



Université du Québec
à Chicoutimi

**OUTILS DE DÉTERMINATION DES CRITÈRES DE PERFORMANCE DES
PRODUITS ANTIGIVRE ET DÉGIVRANTS POUR PISTE D'AÉROPORT AFIN
DE DÉFINIR LES TAUX D'ÉPANDAGE OPTIMAUX**

PAR

CHARPENTIER CLAIRE

**Sous la direction de la professeure Gelareh Momen et la codirection des
professeurs Jean-Denis Brassard et Mario Marchetti**

**Thèse présentée à l'université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du
grade de Philosophie doctor (Ph. D.) en ingénierie**

Membres du jury :

Prof. Kadiata Ba, Département de sciences appliquées à l'UQAC, présidente du jury

Prof. Malal Kane, Université Gustave Eiffel, membre du jury externe

Prof. Gelareh Momen, Département de sciences appliquées à l'UQAC, membre du
jury interne

Prof. Jean-Denis Brassard, Département de sciences appliquées à l'UQAC, membre
de jury interne

Directeur de Recherche Mario Marchetti, Université Gustave Eiffel, membre de jury
interne

Prof. Derek Harvey, Département de sciences appliquées à l'UQAC, membre de jury
interne

**Québec, Canada
© Charpentier Claire, 2025**

RÉSUMÉ

Les hivers canadiens donnent lieu à de nombreuses intempéries liées au froid. En effet, dans cette région du monde, les températures, parfois extrêmes, conduisent à des précipitations récurrentes telles que la neige, la bruine ou la pluie verglaçante, etc. Cette contamination des surfaces est une problématique importante pour les aéroports canadiens qui doivent maintenir une qualité de piste avec une faible glissance pour que les avions puissent circuler sur la piste en toute sécurité. Afin de maintenir un état de surface approprié pour la piste, ces derniers utilisent des outils mécaniques (grattes, balais, fraiseuse, etc.) mais aussi des produits chimiques hivernaux qui assurent la fusion de la contamination accumulée ou qui protègent la piste avant une précipitation.

Toutefois, il n'existe aucune norme guidant précisément les aéroports dans le dégivrage et l'antigivrage des pistes. En effet, Transport Canada possède et partage des normes pour aider aux opérations mais aucun guide précis comme pour le dégivrage et l'antigivrage des aéronefs. Un avion bien dégivré et protégé est crucial mais, s'il décolle ou qu'il atterrit sur une piste contaminée par de la neige ou de la glace, cela devient dangereux.

En effet, des accidents se produisent encore. De plus, les produits chimiques utilisés ont un coût mais surtout un impact écologique. Donc juste en épandre énormément dans le doute de se dire « trop c'est mieux que pas assez » reste une solution néfaste à long terme.

Les normes de la SAE donnent le point de congélation comme actuel et seul critère évalué d'échec hivernal. Il existe tout de même trois essais normés de performance en dégivrage, utilisés à des fins de comparaison entre les produits, leurs résultats restants toutefois informationnels. De plus, il n'existe aucune donnée en antigivrage ni sur le taux d'épandage.

Cette thèse, effectuée avec la collaboration des aéroports de Montréal, vise donc à développer une méthodologie en laboratoire pour évaluer la performance des produits chimique de dégivrage et d'antigivrage utilisés pour les pistes d'aéroport. Cette méthodologie intègre les connaissances issues de la littérature, des observations sur le terrain et des expérimentations.

Un modèle dynamique a été élaboré dans la première phase du projet afin d'approfondir les connaissances sur l'interaction entre le produit chimique et la glace lors de la pénétration de cette dernière. Nous avons observé que le mode dominant de transfert de chaleur est la convection laminaire naturelle. Le modèle prédit une longueur de fusion uniforme pour l'ensemble de la section du tube. Ainsi, cette modélisation simplifiée de la pénétration de la glace à l'aide de l'AS6211 prédit de manière acceptable une vitesse de pénétration de la glace (mm/min), confirmée par les résultats expérimentaux.

La seconde phase du projet s'est focalisée sur l'interaction physico-chimique entre de la glace et un produit chimique solide grâce à l'analyse couplée par spectroscopie Raman et thermographie infrarouge. Grâce à ces techniques d'analyse, il est possible de déterminer l'évolution de la concentration du produit chimique en solution et la température radiative de surface tout au long de l'action de ce produit chimique sur le contaminant solide. Les phases initiales du contact entre le celui-ci et la glace impliquent des réactions de fusion exothermiques qui génèrent de la saumure, suivies d'un échange de chaleur avec la glace

environnante pour encourager la fonte. La phase finale est la fonte complète du contaminant solide, qui ne laisse que de la saumure avec un échange de chaleur réduit à la surface. Par la quantification de ces changements thermiques et chimiques, nous comprenons mieux la fonte de la glace liée aux produit chimique, et une évaluation plus solide peut être fournie aux aéroports les utilisant.

Enfin, la dernière phase du projet s'est intéressée à l'activation mécanique des produits chimiques. L'activation mécanique joue un rôle essentiel dans l'efficacité du produit de dégivrage des pistes en tant qu'agent antigivrant. Par exemple, si une saleuse assure une activation mécanique par broyage du produit en roulant dessus, cela peut permettre aux aéroports d'éviter d'épandre à nouveau du produit et de réduire le risque de saturation des pistes, ce qui permet d'économiser de l'argent et de prolonger la durée d'action du produit. C'est pourquoi un Simulateur de Trafic Aéroportuaire (STA) a été développé afin de reproduire en laboratoire les conditions réelles d'exploitation hivernale des pistes d'aéroport et de leur environnement. Le temps d'efficacité du produit augmente au fur et à mesure que la température croît et que l'intensité des précipitations diminue. Cette relation souligne l'importance de la prise compte des conditions météorologiques pour déterminer la stratégie d'application optimale du produit. En outre, le broyage par le STA d'un produit a démontré qu'une activation mécanique plus fréquente améliore de manière significative l'efficacité du produit en tant qu'agent antigivre. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet constituent la base à l'élaboration d'un cadre analytique plus large, grâce à la méthodologie robuste élaborée, qui peut être étendue à d'autres conditions météorologiques.

Grâce aux outils de caractérisation physique et chimique, il est possible de déterminer la concentration en produits et la température de surface du fluide contaminant présent sur les pistes, tandis que le modèle thermodynamique élaboré dans la première phase du projet permet d'évaluer leur performance curative en présence de contaminants divers (glace, neige, slush, etc.).

Grâce à ce travail, les opérations hivernales gagneront en efficacité dans de multiples aspects comme la sécurité, le coût mais aussi l'impact environnemental.

ABSTRACT

Canadian winters give rise to a great deal of cold-related bad weather. In fact, in this part of the world, the sometimes extreme temperatures lead to recurrent precipitation such as snow, drizzle or freezing rain. This surface contamination is a major problem for Canadian airports, which have to maintain runway quality with low slipperiness so that aircraft can taxi safely. To maintain an appropriate runway surface condition, they use mechanical tools (scrapers, brooms, milling machines, etc.) as well as winter chemicals to melt away accumulated contamination or protect the runway before precipitation.

However, there are no standards to guide airports precisely in de-icing and anti-icing runways. In fact, Transport Canada has and shares standards to help operations, but no precise guidelines as for aircraft de-icing and anti-icing. A properly de-iced and protected aircraft is crucial, but if it takes off or lands on a runway contaminated by snow or ice, it becomes dangerous.

Accidents still happen. What's more, the chemicals we use have a cost and, above all, an ecological impact. So just spraying a lot of them, in the doubt that “too much is better than too little”, remains a harmful solution in the long term.

SAE standards give the freezing point as the current and only evaluated criterion for winter failure. There are, however, three standardized de-icing performance tests, which are used to compare products, although their results remain informative. Moreover, there are no data on anti-icing or spreading rates.

The aim of this thesis, carried out in collaboration with Montreal's airports, is to develop a laboratory methodology for assessing the performance of de-icing and anti-icing chemicals used on airport runways. This methodology integrates knowledge from the literature, field observations and experiments.

A dynamic model was developed in the first phase of the project to gain a better understanding of the interaction between the chemical and the ice during ice penetration. We observed that the dominant mode of heat transfer is natural laminar convection. The model predicts a uniform melting length for the entire tube cross-section. Thus, this simplified modeling of ice penetration using the AS6211 predicts an acceptable ice penetration velocity (mm/min), confirmed by experimental results.

The second phase of the project focused on the physico-chemical interaction between ice and a solid chemical, using coupled analysis by Raman spectroscopy and infrared thermography. Thanks to these analysis techniques, it is possible to determine the evolution of the concentration of the chemical in solution and the radiative surface temperature throughout the action of this chemical on the solid contaminant. The initial phases of contact between the chemical and the ice involve exothermic melting reactions that generate brine, followed by heat exchange with the surrounding ice to encourage melting. The final phase is the complete melting of the solid contaminant, leaving only brine with reduced heat exchange at the surface. By quantifying these thermal and chemical changes, we gain a better understanding of chemical-related ice melting, and a more robust assessment can be provided to airports using them.

Finally, the last phase of the project focused on the mechanical activation of chemicals. Mechanical activation plays an essential role in the effectiveness of runway de-

icers as anti-icing agents. For example, if a spreader provides mechanical activation by crushing the product as it rolls over it, this can enable airports to avoid re-spraying product and reduce the risk of runway saturation, saving money and extending the product's duration of action. For this reason, an Airport Traffic Simulator (ATS) has been developed to reproduce in the laboratory the actual winter operating conditions of airport runways and their environment. As temperature rises and precipitation intensity falls, the product's effectiveness increases. This relationship underlines the importance of taking weather conditions into account when determining the optimum product application strategy. In addition, STA milling of a product has shown that more frequent mechanical activation significantly improves the product's effectiveness as an anti-icing agent. The results obtained in this project form the basis for the development of a broader analytical framework, thanks to the robust methodology developed, which can be extended to other weather conditions.

Thanks to physical and chemical characterization tools, it is possible to determine the product concentration and surface temperature of the contaminating fluid present on the tracks, while the thermodynamic model developed in the first phase of the project enables us to assess their curative performance in the presence of various contaminants (ice, snow, slush, etc.).

Thanks to this work, winter operations will be more efficient in many respects, including safety, cost and environmental impact.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un projet doctoral à l'Université du Québec à Chicoutimi, au sein du Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA).

Tout d'abord, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à ma directrice de recherche, la professeur Gelareh Momen, qui m'a supervisée tout au long de mes travaux. Je suis reconnaissante d'avoir pu travailler à ses côtés dans une discipline exemplaire et une rigueur scientifique que j'admire à travers ses nombreuses nominations et publications. Merci pour vos multiples conseils.

Je tiens aussi à témoigner ma profonde reconnaissance envers mon codirecteur le professeur Jean-Denis Brassard pour ses conseils, ses remarques, ses encouragements et surtout ses qualités d'écoute, son savoir et son expérience qui m'ont été très bénéfiques. Il est une personne patiente, à l'écoute, disponible, compréhensif, humain, et un chercheur que j'admire pour sa rigueur et son dévouement. Sa passion pour la recherche se ressent dans chaque échange et ses qualités de responsable en font quelqu'un de bienveillant et un modèle.

Toute ma reconnaissance à mon codirecteur Mario Marchetti, pour son soutien sans faille, ses qualités d'écoute, ses précieux conseils, son savoir et son expérience qui m'ont été très bénéfiques. Merci pour les Dragibus, le soutien et la disponibilité même depuis un autre continent.

Je tenais également à remercier chaleureusement les techniciennes et techniciens du LIMA, pour leur aide, assistance et solutions ingénieuses lors de la réalisation des montages expérimentaux, mais aussi pour les rires, les encouragements et leur bienveillance.

Mes plus profonds remerciements à mes chers parents, qui m'ont toujours soutenue et m'ont poussée à poursuivre mes études et mes ambitions tout en me soutenant dans les moments de doute et de pessimisme. Merci d'avoir été ma bouteille d'oxygène et de rester ce port d'attache où que je sois. Une reconnaissance incandescente pour leur aide et encouragements dans tous mon parcours académique et personnel. Vous m'avez enseigné de ne jamais abandonner mes rêves et que chaque objectif s'obtient par le travail. Même la chance, il faut savoir la provoquer. « On sait pourquoi on n'aime pas, mais on ne peut pas dire pourquoi on aime quand on aime vraiment ».

Un remerciement tout particulier pour mon conjoint Gabriel Lavoie pour m'avoir soutenue dans cette thèse. L'écoute dont il a fait preuve et les discussions sur ma recherche pour orienter mon travail m'ont été d'un grand soutien. Merci de m'avoir encouragée, réconfortée dans les moments difficiles, supportée quand l'anxiété m'envahissait. Tu es un soutien dans ma vie et la personne la plus passionnante que j'ai pu rencontrer. Merci d'être qui tu es et de partager ma vie. Merci également à Watson, Monsieur, Noctali et Strudel pour leur soutien moral.

De plus, je tiens à remercier mes amis Sanae, Donald, Sarah-Janes, Maria Lucia, Samaneh, Nathan, Kim, Carol, Souleymane pour leur soutien moral tout le long de ce projet. Vous avez su me faire rire et me distraire quand cela était essentiel. Partager des bons moments avec vous est toujours un plaisir. Vous êtes les bonnes personnes que vous pensez être.

Je voudrais également exprimer ma gratitude aux organismes qui ont contribué à ce travail, soit Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), le

Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec (CRIAQ), le ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec, et le soutien apporté par les Aéroports De Montréal (ADM), WPred, et Nachur Alpine Solutions. Je remercie également Luc Capobianco et Nuno des Aéroports De Paris (ADP) pour leur aide, leur bienveillance et leurs commentaires constructifs.

Pour finir, je remercie toutes les personnes intéressées par ce projet, en espérant qu'elles puissent trouver dans cette thèse des informations utiles pour leurs travaux.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	III
ABSTRACT.....	V
REMERCIEMENTS	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XIV
CHAPITRE 1.....	1
INTRODUCTION.....	1
1.1 <i>Mise en contexte</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Problématique</i>	<i>2</i>
1.3 <i>Définitions</i>	<i>4</i>
1.4 <i>Objectif et Sous-Objectifs de la thèse</i>	<i>6</i>
1.5 <i>Originalité du projet doctoral</i>	<i>8</i>
1.6 <i>Méthodologie</i>	<i>9</i>
1.7 <i>Contenu de la thèse</i>	<i>14</i>
1.8 <i>Références</i>	<i>14</i>
CHAPITRE 2.....	17
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	17
2.1 <i>Introduction</i>	<i>17</i>
2.2 <i>Outils de gestion et de préservation de l'adhérence en milieu aéroportuaire</i>	<i>19</i>
2.2.1 <i>Dégagement mécanique de la surface</i>	<i>19</i>
2.2.2 <i>Dégagement chimique.....</i>	<i>23</i>
✓ <i>Produits et molécules usuels</i>	<i>31</i>
✓ <i>Produits et molécules moins ou non conventionnels.....</i>	<i>38</i>
2.3 <i>Outils d'évaluation de performance des produits dégivrants.....</i>	<i>40</i>
2.3.1 <i>Capacité de fonte de glace</i>	<i>42</i>
2.3.2 <i>Capacité de pénétration de la glace</i>	<i>44</i>
2.3.3 <i>Capacité de sous-cavage de la glace.....</i>	<i>47</i>
2.3.4 <i>Temps de protection contre le givrage.....</i>	<i>49</i>
2.4 <i>Caractérisation des produits par spectroscopie Raman</i>	<i>49</i>
2.4.1 <i>Identification de la composition chimique</i>	<i>50</i>
2.4.2 <i>Identification de la transition de phase solide-liquide</i>	<i>50</i>
2.4.3 <i>Détermination de la concentration</i>	<i>51</i>
2.5 <i>Conclusion</i>	<i>54</i>

2.6	Références	55
CHAPITRE 3.....		59
DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DYNAMIQUE DE PÉNÉTRATION DE LA GLACE POUR LES PRODUITS DÉGIVRANTS DES PISTES GRÂCE A UNE CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES.....		59
3.1	Résumé	59
	<i>Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization</i>	<i>61</i>
3.2	Abstract	61
3.3	Nomenclature.....	62
3.4	Introduction.....	64
3.5	Experimental protocols.....	67
3.5.1	Ice penetration protocol.....	67
3.6	Experimental Results	70
3.6.1	Ice penetration test	70
3.7	Ice penetration modeling	73
3.7.1	Simplified mathematical modeling of ice penetration	73
✓	Energy balance around the cavity	75
3.7.2	Solving the nonlinear differential equations	81
3.7.3	Verification of the numerical solution (energy balance and steady-state solution)	84
3.7.4	Maximum de-icing power of a fluid.....	84
3.8	Conclusion	87
3.9	Acknowledgement.....	88
3.10	References	88
CHAPITRE 4.....		91
AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES SUR LE DÉGIVRAGE DES PISTES : COMBINAISON DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ET DE LA SPECTROSCOPIE RAMAN POUR ÉVALUER LA FONTE DE LA GLACE.....		91
4.1	Résumé	91
	<i>Advancing Insights into Runway De-Icing: Combining Infrared Thermography and Raman Spectroscopy to Assess Ice Melt.....</i>	<i>93</i>
4.2	Abstract	93
4.3	Introduction	94
4.4	Experimental protocols	97
4.4.1	Ice Melting Protocol using the AS6170 Test	98
4.4.2	Airport Application Rate	99
4.4.3	Thermometric Photography and Raman Spectroscopy.....	100
4.5	Results	102
4.5.1	Ice Melting Test	102
4.5.2	Raman Spectroscopy	105
4.6	Coupled Thermographic and Spectral Analyses	107

4.7	<i>Discussion</i>	110
4.8	<i>Conclusions</i>	111
4.9	<i>Acknowledgement</i>	112
4.10	<i>References</i>	112
CHAPITRE 5.....		115
SIMULATEUR DE TRAFIC AÉROPORTUAIRE POUR LES PRODUITS HIVERNAUX ANTIGIVRE DES PISTES : PERFORMANCE CHIMIQUE PAR ACTIVATION MÉCANIQUE		115
5.1	<i>Résumé</i>	115
	<i>Airport Traffic Simulator for Anti-icing Runway Winter Products: Chemical Performance by Mechanical Activation</i>	117
5.2	<i>Abstract</i>	117
5.3	<i>Introduction</i>	118
5.4	<i>Methodology</i>	128
5.5	<i>Results and discussion</i>	131
5.6	<i>Conclusions</i>	143
5.7	<i>Acknowledgement</i>	145
5.8	<i>References</i>	146
CHAPITRE 6.....		148
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		148
6.1	<i>Conclusions</i>	148
6.2	<i>Recommandations</i>	152
6.3	<i>Références</i>	157

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Schéma de la méthodologie de recherche	13
Figure 2-1 : Cartographie de la revue bibliographique	17
Figure 2-2 : Déneigeuses (images libres de droits).....	20
Figure 2-3 : Le déneigement des pistes des Aéroports de Paris (image générée par intelligence artificielle) [3]	22
Figure 2-4 : Schéma de l'effet du dégivrant sur la glace	37
Figure 2-5 : Méthodologie de fonte des glaces telle que présentée dans AS6170. (A) Échantillon de glace où 5 g de RDP en solution sont versés. (B) Élimination de la glace fondue avec de l'air comprimé modifiée à partir de [34]	43
Figure 2-6 : Méthodologie de pénétration de la glace. (A) Échantillons de glace initiaux dans les tubes de micro-centrifugeuse, (B) Dépôt de RDP teint sur l'échantillon de glace et (C) Pénétration de la glace par le RDP selon AS6211 modifiée à partir de [34]	45
Figure 2-7 : Méthodologie de sous-cavage de la glace. (A) échantillon de glace initial dans la boîte de Pétri, (B) formation de cavités et (C) dépôt de RDP teint sur échantillon de glace avec mesure de sous-coupe modifiée à partir de [34].....	47
Figure 2-8 : Sous-cavage du KAC en fonction du temps à -2°C et -10°C modifiée à partir de [34]	48
Figure 2-9: Lacunes et manques d'information.....	55
Figure 3-1: Ice penetration test of a runway de-icing product (RDP) according to the AS6211 standard. (A) Initial ice samples in microcentrifuge tubes; (B) deposition of the dyed RDP (potassium acetate) onto the ice sample; and (C) the RDP penetration of the ice [16].....	69
Figure 3-2: Evolution of fluid penetration into the ice during the ice penetration test for the RDP (potassium acetate) at -2 °C (top) and -10 °C (bottom). The color change is more evident for the samples at -2 °C, testifying to the dilution of the brine that penetrates the ice.	71
Figure 3-3: Ice penetration rate of the 50% w/w potassium acetate KAC at -10 °C and -2 °C	71
Figure 3-4: Minimum temperatures of the RDP (potassium acetate) at the ice surface for -10 °C and -2 °C and the thermal photographs at the ice surface at -10 °C during the ice melting test at 0, 1, minimal temperature, and 10 min.	72
Figure 3-5: Visual evidence of natural convection by a bottom-top circulation followed by top-bottom circulation of the RDP when applied to the ice layer. Image on the right has red arrows added to show this convection	75
Figure 3-6: Representation of the elements of the 1D thermodynamic model of the ice penetration test following the AS6211 test method protocol [16]	77
Figure 3-7 : Rayleigh number in the test tube cavity ($L/D = 0.9$) and heat transfer mode	78
Figure 3-8 : Theoretical freezing temperature of KAC in water. Polynomial second order fitting is obtained from those data.	81
Figure 3-9: Simulated ice penetration rate profiles for -2 °C and -10 °C for KAC as an RDP.....	82
Figure 3-10: Simulated temperature profiles for the -10 °C test.....	83
Figure 3-11: Temperature difference between the de-icing fluid T_2 and the melting value T_{di} for the test at -10°C.....	83
Figure 3-12: C_2 concentration of de-icing fluid over time for the -10 °C test.....	83
Figure 3-13: Thickness of the RDP as a function of ice cover thickness, temperature, and fluid concentration (C). For each temperature, the top line corresponds to a concentration (w/w) of 0.4 while the bottom corresponds to a 0.5 (w/w).	87
Figure 4-1: The ice melting test for a runway de-icing product (RDP) following the AS6170 standard. Panel (A) depicts the initial ice sample in a Petri dish and the placing of the RDP (sodium formate) onto the ice sample. In panel (B), the RDP and melted ice are removed using compressed air [20].....	98

Figure 4-2: Sodium formate (NaFo) over a concrete pavement runway surface, illustrating the application concentration used at Mirabel airport, Québec.....	100
Figure 4-3: Experimental setup for the thermometric imaging and Raman spectroscopy.	101
Figure 4-4: Ice melting rate of the 5 g and 0.5 g sodium formate (NaFo) samples at -10°C	103
Figure 4-5: Minimum temperature of the sodium formate (NaFo) at the ice surface for the 0.5 g (top) and 5 g tests (bottom) and the corresponding thermal photographs of the ice surface at -10°C during the ice melting test at 0, 1, and 10 min, as well as at the min.....	104
Figure 4-6: Raman spectra of the runway de-icing product obtained after 125, 293, 608, and 1196 s (laser at 785 nm, integration time of 20 s, average of four spectra), with the identification of the main Raman peaks.	106
Figure 4-7: Thermal pictures during Raman spectroscopy of the RDP (sodium formate, NaFo) with a Raman probe at (A) 125 s, (B) 293 s, (C) 608 s, and (D) 1196 s.	107
Figure 4-8: Coupled thermographic and spectral analyses; (A) maximum intensity of a Raman peak at 930 cm^{-1} and minimum temperature during the test with 0.05 mL of the RDP sodium formate (NaFo) at -10°C ; (B) RDP with rhodamine B melting on ice at -10°C ; and (C) a 2D representation of the RDP de-icing phenomenon.	108
Figure 5-1: Thermal image of a test campaign on a Montreal airport runway to evaluate the benefit of a mechanical activation of a RDP. Blue pixels are colder than red pixels.	126
Figure 5-2: Diagram of the parameters involved in an RDP being mechanically activated by a wheel on an airport runway.....	127
Figure 5-3: Diagram (a) and photograph (b) of the Airport Traffic Simulator (ATS) [25]	129
Figure 5-4: Images of the concrete sample with sodium formate (NAFO) applied (a) and potassium acetate (KAC) sprayed (b) on its surface prior to mechanical activation by the ATS wheel.....	130
Figure 5-5: Thermal images of the concrete sample at the start of the test at -5°C (a) and under a precipitation intensity of $6.5\text{ g/dm}^2/\text{h}$ (b) along with corresponding visual photographs (c, d) of the block at the end of the NAFO pre-wetted with KAC test.	132
Figure 5-6: Efficiency time (min) as a function of precipitation intensity ($\text{g/dm}^2/\text{h}$) for NAFO pre-wetted with KAC	134
Figure 5-7: Temperature ($^{\circ}\text{C}$) versus time (min) for NAFO pre-wetted with KAC at $8.5\text{ g/dm}^2/\text{h}$ and a fixed quantity of RDP of 0.5g NAFO and 0.35g KAC	134
Figure 5-8: Evolution of minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$) as a function of time (min) during a test with a constant precipitation rate ($8.5\text{ g/dm}^2/\text{h}$) for NAFO pre-wetted with KAC.....	136
Figure 5-9: Evolution of minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$) observed according to waiting time for passage under the wheel every 5 minutes versus every 2min 30s as a function of time (min) for NAFO pre-wetted with KAC and an example of one cycle described with all phases of the process.	138
Figure 5-10: Representation of the impact of mechanical activation on RDP under anti-icing conditions.	138
Figure 6-1: Schéma d'une plaque liée au spectromètre Raman.....	154

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Récapitulatif des caractéristiques intéressantes pour une application aéroportuaire des types de produits dégivrants [8]	32
Tableau 2-2 : Formules compactes et, développées des molécules et point de congélation	33
Tableau 2-3 : Formules semi-développées, développées des molécules et point de congélation des produits non conventionnels	39
Tableau 2-4: Avantages de la méthode de la spectroscopie Raman par rapports à d'autres méthodes de caractérisation.....	53
Table 5-1 : Summary of de-icing product characteristics [7].....	120
Table 5-2: Efficiency duration of NAFO pre-wetted with KAC as a function of temperature and freezing drizzle precipitation intensity	141

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Dans les pays nordiques comme le Canada, des centaines de tonnes de produits chimiques de dégivrage et de déverglaçage sont utilisées dans les aéroports pour assurer la sécurité des décollages, des atterrissages et la circulation des avions dans des conditions météorologiques hivernales défavorables [1]. La plupart de ces conditions dégradées consistent en ce que l'on appelle le givrage atmosphérique. Ce dernier comprend la pluie verglaçante, la neige humide ou sèche, la grêle et les précipitations de bruine verglaçante, ainsi que le givrage, résultant de la transition de phase du dépôt de vapeur d'eau directement en cristaux de glace [2]. La plupart de ces événements météorologiques entraînent des conditions dangereuses sur les aéronefs et de glissance sur les pistes et voies de circulation qui augmentent le risque pour les usagers [3, 4]. Ces conditions hivernales sont récurrentes et leur gravité varie significativement d'une année à l'autre. Jusqu'à présent, encore trop peu d'attention a été accordée à la détermination des quantités optimales de produits de dégivrage et d'antigivrage à appliquer sur les pistes et à l'évaluation de leurs performances. Chaque fournisseur de produits indique ses propositions de taux d'application, déterminés selon ses méthodes propres, ainsi qu'une estimation de la durée d'efficacité en fonction de connaissances propres à chaque détaillant. Cependant, dans certaines situations, une simple transition des conditions météorologiques est susceptible de rendre caducs ces préconisations et peut ainsi mettre en péril la sécurité sur la piste. De leur côté, les équipes de maintenance des aéroports ont aussi leurs propres estimations tant des taux d'épandage

que de leurs modes opératoires garantissant une piste sécuritaire en tout temps. Toutefois ces préconisations sont souvent fonction de l'expérience et de la tolérance au risque des équipes en charge de l'exploitation hivernale.

Plusieurs accidents d'avions sont toutefois imputables à des conditions de pistes inadaptées et peuvent s'avérer létales [5]. Par exemple, le 8 février 2019, un avion est sorti de la piste de l'aéroport de Bagotville après un atterrissage [6]. Au total, 42 passagers et trois membres d'équipage étaient à bord, mais heureusement, sans aucun blessé. Selon la compagnie aérienne, le train avant a quitté la surface pavée en raison de la présence de givre au sol.

1.2 Problématique

En raison de sa géographie et de son climat, les risques d'affronter une piste contaminée au Canada sont donc élevés [7, 8] et impactent l'exploitation des aéroports par des retards et des avions non fonctionnels [6].

