givrage du rotor en fonction de la hauteur des nuages atmosphériques. Cela suppose que, si la base des nuages arrive en dessous de la hauteur du rotor, l'ensemble du rotor est soumis à des conditions de givrage. Bien que ce modèle puisse offrir une approche préliminaire pour les grandes éoliennes, il ne tient pas compte des structures de petite à moyenne taille et manque d'intégration avec d'autres facteurs atmosphériques, comme les profils de température et les niveaux d'humidité.

Pour contextualiser l'environnement extracôtier canadien, l'examen explore également les schémas de givrage régionaux, en mettant particulièrement l'accent sur le Canada atlantique. Les précipitations verglaçantes sont déterminées comme étant un danger climatique récurrent et ayant un impact dans la région. La topographie locale, l'advection d'humidité et les conditions de vent dominantes influencent considérablement la gravité du givrage. Par exemple, l'est de Terre-Neuve connaît fréquemment des périodes de verglas persistant en raison de l'exposition à des masses d'air atlantiques humides, tandis que les pentes orientées vers l'Atlantique de la péninsule de Gaspé et la vallée du fleuve Saint-Laurent présentent des indices de gravité du verglas élevés, entraînés par des trajectoires récurrentes de tempêtes de verglas et des vents forts d'ouest à nord-ouest. Bien que ces aperçus régionaux offrent un contexte météorologique et topographique précieux, il manque des analyses complètes, qui explorent des tendances temporelles plus larges et des répercussions à long terme. En particulier, cette revue détermine la compréhension limitée de la façon dont le changement climatique peut affecter les motifs de givrage sur des échelles de temps étalées.

En plus des modèles empiriques et semi-empiriques, des outils de calcul avancés ont également été évalués. Des modèles comme TURBICE et FENSAP-ICE fournissent de précieux renseignements, mais montrent des limites dans la représentation précise des dynamiques transitoires des événements de givrage et des défis liés au rejet de sel. Il est nécessaire de disposer de données de terrain à long terme et spécifiques à la région pour approfondir notre compréhension des conditions atmosphériques extracôtières et soutenir le développement de modèles plus fiables de prévision du givrage.

5.1.3 Caractérisation du givrage causé par les embruns marins

Pour améliorer la compréhension du givrage causé par les embruns marins dans les environnements extracôtiers, dans la présente revue, on a catégorisé le phénomène en deux principaux stades : la génération d'embruns marins et le processus de givrage qui s'ensuit. Cette perspective intégrée offre une vue plus complète et comble une lacune notable dans la littérature précédente, où une telle approche structurée n'a pas été bien documentée.

Dans le contexte de la génération d'embruns marins, des études antérieures ont révélé que des événements de vagues fréquents et intenses sont fréquents dans l'Atlantique Nord. Toutefois, des lacunes de données importantes subsistent concernant les caractéristiques des vagues telles que la hauteur, la fréquence et la dynamique d'impact, ce qui limite notre capacité à évaluer avec précision la

formation d’embruns marins et sa contribution au givrage marin. Les gouttelettes d’embruns marins contribuent de façon importante au givrage causé par des embruns marins, ce qui rend essentiel de caractériser avec précision leur taille, leur distribution et leur comportement. Pour aider les efforts de modélisation futurs, cette revue propose une recommandation pour la taille minimale des gouttelettes dans la figure 4.6, dérivée de corrélations empiriques provenant d’études existantes. Néanmoins, d’importantes incertitudes demeurent, en particulier en ce qui concerne la vitesse et la distribution des gouttelettes dans des conditions environnementales variées.

Une complexité supplémentaire découle des paramètres océaniques et météorologiques, comme la température de surface de la mer, la salinité et l’humidité relative, qui compliquent l’application directe des modèles semi-empiriques dans les divers contextes du Canada atlantique. La nature spécifique à l’emplacement de ces variables limite la généralisabilité des modèles existants, renforçant ainsi la nécessité de données d’entrée spécifiques à la région.

En plus des approches empiriques et semi-empiriques, une gamme d’outils de modélisation computationnelle a été développée pour simuler la génération d’embruns marins et la formation de givrage. Ces modèles bénéficient des progrès au niveau de la puissance de calcul et présentent un important potentiel pour saisir les complexités des conditions du monde réel. Toutefois, la comparaison des résultats des modèles reste difficile en raison des variations dans la portée et l’application. Par exemple, RIGICE, développé au Canada, est conçu pour les structures extracôtières stationnaires, tandis qu’ICEMOD, en provenance de Norvège, est adapté aux navires marins et fonctionne comme un modèle dépendant du temps. Ce contraste souligne la nécessité de sélectionner ou de développer des cadres de modélisation spécifiques aux cas adaptés aux conditions opérationnelles et environnementales uniques des systèmes énergétiques extracôtiers dans des climats froids.

5.1.4 Développement d’un cadre complet de collecte de données sur le climat froid

Grâce à une évaluation des mécanismes de givrage atmosphérique et causé par les embruns marins, une matrice de collecte de données complète a été développée et est représentée au tableau 5.1. Cette matrice servira de ressource précieuse pour les futures campagnes sur le terrain de RNCAN au Canada atlantique et soutiendra la conception de cartes régionales des risques de givrage en climat froid, contribuant ainsi au déploiement sûr et efficace des systèmes énergétiques extracôtiers dans la région.