La présence d'hydrométéores i.e. eau, glace ou neige [4], sur des pistes a été l'un des facteurs influents des accidents d'avion entre 2010 et 2019 [9]. En effet, l'excursion de piste est classée comme l'une des deux zones de risque les plus importantes dans l'industrie aéronautique. Les conditions météorologiques représentent un risque actuel avéré et est déterminé comme une priorité forte dans les problématiques rencontrées par les aéroports. La maintenance hivernale des pistes qui découle de cette difficulté en est évidemment impactée [10]. Un tiers des accidents majeurs est dû à des sorties de piste. La multitude de méthodes et de formats pour évaluer et signaler l'état de la surface de la piste contribue à ce constat

[11]. La plupart de ces accidents ont hélas été mortels [12].

Durant la saison hivernale, les pistes d'aéroports sont dégagées mécaniquement (raclage, brossage) et des produits chimiques en solution ou solides sont également épandus pour empêcher la persistance et l'accumulation d'eau solide. Ceux-ci peuvent avoir deux rôles :

- antigivre, à savoir : placé en prévention d'une précipitation pour éviter l'accumulation de contaminant (neige, glace, etc.) ;
- ou dégivrant, à savoir pour éliminer le contaminant de la piste afin que celle-ci redevienne praticable en toute sécurité.

Le concept de pistes dégagées est donc essentiel pour les aéroports : pour accroître la sécurité des passagers et des employés, pour maîtriser les coûts et l'impact environnemental, et pour accroître les connaissances sur les performances de dégivrage et d'antigivrage des produits chimiques pour pistes afin d'optimiser les opérations [13].

L'impact environnemental de ces produits demeure significatif en raison de la charge organique à biodégrader qu'ils représentent dans les eaux usées à traiter. En effet, les produits les plus souvent utilisés sont le formate de potassium, l'acétate de potassium, le formate de sodium, l'acétate de sodium et des composés hybrides (acétate de potassium et glycol mélangés). Ces produits chimiques affectent tant la vie aquatique [14] que la flore.

De plus, les quantités de produits d'antigivrage et de dégivrage à déverser sur les pistes demeurent insuffisamment précises. Le seul critère de performance ayant rapport au froid est un point de congélation de -14 °C lorsque le produit est dilué à 50% m/m dans l'eau [15]. Il existe très peu d'informations sur les opérations à suivre lors d'un processus

d'antigivrage ou dégivrage des pistes d'un aéroport puisque les fabricants ne s'avancent que très peu sur ce paramètre.

À l'heure actuelle, il existe tout de même trois normes aérospatiales qui permettent d'évaluer les performances des produits des pistes en condition de dégivrage [15-19]. Il s'agit toutefois de tests comparatifs, pour apprécier si un produit dégivrant est efficace en mode dégivrage dans des conditions contrôlées, sans la moindre valeur minimale de performance à atteindre. Ces méthodes sont la capacité de fonte de la glace, le sous-cavage de la glace et la pénétration de la glace, et sont effectuées conjointement de manière systématique en laboratoire. Bien connues de l'industrie, ces méthodes nécessitent toutefois un approfondissement afin de comprendre les aspects fondamentaux inhérents aux processus de dégivrage. De plus, il n'existe aucune limite minimale normée à dépasser pour ces produits. Par ce fait, les taux d'épandage à appliquer (sous forme de grammage ou de délais d'application) sur les pistes ne sont jamais étudiés, ce qui aggrave le manque d'informations et celles cruciales à fournir aux exploitants pour parvenir à un déroulé optimal des opérations hivernales.

Ce manque d'informations est dommageable pour les aéroports car celles fournies par les industriels sont difficiles à interpréter et à analyser afin de sélectionner objectivement le dégivrant ou antigivre optimal suivant la situation météorologique rencontrée et/ou à venir.

1.3 Définitions

Afin de mettre en contexte certains termes utilisés dans le cadre de cette thèse, il est nécessaire de les définir. En effet, les termes performance ou taux d'épandage sont généraux et peuvent prendre différents sens suivant l'utilisation. Il est donc opportun de les définir

avec précision dans le cadre de ce projet.

« **Performance** » d'un produit antigivre ou dégivrant pour piste d'aéroport :

Parler de performance, c'est réfléchir tant sur les résultats ultimes que l'on cherche à produire que sur les moyens appropriés pour y parvenir. Ceux-ci sont déjà définis en dégivrage grâce aux essais IM (Ice Melting), IP (Ice Penetration), IU (Ice Undercutting) normés. Un travail a également été fait sur le développement de nouveaux essais en mode antigivrage. Si on reprend le terme d'objectifs poursuivis on comprend alors que pour obtenir une performance, il faut définir une référence à suivre, à atteindre, à dépasser, ou même un seuil. Le terme d'exploit quelconque va dans ce sens également : pour considérer un exploit, il faut définir un seuil à dépasser.

Pour définir une performance, il faut donc définir une référence par la création d'une norme régissant le tout afin de servir d'objectif à poursuivre pour corrélérer avec la définition même. De même, la performance peut être interprétée de deux manières différentes concernant les produits antigivre et dégivrants pour piste d'aéroport. En effet, un produit chimique peut être qualifié de performant car il est rapidement efficace (exemple : excellent taux de fonte de la glace dans les cinq premières minutes). Cependant, un autre produit peut être considéré comme performant car endurant (exemple : produit toujours actif au bout de 30 minutes avec un taux de fonte élevé). Ainsi, le terme de performance est important et sera utilisé ici pour définir un produit rapide à agir et/ou un produit endurant.

« **Taux d'épandage** » des produits antigivre et dégivrants pour piste d'aéroport :

Le taux d'épandage représente la quantité de produit épandue par unité de temps ou de surface. Dans le projet, le taux d'épandage par unité de surface a été établi grâce à une

étude sur le terrain en association avec les aéroports de Montréal. Dans la suite du projet, sa variabilité a été exprimée en g/min.

« **Optimisation** » des taux d'épandage : il existe quatre manières d'optimiser l'utilisation des produits antigivre et dégivrants pour piste :

- Choisir le produit le plus efficace grâce à une analyse de performance (voir définition plus haut).
- Réduire la quantité de produit en mettant en œuvre une nouvelle méthode d'application.
- Réduire la fréquence d'application du produit.
- Explorer l'utilisation de produits non conventionnels en synergie.

La méthode de réduction de produit épandu semble la solution la plus logique. Néanmoins, après discussions et observations en milieux aéroportuaire, il est ressorti que la quantité de produit déversée par le camion ne peut pas être modifiée aussi aisément. Ainsi, l'optimisation du taux d'épandage sera faite par la réduction de la fréquence d'application du produit.

1.4 Objectif et Sous-Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est d'**élaborer et de proposer une méthodologie de laboratoire représentative afin d'étudier les taux d'épandage et d'améliorer la compréhension fondamentale de la performance des produits épandus**, en s'appuyant sur les connaissances acquises par les Aéroports de Montréal et sur la littérature, ainsi que des campagnes expérimentales afin de mieux comprendre fondamentalement les produits.

Pour y parvenir, il a été question d'évaluer les performances des produits en se basant sur les essais normés actuels. Dans ceux-ci, il n'existe actuellement pas de critère de performance. Le travail de thèse entrepris vise à contribuer à combler cette lacune.

Une discussion découle de cette phase afin de s'ouvrir sur les propriétés les plus pertinentes et les facteurs influents mis en lumière durant les analyses. Une ouverture sur de nouvelles méthodes est faite grâce à ces critères et à la lecture d'articles qui paraissent pendant l'étude.

Le développement de ces deux objectifs contribuera possiblement aboutir à la rédaction d'une norme aérospatiale afin d'encadrer les opérations hivernales sur les pistes d'aéroport.

Afin d'atteindre cet objectif principal, trois sous-objectifs sont réalisés :

- Évaluer en laboratoire les performances des produits chimiques purs qui sont les constituants des produits commerciaux, en s'appuyant sur une série d'essais expérimentaux, analyser les données recueillies, discuter des propriétés les plus pertinentes et les facteurs influents.
- Développer un dispositif expérimental adapté pour déterminer les taux d'épandage en utilisant des outils normés, des conditions météorologiques contrôlées et représentatives de l'hiver et en les comparant avec les données de terrain fournies par les Aéroports de Montréal.
- Établir un protocole de génération de précipitations artificielle pour l'utilisation de ce dispositif expérimental basé sur les normes et le Global Report Format (GRF) utilisé par les pilotes en prenant en considération des données météorologiques telles que le type de précipitation, son intensité, la température qui seront détaillées dans le chapitre correspondant (bruine verglaçante), sans nécessairement être exhaustives.

1.5 Originalité du projet doctoral

L'originalité de ce projet doctoral se décline autour de trois thèmes principaux.

Le premier thème concerne le développement d'une méthodologie visant à la **définition des taux d'épandage** pour les produits chimiques appliqués en milieu aéroportuaire. En effet, la façon dont les taux d'épandage sont actuellement déterminés est **inconnue pour les produits dégivrants et antigivre** pour les pistes d'aéroport. L'introduction et l'utilisation de mesures issues des capteurs de piste, de thermographie infrarouge et de la spectroscopie Raman dans le poste d'observation de l'appareil développé est également une innovation et une rupture scientifique qui permettront notamment d'augmenter et d'affiner les informations et les données recueillies.

La seconde déclinaison de l'originalité porte sur les méthodes qui seront utilisées. Sur la base de méthodes connues, la classification et l'identification des produits antigivre et dégivrants pourront être effectuées suivant une **définition de performance**. D'autre part, une nouvelle méthodologie sera élaborée et proposée en utilisant de nouveaux montages incluant un spectromètre Raman, ce qui permettra de comprendre avec plus de précision la synergie entre le produit chimique (Runway Deicing Products (RDP)) et la glace, mais également un montage de simulateur de trafic aéroportuaire (STA) qui reproduira en laboratoire et de manière représentative les conditions sur le terrain par les aéroports et ainsi reconstituer les campagnes d'épandage afin d'analyser les comportements du produit appliqué selon différentes conditions.

Enfin, la présente étude vise à **approfondir les connaissances** dans le domaine des produits chimiques dégivrants et antigivre et des pistes aéroportuaires en saison hivernale, un domaine encore trop peu étudié par la communauté scientifique. Au terme de ce projet,

une nouvelle approche sera alors proposée aux comités de la Society of Automotive Engineering (SAE), plus spécifiquement les groupes de travail en charge des RDP. Cette approche vise à inclure de nouveaux essais possibles à proposer aux professionnels du domaine afin de tester les RDP, à contribuer ainsi à accroître la sécurité dans les aéroports. Enfin, l'impact environnemental, grand enjeu de notre ère, sera, de ce fait, également atténué car seules les quantités nécessaires seront déversées.

1.6 Méthodologie

La méthodologie de la thèse représente le cheminement scientifique de celle-ci et repose tout d'abord, sur une recherche bibliographique. Elle a été effectuée afin d'établir une base et d'approfondir les connaissances sur les travaux de recherche déjà effectués dans le domaine. Cette étude a permis de mettre en lumière les outils utilisés par les aéroports pour préserver l'adhérence de la piste, mécaniquement ou chimiquement, mais également de s'intéresser aux propriétés physiques, chimiques et thermodynamiques des produits chimiques mis en œuvre.

Tout d'abord, le choix des produits chimiques lors des expérimentations s'est fait suivant leur utilisation courante en Amérique du Nord [20]. Ainsi, dans la première phase du projet il a été question d'axer la recherche sur le produit liquide, soit l'acétate de potassium (KAc), pour ensuite poursuivre la recherche dans une deuxième phase sur le produit solide le plus utilisé, soit le formate de sodium (NaFo) pour enfin faire l'étude des deux molécules combinées tel qu'utilisé dans les aéroports pour une meilleure représentativité des résultats proposés.

De plus, cette étude s'est axée autour des outils d'évaluation de la performance des produits dégivrants grâce notamment aux essais en dégivrage normés mais également grâce

à la méthode d'appréciation de la capacité de fonte de glace qui est un essai en protection antigivre utilisé pour les produits liquides. Enfin, cette partie s'est conclue avec l'étude de la caractérisation des produits par la spectroscopie Raman pour l'identification de la composition chimique, de la transition de phase solide-liquide mais également la détermination de la concentration des produits en temps réel.

Ensuite une série d'expérimentations a été conduite, axées autour des essais de performance en dégivrage normés. Ils sont réalisés à des fins de comparaison entre les produits chimiques pour piste, évaluant la capacité de la fonte de la glace, de la pénétration de la glace et du sous-cavage de la glace. Cette phase a permis de mettre en lumière les informations manquantes à l'étude afin de répondre à la problématique. Ainsi, un modèle numérique dynamique a été élaboré dans cette première phase du projet doctoral afin d'approfondir les connaissances sur l'interaction entre le produit chimique et la glace lors de la pénétration de cette dernière. Grâce à la modélisation, nous avons observé que le mode dominant de transfert de chaleur est la convection laminaire naturelle, et le modèle prédit une longueur de fusion uniforme pour l'ensemble de la section du tube contenant la glace. Ainsi, la modélisation simplifiée de sa pénétration à l'aide de l'AS6211 peut prédire de manière acceptable la vitesse de pénétration de la glace (mm/min), la modélisation étant confirmée par les résultats expérimentaux. L'application future de ce modèle simplifié à d'autres méthodes d'essai de caractérisation des fluides de déverglaçage existants permettrait d'identifier les effets des produits de déverglaçage des pistes solides dilués ou non dilués sur les taux de pénétration de la glace et, en fin de compte, sur les taux d'épandage.

La seconde phase du projet s'est focalisée sur l'interaction entre la glace et le produit chimique solide grâce à la caractérisation chimique et physique couplée de la spectroscopie

Raman et de la thermographie infrarouge. Grâce à ces outils il est donc possible de déterminer la concentration du produit et la température de surface lors de l'action du produit chimique (RDP). Le plateau d'efficacité maximale, caractérisé par l'intensité de la bande spectrale Raman la plus significative, correspond au pic de la température minimale, indication d'une performance optimale des RDP. Au-delà de ce point, l'efficacité du RDP diminue et la température du système, y compris les contaminants en solution et le RDP, se rapproche de celle ambiante. L'efficacité du RDP persiste lorsque la température ambiante dépasse le point de congélation du mélange. Dans le cas contraire, un risque de congélation subsiste. Les phases initiales du contact entre le RDP et la glace impliquent des réactions exothermiques qui génèrent de la saumure, suivies d'un échange de chaleur avec la glace environnante pour encourager la fonte. La phase finale de la fonte complète de la glace, ne laisse que de la saumure avec un échange de chaleur réduit à la surface. En quantifiant ces changements thermiques et chimiques, nous comprenons mieux la fonte de la glace liée aux RDP, et une évaluation plus solide peut être fournie aux aéroports utilisant des RDP.

Enfin, la dernière phase du projet s'est intéressée à l'activation mécanique des produits chimiques. Ce phénomène est reproduit à l'aide d'un Simulateur de Trafic Aéroportuaire (STA) afin de déterminer les taux d'épandage optimaux en protection antigivre. L'activation mécanique consiste en le broyage du produit chimique solide et son brassage dans l'eau liquide formée. Elle joue un rôle essentiel dans son efficacité en tant qu'agent antigivrant. Par exemple, si une saleuse assure une activation mécanique constante du produit, cela peut permettre aux aéroports d'éviter un nouvel épandage et de réduire le risque de saturation des pistes. Cela permet d'économiser de l'argent et de prolonger la durée d'action du produit. C'est pourquoi le développement de ce Simulateur de Trafic

Aéroportuaire a été entrepris afin de reproduire de manière représentative et en laboratoire les conditions réelles des pistes d'aéroport, de circulation de véhicules sur les pistes et de leur environnement. L'évaluation de l'efficacité de l'antigivrage fournit aux équipes de maintenance des aéroports des outils pour optimiser les coûts d'application des produits chimiques tout en maintenant une sécurité maximale. L'échec de ces tests est déterminé par la réaction exothermique causée par la formation de glace sur la surface circulée, identifiée à l'aide d'une caméra thermique. Le temps d'efficacité du produit augmente au fur et à mesure que la température augmente et que l'intensité des précipitations diminue. Cette relation souligne l'importance de tenir compte des conditions météorologiques pour déterminer la stratégie optimale d'application. En outre, le broyage assuré par la circulation reproduite par le STA d'un produit a démontré qu'une activation mécanique plus fréquente améliore de manière significative l'efficacité du produit en tant qu'agent antigivre. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet servent de base à l'élaboration d'un cadre analytique plus large, grâce à la méthodologie robuste employée, qui peut être étendue à d'autres conditions météorologiques.

Pour conclure et résumer cette méthodologie de recherche, la Figure 1-1 est présentée.

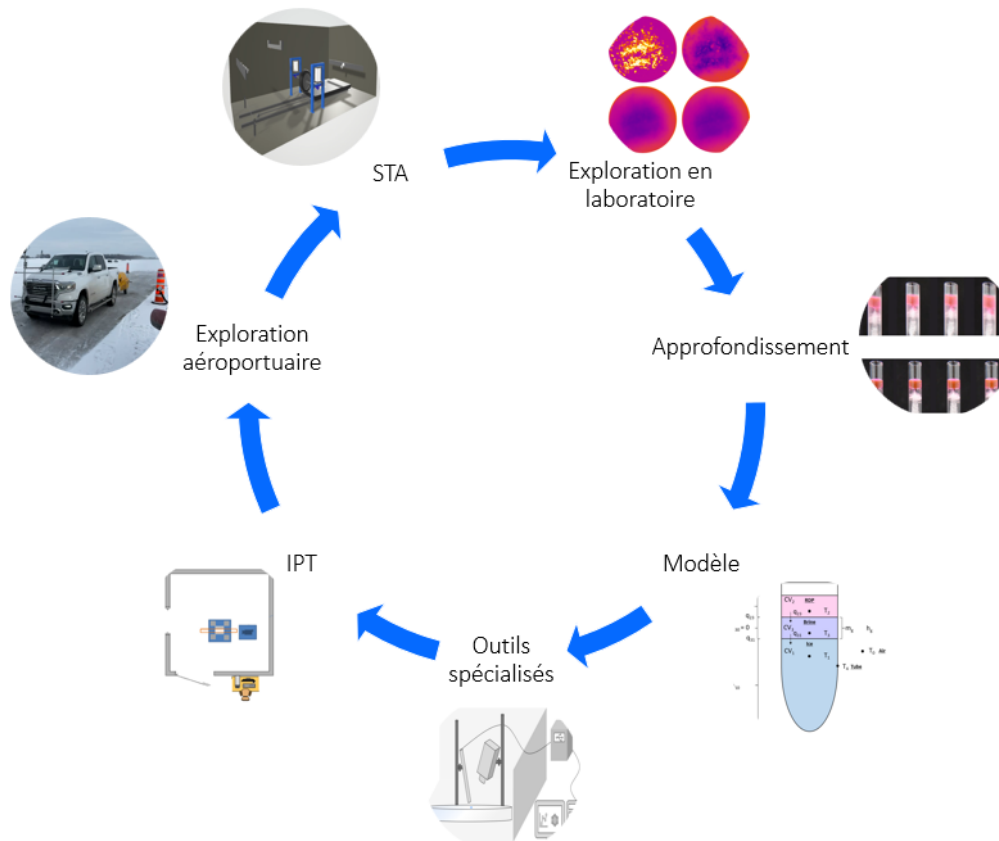


Figure 1-1: Schéma de la méthodologie de recherche

La Figure 1-1 permet de comprendre le cheminement scientifique ayant conduit à l'élaboration de cette thèse. En effet, l'étude s'est tout d'abord portée sur l'exploration en laboratoire des essais normés pour ensuite proposer un approfondissement de ces essais par l'ajout de données. À la suite des résultats obtenus, la recherche s'est tournée vers un modèle dynamique d'un essai normé puis à l'étude d'un autre essai normé grâce à des outils spécialisés qui sont la thermographie infrarouge et la spectroscopie Raman. Les conclusions ont conduit à l'essai IPT (Icing Protection Time) qui permet de quantifier le temps de protection antigivre. Néanmoins cet essai ne fonctionnant pas avec les produits chimiques solides, la recherche s'est tournée vers une exploration en milieu aéroportuaire pour mieux comprendre l'application et l'utilisation des produits chimiques solides, ce qui a donc conduit au développement du Simulateur de trafic Aéroportuaire (STA) et qui a ainsi conduit

à nouveau à des explorations en laboratoires par des essais.

Ce manuscrit est rédigé selon les exigences d'une thèse par articles. L'ensemble des méthodologies et des résultats sont donnés dans les chapitres suivants sous forme de deux articles publiés et un soumis actuellement en processus de révision par les pairs.

1.7 Contenu de la thèse

Les chapitres constituant cette thèse sont structurés comme suit. Le premier chapitre de cette thèse est une introduction comprenant une mise en contexte et la problématique afin que le lecteur comprenne les enjeux. Ensuite les objectifs et sous-objectifs permettent de mieux intégrer la réponse à la problématique et la méthodologie de comment s'est axée la recherche. Dans le deuxième chapitre, la revue bibliographique explique les travaux de recherche déjà entrepris dans le domaine d'étude afin d'obtenir des connaissances avancées et proposer par la suite une solution novatrice. Les trois chapitres suivants reposent sur les articles réalisés à partir des expérimentations et analyses des résultats de celles-ci et portent sur un modèle dynamique de la performance curative des produits [21], une caractérisation physico-chimique du produit en performance de fonte [22], ainsi que l'impact de l'activation mécanique sur les performances de protection antigivre [23]. Enfin, le dernier chapitre porte sur une conclusion globale de la recherche effectuée avec les perspectives et recommandations pour la suite du travail.

1.8 Références

- [1] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M.-M. Tremblay, et G. Momen, "A Refined Procedure for Evaluating the Airport Runway De-icing Products Performance,"

- [2] K. G. Libbrecht, "Physical dynamics of ice crystal growth," *Annual Review of Materials Research*, vol. 47, pp. 271-295, 2017.
- [3] A. Klein-Paste, "Runway Operability under Cold Weather Conditions. Tire-pavement friction creation by sand particles on iced pavements, and non-contacting detection of sand particles on pavements," *NTNU*, 2007.
- [4] A. Klein-Paste, "Airplane braking friction on dry snow, wet snow or slush contaminated runways," *Cold Regions Science and Technology*, 2017/02/20/ 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.02.004>.
- [5] A. Tuncal, U. Suat, et E. Dursun, "A MILESTONE TO ENHANCE RUNWAY SAFETY: THE NEW GLOBAL REPORTING FORMAT," *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 33, no. 1, pp. 168-178, 2021.
- [6] R. Canada, "Un avion fait une sortie de piste à l'aéroport de Bagotville," 2019. [En ligne]. Disponible: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1151839/incident-voyageurs-bagotville-aeroport-urgence>
- [7] J. Procházka et M. Kameník, "Contaminated Runway Operations-Adverse weather," *MAD-Magazine of Aviation Development*, vol. 1, no. 4, pp. 3-7, 2013.
- [8] Y. Niu *et al.*, "Techniques and Methods for Runway Friction Measurement: A Review of State-of-the-Art," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021.
- [9] Boeing. "Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents". https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf (Consulté le 2022-01-19).
- [10] EASA, "Annual Safety Review," 2020. [En ligne]. Disponible: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/annual-safety-review-2020>
- [11] L. KORNSTAEtT et R. Lignee, "Operational Landing Distances, A new standard for in-flight landing distance assessment," *Safety*, no. 1/5, 2010.
- [12] G. Comfort, "Wet Runway Friction: Literature and Information Review," 2001.
- [13] (2021). *Advisory Circular (AC) No. 300-019: Global Reporting Format (GRF) for Runway Surface Conditions*. doi:
- [14] T. Ozeki, Kitagawa, H., Izumiyama, K., Shimoda, H., and Kosugi, K., "An Investigation of Sea Spray Icing and Deicing on Membrane Structures," présenté à The 11th International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, Montréal, 2005 2005.
- [15] *AMS1435E Fluid, Generic, Deicing/Anti-icing Runways and Taxiways*, SAE International, 2024. [En ligne]. Disponible: <http://www.sea.org>
- [16] *AS6170 Ice Melting Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [17] *AS6211 Ice Penetration Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [18] *AS6172 Ice Undercutting Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [19] *AMS1431F Compound, Solid Runway and Taxiway Deicing/Anti-icing*, SAE International, 2024. [En ligne]. Disponible: <http://www.sae.org>
- [20] S. Aerospace, "Collection of Runway Deicer Types used on Airports ", 2010.
- [21] C. Charpentier, J.-D. Brassard, G. Momen, et J. Perron, "Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization," *Cold Regions Science and Technology*, p. 103932, 2023.
- [22] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M. Marchetti, et G. Momen, "Advancing Insights into Runway De-Icing: Combining Infrared Thermography and Raman Spectroscopy to Assess Ice Melt," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 12, p. 5096, 2024.

- [23] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M. Marchetti, et G. Momen, "Airport Traffic Simulator for Anti-icing Runway Winter Products: Chemical Performance by Mechanical Activation," *Cold Region Science & Technology (en révision)*, 2025.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

Le domaine de recherche sur les produits dégivrants et antigivre peut paraître est d'ailleurs vaste. En effet, il est recommandé de traiter les propriétés des produits dégivrants et antigivre, mais également d'aborder l'aspect opérationnel de terrain dans les aéroports pour obtenir une réponse à la problématique de viabilité hivernale. L'étude des contaminants est aussi significative dans ce projet au vu de leur impact sur la recherche effectuée. C'est pourquoi, la revue bibliographique a été réalisée à partir de la carte heuristique suivante (Figure 2-1) :

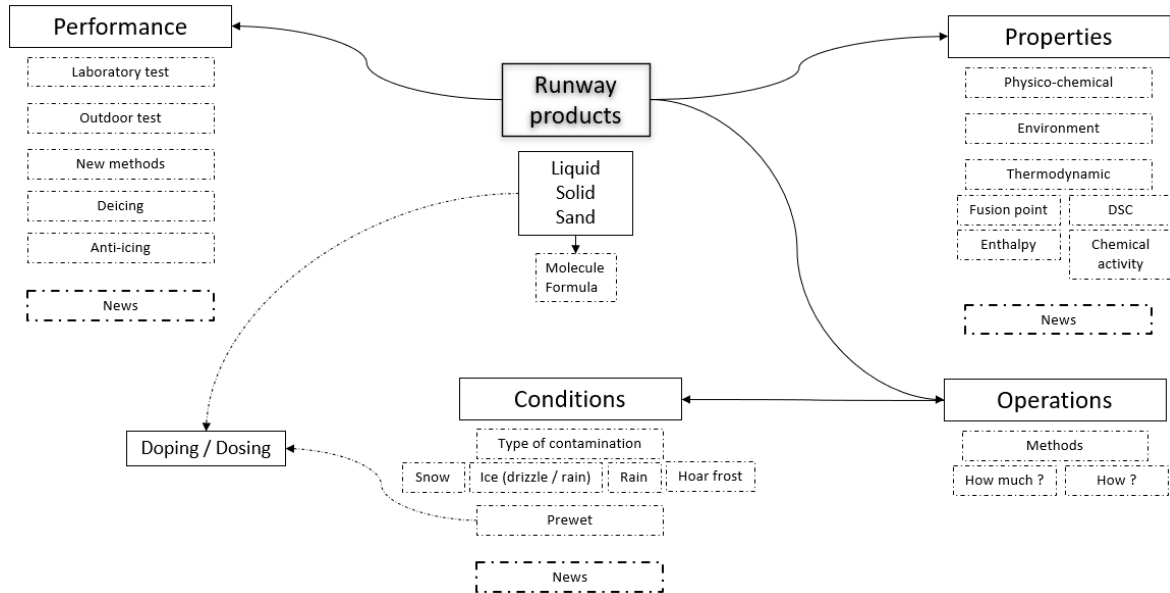


Figure 2-1 : Cartographie de la revue bibliographique

Cette cartographie est présentée en anglais car les recherches associées aux mots-clés étaient dans cette langue dans les bases de données consultées. Afin de garantir une plus

grande précision, il a été jugé préférable d'utiliser ces mêmes mots-clés.

Cette cartographie permet de mieux comprendre la démarche suivie pour effectuer la revue de littérature et de la diviser en différentes parties. Il s'agit d'un point de repère qui a élargi la recherche bibliographique à de nouveaux sujets, mots-clés afin l'enrichir. Elle constitue ainsi la fondation de la recherche ayant permis d'identifier puis de développer les concepts et les outils présentés dans ce projet.

Pour chaque partie, le terme « news » de la cartographie de la revue bibliographique se concentre sur les avancées récentes afin de développer des méthodes plus abouties. Le point central de la revue repose sur les produits destinés aux pistes afin de ne pas restreindre les résultats. Il existe différents types de produits en solution, dits liquides, et solide qui sont utilisés en saison hivernale. On distingue plus particulièrement ceux pour empêcher l'accumulation de contaminants (neige, glace), soit les produits antigivre, ou encore aider à leur enlèvement, soit ceux dégivants pour faciliter l'élimination de contaminants déjà présents. À ceux-ci s'ajoute le sable dont le rôle est de se faire emprisonner à la surface de glace pour créer de nouveau une surface rugueuse et adhérente, et dont le rôle et le mode d'action est totalement différent de ceux visés des produits dégivants.

Le fil conducteur de la revue bibliographique portera sur l'impact de l'usage de ces produits sur la glissance, ou perte d'adhérence, en y intégrant sa définition, les moyens utilisés par les aéroports pour sa gestion, puis finalement sur les méthodes actuellement disponibles pour la quantifier. De même les propriétés physico-chimiques de ces produits auront une importance dans la suite du projet et seront donc abordées et explicitées.

2.2 Outils de gestion et de préservation de l'adhérence en milieu aéroportuaire

Il existe différents outils garantissant l'adhérence d'une piste. En effet, la machinerie conventionnelle constituée de déneigeuse ou encore de fraise à neige sont utilisés mais les produits dégivrants et antigivre facilitent le retrait du ou des contaminants ou encore de protéger la piste avant une précipitation pour en éviter toute accumulation.

2.2.1 *Dégagement mécanique de la surface*

En première instance, pour diminuer la glissance ou la perte d'adhérence de la piste, des outils mécaniques sont déployés lors d'évènements hivernaux conduisant à sa contamination pour effectuer le dégivrage et le déneigement. Des opérations de déneigement bien exécutées et réalisées en temps voulu permettent non seulement de garantir que la route ou la piste restent praticables pendant les tempêtes hivernales, mais aussi de réduire l'accumulation d'une couche d'eau solide dure et compacte. Par conséquent, ces opérations hivernales peuvent réduire la nécessité d'autres comme le sablage et l'application de déverglaçant [1].

Les déneigeuses fonctionnent grâce à une lame qui se glisse sous la neige pour le décoller de la piste. La forme de la lame conduit à repousser la neige pour l'évacuer par les parties latérales de la lame (Figure 2-2).



Figure 2-2 : Déneigeuses (images libres de droits)

Ainsi, la lame servant à décoller la neige du sol, il est nécessaire de modifier l'angle de cette dernière par rapport à la piste pour amasser le plus de neige possible. Donc plus l'angle de la lame avec la piste est élevé, plus la neige sera amassée. Cependant, elle sera davantage susceptible d'être endommagée en se prenant dans un obstacle (trou, trottoir, etc.). Il existe toute une gamme de lames en différents matériaux pour prévenir les dommages, comme de l'acier, du métal dur, ou des lames métalliques recouvertes de caoutchouc [1], et de systèmes d'absorption des chocs. La performance de dégagement d'un chasse-neige peut être appréciée en mesurant la quantité de neige par unité de surface avant et après le déneigement. De nombreux facteurs peuvent affecter les performances de déblaiement, tels que le type de lame, l'angle de râteau, la charge verticale, la conception du versoir, l'épaisseur

initiale de la couche de neige, le niveau d'orniérage et d'irrégularité de la chaussée et la vitesse de chasse. Les véhicules roulent généralement à une vitesse maximale de 50 km/h car il a été démontré qu'une augmentation de la vitesse de déneigement entraîne une réduction de l'efficacité du dégagement [2].

Pour effectuer ces opérations les aéroports déploient des flottes d'engins de déneigement pour effectuer l'opération dans le moins de temps possible. Elles respectent une organisation précise telle que présentée sur la Figure 2-3, montrant comment l'équipe d'Aéroports de Paris effectue ses opérations hivernales.

Les flottes déployées lors de ces opérations sont composées de différents véhicules dont un véhicule de commandement donnent des consignes aux déneigeuses quant au rythme à garder, etc., des déneigeuses qui poussent la neige, deux camions épandeurs de produit déverglaçant, deux souffleuses à neige qui permettent de disperser la neige tassée sur le côté de la voie en dehors de la circulation, et enfin un véhicule de contrôle de glissance qui mesure le coefficient d'adhérence de la piste dégagée et traitée [3].



*Figure 2-3 : Le déneigement des pistes des Aéroports de Paris (image générée par intelligence artificielle)
[3]*

Le déneigement dure entre 15 et 30 minutes selon des conditions météorologiques. Il est à noter que le trafic aérien est interrompu lors de ces événements, ce qui peut créer des retards dans le programme des vols [3] avec les conséquences financières inhérentes à ces retards. Ainsi, l'efficacité de ces manœuvres d'exploitation hivernale est un critère très important pour les aéroports. La vitesse des véhicules est cruciale dans un tel contexte [1], c'est pourquoi un véhicule de commandement est placé à l'avant de ce « train de neige ». Chaque aéroport effectue ses opérations dans un rythme et style semblable mais avec des déviations en fonction de leur positions et expérience.

Néanmoins, la neige fondue est difficile à éliminer efficacement avec une configuration de chasse-neige standard. Souvent, le bord de la fraise commence à "s'incliner" sur la neige fondue, ce qui réduit l'efficacité du chasse-neige à la vitesse nominale. Pour

améliorer les performances de déblaiement de la neige fondue, la lame peut être équipée d'éléments en caoutchouc. Ces derniers sont traînés sur la chaussée (angle d'attaque > 90 degrés) [1].

L'utilisation des produits antigivre et dégivrants paraît contraignante pour l'utilisation des déneigeuses. En effet, la contamination de la piste par de la neige n'est pas réglée pratiquement que par l'utilisation d'outils mécanique puisque l'utilisation de produits chimique, créerait de la « *slush* », ce qui nécessiterait quand même l'utilisation de déneigeuses pour le dégagement. Néanmoins, il existe plusieurs raisons pour lesquelles ces produits sont utilisés conjointement avec les outils mécaniques de dégagement. La première est d'empêcher une surface humide de geler ou de former des dépôts de givre sur la chaussée en abaissant la température de congélation du contaminant en dessous de 0°C [4]. Un produit solide est épandu avant ou au début d'une intempérie hivernale et aide à maintenir le contaminant dans un état le rendant facile à enlever. La deuxième raison est de faire fondre les fines couches de glace qu'une lame ne peut racler avec du produit solide afin de faciliter son enlèvement (dégivrage) si les conditions d'hygrométrie s'y prêtent [4, 5].

2.2.2 *Dégagement chimique*

Le dégagement chimique est très utile dans le processus d'évacuation de la contamination mais nécessite d'être sa mise solution dans l'eau pour être efficace.

Les sels inorganiques, tels que le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de calcium (CaCl₂) et le chlorure de magnésium (MgCl₂), se dissocient en plusieurs ions dans l'eau, ce qui augmente leur efficacité à réduire le point de congélation. Par exemple, le CaCl₂ se dissocie en trois ions (Ca²⁺ et 2 Cl⁻), ce qui multiplie son effet cryoscopique par rapport au NaCl, qui ne se dissocie qu'en deux ions [6].

Les dégivrants organiques, comme les formiates et acétates, quant à eux, fonctionnent différemment. En effet, ils n'agissent pas uniquement par dissolution ionique mais également par formation de liaisons hydrogène avec les molécules d'eau, modifiant leur arrangement et retardant leur cristallisation. Cette approche est particulièrement intéressante, car elle permet d'obtenir un effet antigivre efficace tout en réduisant l'impact corrosif des sels de chlorure [6].

La littérature et les discussions avec les aéroports et des manufacturiers a permis de déterminer que les produits actuellement utilisés en milieu aéroportuaire sont issus de cinq principales familles de molécules, sélectionnées grâce à leur capacité d'abaisser le point de congélation de l'eau [6, 7]. En effet, les produits sont :

- l'acétate de potassium (KAC) qui a un point de congélation de -52°C à la concentration eutectique de 45% m/m,
- le formate de potassium (KFO) qui a un point de congélation de -41°C à la concentration eutectique de 48% m/m,
- le glycérol (*Hybrid*) qui a un point de congélation de -16°C à la concentration eutectique de 24.7% m/m qui sont tous en solution dans l'eau,
- le formate de sodium (NAFO), l'acétate de sodium (NAAC) et un composé issu du mélange 50/50 des deux précédents qui sont à l'état solide [8].

Néanmoins, trois molécules sont régulièrement incluses dans les articles scientifiques pour faire une comparaison avec les produits usuels des voies d'accès routières [9] [10], notamment le chlorure de sodium (NaCl) utilisé en raison de sa capacité de stockage élevée et de son faible coût. À une température de chaussée de -12°C , le NaCl est à peine utilisé et a peu d'effet. Le deuxième produit est chlorure de calcium (CaCl_2) qui est plus efficace pour la gestion de la neige que le NaCl car il très hygroscopique ($\text{HR}_{\text{équilibre}}=45\%$,

contre $HR_{\text{équilibre}}=75\%$ pour le NaCl à température ambiante) et s'accroche donc à la route grâce à l'humidité qu'il absorbe et aussi son poids qui augmente [10]. La dernière molécule est le chlorure de magnésium ($MgCl_2$) aux caractéristiques voisines du KAC.

Historiquement des produits à bases de chlorure et d'urée étaient utilisés sur plateformes aéroportuaires. Néanmoins, il a été mis en évidence que l'urée, particulièrement, malgré un faible coût d'achat, était néfaste pour l'environnement car lors de la décomposition dans l'eau, celle-ci forme de l'ammoniac qui est fortement toxique pour la faune et la flore avoisinante [11]. D'autre part, le chlorure (de sodium, de magnésium ou de calcium), utilisé principalement sur les routes, ne convient pas aux problématiques des pistes d'aéroport à cause de sa forte corrosion pour les alliages d'aluminium ou l'acier présents dans les aéronefs [11]. Ainsi, 86% des aéroports en Amérique du Nord utilisent de l'acétate de potassium, 41% utilisent du formate de sodium, et seulement 14% de l'acétate de sodium [12]. Le Tableau 2-2 présente ces produits en formules semi-développées, développées des molécules et point de congélation.

Contrairement aux chlorures ($NaCl$, $CaCl_2$, $MgCl_2$), qui augmentent le taux de corrosion des infrastructures et des aéronefs, le formate de potassium est beaucoup moins agressif pour les métaux et les surfaces en béton. De plus, il est biodégradable et présente un faible impact écologique, ce qui le rend compatible avec les exigences environnementales des aéroports.

Les produits dégivrants pour les pistes d'aéroport sont tous encadrés par deux normes de la Society of Automotive Engineering (SAE) :

- Aerospace Materials Specification (AMS) AMS1431D Compound, Solid Runway and taxiway Deicing/Anti-icing sur les produits de type solides granulaires [13],

- AMS1435C Fluid, Generic, Deicing/Anti-icing Runways and Taxiways pour les produits de type en solutions [14].

Ces documents comprennent toutes les informations sur les limites acceptables en corrosion, impact environnemental mais très peu en ce qui trait à la performance outre les points de congélation, à -14°C à une dilution du produit à 50% m/m dans l'eau ou des essais de performance en dégivrage qui sont comparatifs et informationnels, ni sur la synergie des produits solides et en solution.

Les produits dégivrants ont pour principe d'empêcher la formation de glace et de faciliter son élimination en exploitant plusieurs principes chimiques et thermodynamiques. L'un des mécanismes fondamentaux de leur efficacité est la diminution du point de congélation de l'eau, un phénomène décrit par la loi de Raoult et le concept de dépression cryoscopique. En effet, lorsqu'un soluté est dissous dans un solvant tel que l'eau, il perturbe l'équilibre thermodynamique du système, réduisant ainsi la température à laquelle ce solvant gèle. Selon la loi de Raoult, l'ajout d'un soluté abaisse la pression de vapeur du solvant, ce qui entraîne une modification du point de congélation. Cette relation est décrite par l'équation de la dépression cryoscopique [15] :

$$\Delta T_f = K_f \times i \times m \quad (1)$$

où :

- ΔT_f est la diminution du point de congélation,
- i est le facteur de Van 't Hoff, représentant le nombre d'ions ou de particules produites en solution,
- K_f est la constante cryoscopique du solvant, spécifique à celui-ci,
- m est la molalité du soluté (nombre de moles de soluté par kilogramme de solvant).

Cette équation montre que plus la concentration en soluté est élevée, plus l'abaissement du point de congélation est important. Les produits dégivrants utilisent ce principe en incorporant des sels comme le chlorure de sodium par exemple ou des molécules organiques hygroscopiques comme les acétates ou encore les formiates, qui sont capables d'assurer la fusion de la glace et d'abaisser significativement la température de congélation de la solution ionique ainsi créée [16].

La caractéristique distinctive des produits antigivre et dégivrants de pistes solubles dans l'eau est qu'ils sont capables d'abaisser considérablement le point de congélation de l'eau. Ce paramètre permet d'observer le point de congélation, soit le point où le produit a sa température la plus basse tout en gardant son efficacité. La cause de cette dépression du point de congélation est que l'eau dans sa phase liquide est stabilisée lorsqu'une substance y est dissoute. La dépression du point de congélation est souvent considérée comme une propriété colligative, ce qui signifie que le type de substance chimique dissoute n'a pas d'importance, seul le nombre de particules dissoutes compte. En conséquence, la dépression du point de congélation de l'eau peut être calculée comme suit :

$$\Delta T = K_f m \quad (2)$$

où ΔT est la suppression du point de congélation K_f ($=1,86 \text{ K kg/mol}$) la constante cryoscopique et m est le nombre de particules dissoutes (ions ou molécules) par kg de solvant [6].

Néanmoins, l'hypothèse de l'idéalité est insuffisante pour pouvoir prédire les propriétés des produits chimiques de dégivrage réels. Il existe cependant une théorie décrivant les propriétés des solutions réelles. Un concept central de la thermodynamique des

solutions aqueuses réelles est l'activité de l'eau. En termes simples, l'activité de l'eau est la concentration effective en eau d'une solution réelle. Alternativement, comme il est souvent décrit, c'est la quantité d'eau libre, non liée aux produits chimiques dissous. L'activité de l'eau d'une solution est définie comme suit [6] :

$$a_w = \frac{p^{sol}}{p^{water}} \quad (3)$$

où a_w est l'activité de l'eau, p^{sol} est la pression de vapeur d'eau de la solution et p^{water} est la pression de vapeur d'eau de l'eau pure à la même température.

Comme première étape pour effectuer des calculs sur des solutions réelles, l'équation (2) peut être modifiée en remplaçant la concentration molaire par $\frac{\ln(a_w)}{M_w}$ où M_w le poids molaire de l'eau. Cela donne la relation suivante [6] :

$$\Delta T = \frac{K_f}{M_w} \ln(a_w) \quad (4)$$

qui peut être utilisée pour calculer l'abaissement du point de point de congélation des solutions concentrées.

Ainsi, différentes données sont disponibles sur le sujet, notamment à différentes concentrations de produit. Ce paramètre varie évidemment en fonction de la concentration de produit (ou degrés de dilution avec un contaminant) et donne ainsi une indication concrète sur les performances du dégivreur de piste et son niveau de protection. En effet, plus un produit est concentré, plus il est performant. Il sera donc opportun de concentrer une partie de l'étude sur ce facteur [7, 17, 18]. Aussi, la spectroscopie Raman sera utile lors du projet puisqu'elle permet de suivre l'évolution de la concentration d'un produit tout au long d'un essai, ainsi que ses changements de phase.

Les atomes de sodium et de potassium sont récurrents dans les produits utilisés. L'acétate et le formate sont également les bases des produits. Ainsi, les molécules rencontrées sont composées de la même manière. Le Tableau 2-2 montre leur formule compacte et développée. Elles partagent toutes la capacité à former des liaisons hydrogène, ce qui favorise leur interaction avec les molécules d'eau et leur confère une excellente solubilité. De plus, on y retrouve la température minimale au point de congélation ainsi que le pourcentage massique correspondant (w/w).

En d'autres termes, la diminution du point de congélation repose sur des principes bien établis de la thermodynamique des solutions. L'efficacité des produits dégivrants dépend de la nature du soluté, de sa concentration et de l'interaction de ses molécules constitutives avec celles de l'eau. L'optimisation de ces paramètres permet de mieux comprendre et potentiellement d'améliorer la performance des dégivrants tout en minimisant leur impact sur les infrastructures et l'environnement.

Pour expliciter le principe, l'exemple du formate de potassium (KCOO^-), un produit usuellement utilisé en contexte aéroportuaire, est développé. Ce produit dégivrant, couramment utilisé dans l'industrie en raison de sa faible corrosivité et de son impact environnemental (les essais de DCO/DBO sont conduits pour chaque produit et est un indicateur de biodégradabilité d'un produit) réduit par rapport aux sels chlorés, respecte les critères donnés par les standards AMS1435. Lorsqu'il est dissous dans l'eau, le formate de potassium se dissocie en ions K^+ (potassium) et COO^- (formate), perturbant ainsi l'équilibre thermodynamique du système selon l'équation (1) de la dépression cryoscopique [15] avec :

- $i=2$ car le formate de potassium se dissocie en deux entité (un ion K^+ et un ion COO^-).

- K_f pour l'eau est environ $1,86 \text{ }^{\circ}\text{C.kg.mol}^{-1}$.
- m est la concentration molaire du soluté en mol/kg.

Pour une solution contenant 2 moles de KCOO^- par kg d'eau :

$$\Delta T_f = 1,86 \times 2 \times 2 = 7,44 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

La solution liquide ainsi formée demeure liquide jusqu'à environ $-7,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ au lieu de $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Si la solution contient 50 % en masse de formate de potassium (KCOO^-) dans l'eau, ce qui correspond à la concentration usuelle de ce type de produit, il est possible d'estimer son effet sur le point de congélation en déterminant sa molalité et en appliquant l'équation de la dépression cryoscopique.

Étape 1 : Détermination de la molalité (m)

La molalité (m) est définie comme :

$$m = \frac{\text{moles de soluté}}{\text{kg de solvant}} \quad (6)$$

- La masse molaire du formate de potassium KCOO^- est d'environ $84,12 \text{ g/mol}$.
- Dans 1 kg de solution à 50 % massique, il y a 500 g de KCOO^- et 500 g d'eau.
- Le nombre de moles de formate de potassium est donc :

$$n = \frac{500 \text{ g}}{84,12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \approx 5,94 \text{ moles} \quad (7)$$

- La masse d'eau étant 500 g = 0,5 kg, la molalité est :

$$m = \frac{5,94 \text{ moles}}{0,5 \text{ kg}} = 11,88 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \quad (8)$$

Étape 2 : Calcul de la diminution du point de congélation

On applique la formule de la dépression cryoscopique :

$$\Delta T_f = K_f \times i \times m \quad (1)$$

- $i = 2$ (dissociation en K^+ et COO^-)
- $K_f = 1,86 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ pour l'eau
- $m = 11,88 \text{ mol/kg}$

$$\Delta T_f = 1,86 \times 2 \times 11,88 \approx 44,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Avec une concentration massique de 50 % en $KCOO^-$ dans l'eau, la température de congélation est abaissée d'environ $44,2^\circ\text{C}$. Cela explique pourquoi les solutions concentrées de formate de potassium sont extrêmement efficaces pour empêcher la formation de glace, même par très basses températures, tout en offrant une alternative moins corrosive et plus respectueuse de l'environnement que les sels chlorés.

Le formate de potassium ne se contente pas de diminuer le point de congélation. Il joue également un rôle en limitant la croissance des cristaux de glace et en empêchant leur adhérence aux surfaces. Lorsqu'il est appliqué sur une piste, il forme une fine couche hygroscopique qui attire l'eau et maintient un état liquide, facilitant ainsi l'évacuation de la glace et de la neige. Néanmoins, lorsqu'il est en trop faible quantité à une température trop basse, ceci provoque un risque de recongélation. En conclusion, le formate de potassium est un excellent choix pour les opérations de dégivrage et d'antigivrage grâce à son efficacité à abaisser le point de congélation, sa faible corrosivité et son compatibilité environnementale, en faisant un substitut privilégié aux sels chlorés traditionnels [6].

✓ *Produits et molécules usuels*

Outre le KFO il existe d'autres molécule offrant le même effet. Le Tableau 2-1 [8]

présente les caractéristiques des états d’application des mélanges principaux constituant les produits de dégivrage. Les solides ressortent comme étant plus endurants que les RDP en solutions. Néanmoins les RDP en solutions agissent immédiatement alors que les solides ont besoin de manipulations préalables.

Tableau 2-1 : Récapitulatif des caractéristiques intéressantes pour une application aéroportuaire des types de produits dégivrants [8]

	En solutions (liquide)	Solides	Prémouillés
Compatibilité avec les surfaces de béton	Adhère facilement	Adhérence varie en fonction de la taille des particules	Adhérence supérieure à celle des solides seuls
Vitesse d’action	Agit immédiatement	Action lente (nécessite de l'humidité et une activation mécanique)	Effet synergique. Agit plus rapidement que les solides seuls mais plus lentement que les RDP en solution seuls
Temps d’efficacité	Protège moins longtemps	Effet durable	Effet durable

L'efficacité des produits dégivrants pour pistes aéroportuaires dépend de plusieurs facteurs, notamment leur forme (solution liquide, solide ou produit prémouillé) et leur interaction avec les surfaces. Voici une synthèse des principales caractéristiques de ces différentes catégories de produits :

1. Compatibilité avec les surfaces de béton

- **Solutions liquides** : Adhèrent facilement aux surfaces, réduisant le risque de dispersion par le vent ou le trafic aérien.
- **Solides** : Leur adhérence varie en fonction de la granulométrie des particules, qui peut influencer leur efficacité selon les conditions d’application.
- **Produits prémouillés** : Offrent une adhérence supérieure à celle des solides seuls, améliorant leur maintien sur la surface et réduisant les pertes par projection.

2. Vitesse d'action

- **Solutions liquides** : Agissent immédiatement, ce qui les rend particulièrement adaptées aux interventions rapides lors d'épisodes de givrage.
- **Solides** : Leur action est plus lente, nécessitant la présence d'humidité et une activation mécanique pour libérer leur pouvoir dégivrant.
- **Produits prémouillés** : Présentent une synergie, agissant plus rapidement que les solides seuls, mais légèrement plus lentement que les solutions liquides.

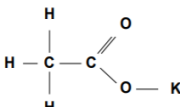
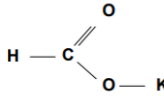
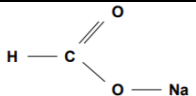
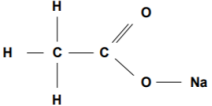
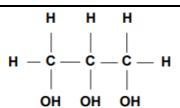
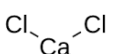
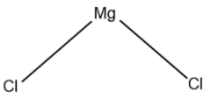
3. Durée d'efficacité

- **Solutions liquides** : Protègent la surface pendant une durée relativement courte, nécessitant des ré-applications plus fréquentes.
- **Solides** : Offrent un effet plus durable grâce à leur capacité à libérer progressivement l'agent dégivrant.
- **Produits prémouillés** : Combinent l'action rapide du liquide avec la persistance des solides, garantissant une protection prolongée.

Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans la sélection des produits afin d'optimiser leur performance en fonction des conditions météorologiques et opérationnelles des aéroports.

Tableau 2-2 : Formules compactes et, développées des molécules et point de congélation

Molécule	Formule semi-développée compacte	Formule développée	Point de congélation et pourcentage massique associé
----------	----------------------------------	--------------------	--

Acétate de potassium (en solution dans l'eau) KAC	CH_3COOK		-52°C À 45% w/w [10]
Formate de potassium (en solution dans l'eau) KFO	HCOOK		-51°C À 48% w/w [10]
Formate de sodium (état solide) NAFO	HCOONa		-16°C À 24,70% w/w [19]
Acétate de sodium (état solide) NAAC	CH_3COONa		-18°C 23% w/w [19]
Glycérol (en solution) HYB	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$		-47°C 67% w/w [10]
Chlorure de sodium	NaCl	$\text{Na} - \text{Cl}$	-20,6°C 23,4% w/w [20]
Chlorure de calcium	CaCl_2		-50°C 30,5% w/w [21]
Chlorure de magnésium	MgCl_2		-33,5°C 21,8% w/w [21]

L'acétate de potassium (KAc), de formule CH_3COOK , est un sel utilisé comme agent de dégivrage et d'antigivrage. Il présente un point de congélation de -52°C lorsqu'il est en solution aqueuse concentrée à 45% en masse. Il est apprécié pour son efficacité à très basses températures et son faible impact environnemental comparé aux sels conventionnels.

Le formate de potassium (KFo), dont la formule est HCOOK , est une autre solution aqueuse largement utilisée en aviation et sur les infrastructures routières. Il affiche un point de congélation de -51°C à une concentration de 48% en masse. Sa biodégradabilité et son efficacité en font une alternative prisée aux sels chlorés. Le formate de sodium (NaFo), sous

forme solide, est une molécule de formule HCOONa . Il est souvent employé dans les mélanges de dégivrage pour ses propriétés antigivrantes. À une concentration de 24,70% en masse, il présente un point de congélation de -16°C , ce qui le rend efficace dans de nombreuses conditions hivernales.

L'acétate de sodium (NaAc), également sous forme solide, est représenté par la formule CH_3COONa . Il est utilisé pour ses propriétés de fonte des couches de glace et comme additif dans certaines solutions de déverglage. Avec un point de congélation de -18°C à une concentration de 23% en masse, il constitue une solution intermédiaire entre les produits plus agressifs et des formulations davantage écologiques.

Le glycérol (hybride issu du mélange de formate de potassium KAC et de glycol (HYB)), ou $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$, est un agent antigivrage sous forme liquide, souvent utilisé comme alternative aux sels et aux solutions de dégivrage classiques. Son point de congélation est de -47°C lorsqu'il est présent à 67% en masse dans l'eau. Sa nature non corrosive et sa compatibilité avec divers substrats en font un choix privilégié dans certaines applications sensibles.

Le chlorure de sodium (NaCl), communément appelé sel de table, est couramment utilisé pour le dégivrage des routes et des infrastructures. Sa formule chimique est NaCl , et il présente un point de congélation de $-20,6^{\circ}\text{C}$ à une concentration de 23,4% en masse. Bien que son efficacité soit prouvée en milieu routier, son impact corrosif et environnemental limite son usage dans certains contextes, notamment aéroportuaire. D'autre part, les vitesses des aéronefs en phase de décollage et d'atterrissage sont de d'un ordre de grandeur supérieur

à ceux des véhicules routiers et celles-ci ne peuvent pas être réduites comme il peut être question dans le domaine routier et doivent être maintenues quelles que soient les conditions météorologiques de surface.

Le chlorure de calcium (CaCl_2) est un sel et présente un fort caractère hygroscopique qui agit efficacement pour abaisser le point de congélation de l'eau. Il est utilisé dans des solutions aqueuses pour des applications de dégivrage intensif, avec un point de congélation de -50°C à une concentration de 30,5% en masse. Sa forte capacité à absorber l'humidité le rend particulièrement performant dans les conditions hivernales extrêmes de froid sec.

Enfin, le chlorure de magnésium (MgCl_2) est une alternative aux autres sels dégivrants, employé notamment pour limiter la formation de glace sur les infrastructures. À une concentration de 21,8% en masse, il présente un point de congélation de $-33,5^\circ\text{C}$. Il est souvent préféré pour réduire l'impact environnemental des traitements hivernaux.

Les produits étant proposés sous différents conditionnements, ils n'agissent pas tous de la même façon. Les principales formes sont solides et en solution (liquide) mais les opérateurs utilisent aussi les produits en solution et solide en conjonction que nous nommons ici pré-mouillé. L'utilisation de cette approche n'est pas documentée dans les bases de données scientifiques. Cependant, cette pratique est en vigueur chez les Aéroports De Montréal (ADM) et les Aéroports De Paris (ADP). En l'absence de corpus bibliographique, il a été choisi de s'appuyer sur l'expertise pratique des services en charge de l'exploitation hivernale compte tenu de leur satisfaction à ce sujet. La Figure 2-4 représente le comportement des différents types de dégivrants sur la glace avec les trois principales étapes de fonte de la glace, de sa pénétration et du sous-cavage [22, 23].

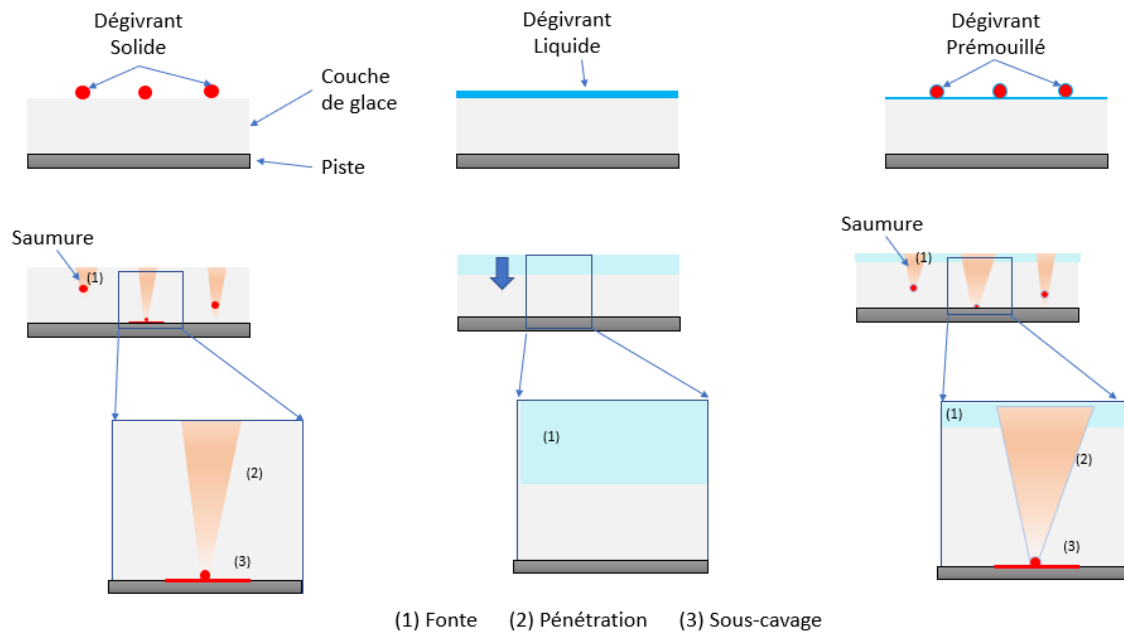


Figure 2-4 : Schéma de l'effet du dégivrant sur la glace

Quelques documents disponibles dans la littérature ont proposé des explications quant au mode d'action de ces produits pour parvenir à la fusion de l'eau solide [24, 25]. Dans le premier cas, le dégivrant solide fait fondre la glace en générant localement sa fusion en un seul point. Il crée localement une saumure dans les trous ainsi créés. L'effet de la gravité aide à pénétrer la glace dans toute son épaisseur jusqu'à la piste, en continuant son effet de sous-cavage, à l'interface glace/piste.