Tableau 5.1 Matrice de collecte de données intégrée pour l'évaluation des risques en climat froid

Catégorie	Numéro de série	Liste des paramètres	Unité	Types de givrage	
				Givrage atmosphérique	Givrage causé par les embruns marins
Météorologique	M1	Vitesse du vent	m/sec	●	●
	M2	Direction du vent	degrés	●	●
	M3	Cisaillement du vent	m/sec/km	●	●
	M4	Turbulence du vent	S.O.	●	●
	M5	Température de l'air	°C	●	●
	M6	Pression atmosphérique	Pa	●	
	M7	Rayonnement solaire	W/m2	●	
	M8	Humidité relative	%	●	●
	M9	Densité de l'eau douce	(kg/m3)	●	
	M10	Contenu en eau liquide pour l'eau douce	g/m3	●	
	M11	Taux de pluie verglaçante	mm/h	●	
	M12	Temps total de pluie verglaçante	Sec ou heure	●	
	M13	Taux de neige mouillée	(mm)	●	
	M14	Type de précipitation	S.O.	●	
	M15	Temps total de précipitation	sec ou heure	●	
	M16	Brouillard marin	Réduction de la visibilité	●	
	M17	Couverture nuageuse	octa	●	
Océan	O1	Température de la surface de la mer ou de l'eau	°C		●
	O2	Salinité de l'eau de mer	ppt	●	●
	O3	Densité de l'eau salée	(kg/m3)		●
	O4	Contenu en eau liquide pour l'eau de mer	g/m3		●
	O5	Hauteur des vagues	m		●
	O6	Période de vague	sec.		●
	O7	Types de rupture des vagues	sec.		●
	O8	État de la mer	S.O.		●
	O9	Fréquence des ondes	S.O.		●
Structure	S1	Structure du substrat	Hz	●	●

Les différentes notifications sont définies comme suit : ● = Phase avant impact; ● = Phase après impact; ● = Les deux phases

5.2 Recommandations pour la recherche future

Pour soutenir la réussite du déploiement et la résilience à long terme des structures extracôtières dans des régions à climat froid comme le Canada atlantique, d'autres recherches doivent accorder une plus grande importance à la compréhension des conditions de givrage atmosphérique et de givrage causé par les embruns marins. Ces phénomènes, ainsi que leurs paramètres d'influence, posent d'importants risques opérationnels dans des environnements marins au-dessous de zéro et nécessitent une enquête approfondie pour améliorer la sécurité et la fiabilité des infrastructures extracôtières. La figure 5.1 illustre les futures applications de la matrice de collecte de données intégrée.

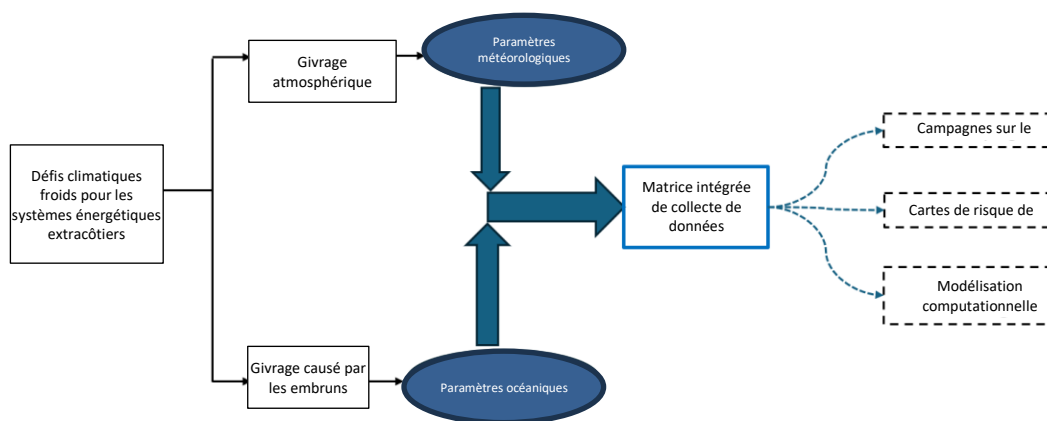


Figure 5.1 : Cadre souhaité des résultats de recherche sur le climat froid

Une étape clé pour atténuer les risques liés au givrage consiste à élaborer des cartes régionales des risques de givrage en climat froid. Cela nécessitera une analyse exhaustive des ensembles de données atmosphériques et océanographiques intégrés sur des périodes prolongées, idéalement de vingt à trente ans. De telles projections à long terme peuvent révéler des tendances climatiques évolutives, faciliter l'identification des régions ayant un potentiel accru de verglas et servir d'outils d'alerte précoce pour les développeurs. Afin de réduire l'incertitude et d'augmenter la robustesse de ces évaluations, des évaluations comparatives utilisant les résultats de plusieurs modèles climatiques sont recommandées.

En ce qui concerne la modélisation de l'accrétion de glace, le modèle RIGICE spécifique au Canada sert d'outil précieux pour les structures extracôtières fixes. Toutefois, pour prévoir efficacement les scénarios de changement climatique, il est essentiel d'intégrer au modèle des ensembles de données historiques à long terme. Pour la validation du modèle, des expériences proportionnées en laboratoire, comme des tests en bassin à vagues et des études contrôlées en chambre froide, peuvent fournir d'importants renseignements sur la formation de la glace. Ces expériences peuvent être encore améliorées par des enregistrements vidéo séquentiels, qui améliorent l'exactitude des données de distribution des gouttelettes et offrent une confirmation visuelle des événements de givrage.

Malgré les avantages des études en laboratoire, les mesures de terrain à long terme restent essentielles pour saisir la complexité des phénomènes de givrage dans le monde réel. Des campagnes de surveillance sur le terrain d'une durée minimale de deux ans sont recommandées pour recueillir des données à haute résolution spécifiques au site, nécessaires à la validation et au perfectionnement complets des modèles. L'intégration de technologies avancées, comme le LiDAR, les drones et les algorithmes d'apprentissage automatique, sera essentielle pour la détection automatisée et la

caractérisation des événements d’embruns marins complexes et des processus transitoires d’accrétion de glace.

Ensemble, ces approches de recherche et ces technologies contribueront à créer un ensemble de données complet et de haute fidélité. Cela, à son tour, soutiendra des évaluations des risques plus précises et le développement de stratégies d’atténuation efficaces, améliorant finalement la résilience opérationnelle des structures extracôtières dans des environnements marins de climat froid.