Dans le second cas, le dégivrant en solution fait fondre la glace à l'interface RDP/glace en causant la fusion progressive de la glace. La saumure créée est de moins en moins concentrée en produit déverglaçant de sorte que son efficacité diminue avec le temps d'exposition [26].

Le partenaire de recherche, Aéroports de Montréal, a mis beaucoup d'emphasis sur l'utilisation de solide pré-mouillés, donc une nouvelle réflexion a été apportée par l'étude préalable des solides pré-mouillés. Ces produits sont des mélanges de solides et d'une saumure (dégivrant en solution) qui permet d'activer avec plus d'efficacité le composé

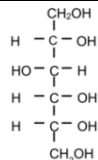
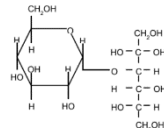
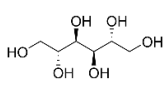
solide. Ils sont donc composés à 10% de produit en solution et 90% de solide. Dans le dernier cas, le dégivrant prémouillé consiste à combiner les effets du RDP en solution, qui amorce plus rapidement la fonte de la glace, et du solide, qui fait fondre la glace, la pénètre puis la décolle lorsque la surface de la piste est atteinte. Cette notion de pré-mouillage est également en lien avec l'hygrométrie ambiante et la notion d'hygrométrie du sel à l'équilibre $HR_{\text{équilibre}}$, hygrométrie au-dessus-de laquelle il capte l'eau ambiante présente dans l'atmosphère. De plus, ils sont testés grâce à une méthode ne considérant pas l'importance de la surface de contact [27]. Il paraît donc important d'utiliser un protocole expérimental adéquat à la problématique rencontrée. En effet, le recours à une méthode pouvant utiliser les produits solides tels que livrés par des fournisseurs semble primordial à la bonne interprétation des résultats.

✓ *Produits et molécules moins ou non conventionnels*

L'enjeu environnemental prend une place davantage prépondérante dans la recherche menée sur l'exploitation hivernale, notamment dans l'industrie aéronautique qui se trouve accusée de forte pollution et de contribuer aux émissions des gaz à effet de serre (GES). Ainsi, le développement de nouveaux produits à connotation plus « propre » s'ouvre de plus en plus. C'est dans cet optique qu'une recherche sur les molécules alternatives a été effectuée. La littérature actuelle comporte plusieurs études portant sur le jus de betteraves ou de maïs afin d'amoindrir l'impact environnemental du dégivrage et déverglaçage des pistes. Les polyols sont également étudiés car ils sont de la même famille que les glycols mais sont beaucoup moins polluants car utilisés à la base comme additifs alimentaires. Ces molécules sont présentées dans le Tableau 2-3. Divers produits chimiques d'origine agricole peuvent être utilisés seuls ou comme additifs à d'autres produits chimiques d'entretien

hivernal. Les additifs d'origine agricole augmentent les coûts mais peuvent accroître la capacité de fonte de la neige des dégivrants, réduire la corrosivité des produits chimiques et/ou avoir une durée de vie plus longue que les produits chimiques standard lorsqu'ils sont appliqués sur les chaussées [28]. À l'heure actuelle, il n'existe néanmoins aucune norme contraignante visant à encadrer l'impact environnemental de ces produits.

Tableau 2-3 : Formules semi-développées, développées des molécules et point de congélation des produits non conventionnels

Molécule	Formule semi-développée compacte	Formule développée	Point de congélation
Sorbitol	$C_6H_{14}O_6$		-38,1°C 27,77% w/w 23,3% NaCl [29]
Maltitol	$C_{12}H_{24}O_{11}$		-35,6°C 27,77% w/w 23,3% NaCl [29]
Mannitol	$C_6H_{14}O_6$		-27°C 13,33% w/w 23,3% NaCl [29]
Jus de maïs	Saccharose	n/a	-23,5°C 70% w/w 23,3% NaCl [29]
Jus de betteraves	Saccharose	n/a	-28°C 100% w/w 23,3% NaCl [29]

La recherche s'est portée sur le point de congélation à la concentration eutectique de ces produits [29]. Il a notamment été révélé que le jus de maïs à 70 % en poids et le jus de betterave à 100 % de concentration avec 23,3% en poids de NaCl ont abaissé les points de congélation à -23,5°C et -28°C, respectivement alors que celui-ci est de -20,6°C pour la saumure saturée de NaCl seule. On a également observé que les points de congélation des jus de maïs et de betterave diminuaient avec l'augmentation de leur concentration massique et que le point de congélation du jus de maïs a diminué avec l'augmentation de sa fraction massique. Pour ce qui est des polyols, il a été mis en évidence qu'ils améliorent la capacité

à faire fondre la glace de la saumure de NaCl et réduisent considérablement la corrosion dans les automobiles. Les points de congélation ont également baissé avec l'augmentation de leur fraction massique. L'ajout de polyols à la solution saline de NaCl à 23,3% en poids a permis d'abaisser le point de congélation en dessous de -21,1°C. La combinaison de 27,8% en poids de sorbitol + 23,3% en poids de solution saline est recommandée pour le dégivrage dans les régions où les températures de congélation sont inférieures à -30°C.

On peut donc observer que les points de congélations de tous ces produits sont meilleurs que les produits solides usuellement utilisés pour les pistes d'aéroport. Malheureusement, des phases d'essais et de validation de ces molécules sont encore nécessaires pour des utilisations autres que pour les trottoirs de certaines villes canadiennes, notamment au Manitoba, pour étoffer l'information encore trop peu disponible à leur sujet [30, 31]. Des essais supplémentaires sont nécessaires pour déterminer s'ils pourraient être utilisés sur des pistes.

Outre les progrès réalisés dans les méthodologies d'essai, l'accent est de plus en plus mis sur le développement de formulations de RDP plus respectueuses de l'environnement, qui conservent leur efficacité tout en réduisant les risques écologiques [32]. Des recherches récentes ont exploré des matériaux alternatifs tels que les dégivreurs à base biologique et les composés chimiques moins corrosifs qui peuvent faire fondre efficacement la glace sans causer de dommages significatifs aux écosystèmes ou aux infrastructures environnantes [32]. La transition vers ces options durables répond non seulement aux préoccupations environnementales, mais s'aligne également sur les pressions réglementaires visant à minimiser les écoulements nocifs provenant des opérations aéroportuaires [32].

2.3 Outils d'évaluation de performance des produits dégivrants

Comme expliqué dans le paragraphe 2.2.1 et la Figure 2-3, des engins d'épandage sont déployés après le passage des déneigeuses. Ceci réduit notamment la quantité de neige ou de glace présente sur la surface de la piste avant l'application des produits dégivrants ou antigivre [3], la neige et la glace résiduelle étant autant de sources de dilution et par conséquent de rapprochement de 0°C de la température de congélation du contaminant présent sur la piste. Néanmoins il n'existe aucune norme régissant la quantité de produit ou même quel type de produit à utiliser suivant les conditions et le type de contaminant. En effet, les acteurs sur le terrain sont obligés de travailler suivant leur instinct et leur expérience pour déterminer quel produit épandre et en quel volume ou dosage. Notre partenaire sur le terrain a cependant mis en évidence que la contamination de la piste par la neige n'est traitée que par des outils mécaniques. Il est à noter que cette information ne concerne que l'Aérocité de Mirabel.

Il paraît donc primordial de répondre à cette problématique de rétablissement d'adhérence de manière optimale tout en respectant le plus l'environnement et demeurer économiquement viable. Pour ce faire, il est tout d'abord inévitable d'évaluer la performance des différents produits proposés sur le marché. Néanmoins, aucune définition précise de performance n'a été publiée. Ainsi, les industriels basent l'efficacité de leurs produits selon leurs propres critères.

Les prochaines sections présenteront donc les principaux essais proposés dans la littérature à l'état actuel pour déterminer la performance des produits d'exploitation hivernale aéroportuaire. Une revue critique de chacune de ces méthodes en fonction des observations faites sur le terrain est aussi présentée.

2.3.1 *Capacité de fonte de glace*

La méthode d'évaluation de la capacité de fonte de glace permet de calculer la masse de glace qu'une masse donnée de produit va faire fondre par minute dans des conditions données. Plus la masse de glace fondue sera élevée, plus le produit sera considéré comme efficace. Ce procédé est réalisé selon la norme AS6170 [33]. Le résultat représente la vitesse à laquelle un produit se fondrait de la glace. Ainsi, plus la masse obtenue de produit dilué dans l'eau issu de la fusion de la glace, à savoir la saumure, est élevée, plus le RDP est performant. La procédure générale de test est présentée sur la Figure 2-5 [34]. Il est à noter qu'aucune valeur d'échec n'est présente dans cette méthode, ce qui contredit la notion de performance.

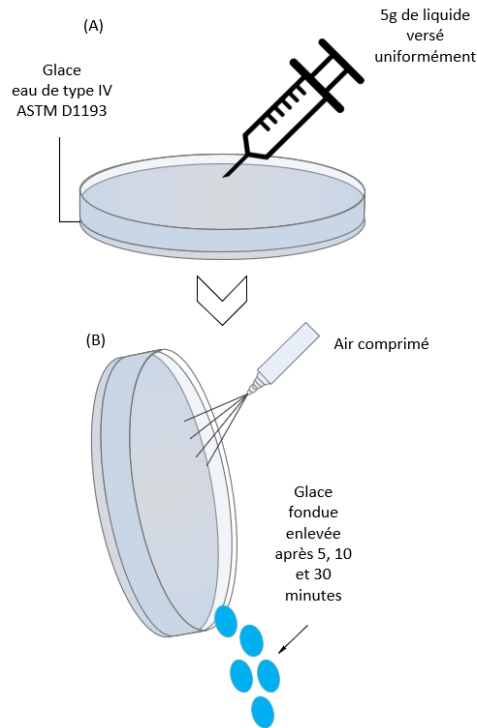


Figure 2-5 : Méthodologie de fonte des glaces telle que présentée dans AS6170. (A) Échantillon de glace où 5 g de RDP en solution sont versés. (B) Élimination de la glace fondue avec de l'air comprimé modifiée à partir de [34]

La littérature actuelle sur le sujet n'est pas très développée. Cela reste tout de même le sujet le plus exploité par les chercheurs. En effet, la capacité de fonte de la glace est également évaluée dans de nombreuses méthodes avec des glaçons [35] et des bouteilles thermos [7]. Il a été observé, dans ces articles, un fort abaissement de la température au contact du fluide avec la surface de la glace qui permettrait la fonte de celle-ci.

Par ailleurs, une autre méthode développée proposait de former la glace par couches très fines (0.5mm) pour atteindre une épaisseur finale de 25mm afin de limiter la formation de bulles [36] [37] mais aussi pour obtenir une surface de contact constante entre le RDP et la glace.

Néanmoins, la méthode présentée ici (Figure 2-4) est plus proche de la réalité des opérations hivernales au Canada. Le principal avantage de cette méthode est la connaissance

apportée et la facilité à la pratiquer mais surtout que tous les paramètres qui la composent sont connus. En termes opérationnels, la capacité de fonte de la glace est la caractéristique principale que les responsables d'entretien regardent pour un produit. Bien que la norme spécifie une quantité fixe de 5g de déverglaçant pour une surface de 177 cm² de glace, la quantité appliquée en exploitation est bien moindre en réalité, induisant une erreur/biais dans la mesure de performance. Dans l'état actuel, en utilisant la donnée obtenue comme valeur comparative, l'essai reste tout de même valide.

2.3.2 *Capacité de pénétration de la glace*

La méthode de test de pénétration de glace est réalisée selon la norme AS6211 [38] de la SAE. Il donne la profondeur de glace, en mm, qu'un RDP pénètre par minute. Le résultat montre comment un produit, dans des conditions idéales et contrôlées, rentrerait dans la glace en la faisant fondre. La méthode est présentée à la Figure 2-6. Il est à noter qu'aucune valeur d'échec n'est présente dans cette méthode non plus et que les résultats ne sont qu'à valeur de comparaison entre les produits.

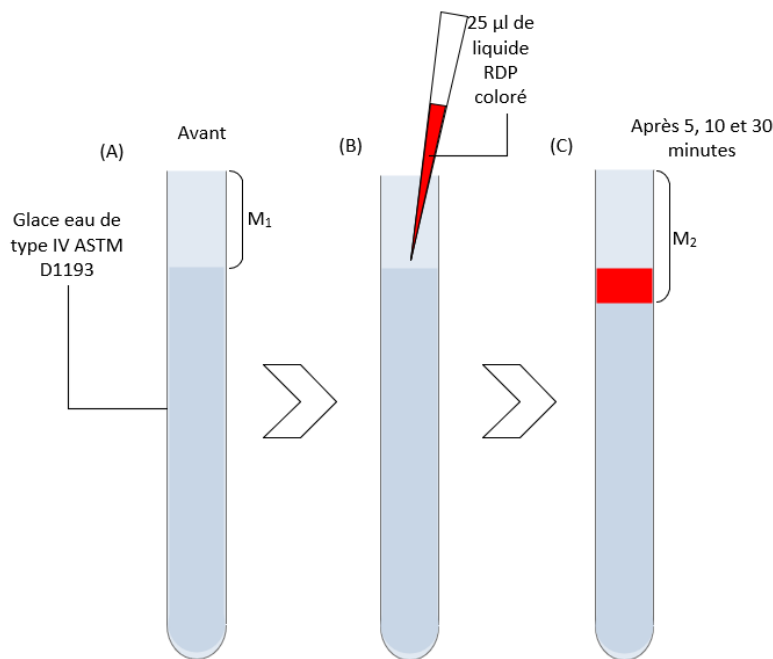


Figure 2-6 : Méthodologie de pénétration de la glace. (A) Échantillons de glace initiaux dans les tubes de micro-centrifugeuse, (B) Dépôt de RDP teint sur l'échantillon de glace et (C) Pénétration de la glace par le RDP selon AS6211 modifiée à partir de [34]

La pénétration de la glace est un procédé qui donne l'effet de performance curatif du RDP. Plus la profondeur de la pénétration du RDP dans la glace est grande, plus le RDP est performant.

Dans la littérature actuelle, ici encore, peu de chercheurs ont exploité ce phénomène. Trzaskos et al. [24] ont évalué la pénétration de la glace dans des conditions de pré-mouillage sans suivre le protocole AS6211. Ils ont utilisé un substrat de glace transparent et ont ensuite modélisé la pénétration de la glace par du RDP. Ils ont observé une vitesse de fonte de la glace relativement lente, facilement observable par analyse photographique. Cependant, Trzaskos et al. [24] ont utilisé du NaCl solide et du $MgCl_2$ en solution en mode pré-mouillé, deux produits interdits sur les pistes. Les résultats obtenus ont mis en évidence que la pénétration se fait sous forme de pointe et non de manière linéaire comme idéalement illustré

sur la Figure 2-6.

D'autre part, la modélisation et l'intelligence artificielle ont été utilisées pour obtenir des RDP plus efficaces [39]. Cette recherche vise à relever les défis environnementaux associés aux agents de déglacage en tirant parti de l'apprentissage automatique pour améliorer leur efficacité. L'étude explore les mécanismes de fonte de la glace de divers sels et produits organiques, avec un accent particulier sur la compréhension de la capacité de pénétration de la glace (ice penetration capacity (IPC)) en tant que facteur critique pour le développement de dégivrants respectueux de l'environnement. À l'aide d'outils analytiques avancés tels que l'extreme gradient boosting (XGBoost) et l'information additive de Shapley (SHAP), la recherche identifie les principaux mécanismes de fonte de la glace. Elle met en évidence les avantages synergiques de la combinaison de produits organiques et de sels dans les formulations des dégivrants. Les résultats proposent une solution prometteuse : un mélange de propylène glycol (PG) et de formiate de sodium, qui offre un IPC supérieur et un impact environnemental nettement plus faible que les dégivreurs commerciaux conventionnels. Ces travaux mettent en évidence une voie claire vers des pratiques de déglacage plus durables et plus efficaces.

Du point de vue opérationnel, l'essai de pénétration de la glace tel que défini dans l'actuelle norme montre un phénomène très spécifique dans des conditions limites précises reproduisant le passage dans une cavité. Le phénomène se produit lorsqu'un grain solide pénètre et traverse une couche de glace. Dans le cas d'un RDP en solution ce dernier n'est pas autant localisé que dans l'essai, perdant ainsi tout le pouvoir localisé du produit. Encore une fois, même si la situation présentée est loin de ce que l'on retrouve en réalité, en

considérant que l'essai a une vocation comparative des produits entre eux, ce dernier reste valide.

2.3.3 Capacité de sous-cavage de la glace

Pour cette méthode, il est à préciser que les produits solides sont nécessairement dilués, et non utilisés tels que reçus. La méthode *undercutting*, ou de sous-cavage de la glace, ou test de dégivrage de la glace, est réalisée selon AS6172 [40]. Il donne la zone, en mm², d'un substrat par minute que le RDP peut dégager. Plus l'aire mesurée sous la glace est grande, plus le produit est considéré comme performant. Cette méthode n'utilise pas de bloc de béton bitumineux, et convient alors à tout type d'étude. Le résultat obtenu représente comment un produit, lorsqu'il atteint le dessous de la glace, en favorise le décollement. La méthode est présentée à la Figure 2-7. Il est à noter qu'aucune valeur d'échec n'est présente dans cette méthode et que les résultats ne sont qu'à valeur de comparaison entre les produits.

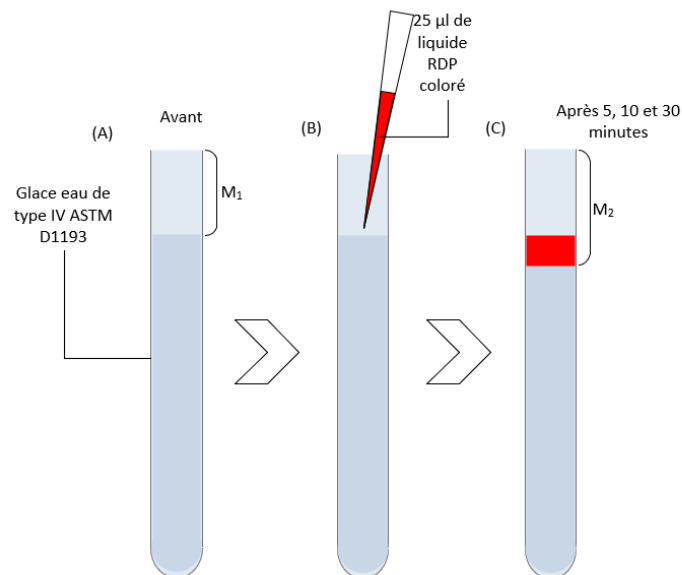


Figure 2-7 : Méthodologie de sous-cavage de la glace. (A) échantillon de glace initial dans la boîte de Pétri, (B) formation de cavités et (C) dépôt de RDP teint sur échantillon de glace avec mesure de sous-coupe modifiée à partir de [34]

Dans ce cas-ci également, très peu d'études ont été menées sur cette méthode. Cependant, un article a traité de sa répétabilité [34].

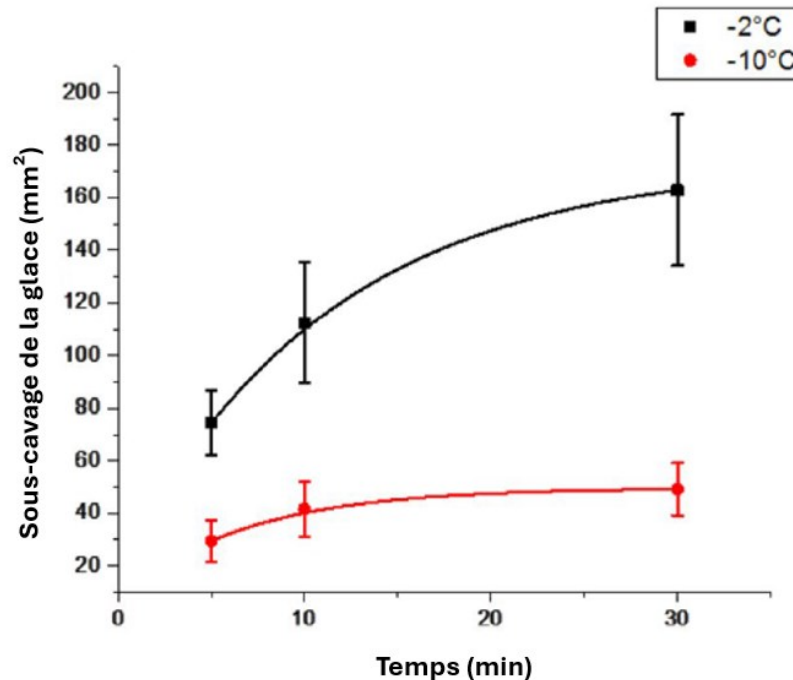


Figure 2-8 : Sous-cavage du KAC en fonction du temps à -2°C et -10°C modifiée à partir de [34]

La Figure 2-8 présente que le KAC est plus efficace à -2°C qu'à -10°C. L'essai présente également une bonne répétabilité car pour une répétition de 50 tests, l'écart-type est inférieur ou égal à 20%. D'un point de vue opérationnel, le sous-cavage est observé dans quelques situations. D'une part lorsqu'un solide est utilisé sur un film de glace. Ce dernier, sous forme granulaire, perce la glace puis, la saumure formée, lorsqu'en contact avec la surface de béton, passe sous la glace et en assure la fusion et décolle la glace de sa surface support. Cela facilite le raclage de la glace lorsqu'un outil mécanique est utilisé. Dans le cadre de l'essai, comme le trou est déjà formé, l'utilisation d'une solution concentrée à 50% w/w augmente l'efficacité du produit alors que ce dernier, durant l'opération devrait être déjà dilué et donc de moindre efficacité. Néanmoins, comme le résultat a une vocation comparative des produits entre eux, le résultat reste valide.

2.3.4 Temps de protection contre le givrage

L'évaluation du temps de protection contre le givrage est l'une des méthodes ayant été développées par le *Runway Deicing Product Performance Working Group* (RDP₂ WG) [41] pour justement déterminer un niveau de performance des produits. Laforde et al. [42] ont déterminé, en prenant des images thermiques par caméra infrarouge aux 30 secondes qu'un phénomène de dilution, causant une réaction endothermique puis une autre exothermique causée par la formation de la glace, était observable. Des études plus approfondies ont permis de déterminer que le processus de dilution puis de formation de la glace était clairement perceptible par analyse de vidéo thermique [43]. Cet essai est en cours de développement et des essais supplémentaires sont nécessaires. Une norme aérospatiale est en cours de rédaction par le groupe de travail.

2.4 Caractérisation des produits par spectroscopie Raman

De plus en plus, le développement de capteurs s'appuie sur des méthodes sans contact pour déterminer la nature et la concentration du contaminant sur une surface donnée. Parmi les méthodes les plus intéressantes, on retrouve la spectroscopie Raman. C'est une technique d'analyse bien identifiée de caractérisation des matériaux en général [44]. Dans le cas particulier des produits utilisés en exploitation hivernale des infrastructures de transport, la caractérisation porte sur trois aspects au moins : l'identification du ou des composés chimiques constitutifs du produit, et notamment son principe actif qui confèrera à la solution aqueuse qui le contiendra le point de congélation le plus bas possible ; la concentration de cette solution en ce principe actif, et par voie de conséquence la température de congélation associée ; la capacité de ce produit à être biodégradable. D'après les principes généraux de la

spectroscopie Raman et d'un signal Raman, tout prédispose cette spectroscopie à être appliquée à la caractérisation des produits utilisés en exploitation hivernale des infrastructures de transport en général, et plus spécifiquement aux produits aéroportuaires. Cette approche spectroscopique dans le cadre de la viabilité hivernale a d'abord été développée en France [45-48]. Cette approche est cependant restée attachée à des dispositifs de laboratoire ou portatifs, et des développements sont encore nécessaires afin d'aboutir à un déploiement sur le terrain.

2.4.1 *Identification de la composition chimique*

Identifier la composition chimique des produits utilisés en exploitation hivernale des aéroports et des avions revient à l'identification des liaisons chimiques et des groupements chimiques fonctionnels qui les constituent. Si on fait abstraction des sels chlorés, prohibés sur plateforme aéroportuaires en raison de la corrosion que les ions chlorures génèrent sur les alliages d'aluminium dont sont constitués nombre de pièces structurelles des avions, les produits à caractériser sont des sels organiques (formiate, acétate), ou des glycols. La détection porte alors sur des liaisons covalentes C-H, C-C, C-O, C=O, O-H, et d'autres dont Socrates dresse une liste exhaustive [49]. La détection et l'identification des formiates, acétates et glycols, ainsi que celle des produits hors normes, sont ainsi tout à fait accessibles par spectroscopie Raman.

2.4.2 *Identification de la transition de phase solide-liquide*

Si l'identification des produits repose sur celle de ses liaisons chimiques constitutives, l'identification de la transition de phase nécessite d'accéder au niveau d'ordre structurel des molécules constitutives du matériau étudié et aux modes de vibration des liaisons chimiques.

Comme dans le cas de l'identification des liaisons chimiques, la spectroscopie vibrationnelle et celle Raman en particulier communique des informations sur l'ordre ou le désordre structural d'un matériau. Ainsi, une phase liquide, synonyme d'une structure amorphe se différenciera d'une structure solide, soit en raison d'un ordre structurel liée à une organisation cristalline, soit en raison de fréquence de vibration distinctes en raison de différents atomes présents dans le matériau, soit les deux. La spectroscopie Raman est ainsi adaptée à l'identification de la transition de phase liquide-solide, et a fait l'objet de quelques communications scientifiques [47, 50, 51]. Cette différenciation des phases s'appuie sur l'analyses des spectres Raman, soit directement (rapport d'intensités, rapport d'aires, avec toute la subjectivité associée au choix des pics ou des aires), soit moins directement et avec davantage d'objectivité en s'appuyant sur des méthodologies d'analyse de données (analyse en composantes principales par exemple).

2.4.3 *Détermination de la concentration*

En spectroscopie vibrationnelle [44], d'après la loi de Lambert-Beer, l'intensité du signal à une fréquence donnée est proportionnelle à la concentration en l'espèce chimique dont le signal apparaît à cette fréquence donnée. Ainsi, comme l'ont montré certaines publications scientifiques dédiées à l'exploitation hivernale ou à des solutions salines [47, 50, 52, 53], remonter à la concentration d'une solution saline en fonction de sa signature spectrale est effectivement possible. Comme dans le cas de la transition de phase, cette détermination s'appuie aussi bien sur des rapports d'intensités ou d'aires, avec les mêmes limites et avantages cités dans le cas de la transition de phase, ou sur de l'analyse de données, et notamment la Partial Least-Square Regression (PLS-R).

La détermination de la concentration soulève bien évidemment et également la

question de la limite de détection, ou du seuil de détection, mais également de l'incertitude associée à cette détermination de la concentration. Le seuil de détection dépend de la sensibilité du dispositif de mesure, et l'incertitude de la qualité du signal mesurée, et notamment du rapport signal sur bruit. Disposer du seuil le plus faible est scientifiquement intéressant d'un point de vue métrologique. Néanmoins, une solution aqueuse contenant un produit d'exploitation hivernale dilué verra sa température de congélation s'approcher de 0°C. Cette situation et cette information sont à rapprocher des conditions météorologiques en cours et à venir afin d'identifier dans quelle proportion elles créent une situation de danger. Le spectromètre utilisé dans l'étude fonctionne avec un laser de 785 nm à une puissance de sortie de 340 mW. Le signal Raman a été recueilli à l'aide d'une sonde Raman à lentille confocale, permettant une mesure sans contact à une distance d'environ 5 mm. L'instrument fournit des spectres Raman dans la gamme 300-3400 cm^{-1} avec une résolution de 4 cm^{-1} .

Dans l'ensemble des situations décrites précédemment, l'implication de la spectroscopie Raman a été effectuée dans des conditions qu'il est possible de considérer comme idéales. Les mesures sont réalisées en laboratoire en conditions climatiques maîtrisées, mais pas forcément représentatives de conditions hivernales réelles (vitesse de refroidissement, présence de précipitations hivernales, et surtout pollution lumineuse ...). Les produits testés sont soit des produits chimiques de pureté et de composition connues, sans la présence de tout autre produit contribuant à la contamination d'une piste aéroportuaire (gomme de pneumatique, résidus solides minéraux, ...), et susceptible d'affecter la signature spectrale des produits dédiés et utilisés en exploitation hivernale des aéroports. D'autre part, l'utilisation de cette spectroscopie suppose la présence d'eau (solide ou liquide, avec ou sans produit déverglaçant ou dégivrant), puisque ce sont ces situations qui présentent un risque

d'exploitation. En revanche, pour des surfaces traitées et sèches, la recherche est encore à conduire.

Néanmoins, il est à préciser pourquoi la méthodologie Raman a été sélectionnée parmi toutes les méthodes de caractérisation actuelles. En effet les méthodes de la calorimétrie ou encore infrarouge auraient pu être utilisées. Néanmoins, la principale préoccupation dans le choix de la méthode était que celle-ci soit non destructive pour une meilleure représentativité des résultats obtenus. Ainsi, le choix s'est tourné sur la méthode Raman (Tableau 2-4). La rapidité a été également un choix primordial puisque le produit analysé a une vitesse de réaction au contact de la glace très rapide. Ainsi, il était nécessaire d'avoir une méthodologie qui permette d'observer le phénomène tôt dans l'expérimentation et avoir des valeurs à partir de 0,1 seconde minimum, ce qui n'est pas envisageable avec d'autres méthodes.

Tableau 2-4: Avantages de la méthode de la spectroscopie Raman par rapports à d'autres méthodes de caractérisation

	Informations microstructurales		Exigences associées au dispositif de mesure			
	taux de cristallinité	orientation moléculaire	non destructivité	rapidité	commodité miniaturisation	coût
Diffraction des rayons X	✓	✓	×	×	×	×
Calorimétrie / Dilatométrie	✓	×	×	×	≈	✓
Microscopie optique	≈	≈	×	≈	≈	✓
Microscopies électroniques	≈	≈	×	×	×	×
Microscopie champ proche	×	≈	×	×	×	×
Mesures de biréfringence	×	✓	≈	≈	≈	✓
Spectroscopie Infra Rouge	≈	≈	≈	✓	≈	✓
Spectroscopie Raman	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Aussi, la spectroscopie Raman présente un caractère très prometteur pour apporter des réponses en tant qu'outil de détermination des critères de performance des produits antigivre et dégivrants pour piste d'aéroport et ainsi atteindre des taux d'épandage optimaux.

Néanmoins, les défis de l'approche spectroscopique sont encore nombreux à relever pour que cet outil s'inscrive de manière incontournable comme outil. Parmi ces défis, on peut citer les situation suivantes (liste non exhaustive) : les résidus secs des traitements antérieurs à une situation donnée, les traitements en prémouillé, les mélanges de produits différents chimiquement, la réalisation de mesures spectroscopiques sur pistes ou sur les avions, les mesures en embarqué pour accéder aux traitements résiduels et ainsi optimiser les futures quantités à épandre.

Au terme de cette revue, il apparait que bien que les opérations chimiques de déneigement soient courantes dans les aéroports nordiques, les normes et la littérature permettent de mettre en évidence des lacunes sur les connaissances requises quant aux interactions entre les produits et le contaminant et au taux d'épandage, ne répondant pas à cette problématique importante que rencontrent les aéroports. Ainsi, le travail qui suit s'intéresse à ces deux aspects afin de soutenir les équipes sur le terrain en leur proposant un approfondissement de ces notions.

2.5 Conclusion

La conclusion de cette revue de littérature se porte sur les lacunes et les manques d'information relevés afin de mettre en évidence les points à soulever dans cette recherche. La Figure 2-9 illustre ce propos.



Figure 2-9: Lacunes et manques d'information

Le seul critère de performance évoqué dans la littérature est le point de fusion de -14°C lorsque le produit est dilué à 50%. Cette donnée reste insuffisante car elle ne permet pas de déterminer en combien de temps un RDP fait fondre un contaminant. De plus, il n'existe aucun seuil dans les normes présentées puisque les trois essais normés en dégivrage présentés n'ont de valeur que de comparaison entre les produits. De plus, pour deux de ces trois essais, les produits solides sont obligatoirement dilués à 50% ce qui nuit à la comparaison possible avec les produits liquides. De même, aucun essai normé n'existe en antigivrage et aucun moyen de détection des contaminants n'est présent pour aider aux opérations. Ainsi, cette thèse va permettre de répondre partiellement à ces lacunes afin de développer les connaissances et informations sur les produits dégivrants et antigivre pour piste d'aéroport.

2.6 Références

- [1] A. Klein-Paste et R. Dalen, "The fundamentals of plowing, anti-icing, de-icing and sanding," *Sustainable winter road operations*, pp. 82-100, 2018.
- [2] C. V. Suciú et H. Goto, "Interconnection between the contact angle (adhesion) hysteresis, slippage on a nanorough solid wall and phononic friction," *Tribology international*, vol. 43, no. 5-6, pp. 1091-1098, 2010.
- [3] A. d. Paris, "Plan d'action en saison hivernale," 2021.
- [4] A. Hurtado Mayen, L. I. Farfán Cabrera, N. F. Garza Montes-de-Oca, E. A. Gallardo Hernández, et M. Moreno Ríos, "Sand as a friction coefficient improver on asphalt ice layers," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2022.

- [5] M. Akin, L. Fay, et X. Shi, "Friction and Snow–Pavement Bond after Salting and Plowing Permeable Friction Surfaces," *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 11, pp. 794-805, 2020.
- [6] J. S. F. Johan Wåhlin, Kaj Thomsen, Alex Klein-Paste, "Thermodynamics of deicing chemicals," 2017.
- [7] A. Klein-Paste et J. Potapova, "Thermal aspects of melting ice with deicer chemicals," *Transportation Research Record*, vol. 2440, no. 1, pp. 69-75, 2014.
- [8] N. SCHWEIGERT et S. POISSONNIER, "Caractérisation des produits de déverglaçage," 2016.
- [9] K. Nilssen, A. Klein-Paste, et J. Wåhlin, "The Effect of Additives on the Low Temperature Ice-Melting Capacity of NaCl," 2018.
- [10] Å. Melinder, "Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids Doctoral Thesis By," 2007.
- [11] C. Cireau. "Les différents produits de déglçage des pistes d'aéroports et leurs impacts". <https://www.infrastructures.com/0713/cireau2.htm>
- [12] S. Aerospace, "Collection of Runway Deicer Types used on Airports ", 2010.
- [13] S. International, "AMS 1431," 2018.
- [14] S. International, "AMS 1435," 2018.
- [15] C. STRAZIELLE, "Méthodes de caractérisation par la détermination des masses moléculaires," *Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation*, vol. 1, no. P595, pp. P595. 1-P595. 21, 1984.
- [16] J. C. Kotz, P. M. Treichel Jr, et P. M. Treichel, *Chimie des solutions: De Boeck Supérieur*, 2006.
- [17] M. MARCHETTI, S. POISSONNIER, et B. MARS, "Functional properties of runway deicers," 2011.
- [18] A. Klein-Paste et J. Wåhlin, "Wet pavement anti-icing — A physical mechanism," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 96, pp. 1-7, 2013/12/01/ 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.09.002>.
- [19] V. P. Danilova, E. A. Frolova, et D. F. Kondakova, "Phase Equilibria in the Sodium-Acetate–Sodium-Formate–Water System at Temperatures of from 0 to –22°C and the Anti-icing Properties of Compositions Based on These Salts," 2017.
- [20] J. Aguirre-Puente, R. Posado, M. Ramos, et P. Sanz, "Contribution à l'étude du changement de phase de solutions aqueuses," Dans *Proceedings of the fifth Canadian Permafrost Conference*, 1990, vol. 54, pp. 61-68.
- [21] J.-P. GERVAIS et D. MAHEUX, "L'INFLUENCE DE LA SALINITE DE LA GLACE SUR LE TEMPS DE FONTE," MINISTÈRE DES TRANSPORTS, 1981.
- [22] C. Charpentier, J.-D. Brassard, G. Momen, et J. Perron, "Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization," *Cold Regions Science and Technology*, p. 103932, 2023.
- [23] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M. Marchetti, et G. Momen, "Airport Traffic Simulator to Enhance the Application of Runway De-icing Product," présenté à IWAIS, Narvik, Norway, 2024.
- [24] M. P. Trzaskos et A. Klein-Paste, "Effect of Temperature and Prewetting for Ice Penetration with Sodium Formate," *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 6, pp. 140-150, 2020. doi: 10.1177/0361198120917974.
- [25] A. Muthumani, L. Fay, X. Shi, et C. Little, "Enhancing Deicer Performance," *Roads & Bridges, September*, vol. 6, 2017.
- [26] M. Marchetti, J.-D. Brassard, C. Charpentier, et G. Momen, "Ice penetration test: Raman spectroscopy insight and benefits," présenté à IWAIS, Narvik, Norway, 2024.
- [27] M. P. Trzaskos et A. Klein-Paste, "Effect of Temperature and Prewetting for Ice Penetration with Sodium Formate," 2020.

- [28] S. Xu, Z. Zhou, L. Feng, N. Cui, et N. Xie, "Durability of Pavement Materials with Exposure to Various Anti-Icing Strategies," *Processes*, vol. 9, no. 2, p. 291, 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/2/291>
- [29] T. Abbas, D. N. Lavadiya, et R. Kiran, "Exploring the Use of Polyols, Corn, and Beet Juice for Decreasing the Freezing Point of Brine Solution for Deicing of Pavements," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 5765, 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/5765>
- [30] R. z. 8, "Déglacer les routes avec du jus de betterave," 2020. [En ligne]. Disponible: <https://ici.radio-canada.ca/ohdio/premiere/emissions/region-zero-8/segments/entrevue/156353/deglacage-routes-jus-betterave-sel-sable>
- [31] Radio-Canada, "Le jus de betterave : une solution aux rues glissantes de La Broquerie," 2017. [En ligne]. Disponible: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1011798/jus-betterave-la-broquerie-neige>
- [32] P. Friedman et X. Shi, "Assessing the impact of pavement de-icing products on aircraft and airfield infrastructure," *Journal of Airport Management*, vol. 3, no. 3, pp. 223-237, 2009.
- [33] *AS6170 Ice Melting Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [34] J.-D. Brassard, C. Laforte, M. M. Tremblay, et C. Volat, "Runway Deicing Product Anti/Deicing Performance Assessment: Review and Future Directions," 2019.
- [35] H. U. Sajid, D. L. Naik, et R. Kiran, "Improving the ice-melting capacity of traditional deicers," *Construction and Building Materials*, vol. 271, p. 121527, 2021.
- [36] J. Wåhlin et A. Klein-Paste, "The effect of mass diffusion on the rate of chemical ice melting using aqueous solutions," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 139, pp. 11-21, 2017. doi: 10.1016/j.coldregions.2017.04.001.
- [37] J. Wåhlin et A. Klein-Paste, "Ice Melting Rates at − 5° C, − 10° C, and − 15° C Using Chloride Solutions: a Physical Explanation," 2018.
- [38] *AS6211 Ice Penetration Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [39] K. Ito, A. Fukatsu, K. Okada, et M. Takahashi, "Machine learning-assisted chemical design of highly efficient deicers," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 12453, 2024.
- [40] *AS6172 Ice Undercutting Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [41] S. G12 et J.-D. Brassard, "Runway Deicing Product Performance Working Group."
- [42] C. Laforte et M. M. Tremblay, "Comparative evaluation of the anti-icing protection time of runway deicers using infrared thermography," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 138, pp. 57-62, 6// 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.03.003>.
- [43] J.-D. Brassard, C. Laforte, M. M. Tremblay, et C. Volat, "Runway Deicing Product Anti/Deicing Performance Assessment: Review and Future Directions," 2019. doi: 10.4271/2019-01-1974.
- [44] G. Simon, "Spectroscopies vibrationnelles," Editions des archives contemporaines, 2020.
- [45] I. Durickovic, "Etude par spectroscopie Raman de la salinité résiduelle issue de l'épandage de fondants routiers sur une chaussée," *Metz: Université Paul Verlaine*, 2008.
- [46] R. Claverie, M. D. Fontana, I. Đuričković, P. Bourson, M. Marchetti, et J.-M. Chassot, "Optical sensor for characterizing the phase transition in salted solutions," *Sensors*, vol. 10, no. 4, pp. 3815-3823, 2010.
- [47] I. Đuričković, M. Marchetti, R. Claverie, P. Bourson, J.-M. Chassot, et M. D. Fontana, "Experimental study of NaCl aqueous solutions by Raman spectroscopy: Towards a new optical sensor," *Applied spectroscopy*, vol. 64, no. 8, pp. 853-857, 2010.
- [48] I. Đuričković, R. Claverie, P. Bourson, M. Marchetti, J. M. Chassot, et M. D. Fontana, "Water-ice phase transition probed by Raman spectroscopy," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 42, no. 6, pp. 1408-1412, 2011.

- [49] G. Socrates, *Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts*: John Wiley & Sons, 2004.
- [50] M. Marchetti, P. Bourson, M. D. Fontana, C. Jobard, B. Saintot, et G. Casteran, "Spectroscopic and chemiometrics supported studies on discrimination, phase transition and concentration identifications of 1,2-propylene glycol solutions, and of a mixture of potassium acetate with 1,3-propanediol solutions as anti-icing fluids," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 142, pp. 34-41, 2017/10/01/ 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.07.009>.
- [51] M. Marchetti, M. Fois, L. Ibos, J. Dumoulin, P. Bourson, et J.-M. Piau, "Comparative study in the identification of liquid to solid transition phase with DSC, Raman spectra analysis and chemiometrics methods applied to phase change materials used for icing-delay in civil engineering infrastructures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 49-61, 2018.
- [52] K. Nilssen, A. Klein-Paste, J. Wählin, et M. A. Delapaz, "Use of calorimetry to measure ice-melting capacity," *Transportation research record*, vol. 2613, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [53] M. Marchetti *et al.*, "Chemometrics-assisted monitoring in raman spectroscopy for the biodegradation process of an aqueous polyfluoroalkyl ether from a fire-fighting foam in an environmental matrix," *Environments*, vol. 7, no. 1, p. 4, 2020.

CHAPITRE 3

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DYNAMIQUE DE PÉNÉTRATION DE LA GLACE POUR LES PRODUITS DÉGIVRANTS DES PISTES GRÂCE A UNE CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES

Avant-propos

État de l'acceptation : Publié.

Journal : Cold Regions Science and Technology

Lien d'accès :

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X23001623?casa_token=KWR3sxx6QVhAAAAA:hex7a8EQYmR_wEs-wH3zV3wrJExNBdvhW_vRNqEUL2DlnbaI4ZNIlgA9Rx1zHaD2OQYQ7ni8Qg
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103932>

Référence : Charpentier, C., et al. (2023). "Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization." Cold Regions Science and Technology: 103932.

Titre en français : Développement d'un modèle dynamique de pénétration de la glace pour les produits dégivrants des pistes grâce à une caractérisation expérimentale des performances

3.1 Résumé

En hiver, le concept de piste dégagée est crucial pour les aéroports afin de maintenir la sécurité des passagers et des employés. La recherche peut optimiser les taux d'application des produits de déverglaçage, réduisant ainsi les coûts et l'impact sur l'environnement. Actuellement, il existe trois normes aérospatiales pour évaluer les performances des produits de dégivrage des pistes. Ces essais comparatifs (fonte de la glace, sous-cavage de la glace et

pénétration de la glace) sont effectués conjointement de manière systématique et indiquent si un produit de dégivrage des pistes est efficace pour réduire activement la présence de glace. Nous présentons ici un modèle numérique pour la méthode de pénétration de la glace, pour un produit de déverglage fluide, dans le but d'approfondir les connaissances dans ce domaine. Nous appliquons une série d'essais en laboratoire pour mesurer la performance des produits de dégivrage des pistes et développons un nouveau modèle pour analyser le comportement de chaque produit. La principale observation est que le produit est plus efficace à 1 min et que l'efficacité diminue en suivant une courbe logarithmique inverse jusqu'à 30 min. Grâce à la modélisation, nous observons que le mode dominant de transfert de chaleur est la convection laminaire naturelle, et le modèle prédit une longueur de fusion uniforme pour l'ensemble de la section du tube. Ainsi, la modélisation simplifiée de la pénétration de la glace à l'aide de l'AS6211 peut prédire de manière acceptable le taux de pénétration de la glace en fonction du temps (mm/min), la modélisation étant confirmée par nos résultats expérimentaux. L'application future de notre modèle simplifié à d'autres méthodes d'essai de caractérisation des fluides de déverglage existants pourrait permettre d'identifier les effets des produits de déverglage des pistes solides dilués ou non dilués sur les taux de pénétration de la glace et, en fin de compte, sur les taux d'épandage.

Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization

Claire Charpentier ^a, Jean-Denis Brassard ^a, Gelareh Momen ^a, Jean Perron ^b

^a Anti-Icing Materials International Laboratory, Université du Québec à

Chicoutimi, Saguenay, Canada

^b Department of Applied Sciences, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada

Keywords: Airport; Runway de-icing product; Ice penetration; Thermodynamic model

3.2 Abstract

During winter, the clear runway concept is crucial to airports for maintaining passenger and employee safety. Research can optimize de-icing product application rates, thereby reducing costs and environmental impact. Currently, three aerospace standards exist for evaluating the performance of runway de-icing products. These comparative tests—ice melting, ice undercutting, and ice penetration tests—are carried out jointly in a systematic way and indicate whether a runway de-icing product is effective in actively reducing the presence of ice. Here we present a numerical model for the ice penetration method, for fluid runway de-icing product, with the goal of deepening the knowledge in this field. We apply a series of laboratory-based tests to measure the performance of runway de-icing products, and develop a new model to analyze the behavior of each product. The principal observation is that the product is more effective at 1 min and effectiveness decreases following an inverse logarithmic curve trend to 30 min. Through modeling, we observe that the dominant mode of heat transfer is natural

laminar convection, and the model predicts a uniform melt length for the entire tube section. Thus, simplified ice penetration modeling using AS6211 can acceptably predict the rate of ice penetration as a function of time (mm/min), with the modeling confirmed by our experimental results. The future application of our simplified model to other existing de-icing fluid characterization test methods could identify the effects of diluted or undiluted solid runway de-icing products on ice penetration rates and ultimately on spreading rates.

3.3 Nomenclature

A: interchange area

C: concentration

C_p: specific heat

CV1: control volume of ice

CV2: control volume of RDP (KAC)

CV3: control volume of brine

D: width

E_{cv}: energy of Control Volume

E_{in}: energy inside

E_{out}: energy outside

$\dot{E}$: variation of energy as a function of time

g: gravitational acceleration due to Earth

Gr: Grashoff number

h: heat coefficient

H_{sl}: latent heat of ice fusion

k : thermal conductivity
 L : length
 m_i : mass of pure RDP
 m_1 : mass of ice
 m_2 : mass of RDP 50 w/w (KAC)
 m_3 : mass of brine
 $\dot{m}$: mass flow
 Nu : Nusselt Number
 Pr : Prandtl number
 q : thermal flow
 Ra : Rayleigh number
 Ra_c : critical Rayleigh number
 RDP : runway de-icing product
 r_o : outside radius of tube
 r_i : inside radius of tube
 t : time
 T : temperature
 T_{di} : melting temperature of fluid
 T_{min} : minimal temperature
 T_1 : temperature of ice
 T_2 : temperature of RDP 50 w/w (KAC)
 T_3 : temperature of brine
 T_4 : temperature of sample tube
 T_0 : temperature of climatic chamber

$\dot{T}$: variation of temperature as a function of time

x_1 : depth of ice

x_2 : depth of RDP (KAC)

x_3 : depth of brine

$\dot{x}$: variation of the depth as a function of time

α : thermal diffusivity

β : thermal expansion

ΔE_{tot} : difference of total energy

ρ : density

ν : kinematic viscosity

3.4 Introduction

During airport winter maintenance operation in northern countries such as Canada and United States, thousands of kilograms of de-icing products, in both fluid and solid form, are applied to airport runways to make the winter contaminant more easily removed using mechanical tools and thus promote safe aircraft take-offs and landings. Most of these adverse conditions involve what is commonly known as atmospheric icing, which includes freezing rain, wet or dry snow, ice pellets, freezing drizzle precipitation, and frost, resulting from the deposition of water vapor directly into ice crystals [1]. These weather events can result in hazardous runway conditions that increase the risk to users [2] [3]. Although these winter conditions are recurrent and, in some cases, worsen from year to year, to date very little attention has been paid to evaluating the performance and determining the optimal amounts of de-icing and anti-icing products to apply to runways. Each product supplier specifies application rates and the duration of effectiveness on the basis of their own experiences and

knowledge.

Many aircraft accidents are attributable to poor runway conditions [4]. The presence of water, ice, or snow [3] on runways has been identified as a key factor leading to aircraft accidents between 2010 and 2019 [5]. Among them, on February 8, 2019, an aircraft ran off the runway at Saguenay–Bagotville (Québec) airport after landing [6]. A total of 42 passengers and 3 crew members were on board, but fortunately there were no injuries. Runway excursion is classified as one of the two most important risk areas in the aviation industry [7-9], and the risk of an icy runway in Canada is high [10, 11]. Most of these recorded accidents had significant property damage consequences [12]. Northern winter conditions favor a greater frequency of accidents and therefore impact negatively the airports [13].

To counter runway icing, airport operators apply significant quantities of de-icing products onto the runways. Most of the runway de-icing products (RDPs) contain potassium formate, potassium acetate, sodium acetate, sodium formate and sometimes also glycol that may have a negative effect on aquatic life surrounding the airports.

The *bare runway* is therefore applied by airports to increase passenger and employee safety ensuring runway practicable by making winter contaminants easier to remove. Work needs to be carried out to reduce costs and environmental impacts (ground and surface water contamination), by increasing knowledge regarding de-icing and anti-icing performance of RDPs as a means of optimizing operations [14]. Knowing product performance is essential for airports to select the appropriate amount of product in relation to the conditions experienced on the ground. Therefore, laboratory tests of such products are required under known and controlled conditions [15-17]. Currently, three aerospace standards are applied to evaluate the performance of an RDP [16, 18]; the tests, undertaken jointly and in a

systematic manner, are the ice melting, ice undercutting, and ice penetration tests.

The ice penetration test follows the AS6211 test method standard [16] and involves recording the vertical penetration depth of the product into the ice (mm/min). The test illustrates how a product, under ideal conditions, enters the ice by melting it down vertically. Trzaskos et al. [19] evaluated ice penetration under prewet conditions; however, they did not follow the AS6211 protocol. They used a clear ice substrate and then modeled the ice penetration of the RDP. A relatively slow ice penetration rate was easily observable by photo analysis. In this work [19] solid NaCl and liquid MgCl_2 in a prewet mode were used, two products which should be avoided for use on runways due to their corrosiveness on aircraft components.

The ice undercutting test is performed according to the AS6172 test method standard [17]. The test gives the area that the RDP can clear, hence a two-dimensional result (mm^2), under the ice cover, per minute. The test informs on how a product eases debonding when the RDP reaches the underside of the ice. The available literature discussing this topic is nonetheless inexistent, highlighting the need for research in this area. This test was not run in this study.

Finally, the ice melting test estimates the ice mass that an RDP will melt per minute. This test is described by the AS6170 test method standard [15]. A product that melts a greater amount of ice and a good ice penetration is deemed to be more effective. This test result is in three-dimensions (mass/volume per minute) and represents the speed at which a product melts ice. The ice melting capacity has also been evaluated using ice cubes [20] and insulated bottles [21] which are not included properly in the standard because of the variability of the parameters. In these tests, a marked lowering of the temperature occurs upon the fluid contacting the ice surface reflecting an endothermic reaction with a dilution of the brine.

Another method grows the ice by very thin layers—0.5 mm layers accumulated to a final thickness of 25 mm—to limit the formation of bubbles and obtain an equal contact surface between the RDP and the ice [22] [23]. The studies that applied this method observed that the diffusion flux, dimension of which is the amount of material per unit area per unit time, correlated well with the ice melting rate. Nevertheless, in this study we follow the AS6170 test method protocol [15] as it fits closer to the reality of winter operations in Canada. Moreover, this method is preferred as it is well known, easy to conduct, and, most importantly, all involved parameters of this test are known.

The main objective of this article is to present a numerical model of the ice penetration method using laboratory-based tests of RDP ice penetration and ice melt, to validate the model output. The model will serve to develop new methods of analysis of fluid RDP behavior on ice and improve our understanding of RDP–ice interactions.

3.5 Experimental protocols

We performed ice penetration and ice melting tests in a controlled laboratory setting. The third test related to RDP–ice interactions, ice undercutting, was not applied. All tests were run in a controlled climatic chamber at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and -10°C . We selected potassium acetate diluted by 50% in demineralized water, in fluid form, as the RDP for both tests.

3.5.1 *Ice penetration protocol*

We followed the AS6211 test method standard [16] for the ice penetration test (Figure 3-1). We carried out the test in a cold room of the International Laboratory of Anti-icing Materials (AMIL). This cold room (9.1 m high, 5.5 m long, and 3.5 m wide) provides a controlled air temperature between $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ at a precision of $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

We obtained ice by pouring 0.5 mL of ASTM D1193 type IV water into a Pyrex test tube. The fluid and the test tube holder were placed in the chamber at least eight hours before the test to ensure they attained the required test temperature. The 6 mm × 50 mm Pyrex test tubes were then placed on the holder for 15 min. Using a syringe, we added 0.45 ± 0.05 mL of demineralized water into each tube by pushing the needle into the bottom of the tube and raising it gradually to avoid air bubble formation. We left the water 2 h for it to freeze; we used a needle (having the same temperature as the chamber) to initiate ice formation by gently touching the water surface. After 30 min, the ice interface inside the glass tubes was flattened using an aluminum bar (3.75 mm diameter and preheated with hot water between 65 and 70 °C) to obtain a smooth ice surface without asperities. Finally, the support and the glass tubes were maintained at constant temperature in the cold room at -10 ± 0.5 °C for an additional 90 min before proceeding with the tests. The chamber temperature was either maintained at -10 °C or increased to -2 °C as per the AS6211 test method.

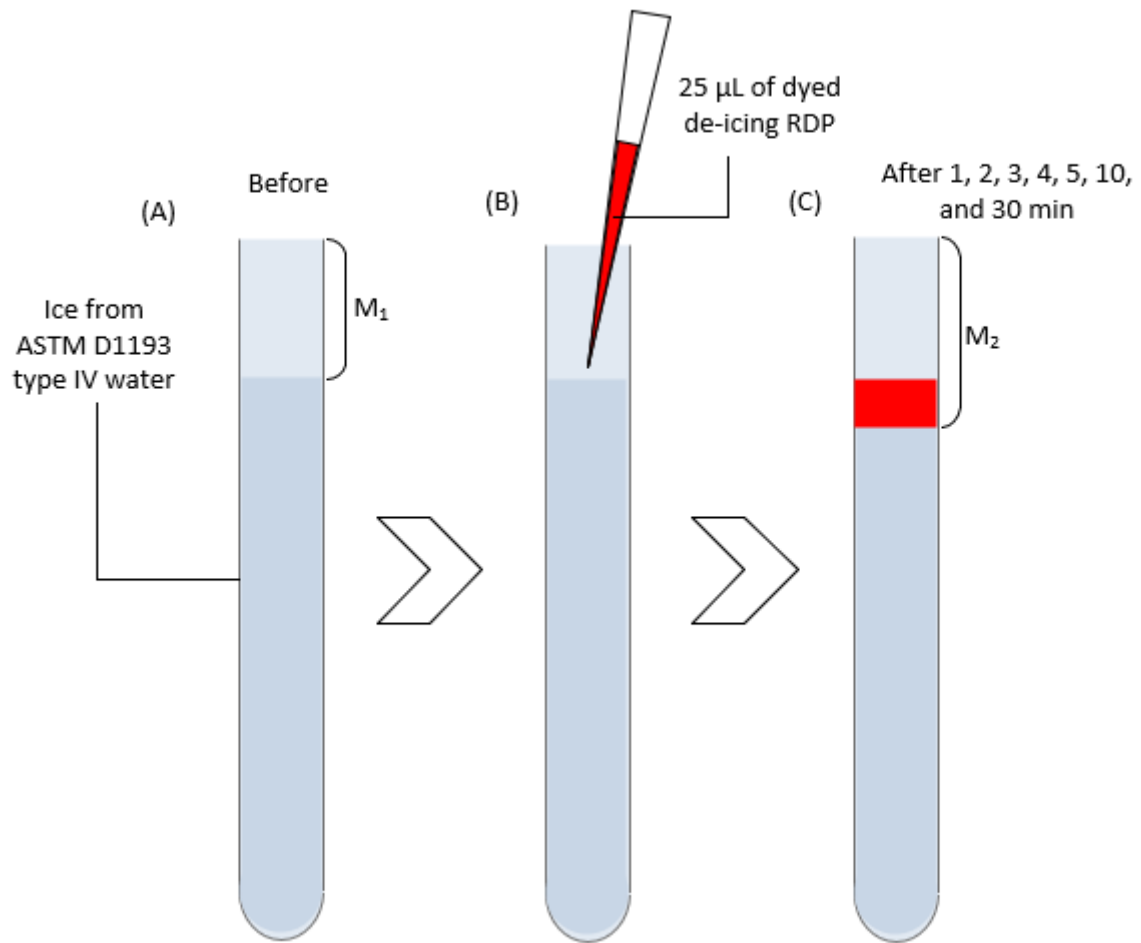


Figure 3-1: Ice penetration test of a runway de-icing product (RDP) according to the AS6211 standard. (A) Initial ice samples in microcentrifuge tubes; (B) deposition of the dyed RDP (potassium acetate) onto the ice sample; and (C) the RDP penetration of the ice [16]

The ice penetration test method was performed according to AS6211 standard [16]. Prior to adding the fluid, we measured the height from the top of the tube to the ice surface (measurement M_1). We then poured 25 μL of the dyed RDP into the tube. We used rhodamine B as a dye as it does not alter RDP performance [16] and helps to accurately determine RDP penetration. Measurements (M_2) were then taken after 1, 2, 3, 4, 5, 10, and 30 min, measuring from the top of the tube to the depth of fluid penetration. Ice penetration was calculated by subtracting M_1 from M_2 . We used a camera to increase the precision of the measured depths and processed the photos using ImageJ software, which measures to the

nearest of a pixel. The data was then converted into millimeters. We repeated the test four times [1]. There is no failure value or performance limit specified in this standard.