6. Références

1. Gouvernement de la Nouvelle-Écosse. (2023). *Nova Scotia Offshore Wind Roadmap (Version 1)*, Halifax, Canada : gouvernement de la Nouvelle-Écosse.
2. Elsaraf, H., S.M. Rudreshet S. Shervani. (2020). *Design of a utility-scale wind farm in Newfoundland and Labrador (Research report)*, St. John's, Canada : Université Memorial de Terre-Neuve.
3. Kilpatrick, R. J., C. Wakim et G.Caesar. (2024). *Analyse préliminaire de l’énergie éolienne en mer au Canada atlantique* (rapport de Richesses naturelles Canada n° M154-158/2023E -PDF), Ottawa, Canada : CanmetÉNERGIE-Ottawa, Ressources naturelles Canada.
4. Gouvernement du Canada. (2022). *Reasons for determination: Regional assessment of offshore wind development in Newfoundland and Labrador and Nova Scotia* [communiqué de presse]. Ottawa, Canada : gouvernement du Canada.
5. Mustafa, A. M., A. Barabadi, A. et T. Markeset. (2019). Risk assessment of wind farm development in ice proven area. In *Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2019)*, Delft, Pays-Bas.
6. Lamraoui, F., G. Fortin, R. Benoît, J. Perron, et C. Masson. (2013). « Atmospheric icing severity: Quantification and mapping », *Atmospheric Research*, vol. 128, p. 57-75.
7. Samuelsen, E. M., et R.G. Graversen. (2019). « Weather situation during observed ship-icing events off the coast of Northern Norway and the Svalbard archipelago », dans *Weather and Climate Extremes*, vol. 24, 100200.
8. Naseri, M. et E.M. Samuelsen. (2019). « Unprecedented vessel-icing climatology based on spray-icing modelling and reanalysis data: A risk-based decision-making input for arctic offshore industries », dans *Atmosphere*, vol. 10, n° 4, p. 197.
9. Battisti, L., R. Fedrizzi, A. Brighenti, et T. Laakso. (2006, avril). Sea ice and icing risk for offshore wind turbines, Dans *Proceedings of OWEMES 2006* (p. 20-22).
10. Dehghani-Sanij, A. R., S.R. Dehghani, G.F. Naterer et Y.S. Muzychka. (2017). « Sea spray icing phenomena on marine vessels and offshore structures: Review and formulation », dans *Ocean Engineering*, vol. 132, p. 25-39.
11. Mintu, S., et D. Molyneux. (2022). « Ice accretion for ships and offshore structures, Part 1 – State of the art review », dans *Ocean Engineering*, vol. 258, 111501.

12. Tahir, S. A. R., M.S. Virk, et T.O. Awoniyi. (2021, octobre). « Offshore wind energy in ice-prone cold regions – An overview of technological gaps and needs » dans *Proceedings of the 2021 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)* (p. 1-6). IEEE.
13. Cammaert, G. (2013). *Impact of marine icing on Arctic offshore operations* (Arctic Marine Operations Challenges & Recommendations Pilot Project, vol. 5), Rapport
14. Botta, G., M. Cavaliere et H. Holttinen. (1998). *Ice accretion at Acqua Spruzza and its effects on wind turbine operation and loss of energy production*, Hetta, Finland : ENEL Research, Renewable Energy Unit.
15. Laakso, T. et E. Peltola. (2005, mars). *Review on blade heating technology and future prospects*, Communication présentée à BOREAS VII : Impact of Icing on Wind Energy Production and Other Applications, Saariselkä, Finland.
16. Lamraoui, F., G. Fortin, R.Benoît, J. Perron et C. Masson. (2014). *Atmospheric icing impact on wind turbine production*, Cold Regions Science and Technology, vol. 100, p. 36-49.
17. Tammelin, B. et K. Sääntti. (1996). *Icing of wind turbines* (rapport final, projet Joule de l'UE no JOU2-CT93-0366), Wilhelmshaven, Allemagne/Helsinki, Finlande : DEWI et Institut météorologique finlandais.
18. Boluk, Y. (1996). *Adhesion of freezing precipitates to aircraft surfaces*, Ottawa, Canada : transports Canada
19. Fikke, S. et coll. (2006). *Atmospheric icing on structures: Measurements and data collection on icing – State of the art* (COST Action 727 Report). Zurich, Suisse : MétéoSuisse.
20. Organisation internationale de normalisation. (2001) *Atmospheric icing of structures* (norme ISO Standard n° 12494:2001), Genève, Suisse : Auteur
21. Richert, F. (1996). « Is rotorcraft icing knowledge transferable to wind turbines? », dans *Proceedings of BOREAS III* (p. 366-380). Saariselkä, Finland : Finnish Meteorological Institute.
22. Dalili, N., A. Edrisy et R. Carriveau. (2009). « A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance », dans *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 2, p. 428-438.
23. Cao, H. Q., X. Bai, X. D. Ma, Q. Yin, et X.Y. Yang. (2022). « Numerical simulation of icing on nrel 5-MW reference offshore wind turbine blades under different icing conditions », dans *China Ocean Engineering*, vol. 36, n° 5, p. 767-780.
24. Rydholm, S. et B. Thörnberg. (2020). « Measurement of atmospheric icing and droplets », dans *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, n° 8, p. 5799 à 5809.
25. Boluk, Y. (1996). *Adhesion of freezing precipitates to aircraft surfaces*, Transports Canada
26. Fikke, S., G. Ronsten, A. Heimo, S. Kunz, M. Ostrozlik, P.-E. Persson, J. Sabata, B. Wareing, B. Wichura, J. Chum, T. Laakso, K. Sääntti, et L. Makkonen. (2006). *Atmospheric icing on structures: COST-727*, MeteoSwiss.
27. Organisation internationale de normalisation. (2001) *Atmospheric icing of structures (ISO 12494)*, ISO.
28. IEA Wind Task. (2017). [Rapport sur le givrage atmosphérique], IEA Wind Task.
29. Richert, F. (1996). « Is rotorcraft icing knowledge transferable to wind turbines? », dans *Proceedings of BOREAS III* (p. 366-380), Finnish Meteorological Institute.
30. Blackmore, R. Z. (1996). *Vessel icing and spongy accretion modelling* (Doctoral dissertation), Université de l'Alberta