The ice melting test method was performed according to the AS6170 test method standard [15] (Figure 3-2). In a first step, we placed a Petri dish in a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ cold room and filled it with 60 mL of ASTM D1193 type IV water. After a minimum of 8 h, we weighed the Petri dish and the formed ice using a calibrated two-decimal scale. We then poured 5 g of RDP onto the ice sample. We used a thermal camera— (Optris Pi400) and the associated software (Optris PIX Connect)—to this procedure to improve data collection and to better understand product performance. The thermal camera recorded thermal imagery video to determine temperatures during ice melting.

3.6 Experimental Results

3.6.1 *Ice penetration test*

Photos captured during the ice penetration test highlight the general behavior of the product (Figure 3-2). We observed that fluid penetration into the ice was initially quite rapid (Figure 3-3). Ice penetration by the RDP was also greater in the $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ice than for ice at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

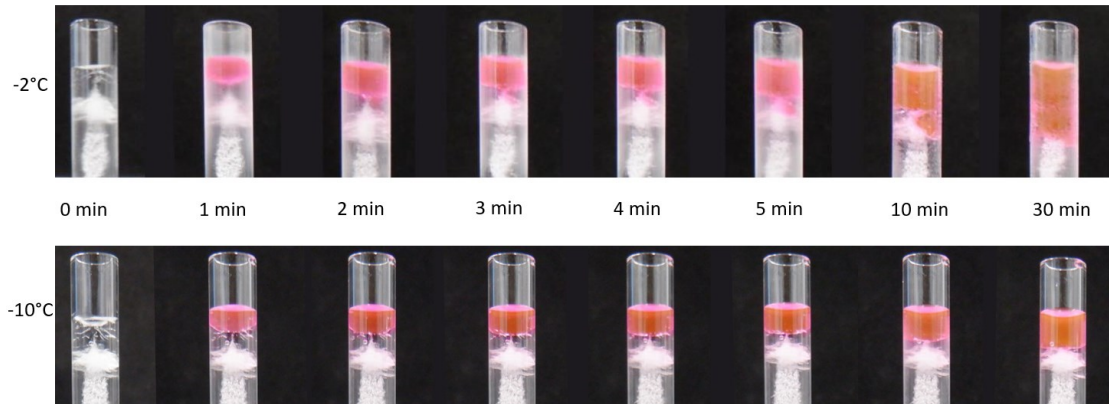


Figure 3-2: Evolution of fluid penetration into the ice during the ice penetration test for the RDP (potassium acetate) at -2°C (top) and -10°C (bottom). The color change is more evident for the samples at -2°C , testifying to the dilution of the brine that penetrates the ice.

Moreover, fluid penetration was not uniform, showing a more pointed (inverted conical) shape, which then tends to flatten out. A similar form was observed by Trzaskos and Klein-Paste [19]. The color of the RDP is also lighter in the -2°C test, indicating that the dilution is then more important at -10°C .

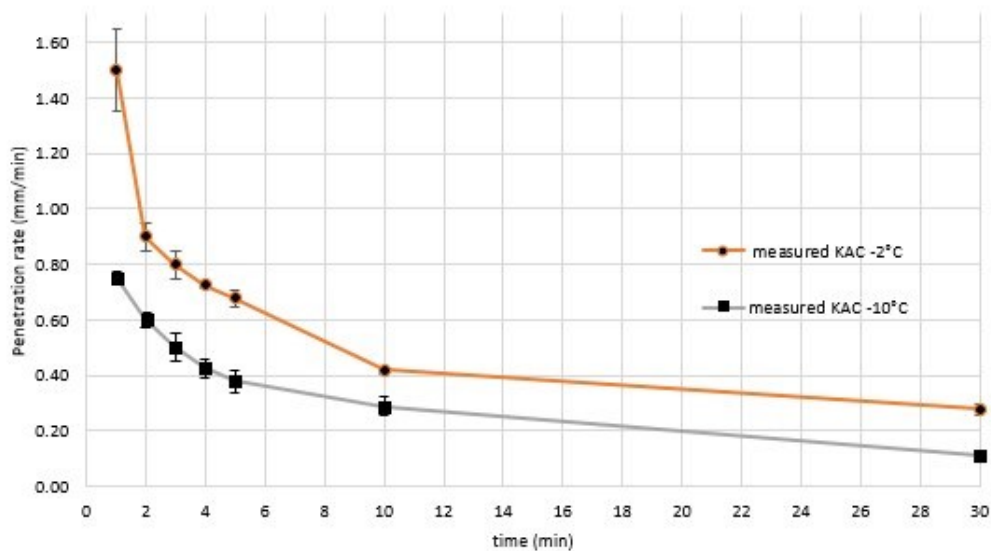


Figure 3-3: Ice penetration rate of the 50% w/w potassium acetate KAC at -10°C and -2°C

In regard to the penetration rates of the RDP at -2°C and -10°C , the product was most effective in the first minutes; for both ice temperatures, the penetration rates decreased over the next 30 min along an inverse logarithmic curve (Figure 3-3). However, the ice

penetration rate at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ was greater than that for the $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ice; nonetheless, the standard deviation was greater for $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ than $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ after one minute (± 0.3 at -2°C and ± 0.05 at -10°C). As a second step, we analyzed the thermal video to gain insight into RDP behavior in the Petri dish (Figure 3-4).

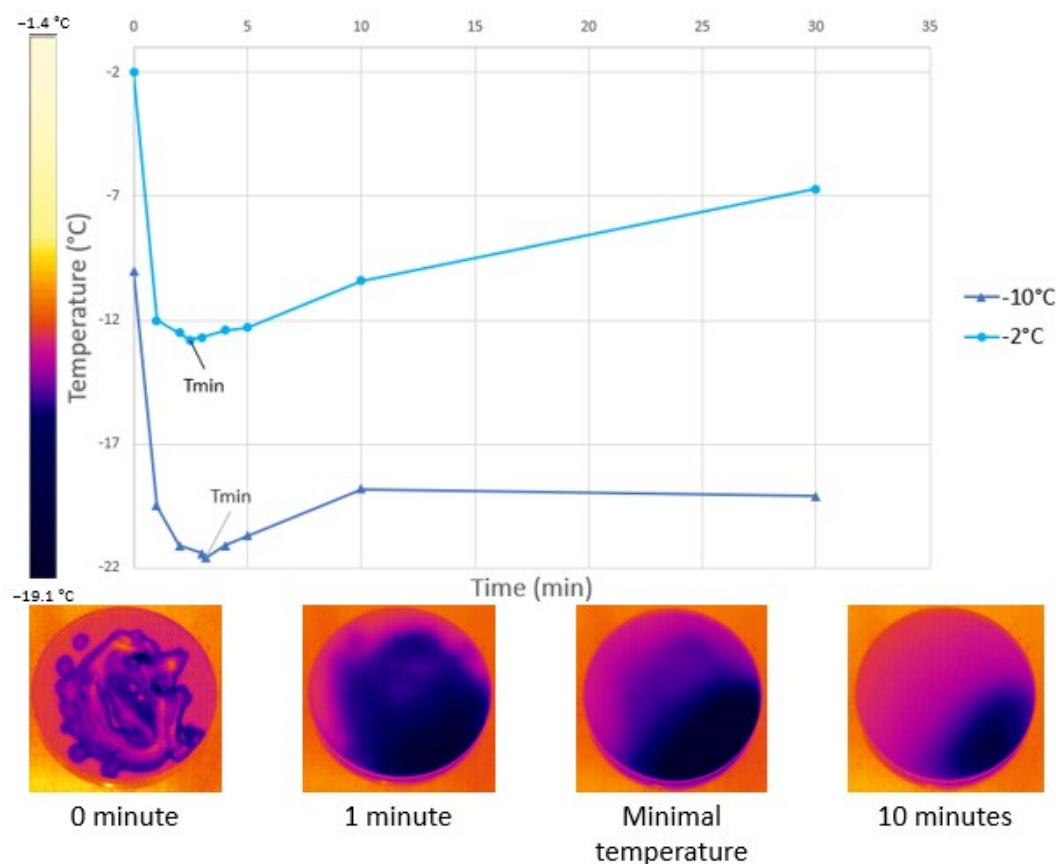


Figure 3-4: Minimum temperatures of the RDP (potassium acetate) at the ice surface for $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the thermal photographs at the ice surface at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the ice melting test at 0, 1, minimal temperature, and 10 min.

Temperature was not uniform across the surfaces, varying from $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to minimum values around $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 3-4). At T_0 , we observed an instantaneous temperature drop at the beginning of the test. The reaction is endothermic because of the dissolution of salt in water/ ice [22]. A minimum temperature of $-21.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, corresponding to the product's peak effectiveness, therefore where the product is the most reactive, was attained after three minutes, and the temperature then increased until the final observation at 30 min. The

minimum temperature reached at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ was $-21.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 189 s and $-12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 148 s for the $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tests. The temperature eventually attained the test temperature, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, when the product could no longer melt the ice. The pattern of minimum temperatures over the course of the melting capacity test [15] at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ is important for modelling how the product penetrate the ice .

The attained minimum temperature was lower at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ than at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is understandable. Nevertheless, the difference between the initial temperature of the test and the minimum temperature reached was $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ for $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ for $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. This pattern of delta temperatures is explained by ice melting with aqueous solutions below $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ being limited by diffusion [23]. The temperature of the product drops following the same trend. The higher the melt rate, the lower the temperature. We can therefore conclude that the greater the penetration rate, the lower the temperature from the correlation between both methods.

3.7 Ice penetration modeling

3.7.1 *Simplified mathematical modeling of ice penetration*

We used our observations to develop a simplified thermodynamic model presenting the evolution of ice penetration in the presence of a RDP following the AS6211 protocol [16]. As a first step, we evaluated the thermodynamic evolution of the ice penetration test to determine whether it acts as the natural convection of a liquid in a cavity in the presence of a phase change. It is crucial to determine the type of convection since it will drive the selection of the accurate equations. Forced convection will rather complexify the model equations. The immediate melting of a solid, such as ice crystals, occurs upon contact with the RDP because of the lower melting point for the water molecules (and RDP) at the contact

with the ice.

To determine whether this assumption of natural convection of the RDP is applicable to our tests, we relied on a series of visual recordings, using a digital lens at 12× magnification, to observe whether RDP circulated when deposited onto the ice sheet in an initially isothermal condition. Heitz et al. [24] identified three possibilities or modes of heat transfer in water contained within a closed cavity: conduction, laminar or turbulent convection; their respective occurrence mainly depends on the temperature profile, the velocity profile, and the dimensions of the cavity (L/D ; height/width). The authors identify the critical Rayleigh number (Ra_c) and the geometrical parameters of the cavity as predictors of heat transfer mode in the cavity.

Our recordings portray a bottom–top circulation of the fluid and a well-defined circulation cell, as described in the literature [24]. The RDP flow profile shows flow channels from bottom to top and then top to bottom (Figure 3-5). Measurements of the fluid surface temperature using a thermal camera recorded a considerable drop in the fluid surface temperature after the start of the test (up to 10 °C cooler), which suggests the mode of heat transfer by natural convection is similar to that for a cavity having the bottom (ice) at a higher temperature than the top (fluid).

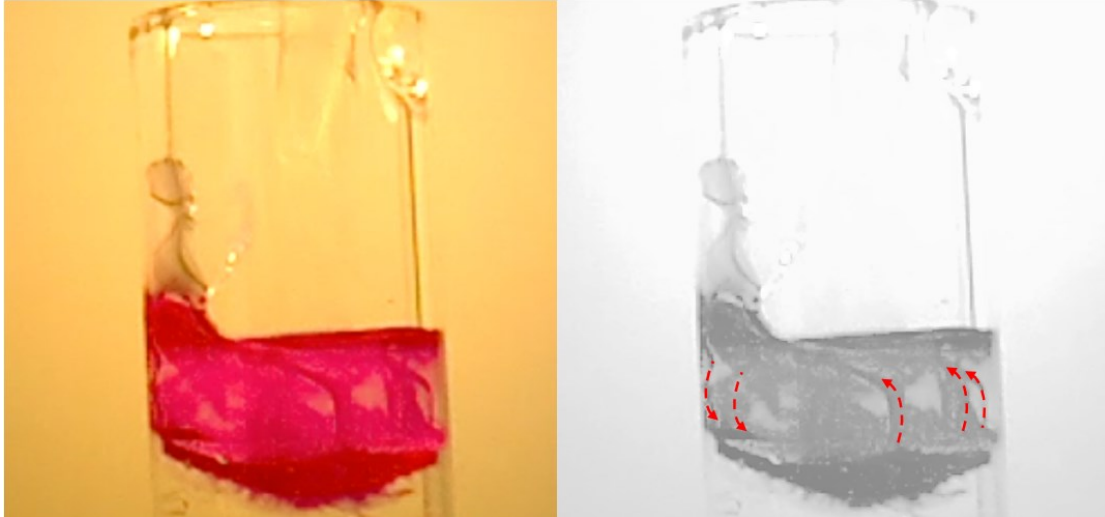


Figure 3-5: Visual evidence of natural convection by a bottom–top circulation followed by top–bottom circulation of the RDP when applied to the ice layer. Image on the right has red arrows added to show this convection

Our measurements of the surface temperature of the RDP and our recorded observation confirm that it circulated following a natural convection model (Figure 3-5). We can validate this observation by comparing the measured penetration rates with the model output and by estimating the critical Rayleigh number for predicting the mode of heat transfer. The important parameters to consider in the case of this cavity are as below:

- the dimension of the cavity and in particular the ratio height/width (L/D),
- the properties of the RDP at the test temperature T , such as concentration, viscosity.
- the properties of the ice at the test temperature T ,
- the Rayleigh (Ra), Nusselt (Nu), Prandtl (Pr), and Grashoff (Gr) numbers
- the modes of heat transfer (bottom–top or top–bottom),
- the presence of a phase change of the ice (melting/fusion).

✓ Energy balance around the cavity

Rigorous modeling of phenomena involving a phase change frequently uses the enthalpic method [25], which makes it easier to consider the constant temperature plateau at

the melting temperature. Fluid enthalpy evolves constantly during the melting temperature plateau via the storage of internal energy until the melting point; this results in a continuous energy function. However, we wish to apply a simplified approach to observe in a general way the ice melting phenomenon and to draw some useful conclusions. We can refer to Figure 3-6 to illustrate the main assumptions of this modeling approach. The main assumptions of the simplified model are that:

- at $t = 0$, the RDP, the ice, the tube, and the outside air all have the same temperature T as the climatic chamber T_0 (isothermal).
- the temperatures of the fluid T_2 , melted ice T_3 , and ice T_1 are lumped parameters; heat transfer is considered dominant in the axial direction of the tube (1D lumped parameter model),
- the temperature of the sample tube T_4 is the same temperature as that of the climate chamber T_0 ,
- the concentrations of potassium acetate in the C_2 and C_3 fluid are grouped parameters,
- the phase change of the ice and melting rate is a function of the temperature difference between the temperature of the fluid T_2 and the melting temperature of the fluid at concentration C_2 , i.e., $T_2 - T_{di}$.
- In this first version of this model, the thermodynamic properties (ρ , C_p , k , v) of brine and RDP are assumed to be the same as the water. However, in a future version, different properties between brine and water could be added [26].

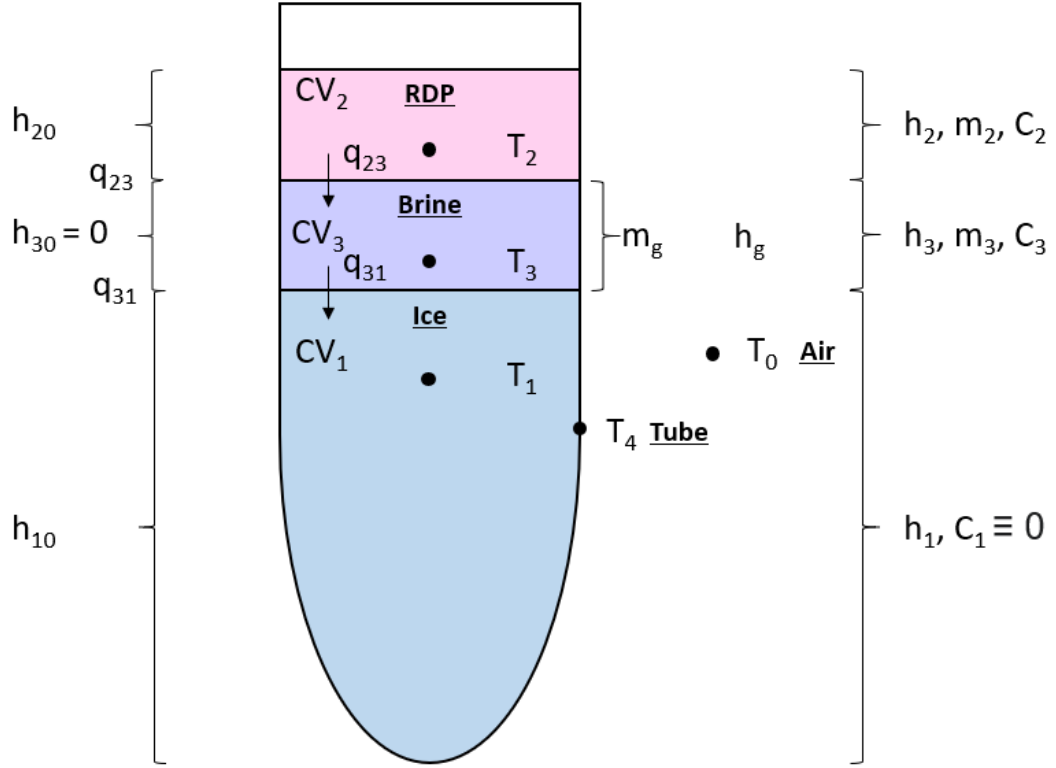


Figure 3-6: Representation of the elements of the 1D thermodynamic model of the ice penetration test following the AS6211 test method protocol [16]

The resulting model has a natural convection cell of the RDP in the lower part, near the ice interface, when the RDP is deposited onto the ice, the temperature of the lower part decreases to a temperature cooler than that of the ice because of heat transfer to the melting ice (latent heat of fusion of the ice H_{sl}). This convection cell occurs when a positive thermal gradient $\nabla T = T_1 - T_3$ becomes established. Heitz presents the critical Rayleigh number Ra_c for the heat transfer modes in water contained within a cavity of dimension L/D . For the test tube filled with RDP, we obtain a ratio of $3.6 \text{ mm}/4 \text{ mm} = 0.9$. The Ra around the RDP above the ice layer is expressed as a function of the RDP thickness, which increases as the ice is penetrated, and thus melts.

$$Ra = \frac{g\beta_2}{\nu\alpha} (T_1 - T_3)(x_2 + x_3)^3. \quad (1)$$

We observe that in the case of a typical simulation of the test tube ($L/D = 0.9$), conduction is the dominant mode over the first minutes (Figure 3-7). This mode then evolves toward a natural convection until the end of the test (30 min). Thus, we observe that the dominant mode of heat transfer is laminar natural convection.

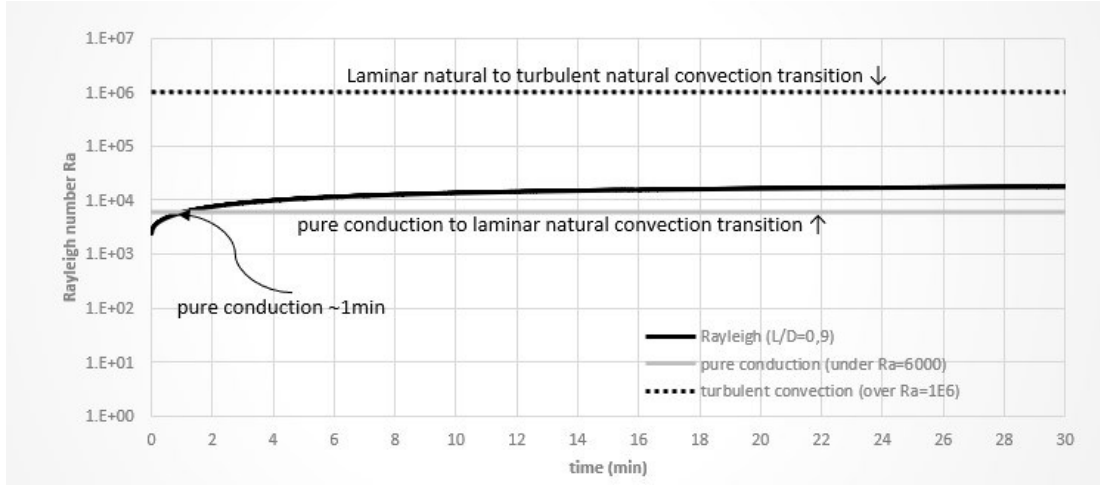


Figure 3-7 : Rayleigh number in the test tube cavity ($L/D = 0.9$) and heat transfer mode

The heat and mass balance equations of the different control volumes are

CV1 (ice):

$$\dot{E}_{CV1} \sim m_1 C_{p1} \dot{T}_1 = \rho_1 A_1 x_1 C_{p1} \dot{T}_1 = q_{31} + q_{41}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 A_1 \dot{x}_1 = -\dot{m}_i; \quad (3)$$

CV2 (RDP):

$$\dot{E}_{CV2} \sim m_2 C_{p2} \dot{T}_2 = \rho_2 A_2 x_2 C_{p2} \dot{T}_2 = -q_{23} + q_{42} + q_{02}, \quad (4)$$

$$\dot{m}_2 = 0 \quad (5);$$

CV3 (brine):

$$\dot{E}_{CV3} \sim m_3 C_{p3} \dot{T}_3 = \rho_3 A_3 x_3 C_{p3} \dot{T}_3 = q_{23} - q_{31} + q_{43} - \dot{m}_i H_{sl}, \quad (6)$$

$$\dot{m}_3 = \rho_3 A_3 \dot{x}_3 = \dot{m}_i, \quad (7)$$

$$C_2 = C_3 = \frac{m_i}{m_{tot}} = \frac{C_2(0)m_2(0)}{m_2(0)+m_3} \quad (\text{CV}_2 \text{ and CV}_3); \quad (8)$$

and the thermal flows:

$$q_{31} = h_{31} A_{31} (T_3 - T_1), \quad (9) \text{ (brine to ice)}$$

$$q_{41} = \frac{2\pi k_4 x_1}{\ln(r_0/r_i)} (T_4 - T_1), \quad (10) \text{ (tube to ice)}$$

$$q_{23} = h_{23} A_{23} (T_2 - T_3), \quad (11) \text{ (RDP to brine)}$$

$$q_{42} = h_{42} A_{42} (T_4 - T_2), \quad (12) \text{ (tube to RDP)}$$

$$q_{02} = h_{02} A_{02} (T_0 - T_2), \quad (13) \text{ (air to RDP)}$$

$$q_{43} = h_{43} A_{43} (T_4 - T_3); \quad (14) \text{ (tube to brine)}$$

the interchange areas:

$$A_{31} = A_{23} = A_{02} = \pi r^2, \quad (15)$$

$$A_{41} = 2\pi r x_1, \quad (16)$$

$$A_{42} = 2\pi r x_2, \quad (17)$$

$$A_{43} = 2\pi r x_3; \quad (18)$$

the exchange coefficients:

$$h_{02} = 0.64(\Delta T/L)^{1/4} = 0.64((T_0 - T_2)/x_2)^{1/4}, \quad (19) \text{ (air to liquid) [27]}$$

$$h_{42} = h_{43} = 1.42(\Delta T/L)^{1/4} = 1.42(T_4 - T_{2/3})^{1/4}, \quad (20) \text{ (tube to liquid, laminar) [28]}$$

$$h_{31} = \frac{0.13 k_3}{x_3} (Ra_{x_3})^{0.2}, \quad (21) \text{ (brine to ice, laminar) [29]}$$

$$h_{23} = \frac{0.13 k_2}{x_2} (Ra_{x_2})^{0.2}, \quad (22) \text{ (RDP to Brine, laminar) [29]}$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_0 \left[\frac{T_3(t) - T_{di}(t, C_2(t))}{T_3(0) - T_{di}(0, C_2(0))} \right]^2; \quad (23)$$

and the following values of the parameters: The values of ρ_1, k_1, C_{p1} are the usual properties of water and ice.

$$R_{a_{x_3}} = \frac{g\beta_3}{v_3\alpha_3}(T_1 - T_3)x_3^3, \quad (24)$$

$$R_{a_{x_2}} = \frac{g\beta_2}{v_2\alpha_2}(T_2 - T_3)x_2^3, \quad (25)$$

$$r = 2 \times 10^{-3} [m] \text{ (test tube radius)}, \quad (26)$$

$$k_1 \sim 2.1 \left[\frac{W}{mC} \right] \text{ (0 to } -20[^\circ C]), \quad (27)$$

$$C_{p1} \sim 2040 \left[\frac{J}{kgC} \right] \text{ (0 to } -20[^\circ C]), \quad (28)$$

$$\rho_1 \sim 920 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \text{ (0 to } -20[^\circ C]), \quad (29)$$

$$C_{p2} = C_{p3} \sim 2400 \left[\frac{J}{kgC} \right] \text{ (0 to } -20[^\circ C]), \quad (30)$$

$$\rho_2 = \rho_3 \sim 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \text{ (0 to } -20[^\circ C]), \quad (31)$$

$$k_2 = k_3 \sim 0.555 \left[\frac{W}{mC} \right] \text{ (0 } [^\circ C]), \quad (32)$$

$$H_{sl} = 3.33 \times 10^5 \left[\frac{J}{kg} \right] \text{ (enthalpy of ice fusion)}, \quad (33)$$

$$C_2(0) = 0.5 \left[\frac{kg \text{ of deicing fluid}}{kg \text{ total}} \right], \quad (34)$$

$$T_{di}(t, C_2) = -134.2C_2(t)^2 - 42.1C_2(t), \quad (35) \text{ (KAC, see Figure 3-8)}$$

This equation is based on the polynomial second order fitting of the phase diagram of KAC and water (Figure 3-8).