31. Parent, O. et A. Ilinca. (2011). « Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: A critical review », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 65, n° 1, p. 88-96.
32. Makkonen, L. (1984). « Atmospheric icing on sea structures (CRREL-MONO-84-2) », Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
33. Minsk, L. D. (1980). Icing on structures (CRREL Report No. 80-31). U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
34. Wang, X. (2008). Convection heat transfer and experimental icing aerodynamics of wind turbine blades (Doctoral dissertation). Université du Manitoba.
35. Boyd, D. W. et G.P. Williams. (1968). *Atmospheric icing of structures* (rapport technique), Archives des publications du CNRC.
36. Makkonen, L. (1984a). « Modeling of ice accretion on wires », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 23, n° 6, p. 929-939.
37. Tabata, T., S. Iwata, S. et N. Ono. (1967). *Studies of ice accumulation on ships, Parts I-II* (E. R. Hope, Trans.), Defence Research Board Translations, T93-T94.
38. Horjen, I. (1983). « Icing on offshore structures », dans *Norwegian Maritime Research*, vol. 11, n° 3, 9-22.
39. Farzaneh, M. (Éd.). 2008. *Atmospheric icing of power networks*, Springer Science & Business Media.
40. Feit, D. M. (1987). *Forecasting of superstructure icing for Alaskan waters* [rapport].
41. Stuart, J. et A. Issac. (1999). *Freezing precipitation events in atmospheric icing* [rapport].
42. Changnon, G. et T. Karl. (2003). *Freezing rain frequency in Canada* [rapport].
43. Cortinas Jr., B. et coll. 2004. *Analysis of freezing rain events in Canada* [rapport].
44. Conception. 2010. *Analysis of frozen wet snow impact on offshore structures* [rapport].
45. Alberta. 2010. *Frozen wet snow ice load in Alberta* [rapport].
46. Makkonen, L. (2000). « Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures », dans *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 358, n° 1776, p. 2913-2939.
47. Turkia, V., S. Huttunen et T. Wallenius. (2013). *Method for estimating wind turbine production losses due to icing* (rapport n° T114) [rapport technique]. VTT Technology. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T114.pdf>
48. Dranvic, E. P. (1971). « Glaze and rime », *Gidrometeoizdat*.
49. Volobueva, G. V. (1975). « Classification of glaze-rime deposits according to their weight », dans *Glavnaia Geograficheskaya Observatoriia, Trudy*, vol. 303, p. 34-40.
50. Makkonen, L. et K. Ahti. (1983). « The effect of meteorological parameters on rime formation in Finland », dans *Proceedings of the First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*.
51. CanREA. 2020. *Best practices for wind farm icing and cold climate health and safety*, Association canadienne de l'énergie renouvelable.
52. Dobesch, H., D. Nikolov et L. Makkonen. (2005). *Physical processes, modeling and measuring of icing effects in Europe* [document de conférence].
53. McKay, G. A. et H.A. Thompson. (1969). « Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data », dans *Journal of Applied Meteorology*, vol. 8, p. 927-935.

54. Yip, T. C. (1995). « Estimating icing amounts caused by freezing precipitation in Canada », dans *Atmospheric Research*, vol. 36, n° 3-4, p. 221-232.
55. Chaîné, P. M. et G. Castonguay. (1974). « New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors » (vol. 4), dans *Atmospheric Environment*, Environnement Canada.
56. McComber, P. et J. Govoni. (1985). « An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at Mount Washington », dans *Proceedings of the Forty-Second Annual Eastern Snow Conference* (en ligne, 6 et 7 June 1985).
57. Stuart, R. A. et G. A. Isaac. (1999). « Freezing precipitation in Canada », dans *Atmosphere-Ocean*, vol. 37, no 1, p. 87-102.
58. Horjen, I. (1983). ICING ON OFFSHORE STRUCTURES—ATMOSPHERIC ICING.
59. Lamraoui, F., G. Fortin, R. Benoit, J. Perron et C. Masson. (2013). « Atmospheric icing severity: Quantification and mapping », *Atmospheric Research*, vol. 128, p. 57-75.
60. Tony, K. T., F. Ralph, M. Fuglem, P. Stuckey, J. Thijssen, I. Turnbull, [...] et M. Paulin. (2022, avril). « Ice risk analysis for floating wind turbines, offshore Newfoundland and Labrador », dans *Offshore Technology Conference* (p. D031S031R007). OTC.
61. Bernstein, B. C., C. A. Wolff et F. McDonough. (2007). « An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part 1: Canada and the continental United States. » *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 46, n° 11, p. 1857-1878.
62. Bernstein, B. C., F. McDonough, M. K. Politovich, B. G., Brown, T. P., Ratvasky, D. R. Miller, [...] et G. Cunning. (2005). « Current icing potential: Algorithm description and comparison with aircraft observations », dans *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 44, n° 7, p. 969-986.
63. Cheng, C. S., G. Li et H. Auld. (2011). « Possible impacts of climate change on freezing rain using downscaled future climate scenarios: Updated for eastern Canada », dans *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, n° 1, p. 8-21.
64. IEA Wind-13. (2017). Wind energy projects in cold climates 2. EDITION 2017.
65. IEC. (2016). IEC 61400-1 Ed.4 « Wind turbines – Part 1 : Design requirements ». International Electrotechnical Commission, Genève. (Publication prévue à la fin de 2016).
66. Zarling, J. P. (1980). « Heat and mass transfer from freely falling drops at low temperatures (No. 80) », The Laboratory.
67. Sultana, K. R., K. Pope, L. S. Lam et Y. S. Muzychka. (2017). « Phase change and droplet dynamics for a free falling water droplet », dans *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, p. 461-470.
68. Sultana, K. R., K. Pope et Y. S. Muzychka. (2017). « Numerical prediction of transient cooling and phase change of falling water droplet in sub-zero air temperatures », dans *2nd Thermal and Fluid Engineering Conference, TFEC2017* (Las Vegas, NV, É.-U.).
69. Lozowski, E. P., J. R. Stallabrass et P. F. Hearty. (1983). « The icing of an unheated, nonrotating cylinder, Part 1: A simulation model », dans *Journal of Climate and Applied Meteorology*, p. 2053-2062.
70. Chung, K. K. et E. P. Lozowski. (1990). « On the growth of marine icicles », dans *Atmosphere-Ocean*, vol. 28, n° 4, p. 393-408.
71. Johnson, K. et E. P. Lozowski. (1988). « The simulation of experimental freshwater icicle growth with a simple numerical model », dans *Proceedings of IAHR Ice Syrup* (p. 425-435).