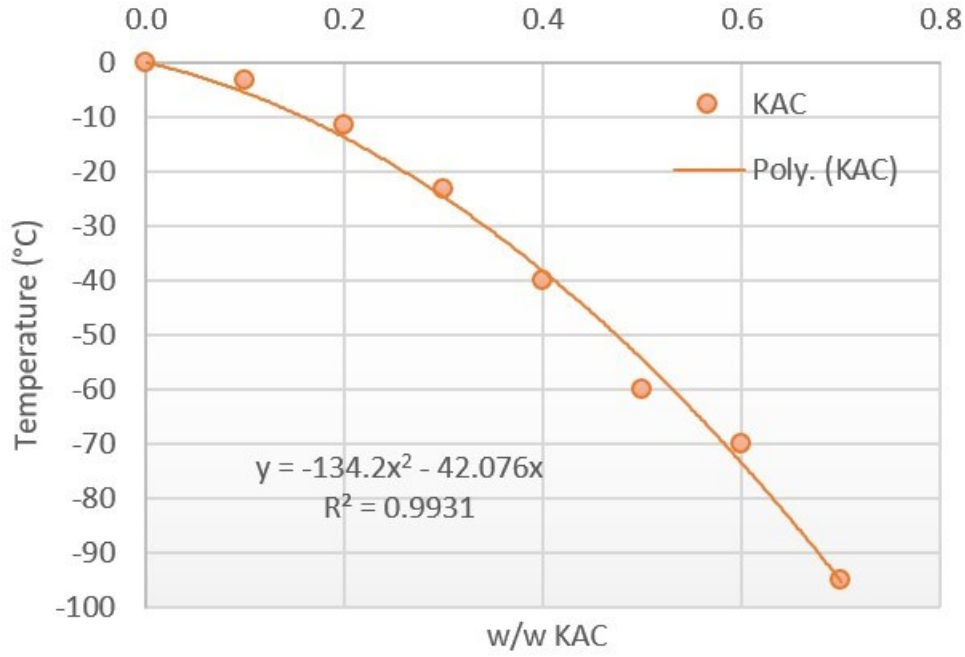


Figure 3-8 : Theoretical freezing temperature of KAC in water. Polynomial second order fitting is obtained from those data.

The following values are the calibration values at $t=0$ (Figure 3-3).

$$\dot{m}_0 = 1 \text{ to } 3 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \text{ (ice melting rate at } t = 0 \text{)}, \quad (36)$$

$$\beta_2 = \beta_3 \sim 2.1 \times 10^{-4} [C^{-1}] \text{ (liquid thermal expansion at } T = 0^\circ C \text{)}, \quad (37)$$

$$\nu_2 = \nu_3 \sim 1.8 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \text{ (liquid kinematic viscosity at } T = 0^\circ C \text{)}, \quad (38)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 \sim 1.4 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \text{ (liquid thermal diffusivity at } T = 0^\circ C \text{)}. \quad (39)$$

3.7.2 Solving the nonlinear differential equations

The analytical solution for the five differential equations $(T_1, T_2, T_3, x_1, x_3)$ is complex; thus, we applied a first-order finite difference numerical method. From experimental measurement, we obtain:

$$(T_1(0) = T_2(0) = T_3(0) = -2, -10, x_3(0) = 0, x_1(0) = 0.04, x_2(0) = 0.0036, C_2(0) = 0.5)$$

For the simulated ice melt rate profiles, we observed a good match with the experimental results obtained at -2°C and -10°C . The model's initial penetration rates were lower than the observed rates; this discrepancy can be explained mainly by variability between measurements of ice penetration depth recorded in the center of the tube. Measurements in the center of the tube partly overestimate ice penetration along the sides (concave meniscus) because the model predicts a uniform penetration depth for the entire section.

In the model, the fluid cooled considerably when melting began; however, the temperature remained above the melting temperature of the RDP (Figure 3-9). The observed temperature difference between the RDP and the melting point (Figure 3-10) indicates well the performance of the RDP because ice melting continues as long as the temperature of the RDP remains above the melting temperature at concentration C (Figure 3-11). We also noted the constant dilution of the de-icing fluid over time (Figure 3-12).

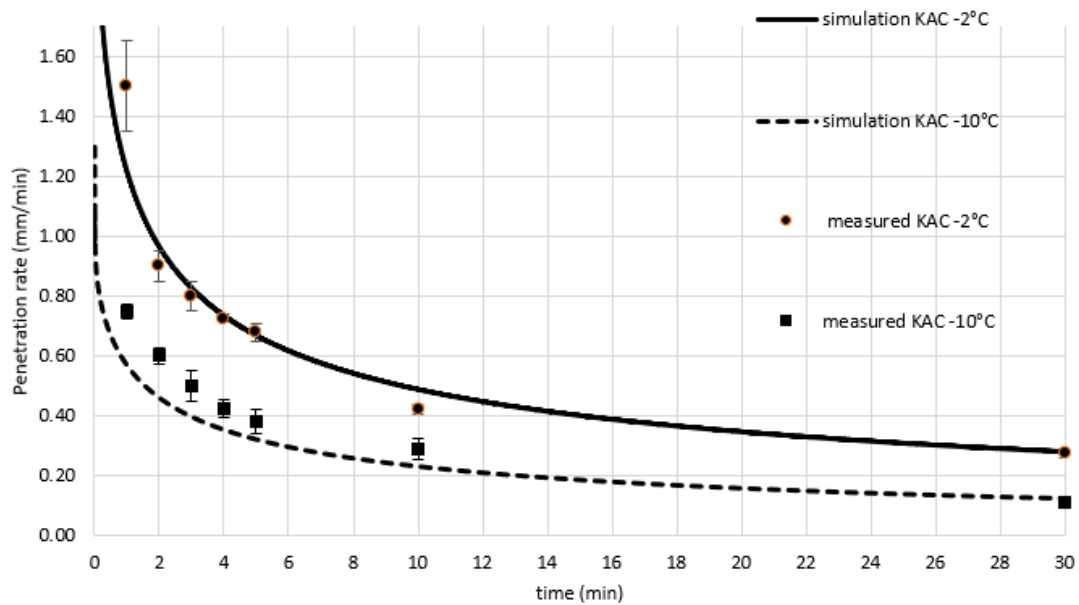


Figure 3-9: Simulated ice penetration rate profiles for -2°C and -10°C for KAC as an RDP

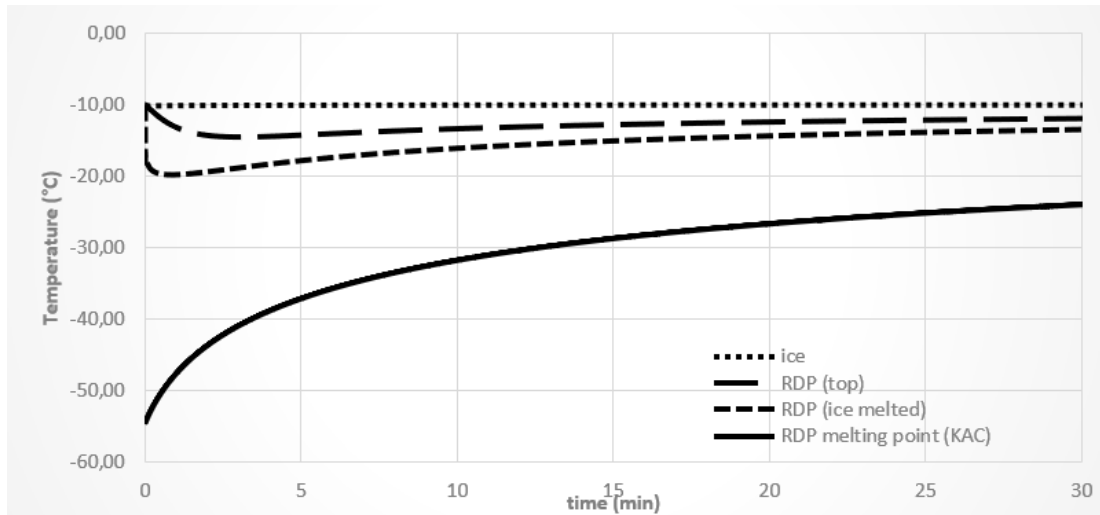


Figure 3-10: Simulated temperature profiles for the -10°C test

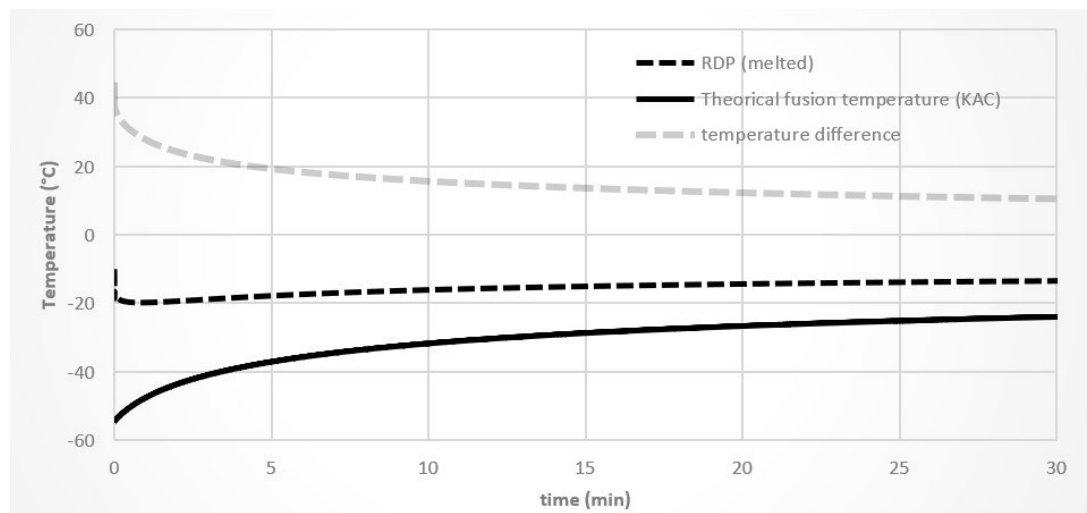


Figure 3-11: Temperature difference between the de-icing fluid T_2 and the melting value T_{di} for the test at -10°C

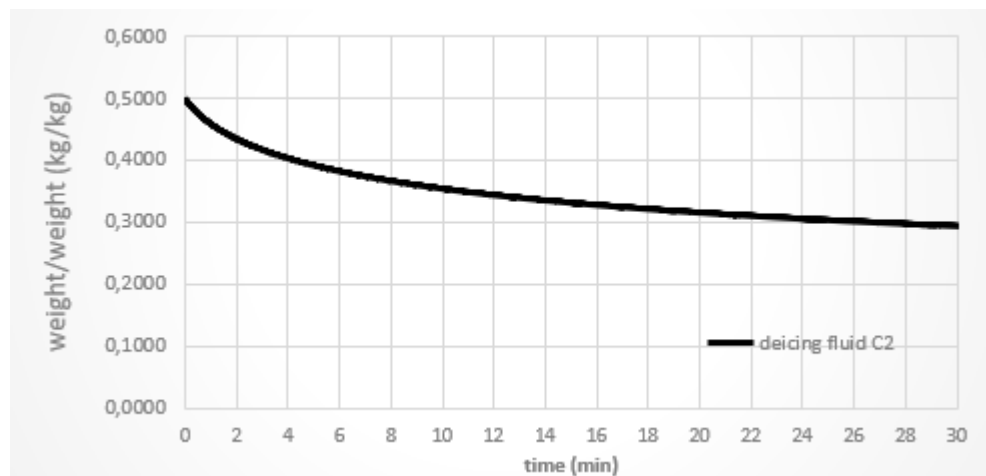


Figure 3-12: C_2 concentration of de-icing fluid over time for the -10°C test

3.7.3 Verification of the numerical solution (energy balance and steady-state solution)

To verify the obtained numerical solution, we used the energy balance equation of the simulation to determine the convergence of the solution and the isotherm at which the de-icing fluid becomes diluted and the melting ends.

We can write the energy balance equation for the entire tube (CV₁, CV₂, and CV₃) as

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{tot}, \quad (40)$$

$$\int_0^{30 \text{ min}} \sum_1^4 q_i dt - 0 = \sum_{i=1}^3 E_{CVi} + \Delta E_{ice \text{ melted}}, \quad (41)$$

$$\int_0^{30 \text{ min}} [q_{02} + q_{41} + q_{42} + q_{43}] dt = m_3 H_{sl} + \Delta E_{CV1} + \Delta E_{CV2} + \Delta E_{CV3}. \quad (42)$$

Expressed in terms of a percentage error, we find

$$\% \text{ energy balance} = 100 \left(\frac{E_{in} - \Delta E_{tot}}{E_{in}} \right), \quad (43)$$

$$\% \text{ energy balance} = 100 \left(\frac{\int_0^{30 \text{ min}} [q_{02} + q_{41} + q_{42} + q_{43}] dt - m_3 H_{sl} - \Delta E_{CV1} - \Delta E_{CV2} - \Delta E_{CV3}}{\int_0^{30 \text{ min}} [q_{02} + q_{41} + q_{42} + q_{43}] dt} \right). \quad (44)$$

We calculate the values for the energy balance of the simulation at -10°C ,

$$\% \text{ energy balance} = 100 \left(\frac{16.55J - 15.93J}{16.55J} \right) = 3.7\%. \quad (45)$$

As the solution temperature approaches the isotherm, ice penetration continues until the maximum de-icing power of the RDP is reached. When we assess the obtained temperatures during the 780 min of melting, we note that all temperatures converge to the temperature of the climate chamber at -10°C . At -10°C , the obtained RDP concentration reaches 0.16, which is the minimum concentration reached when the ice melt ends at -10°C . The model appears valid for calculating energy balance. The time to reach thermal equilibrium is long because the heat exchange coefficients h is a function of the temperature difference, which proportionally lengthens the time to reach thermal equilibrium.

3.7.4 Maximum de-icing power of a fluid

From the model and the experimental results [16], we can determine that the maximum de-icing power of a surface A covered with ice, of a fluid at a temperature T , starting concentration C_2 , and starting thickness x_2 corresponds to the complete melting of this layer of ice of thickness x_1 until reaching the minimum concentration C_{min} of the melting curve of the fluid at this temperature . The equation that governs this maximum de-icing power is:

$$C_{min} = \frac{C_2 \rho_2 A x_2}{\rho_2 A x_2 + \rho_1 A x_1} = \frac{C_2 \rho_2 x_2}{\rho_2 x_2 + \rho_1 x_1} . \quad (46)$$

Expressed in terms of the layer of RDP required to achieve complete melting of the ice, we can write

$$x_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{C_{min}}{(C_2 - C_{min})} x_1 \sim 0,92 \frac{C_{min}}{(C_2 - C_{min})} x_1 . \quad (47)$$

We can express Equation 47 for a temperature T and the expression of the melting curve of the RDP (square root of Equation $T_{di}(t, C_2) = -134.2C_2(t)^2 - 42.1C_2(t)$, (35)).

For potassium acetate, we obtain

$$C_{min} = 3.72 \times 10^{-3} \sqrt{-537 T + 1772} - 0.156 . \quad (48)$$

Substituting x_2 into the equation, we obtain Equation 49 to determine the amount of RDP (in this case, potassium acetate) required to ensure the complete penetration of the ice layer.

$$x_2(T, x_1, C_2) = \left(\frac{3.42 \times 10^{-3} \sqrt{-537 T + 1772} - 0.143}{C_2 - 3.72 \times 10^{-3} \sqrt{-537 T + 1772} + 0.156} \right) x_1 . \quad (49)$$

For example, the required thickness (x_2) of the RDP (at 0.4 by weight, C_2) to fully melt a 10 mm layer of ice (x_1) covering a surface A at a temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T) can be calculated as

$$x_2(T, x_1, C_2) = \left(\frac{3.42 \times 10^{-3} \sqrt{5370+1772} - 0.143}{0.4 - 3.72 \times 10^{-3} \sqrt{5370+1772} + 0.156} \right) 0.01 \sim 6 \text{ mm} . \quad (50)$$

Figure 3-13 illustrates the equation in the form of a chart for potassium acetate. The red star represents the above case. On this graph, we illustrate four different temperature that could be encountered. The form of this graph could be interesting, after experimental validation, for a practical use of RDP application rates on a frozen surface according to this standard. As an example, using this chart, if the temperature is -5°C , with an RDP of concentration of 0.5 (w/w), if the thickness of the ice is 5 mm, we should at least put 1.5 mm of de-icing fluid to ensure a complete penetration of the ice.

Such a figure could be obtained for each commercial RDP and assist the airport maintenance operation teams to accurately select the quantity of RDP to ensure a complete and efficient de-icing. Further study is necessary to adapt this model to solid RDP and prewetted RDP. Finally, it could be applied to increase the knowledge in the anti-icing properties of RDP.

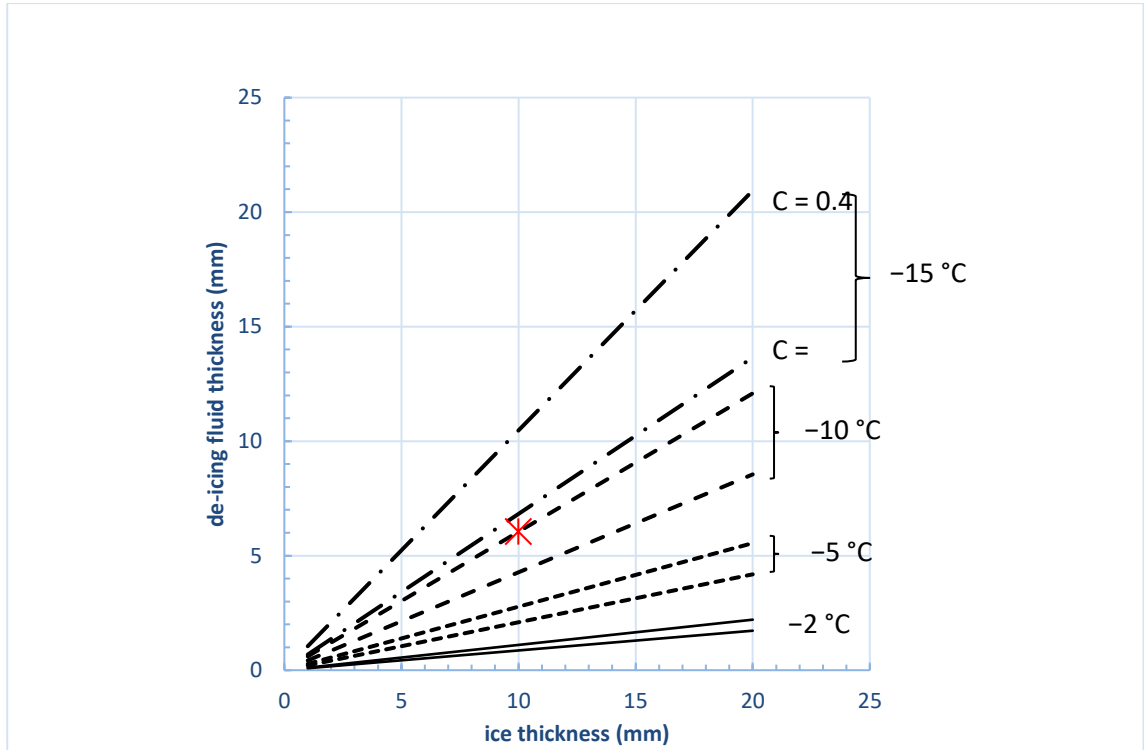


Figure 3-13: Thickness of the RDP as a function of ice cover thickness, temperature, and fluid concentration (C). For each temperature, the top line corresponds to a concentration (w/w) of 0.4 while the bottom corresponds to a 0.5 (w/w).

3.8 Conclusion

We have demonstrated that simplified ice penetration modeling, based on the AS6211 protocol [16], can reliably predict ice melt rate. Our experimental results for the ice penetration and ice melting tests confirm the model output estimates. However, one of the difficulties encountered was air bubbles, as this can affect results. In Figure 3, we can observe some air bubbles. These come from dissolved gasses in the water which are difficult to prevent.

We then obtained an equation to predict the amount of RDP required to melt a given ice thickness. The predicted penetration rates at the beginning of the test appear to be lower than the observations; however, the depth of melt at the beginning of the test is not necessarily representative of the ice melt rate of melt within the entire tube section. Fluid

properties, such as the melting curve as a function of concentration, are the main factor affecting the efficiency of the products excluding, of course, the application methods in real cases. For the model, the heat transfer of the fluid when it contacts the ice is assumed to be uniform; however, in reality this is not necessarily the case. Other methods for characterizing RDP are available, and the application of our simplified model to these alternate methods could isolate the effects of diluted or undiluted solid runway de-icing products on ice melting rates.

3.9 Acknowledgement

We acknowledge the support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Anti-icing Materials International Laboratory (AMIL). This research was conducted in support of the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Québec (CRIAQ) and the Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec, and the support provided by Aéroports de Montréal, WPred and Nachur Alpine Solutions.

3.10 References

- [1] J.-D. Brassard, C. Laforte, M. M. Tremblay, et C. Volat, "Runway Deicing Product Anti/Deicing Performance Assessment: Review and Future Directions," 2019. doi: 10.4271/2019-01-1974.
- [2] A. Klein-Paste, "Runway Operability under Cold Weather Conditions. Tire-pavement friction creation by sand particles on iced pavements, and non-contacting detection of sand particles on pavements," *NTNU*, 2007.
- [3] A. Klein-Paste, "Airplane braking friction on dry snow, wet snow or slush contaminated runways," *Cold Regions Science and Technology*, 2017/02/20/ 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.02.004>.
- [4] A. Tuncal, U. Suat, et E. Dursun, "A MILESTONE TO ENHANCE RUNWAY SAFETY: THE NEW GLOBAL REPORTING FORMAT," *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 33, no. 1, pp. 168-178, 2021.

- [5] Boeing. "Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents".
https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf
(Consulté le 2022-01-19).
- [6] R. Canada, "Un avion fait une sortie de piste à l'aéroport de Bagotville," 2019. [En ligne].
Disponible: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1151839/incident-voyageurs-bagotville-aeroport-urgence>
- [7] EASA, "Annual Safety Review," 2020. [En ligne]. Disponible:
<https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/annual-safety-review-2020>
- [8] L. KORNSTAEtT et R. Lignee, "Operational Landing Distances, A new standard for in-flight landing distance assessment," *Safety*, no. 1/5, 2010.
- [9] T. S. B. o. Canada. "Runway overruns". <https://www.tsb.gc.ca/eng/surveillance-watchlist/aviation/2022/air-02.html>
- [10] J. Procházka et M. Kameník, "Contaminated Runway Operations-Adverse weather," *MAD-Magazine of Aviation Development*, vol. 1, no. 4, pp. 3-7, 2013.
- [11] Y. Niu *et al.*, "Techniques and Methods for Runway Friction Measurement: A Review of State-of-the-Art," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021.
- [12] G. Comfort, "Wet Runway Friction: Literature and Information Review," 2001.
- [13] J. D. Brassard, C. Laforte, F. Guerin, et C. Blackburn, "Icephobicity: Definition and measurement regarding atmospheric icing," in *Advances in Polymer Science* vol. 284, 2019, pp. 123-143. doi: 10.1007/12_2017_36.
- [14] (2021). *Advisory Circular (AC) No. 300-019: Global Reporting Format (GRF) for Runway Surface Conditions*. doi:
- [15] *AS6170 Ice Melting Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [16] *AS6211 Ice Penetration Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [17] *AS6172 Ice Undercutting Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [18] *AMS1431F Compound, Solid Runway and Taxiway Deicing/Anti-icing*, SAE International, 2024. [En ligne]. Disponible: <http://www.sae.org>
- [19] M. P. Trzaskos et A. Klein-Paste, "Effect of Temperature and Prewetting for Ice Penetration with Sodium Formate," *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 6, pp. 140-150, 2020. doi: 10.1177/0361198120917974.
- [20] H. U. Sajid, D. L. Naik, et R. Kiran, "Improving the ice-melting capacity of traditional deicers," *Construction and Building Materials*, vol. 271, p. 121527, 2021.
- [21] A. Klein-Paste et J. Potapova, "Thermal aspects of melting ice with deicer chemicals," *Transportation Research Record*, vol. 2440, no. 1, pp. 69-75, 2014.
- [22] J. Wåhlin et A. Klein-Paste, "The effect of mass diffusion on the rate of chemical ice melting using aqueous solutions," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 139, pp. 11-21, 2017. doi: 10.1016/j.coldregions.2017.04.001.
- [23] J. Wåhlin et A. Klein-Paste, "Ice Melting Rates at– 5° C,– 10° C, and– 15° C Using Chloride Solutions: a Physical Explanation," 2018.
- [24] M. Gangi, F. Stella, et T. A. Kowalewski, "Phase change problems with free convection: fixed grid numerical simulation," *Computing and Visualization in Science*, vol. 2, no. 2, pp. 123-130, 1999.
- [25] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, 2009. [En ligne]. Disponible:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VMY-4RCF741-1/2/0314e4fb616b6631baf70fc8796b008>

- [26] C. R. Bury et G. A. Parry, "139. The densities of aqueous solutions of potassium acetate and laurate," *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, no. 0, pp. 626-628, 1935. doi: 10.1039/JR9350000626.
- [27] A.-J. N. Khalifa, "Natural convective heat transfer coefficient—a review: I. Isolated vertical and horizontal surfaces," *Energy conversion and management*, vol. 42, no. 4, pp. 491-504, 2001.
- [28] A.S.H.R.A.E, "Fundamentals, 1981," *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA*, 1981.
- [29] Ozisik et M. Necati, "Heat transfer: a basic approach," *New York: McGraw-Hill*, vol. 780, 1985.

CHAPITRE 4

AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES SUR LE DÉGIVRAGE DES PISTES : COMBINAISON DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ET DE LA SPECTROSCOPIE RAMAN POUR ÉVALUER LA FONTE DE LA GLACE

Avant-propos

État de l'acceptation : Publié.

Journal : Applied science

Lien d'accès : <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/12/5096>
<https://doi.org/10.3390/app14125096>

Référence : Charpentier, C., et al. (2024). "Advancing Insights into Runway De-Icing: Combining Infrared Thermography and Raman Spectroscopy to Assess Ice Melt." Applied Sciences **14**(12): 5096.

Titre en français : Amélioration des connaissances sur le dégivrage des pistes :
Combinaison de la thermographie infrarouge et de la spectroscopie Raman pour
évaluer la fonte de la glace

4.1 Résumé

Le principe de la « piste nue » vise à garantir la sécurité des passagers et des employés en rendant les pistes plus praticables en hiver, ce qui facilite l'enlèvement des contaminants tels que la neige et la glace. Le maintien de l'exploitation des pistes en hiver est essentiel, mais il implique des coûts considérables et des incidences sur l'environnement. Une

meilleure connaissance des performances de dégivrage et d'antigivrage des produits de dégivrage des pistes (RDP) permet d'optimiser les opérations. L'essai de fonte de la glace, conformément à la norme AS6170, mesure la vitesse à laquelle un produit de déverglaçage dissout une masse de glace afin de déterminer l'efficacité du produit de déverglaçage. Nous présentons ici une nouvelle méthodologie intégrée pour évaluer la fonte de la glace liée aux RDP. Nous combinons des procédures de laboratoire avec la thermographie infrarouge et la spectroscopie Raman pour surveiller l'état des RDP placés sur la glace. Le plateau d'efficacité maximale, marqué par l'intensité du pic Raman le plus significatif, correspond à la température minimale maximale, ce qui indique une performance optimale des RDP. Au-delà de ce point, l'efficacité de la RDP diminue et la température du système, y compris les contaminants fondus et le RDP, se rapproche de la température ambiante. L'efficacité du RDP persiste lorsque la température ambiante dépasse le point de congélation du mélange ; dans le cas contraire, un risque de congélation subsiste. Les phases initiales du contact entre le RDP et la glace impliquent des réactions exothermiques qui génèrent de la saumure, suivies d'un échange de chaleur avec la glace environnante pour encourager la fonte. La phase finale est la fonte complète de la glace, qui ne laisse que de la saumure avec un échange de chaleur réduit à la surface. En quantifiant ces changements thermiques et chimiques, nous comprenons mieux la fonte de la glace liée aux RDP, et une évaluation plus solide peut être fournie aux aéroports utilisant des RDP.

Advancing Insights into Runway De-Icing: Combining Infrared Thermography and Raman Spectroscopy to Assess Ice Melt

Claire Charpentier ^{1,*}, Jean-Denis Brassard ¹, Mario Marchetti ² and Gelareh

Momen ¹

¹Anti-Icing Materials International Laboratory, Université du Québec à

Chicoutimi,

Saguenay, QC G7H 2B1, Canada; jdbrassa@uqac.ca (J.-D.B.);

gmomen@uqac.ca (G.M.)

²Unité Mixte de Recherche-Matériaux pour une Construction Durable (UMR MCD),
Université Gustave

Eiffel-Cerema, Cedex 2, F-77454 Marne-la-Vallée, France; mario.marchetti@univ-eiffel.fr

* Correspondence: claire.charpentier1@uqac.

Keywords: ice melting; Raman spectroscopy; infrared thermography; runway de-icing products; winter maintenance

4.2 Abstract

The “bare runway” principle aims to ensure passenger and employee safety by making runways more usable during winter conditions, allowing for easier removal of contaminants like snow and ice. Maintaining runway operations in winter is essential, but it involves considerable cost and environmental impacts. Greater knowledge about the de-icing and anti-icing performance of runway de-icing products (RDPs) optimizes operations. The ice melting test, as per the AS6170 standard, gauges the rate at which an RDP dissolves an ice mass to determine RDP effectiveness. Here, we introduce a novel integrated

methodology for assessing RDP-related ice melt. We combine laboratory-based procedures with infrared thermography and Raman spectroscopy to monitor the condition of RDPs placed on ice. The plateau of maximum efficiency, marked by the most significant Raman peak intensity, corresponds to the peak minimum temperature, indicating optimal RDP performance. Beyond this point, RDP efficacy declines, and the system temperature, including melted contaminants and RDP, approaches ambient temperature. Effective RDP performance persists when the ambient temperature exceeds the mixture's freezing point; otherwise, a freezing risk remains. The initial phases of RDP–ice contact involve exothermic reactions that generate brine, followed by heat exchange with surrounding ice to encourage melt. The final phase is complete ice melt, leaving only brine with reduced heat exchange on the surface. By quantifying these thermal and chemical changes, we gain a deeper understanding of RDP-related ice melting, and a more robust assessment can be provided to airports using RDPs.