72. Makkonen, L. (1998). « Modeling power line icing in freezing precipitation », dans *Atmospheric Research*, vol. 46, n° 1-2, 131–142.
73. Makkonen, L. et Y. Fujii. (1993). « Spacing of icicles », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 21, n° 3, p. 317-322.
74. Szilder, K., & Lozowski, E. P. (1993). « Stochastic modelling of icicle formation », dans *Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (p. 59–64).
75. Szilder, K., & Lozowski, E. P. (1994). « A new method of modelling ice accretion on objects of complex geometry », dans *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (p. ISOPE-I). ISOPE.
76. Szilder, K., & Lozowski, E. P. (1994). « An analytical model of icicle growth », dans *Annals of Glaciology*, vol. 19, p. 141-145.
77. Szilder, K., & Lozowski, E. P. (1995). « A new method of modelling ice accretion on objects of complex geometry », dans *Journal international d'ingénierie offshore et polaire*, vol. 5, n° 01.
78. Szilder, K., & Lozowski, E. P. (1995). « Simulation of icicle growth using a three-dimensional random walk model », dans *Atmospheric Research*, vol. 36, p. 243-249.
79. Makkonen, L., T. Laakso, M. Marjaniemi et K. J. Finstad (2001). « Modeling and prevention of ice accretion on wind turbines », dans *Wind Engineering*, vol. 25 n° 1, p. 3-21.
80. Y. Du, S. Zhou, X. Jing et coll. (2020). « Damage detection techniques for wind turbine blades: a review », dans *Mech. Syst. Signal Process*, vol. 141 (2020), 106445.
81. Stiti, M., A. Labergue, F. Hervy et coll., 2021. « Characterization of supercooled droplets in an icing wind tunnel using laser-induced fluorescence », dans *Exp. Fluid*, vol. 62, n° 8.
82. Hu, B. et coll. (2022). [Titre non fourni]. *Nom de la revue*, volume, n°, pages. [Note : espace réservé pour la référence.]
83. Sun, H., G. Lin, H. Jin et coll. (2021). « Experimental investigation of surface wettability induced anti-icing characteristics in an ice wind tunnel, Renew », dans *Energy*, vol. 179 (2021), p. 1179-1190.
84. Makkonen, L. (1987). « Salinity and growth rate of ice formed by sea spray », dans *Cold Regions Science and Technology*, vo. 14, n° 2, p. 163-171.
85. Mu, Z., W. Guo, Y. Li et K. Tagawa. (2023). « Wind tunnel test of ice accretion on blade airfoil for wind turbine under offshore atmospheric condition », dans *Renewable Energy*, vol. 209, p. 42-52.
86. Mu, Z., W. Guo, Y. Li et K. Tagawa. (2023). « Wind tunnel test of ice accretion on blade airfoil for wind turbine under offshore atmospheric condition », dans *Renewable Energy*, vol. 209, p. 42-52.
87. Nergica, <https://nergica.com/en/enhancing-cold-climate-wind-farm-performance-with-a-revolutionary-sensor/>
88. Arctic Operations Handbook. (2013). [Détails de publication non fournis].
89. Mintu, S. et D. Molyneux. (2016). State-of-the-art review of research on ice accretion measurements and modelling [présentation à une conférence]. Dans *OTC Arctic Technology Conference*.
90. Mintu, S. A., D. Molyneux et B. Colbourne. (août 2020). « Ship-wave impact generated sea spray: Part 1—formulating liquid water content and spray cloud duration », dans *In International*

- Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 84379, p. V06AT06A008. American Society of Mechanical Engineers.
91. Dehghani-Sanij, A. R., Y. S. Muzychka et G. F. Naterer. (2015). « Analysis of ice accretion on vertical surfaces of marine vessels and structures in Arctic conditions » dans *Proceedings of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (OMAE2015-41306).
 92. Dehghani-Sanij, A. R., Y. S. Muzychka et G. F. Naterer. (2016). « Predicted ice accretion on horizontal surfaces of marine vessels and offshore structures in Arctic regions » dans *Proceedings of the ASME 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (OMAE2016-54054).
 93. Dehghani-Sanij, A. R., S. R. Dehghani, G. F. Naterer et Y. S. Muzychka. (2017). « Sea spray icing phenomena on marine vessels and offshore structures: Review and formulation », dans *Ocean Engineering*, vol. 132, p. 25-39.
 94. Hansen, E.S. (2012). *Numerical modelling of marine icing on offshore structures and vessels*, Thèse de maîtrise. Norwegian University of Science and Technology, Norvège.
 95. Dehghani, S. R., Y. S. Muzychka et G.F. Naterer. (2017). « Water breakup phenomena in wave-impact sea spray on a vessel », dans *Ocean Engineering*, vol. 134, p. 50-61.
 96. Bodagkhani, A., S. R. Dehghani, Y. S. Muzychka et B. Colbourne. (2016). « Understanding spray cloud formation by wave impact on marine objects », dans *Cold Regions Science and Technology*. [Détails non fournis].
 97. Dehghani, S. R., Y. S. Muzychka et G.F. Naterer. (2016a). « Droplet trajectories of wave-impact sea spray on a marine vessel », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 127, 1-9.
 98. Dehghani, S. R., G. F. Naterer et Y. S. Muzychka. (2016b). « Droplet size and velocity distributions of wave-impact sea spray over a marine vessel », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 132, p. 60-67.
 99. Jones, K. F., et E. L. Andreas. (2013). « Winter measurements of sea spray at Mt. Desert Rock ». Compusult, Limited.
 100. Cammaert, G. (2013). « Impact of marine icing on Arctic offshore operations ». Arctic Marine Operations Challenges & Recommendations, 5.
 101. Horjen, I. (1983). « Icing on offshore structures—Atmospheric icing ». [détails de la publication non fournis].
 102. Zakrzewski, W. P. (1987). « Splashing a ship with collision-generated spray », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 14, p. 65-83.
 103. Dhar, S., N. Naseri, T. Zhu, et K. Edvardsen. (juin 2024). « A Novel Device for Accurate Measurement of Spray Frequency and Duration Using Capacitive Liquid Sensors in Marine Icing Estimation », dans ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (p. ISOPE-I). ISOPE.
 104. Muzik et Kirby, (1992). *Sea spray measurements on Tarsiut Island*.
 105. Fitzpatrick, J. et D.G. Stenning. (mai 1983). « Design and construction of Tarsiut island in the Canadian Beaufort Sea », dans *Offshore Technology Conference* (p. OTC-4517). OTC.
 106. Lozowski, E. P., T. W. Forest, V. Chung et K. Szilder. (2002). « Study of marine icing: Final report », Conseil national de recherches Canada.

107. Forest, T. W., E. P. Lozowski, et R. Gagnon. (juin 2005). « Estimating marine icing on offshore structures using RIGICE04 », dans *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures* (p. 12–16). Montreal, Québec, Canada.
108. Dhar, S. (2021). *MarSpray LiDAR (MSL) for the comprehensive measurement of Sea Spray for Improving the Prediction of Marine Icing in Cold Conditions* (thèse de maîtrise, UiT The Arctic Université de Norvège).
109. Dhar, S., et H. A. Khawaja. (2023). *Real-Time Ship Draft Measurement and Optimal Estimation Using Kalman Filter*.
110. Horjen, I. S. Vefsnmo. (1984). *Mobile platform stability (MOPS) subproject 02-icing* (rapport n° STF60 A 284002). Norwegian Hydrodynamic Laboratories.
111. Fuentes, E., H. Coe, D. Green, G. de Leeuw, et G. Mcfiggans. (2010). « Laboratory-generated primary marine aerosol via bubble-bursting and atomization », dans *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 3, p. 141-162. <https://doi.org/10.5194/amt-3-141-2010>
112. Minto, S. et D. Molyneux. (2022). « Ice accretion for ships and offshore structures. Part 1 – State-of-the-art review », dans *Ocean Engineering*, vol. 258, , 111501.
113. Jones, K. F. E. L. Andreas. (2009). *Sea spray icing of drilling and production platforms*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL TR-09-3).
114. Ryerson, C. C. (2013). *Icing management for Coast Guard assets* (rapport n° ERDC/CRREL TR-13-7). U.S. Army Engineer Research and Development Center.
115. Chung, K. K. et E. P. Lozowski. (1998). « A three-dimensional time-dependent icing model for a stern trawler », dans *Journal of Ship Research*, vol. 42, p. 266-273.
116. Horjen, I. (2013). « Numerical modeling of two-dimensional sea spray icing on vessel-mounted cylinders », dans *Cold Regions Science and Technology*, p. 93, vol. 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.05.003>
117. Horjen, I. (2015). « Offshore drilling rig ice accretion modeling including a surficial brine film », dans *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 119, p. 84-110.
118. Kulyakhtin, A. et A. Tsarau. (2014). « A time-dependent model of marine icing with application of computational fluid dynamics », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 104-105, p. 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.05.001>
119. Shipilova, O., A. Kulyakhtin, A. Tsarau, B. Libby, P. O. Moslet et S. Løset, S. (2012). « Mechanism and dynamics of marine ice accretion on vessel archetypes », dans *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers Arctic Technology Conference* (p. 491–502).
120. Zakrzewski, W. P. (1986). *Icing of ships, Part 1: Splashing a ship with spray*. [Détails non fournis].
121. Ozeki, T., T. Shiga, J. Sawamura, Y. Yashiro, S. Adachi et H. Yamaguchi. (juin 2016). « Development of sea spray meters and an analysis of sea spray characteristics in large vessels », dans *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (p. ISOPE-I). ISOPE.
122. Andreas, E. L. (2016). « Sea spray generation at a rocky shoreline », dans *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 55, n° 9, p. 2037-2052.
123. Ryerson, C. C. (1995). « Superstructure spray and ice accretion on a large U.S. Coast Guard cutter », dans *Atmospheric Research*, vol. 36, p. 321-337. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00045-F](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00045-F)

124. Veron, F. (2015). « Ocean spray », dans *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol 47, n° 1, p. 507-538.
125. Horjen, I. et S. Vefsnmo. (1985). *A kinematic and thermodynamic analysis of sea spray*.
126. Andreas, E. L. (1990). « Time constants for the evolution of sea spray droplets », dans *Tellus B*, vol. 42, p. 481-497. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1990.t01-3-00007.x>
127. Andreas, E. L. (2012). « Two experiments on using a scintillometer to infer the surface fluxes of momentum and sensible heat », dans *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 51, n° 9, p. 1685-1701.
128. Horjen, I. et S. Vefsnmo. (1985). « A kinematic and thermodynamic analysis of sea spray », dans *Offshore Icing — Phase II STF60 F85014 Nor, Hydrodyn. Lab. NHL Nor*.
129. Zhang, X., X. Wu et J. Min. (2017a). « Aircraft icing model considering both rime ice property variability and runback water effect », dans *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 104, p. 510-516.
130. Zhang, X., X. Wu et J. Min. (2017b). « Freezing and melting of a sessile water droplet on a horizontal cold plate », dans *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 88, p. 1-7.
131. Blackmore, R. Z. et E. P. Lozowski. (juin 1993). *An heuristic freezing spray model of vessel icing*. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (p. ISOPE-I). ISOPE.
132. Blackmore, R. Z. et E. P. Lozowski. (mai 2003). *Spongy icing modelling: progress and prospects*. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (p. ISOPE-I). ISOPE.
133. Chung, K. K. et E. P. Lozowski. (1990). « On the growth of marine icicles », dans *Atmosphere-Ocean*, vol. 28, n° 4, p. 393-408.
134. Horjen, I. (1983). « Icing on offshore structures », dans *Atmospheric icing*, Norwegian maritime research, vol. 11, n° 3, p.9-22.
135. Horjen, I. (2013). « Numerical modeling of two-dimensional sea spray icing on vessel-mounted cylinders », *Cold Reg. Sci. Technol.* vol. 93, p. 20-35.
136. Jones, K.F. (1996). « Ice accretion in freezing rain », CRREL Rep. 96-2, Cold Reg. Res. Eng. Laboratory, Hanover.
137. Kato, R. (2012). *Modelling of ship superstructure icing* (thèse de maîtrise). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norvège.
138. Kulyakhtin, A. et S. Løset. (2011). *Sea spray icing: in-cloud evaporation*, Semi-analytical and numerical investigations. Proc. of the 14th Intl. Workshop on Atmospheric Icing of Structures.
139. Kulyakhtin, A. et A. Tsarau. (2014). « A time-dependent model of marine icing with application of computational fluid dynamics », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 104–105, p. 33-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.05.001>
140. Lozowski, E.P. E.M. Gates (1991). « On the modelling of ice accretion, in: Cheng, K.C. »
141. Lozowski, E.P., J.R. Stallabrass et P.F. Hearty. (1983). « The icing of an unheated, nonrotating cylinder, Part 1: A simulation model », dans *J. Climate and Appl. Meteorol*, vol. 22, p. 2053-2062.
142. Lozowski, E. P., K. Szilder et L. Makkonen. (2000). « Computer simulation of marine ice accretion », dans *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A* vol. 358, p. 2811-2845.
143. Makkonen, L. (1987). « Salinity and growth rate of ice formed by sea spray », dans *Cold Regions Science and Technology*, vo. 14, n° 2, p. 163-171.

144. Makkonen, L. (2000.) « Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures », dans *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Eng. Sci.*, vol. 358, n° 1776, p.2913-2939.
145. Myers, T.G., D.W. Hammond. (1999). « Ice and water film growth from incoming supercooled droplets », dans *Int. J. Heat and Mass Trans.*, vol. 42, no 12, p.2233-2242.
146. Naterer, G.F. (2011). « Multiphase transport processes of droplet impact and ice accretion on surfaces », dans *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 65, n° 1, p. 5-12.
147. Szilder, K., E.P. Lozowski, E.M. Gates. (1988). « Some applications of a new, time-dependent cylinder ice accretion model », dans *Atmos. Res.*, vol. 22, n° 1, p.41-59.
148. Overland, J.E., C.H. Pease, R.W. Preisendorfer, et A.L. Comiskey. (1986). « Prediction of vessel icing », dans *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, n° 12, p. 1793-1806.
149. Overland, J.E. (1990). *Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures*. [détails comme dans l'original].
150. Tabata, T., S. Iwata, N. Ono et E.R. Hope. (1963). « Studies of ice accumulation on ships », I. Low Temperature Sci. Ser. A, pt. 21, p. 173-221.
151. Tabata, T. (1969). « Studies of ice accumulation », III. Low Temperature Sci. Ser. A, pt. 27, p. 337-349.
152. Lundqvist, J. E. et I. Udin. (1977). « Ice accretion on ships with special emphasis on Baltic conditions », dans *Res. Rep.*, vol. 23.
153. Cammaert, G. (2013). « Impact of marine icing on Arctic offshore operations ». Arctic Marine Operations Challenges & Recommendations, 5.
154. Minsk, L.D. (1977). « Ice accumulation on ocean structures », dans *Cold Reg. Res. Eng. Laboratory*, CRREL Rep. 77-17.
155. Sultana, K.R., S.R. Dehghani, K. Pope, K. et Y.S. Muzychka. (2017a). « A Review of Numerical Modelling Techniques for Marine Icing Applications », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 145, 2017, p. 40-51.
156. Sultana, K.R., K. Pope, K., L.S. Lam et Y.S. Muzychka. (2017b). « Phase change and droplet dynamics for a free falling water droplet », dans *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, p.461-470.
157. U.S. Navy. (1988). *Cold Weather Handbook for Surface Ships (OPNAV P-03C-01-89)*. Chief of Naval Operations, Washington DC.
158. Guest, P. et R. Luke. (2005). *Vessel icing*, dans *Mariners Weather Log*, vol. 49, n° 3, p. 1-7.
159. Rosencrans, D., J.K. Lundquist, M. Optis et N. Bodini. (2023). « The effects of wind farm wakes on freezing sea spray in the mid-Atlantic offshore wind energy areas », dans *Wind Energy Science Discussions*, p. 1-27.
160. Fett, R.W., R.E. Englebreton et D.C. Perryman. (1993). *Forecasters Handbook for the Bering Sea, Aleutian Islands and Gulf of Alaska* (NRL/PU/7541-93-0006). Naval Research Laboratory, Monterey, Californie, p. 302.
161. Stallabrass, J.R. (1980). *Givrage des Chalutiers : Compilation des Recherches Effectuees au C.N.R.* (vol. 56). Conseil national de recherches Canada.
162. Sultana, K. R., K. Pope, et Y.S. Muzychka. (octobre 2016). *Numerical predictions of solidification and water droplet impingement*, dans *OTC Arctic Technology Conference* (p. OTC-27410). OTC.
163. C-NLOPB, 2007- Sydney Basin Sea, Final Report

164. Disponible au lien suivant : <https://lotusarise.com/salinity-of-ocean-water-upsc/?srsId=AfmBOoruUZfgHGLuwjRj8RNwIwS4P4w1RGgUX-whbAvjMeJGLbwichu4>
165. Disponible au lien suivant : <https://oceansconnectes.org/en/average-ocean-salinity/>
166. SALINITY.pdf, Dr Shyama Prasad Mukherjee University, Ranchi.
167. Lam, L.S., K.R. Sultana, K Pope et Y.S. Muzychka. (2020). « Effect of thermal transport on solidification of salt and freshwater droplets on marine surfaces », dans *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 153, 119452.
168. Mohammadi, M. (2016). *Droplet Impact and Solidification on Solid Surfaces in the Presence of Stagnation Air Flow*, thèse de doctorat, Université Concordia.
169. Sultana, K. R. (2019). *Investigation of transient phase change phenomena of water droplets for marine icing applications* (thèse de doctorat, Memorial University of Newfoundland).
170. Sultana, K.R., S.R. Dehghani, K. Pope et Y.S. Muzychka. (2018). « A review of numerical modelling techniques for marine icing applications », dans *Cold Regions Science and Technology*, vol. 145, p. 40-51.
171. Roebber, P. et P. Mitten. (1987). « Modelling and measurement of icing in Canadian waters », dans *Atmos. Environment Ser.*
172. Samuelsen, E. M. (2017). *Prediction of ship icing in Arctic waters-Observations and modelling for application in operational weather forecasting*.
173. Zakrzewski, W. P., E. P. Lozowski, W. L. Thomas, M. Bourassa, R. Z. Blackmore, K. Szilder et A. Kobos. (1993). « A three-dimensional time-dependent ship icing model », dans *Proc 12th Inter Conf Port and Ocean Eng under Arctic Conditions*, POAC, Hamburg, vol. 2, p. 857-873.
174. Lozowski, E. P., K. Szilder et L. Makkonen. (2000). « Computer simulation of marine ice accretion », dans *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A* 358, p. 2811-2845.
175. Horjen, I. (1990). *Numerical modelling of time-dependent marine icing, anti-icing and de-icing* (thèse de doctorat). Norges Tekniske Hogskole (NTH), Trondheim, Norvège.
176. Horjen, I. (2013). « Numerical modeling of two-dimensional sea spray icing on vessel-mounted cylinders », dans *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 93, p. 20-35.
177. Horjen, I. (2015). « Offshore drilling rig ice accretion modeling including a surficial brine film », dans *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 119, p. 84-110.
178. IEA Wind (2017). *Wind energy projects in cold climates*. Lien : <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/RP-13.2-Cold-Climates.pdf>
179. https://taflab.berkeley.edu/ME168-FA13/ME168_Applications.htm
180. Davis, N. (2014). *Icing impacts on wind energy production*.
181. Wright, W. (2008). *User's manual for LEWICE version 3.2* (no E-15537).
182. Habashi, W. G., M. Aubé, M., G. Baruzzi, F. Morency, P. Tran et J.C. Narramore (août 2004). « FENSAP-ICE: a fully-3D in-flight icing simulation system for aircraft, rotorcraft and UAVS, dans *24th International Congress of the Aeronautical Sciences* (p. 1-10). Bonn, Allemagne : International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS).
183. <https://www.dreamstime.com/photos-images/offshore-drilling-rig-turbulent-waves.html>
184. Qian, T., D. Zhang, C. Liu, X. Kong, H. Wen, Y. Yuan et Y. Ji. (2025). « Analysis of the Characteristics of Ice Accretion on the Surface of Wind Turbine Blades Under Different Environmental Conditions », dans *Atmosphere*, vol. 16, n° 3, p. 246.

185. Wagner, R., J. Kaufmann, O. Möhler, H. Saathoff, M. Schnaiter, R. Ullrich et T. Leisner. (2018). « Heterogeneous ice nucleation ability of NaCl and sea salt aerosol particles at cirrus temperatures » dans *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 123, n° 5, p. 2841-2860.
186. Shakespeare, C. J. et M. L. Roderick. (2024). « What Controls Near-Surface Relative Humidity Over the Ocean? » dans, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 16, n° 6, e2023MS004168.

Personne-ressource :

Ryan Kilpatrick

Ingénieur de recherche principal

Groupe bâtiments et renouvelables

CanmetÉNERGIE-Ottawa, Ressources naturelles Canada

ryan.kilpatrick@nrcan-rncan.gc.ca

À propos de CanmetÉNERGIE

CanmetÉNERGIE de Ressources naturelles Canada est le chef de file canadien en matière de développement technologique et de recherche se rapportant à l'énergie propre. Nos spécialistes œuvrent dans les domaines de l'approvisionnement en énergie propre issue de combustibles fossiles et de sources renouvelables, des systèmes de gestion et de distribution d'énergie, et des technologies et procédés d'utilisation finale perfectionnés. Veillant à ce que le Canada reste à l'avant-garde des technologies d'énergie propre, nous améliorons la qualité de vie des Canadiens en créant un avantage en matière de ressources durables.

Siège social
580, rue Booth
Ottawa (Ont.)
Canadien
K1A 0E4

Devon (Alberta)
1 Oil Patch Drive
Devon (Alberta)
Canadien
T9G 1A8

Ottawa (Ontario)
1, promenade
Haanel
Ottawa (Ont.)
Canadien

Varenes (Québec)
1615, boulevard Lionel-Boulet
Varenes (Québec)
Canadien
J3X 1S6

V1A 1A1



canmetenergy.nrcan.gc.ca

Canada