4.3 Introduction

The presence of water, ice, or snow [1] on runways has led to numerous aircraft accidents [2]. Runway excursion is a major risk in the aviation industry [3-5], especially when aircraft must use icy runways, such as in Canada [6, 7]. For example, on February 8, 2019, a thin layer of ice covering the runway at Bagotville airport (Saguenay, Québec, Canada) led to an aircraft leaving the runway after landing [8]; fortunately, there were no injuries. Such accidents often result in significant property damage [9], and the frequency of incidents during winters negatively impacts airport operations at higher latitudes [10]. To ensure safe aircraft take-off and landing, airports remove winter contaminants (e.g., snow, ice) using mechanical tools and/or prevent their accumulation.

Standard runway maintenance operations in regions subject to freezing, e.g., Canada and the northern United States, involve applying thousands of tons [11] of de-icing products in liquid (aqueous solutions) or solid form. Despite the importance of winter conditions on airport operations and budgets, little effort has been made to-ward evaluating de-icing and anti-icing product performance or determining the optimal amounts of product to be applied to runways [12-14]. Product suppliers typically suggest application rates [15-17] and the duration of product effectiveness on the basis of their own experience and knowledge.

Snow accumulated on runways is removed using mechanical tools [18]. For ice, chemicals known as runway de-icing products (RDPs) are first applied to facilitate melting before its removal by mechanical means. Moreover, maintenance crews may initially spread RDPs to prevent ice from forming on the runway [19]. Three standardized tests are conducted jointly to determine RDP performance: ice melting [20], ice penetration [21], and ice undercutting [22]. Here, we focus on ice melting, which is the main property that interests maintenance managers when they assess the utility of an RDP.

Ice melting occurs when energy is added to the ice, causing it to melt. This added energy may be heat, a chemical, or another substance. The ice melting test estimates the amount of ice mass that an RDP will melt per minute, as described by the AS6170 test method standard [20] which was developed by an SAE G12 working group. However, the main shortcoming of this test is the absence of a failure value or minimum value, which leaves the results open to too wide an interpretation. Determining the term “performance” is essential to understanding what is expected of the RDP. Performance can be expressed in terms of melting rate, but also in terms of the product's endurance, how long it reacts. As this notion is not addressed in the standard, it is difficult to estimate what performance is expected during the test. Ice melting is also influenced by various parameters inherent to

airports: solar radiation, convective effect of wind, temperature variations, mixed icing conditions (snow, rain, ice, etc.), passing vehicles and the presence of contaminants (aircraft fluid, fuel). Unfortunately, these parameters are not included in the test. So, ice melting is a comparative test, under controlled conditions, but needs further investigation. The output is a 3D measurement (mass or volume per minute) representing the speed at which a given product melts ice [12]. Much research has been conducted on liquid de-icers [23, 24] but less on solids because of factors such as granulometry. Studies on solid RDPs often focus on NaCl and MgCl₂ [25-27]. Procedures for testing the melting capacity of ice rely on tools such as isothermal bottles [28] and ice cubes [29]; however, these methods require manipulation during testing, which increases the potential for error.

Here, we apply two methods to characterize ice melting through RDP use. The first, thermography, is commonly used in winter operations to measure the surface temperature of pavement (e.g., roads and airports) [30]. The second, Raman spectroscopy, reveals the vibrational and rotational states of the chemical bonds of the molecules in the RDP [31]. This non-destructive method details phase changes and RDP failure [14] and identifies the chemical in isolation or once dissolved. Our primary aim is to introduce a new approach applying infrared thermography and Raman spectroscopy to improve our understanding of ice melting using RDPs. By identifying and quantifying the RDP-related effects of ice melt, we can characterize the thermal and chemical properties of the phase changes. We base our laboratory analyses on field data collected from Montréal (Québec, Canada) airports and the recommended amounts of RDP to be applied. Our study will assist airports in determining the efficacy of a specific RDP for melting ice.

4.4 Experimental protocols

We conducted ice melting tests in controlled laboratory conditions at the International Laboratory of Anti-icing Materials (AMIL). The tests were carried out in a climate chamber measuring 9.1 m in height, 5.5 m in length, and 3.5 m in width. The chamber is designed to maintain a controlled air temperature ranging from 0 °C to −35 °C with a precision of 0.5 °C. The temperature inside the chamber for our tests was set at −10 °C. For all tests, we used commercially available solid-state sodium formate (NaFo) as the RDP. NaFo is commonly used for winter maintenance at airports, including the Montréal airports, because of its environmental and anti-corrosion properties and its cost-effectiveness. This RDP is a white granular solid with particles aggregated into non-cohesive flakes measuring 1–3 mm in diameter and whose freezing point is −16 °C for a mass percentage of 24.70% w/w [32]. Sodium formate is effective at preventing re-icing down to −16 °C. When NaFo is dissolved in water, it reduces the freezing point of the solution. As a result, the solution remains liquid at lower temperatures than pure water would [32]. It prevents ice reformation by maintaining a liquid state even in cold conditions. It also rapidly penetrates solid snow and ice layers, detaching them from asphalt or concrete surfaces.

Our protocol involved running three distinct tests: (i) ice melting assessments conducted according to standardized procedures using thermometric observations; (ii) ice melting evaluations conducted using the existing airport RDP application rate, supplemented by thermometric observations; and (iii) a detailed examination of ice melting phenomena, incorporating both thermometric and Raman spectroscopic observations.

4.4.1 Ice Melting Protocol using the AS6170 Test

We followed the AS6170 test method standard [20] for the ice melting test (Figure 3).

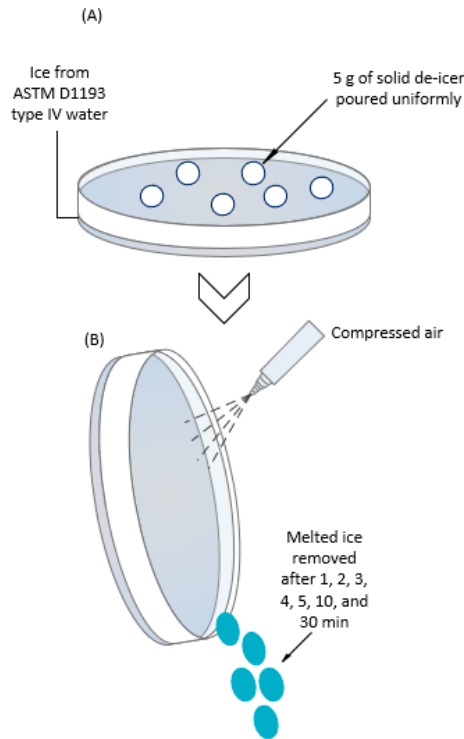


Figure 4-1: The ice melting test for a runway de-icing product (RDP) following the AS6170 standard. Panel (A) depicts the initial ice sample in a Petri dish and the placing of the RDP (sodium formate) onto the ice sample. In panel (B), the RDP and melted ice are removed using compressed air [20].

First, a Petri dish was filled with 60 mL of ASTM D1193 type IV water and then cooled at -10°C . After at least 8 h, the Petri dish and resulting ice were weighed using a calibrated scale (820 g max capacity, ± 0.001 g accuracy). Then, 5 g of RDP was evenly deposited onto the ice surface. After 1, 2, 3, 4, 5, 10, and 30 min, the melted ice (brine) was removed using compressed air, and the Petri dish was reweighed after each removal to determine the mass of the melted ice. Each time interval was treated as a separate measurement and repeated three times.

To gain a deeper understanding of product performance, we used a thermal camera

(Optris Pi450i) with its corresponding software (Optris PIX Connect) to obtain an overall view of the Petri dish and ice. The camera had an uncooled 382×288 pixel microbolometer frame plane array detector and was equipped with an $18^\circ \times 14^\circ$ field of view (FOV) Ge lens. The camera was positioned approximately 40 cm away from the target and was turned on at least 30 min before measurements to ensure thermal equilibrium. The camera had a Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) of 60 mK without further specifications provided by the manufacturer.

Additionally, an aluminum foil mirror was placed on the ice surface in the camera's FOV. The foil served to correct the radiative environment and allow for thermometric analysis using thermal images. Thermal images were recorded at 80 Hz in video mode, capturing temperature measurements during the ice-melting process. The entire test was repeated three times for reliability and consistency.

4.4.2 *Airport Application Rate*

In collaboration with Montréal Airports, we obtained access to a designated runway and observation of the use of maintenance tools to directly observe operational procedures. This unique opportunity allowed us to assess the effectiveness of RDPs in winter conditions.

According to the AS6170 test method standard [20], melting tests should be conducted using a 14 cm diameter Petri dish containing 5 g of product, which is equivalent to 280 g/m² of RDP. However, during the field test campaign, we noted that the actual application concentration (see Figure 4-2) was much lower than the specified standard. Note, however, that the spreading trucks lacked accurate monitors to confirm the precise amounts of applied RDP.



Figure 4-2: Sodium formate (NaFo) over a concrete pavement runway surface, illustrating the application concentration used at Mirabel airport, Québec.

Photo analysis determined the distribution of RDP grains within a given surface area to approximate the application per square meter. The amount spread followed the manufacturer's recommendations, which can also be adapted to the actual weather conditions. We considered the size and weight of each individual grain to determine an actual application concentration of slightly more than 25 g/m²; this coverage is more than 11× lower than that of the AS1670 standard test, leading to a possible overestimate of the RDP's ability to melt ice when relying solely on the AS1670 standard. To align with actual airport use and conditions, we therefore used a reduced amount of product (0.5 g), corresponding to the actual estimated application rate, for the ice melting test. Nevertheless, to maintain consistency with the standard and overestimated amount of RDP, the same test was also run using 5 g of product.

4.4.3 *Thermometric Photography and Raman Spectroscopy*

In the cold room at −10 °C, we then ran thermometric photography and Raman spectroscopy to observe the ice and RDP in real time (Figure 4-3). Building upon the initial

ice melting test, we adapted these additional tests to be more detailed. For these tests, we used 0.05 g of crushed RDP (equivalent to one grain of RDP). The RDP was deposited onto an ice surface using a 0.05 mL semi-spherical spoon. The RDP was thus in direct contact with the ice—a contact surface of 28 mm², approximately the size of one salt grain and ensuring a consistent shape and surface area for analysis.

To measure the temperature distribution of the grain at the ice–RDP interface, we then used an Optris Pi640 thermal camera equipped with a microscopic lens and running Optris PIX Connect software. This setup included a 640 × 480 pixel microbolometer frame plane array detector and a Ge lens, providing a 15° × 11° FOV for thermal imaging of the RDP on the ice. The camera had a NETD of 40 mK. The camera was positioned approximately 40 cm away from the target and was turned on at least 30 min before any measurements to ensure the system attained a thermal equilibrium. Additionally, a reflective crumpled aluminum foil mirror was placed on the ice surface in the camera’s FOV to correct for the radiative environment. Thermal images were captured in video mode at 30 Hz.

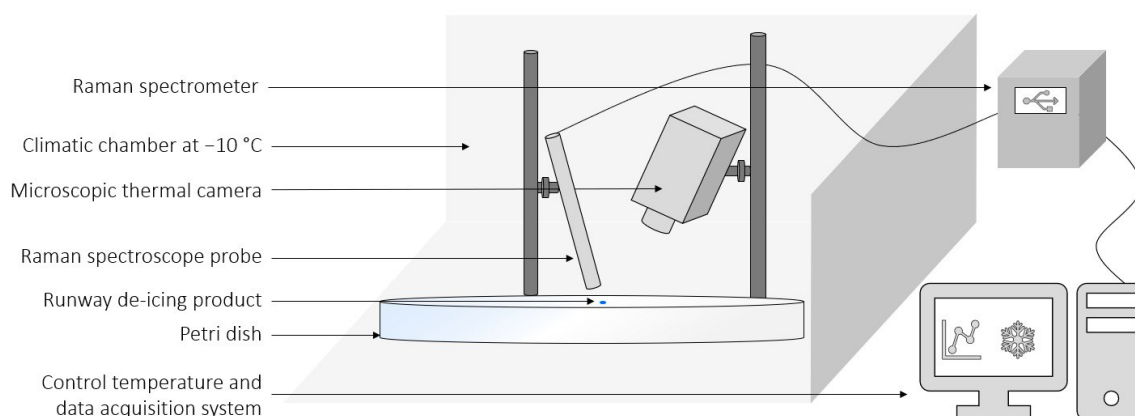


Figure 4-3: Experimental setup for the thermometric imaging and Raman spectroscopy.

The second instrument was an i-Raman Plus portable spectrometer from BWTek, operating with a 785 nm laser at an output power of 340 mW. The Raman signal was collected using a confocal lens Raman probe, allowing for a contactless measurement at a

distance of approximately 5 mm. The spectrometer was controlled using BWSpec 4.11 software, which managed the laser power (ranging from 1%–100% of available power), integration time, and acquisition frequency. A portable spectrometer also permits in situ measurements of the Raman depth profile directly on the runway; this eliminates the need for sample collection and preparation as required for FTIR or DSC methods, thereby speeding up RDP analyses. The instrument provided Raman spectra within the 300–3400 cm^{-1} range at a resolution of 4 cm^{-1} . During the ice melting experiment, the integration time was set at 20 s, and each produced spectrum was an average of four spectra. Each spectral measurement lasted 80 s, and Raman spectra were collected every 0.01 s. Raman spectra of the RDP or brine contained characteristic peaks that correspond to specific chemical bonds; peak intensity correlates with the concentration of the analyzed chemical compound. In this study, we focused specifically on the peak at 930 cm^{-1} .

4.5 Results

4.5.1 *Ice Melting Test*

We observed that the solid RDP melted rapidly into the ice (Figure 4-4). The RDP melting of ice was more pronounced using 5 g than using 0.5 g. In the first few minutes, the RDP-related melting rates were both elevated; however, these rates decreased markedly over the next 10 min (Figure 4-4). For 5 g of RDP, the melting rate was higher after 30 min, possibly because of the presence of pristine RDP still able to melt the ice and generate brine.

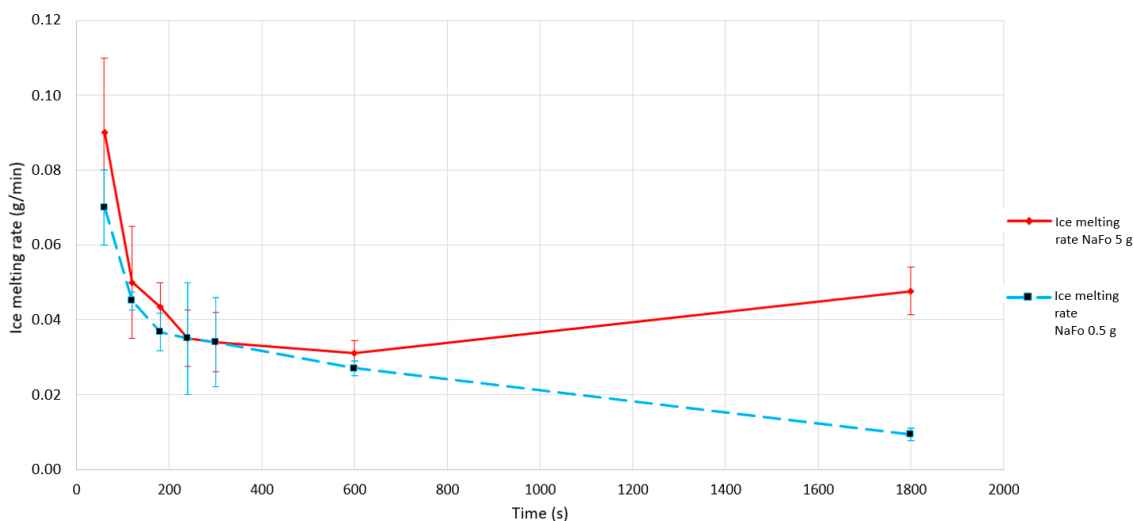


Figure 4-4: Ice melting rate of the 5 g and 0.5 g sodium formate (NaFo) samples at -10°C .

The 5 g ice melting rate was greater than that of the 0.5 g samples, although the rate was not proportional to the RDP amount. The standard deviation after one minute was greater for 5 g (± 0.02) than for 0.5 g (± 0.01), possibly because not all of the 5 g of RDP was initially in contact with the ice, resulting in only partial effectiveness. When using 0.5 g, proportionally much more area of the RDP grains is in contact with the ice, allowing for complete melting. After 10 min, the residual dry RDP in the 5 g samples, which was initially inactive, comes into contact with the water or brine, promoting further melting. Unfortunately, this delay in ice melting negatively affects the time, cost, and quantity required for winter runway maintenance. Therefore, using excessive amounts of RDP does not offer a suitable solution.

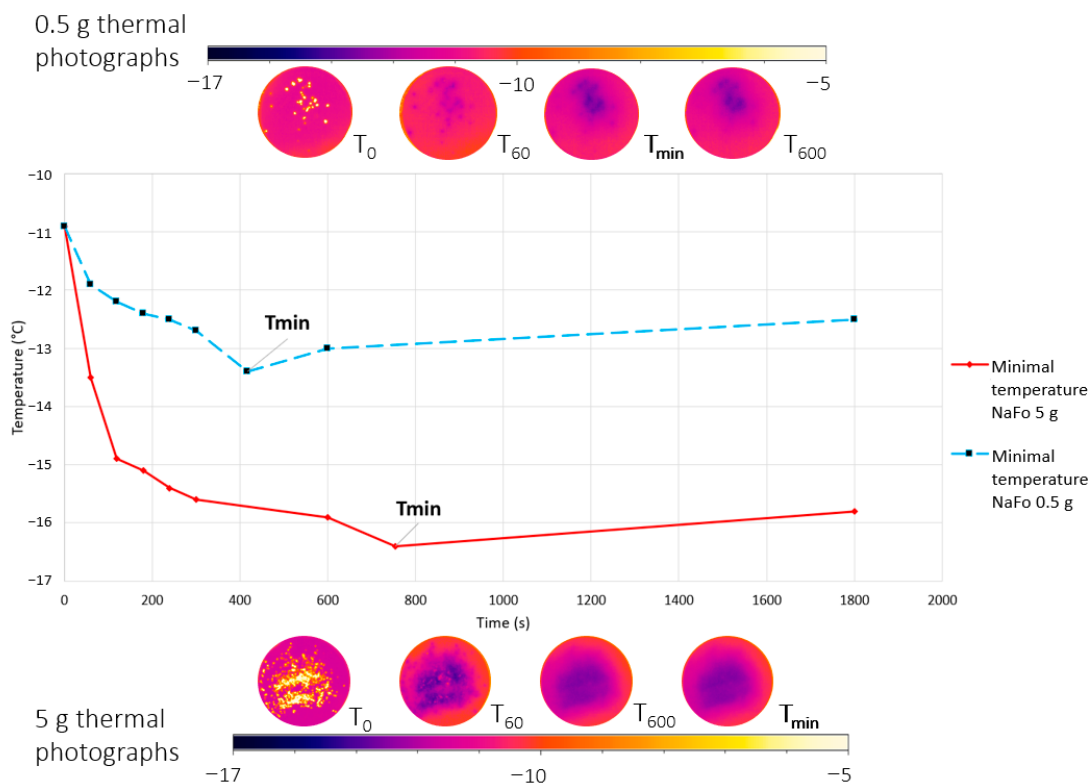


Figure 4-5: Minimum temperature of the sodium formate (NaFo) at the ice surface for the 0.5 g (top) and 5 g tests (bottom) and the corresponding thermal photographs of the ice surface at -10°C during the ice melting test at 0, 1, and 10 min, as well as at the min

We then analyzed temperatures from the thermal video to understand RDP behavior in the Petri dish (Figure 4-5). Temperatures during the melting were not uniform or constant across the surfaces, ranging from -10°C to just below -16°C (Figure 4-5). There was an initial instantaneous temperature drop, an endothermic reaction from the salt dissolution [33]. The reaction can be described as follows: solid RDP + ice and then solid RDP + ice + brine, and evolves quickly to a brine–ice interaction. The thermal images show that for 0.5 g of RDP, the grains were evenly distributed on the ice at 0 min. In contrast, for the 5 g samples, the grains were stacked. As the melting process continued, brine formed in both tests. We recorded a minimum temperature of -16°C for the 5 g test, which corresponds to the peak effectiveness of the product. This temperature was reached after approximately 12 min and then increased until our final observation at 30 min. The minimum temperature of

the 0.5 g RDP sample was approximately $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ at around 7 min. The minimum temperature was lower for the 5 g sample than for the 0.5 g samples, consistent with the difference in RDP amounts. The difference between the initial test temperature ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) and the lowest temperature observed on the thermal images was $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 0.5 g and $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 5 g. This temperature pattern can be explained by the endothermic dissolution of RDP and the melting ice related to poor thermal conduction and local convective effects in aqueous solutions below $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [34]. The product temperature followed the same trend, with lower temperatures corresponding to higher melting rates. Thus, the correlation between the two methods supports the conclusion that higher melting rates resulted in lower temperatures. However, using 5 g to evaluate melting capacity, as recommended by the standard, may produce false results by exaggerating the endothermal reaction and causing an excessive temperature decrease.

4.5.2 *Raman Spectroscopy*

We then focused strictly on the RDP–ice interface. For the 0.5 g samples, each RDP grain reacted independently. RDP grains are polyhedral-shaped, resulting in suboptimal contact with the ice. Therefore, the RDP grains were roughly crushed and molded into a semi-spherical measurement spoon to obtain 0.05 mL of RDP, representing a single grain. Raman spectroscopy specifically targeted the interface between the 0.05 mL of RDP and the ice surface. We collected 62 spectra. Each spectrum was smoothed to facilitate analysis, and the baseline was corrected to obtain spectra similar to those depicted in Figure 4-6. The corresponding peaks are indicated in the figure for informational purposes only.

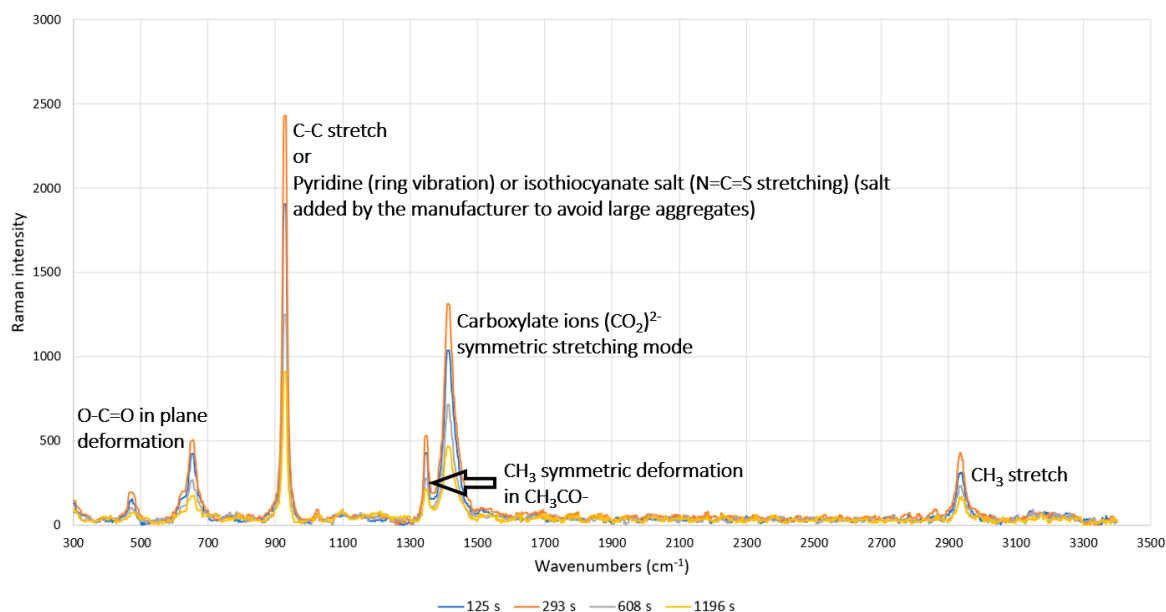


Figure 4-6: Raman spectra of the runway de-icing product obtained after 125, 293, 608, and 1196 s (laser at 785 nm, integration time of 20 s, average of four spectra), with the identification of the main Raman peaks.

These spectra show five significant peaks representing O-C=O in-plane deformation, C-C stretch, pyridine or isothiocyanate salt, CH₃ symmetric deformation in CH₃CO⁻, carboxylate ions, and CH₃ stretch. The most prominent peak is observed at 930 cm⁻¹, which likely corresponds to C-C stretch, typically found in NaFo [35]. It could also correspond to pyridine or isothiocyanate, used to prevent salt aggregation. Monitoring this peak would be useful during analysis, as the peak intensity relates to the concentration of the associated chemical bond. Continuous monitoring of this peak provides insight into the kinetics of ice melting and its variations. A weaker peak intensity indicates greater RDP dilution and increased ice occurrence. (Note that the omission of detailed peak frequency indexed to RDP chemical bonds is to maintain conciseness and clarity in the text.)

Thermal video (Figure 4-7) recorded how RDP temperatures evolved. The Raman probe and the aluminum foil are also visible in these images.

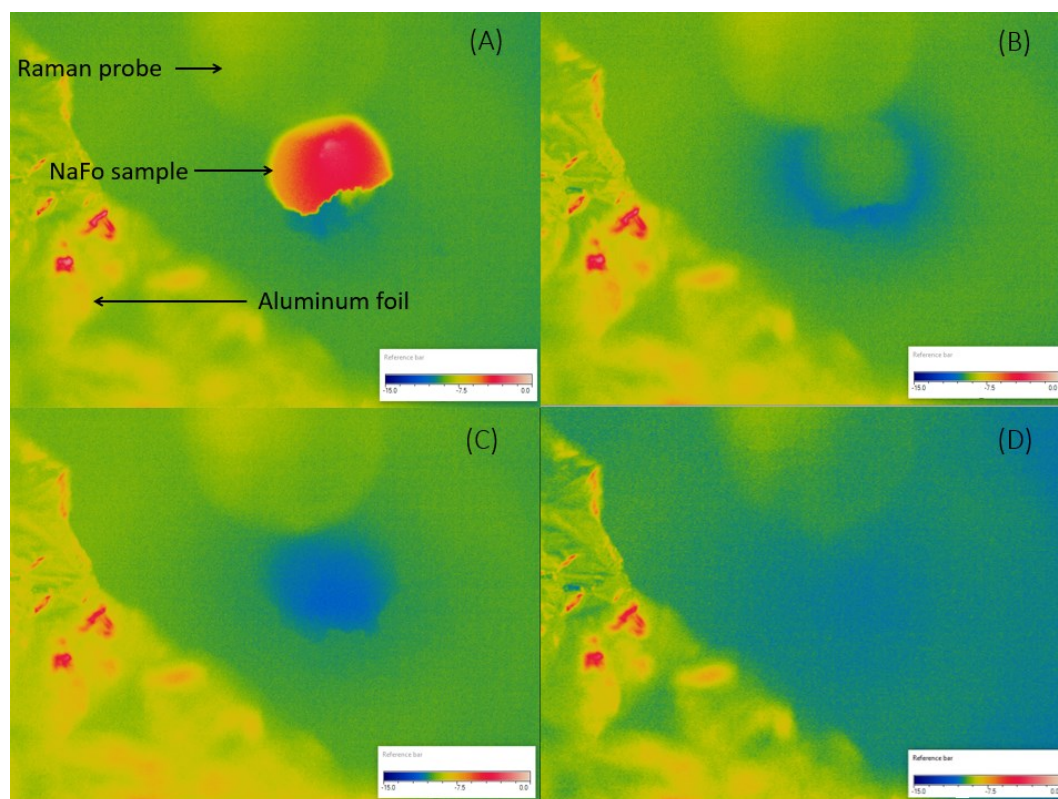


Figure 4-7: Thermal pictures during Raman spectroscopy of the RDP (sodium formate, NaFo) with a Raman probe at (A) 125 s, (B) 293 s, (C) 608 s, and (D) 1196 s.

The RDP begins to dissolve and melt the ice, resulting in a high temperature (Figure 4-7A). The top of the RDP dome is not yet in solution, indicating a highly effective product, as it gradually dissolves, leading to a strong melting reaction (Figure 4-7B). When fully dissolved, the product remains effective (Figure 4-7C). Finally, after almost 20 min (Figure 4-7D), the reaction between RDP and ice (or between brine and ice) is no longer thermally visible.

4.6 Coupled Thermographic and Spectral Analyses

The Raman spectra of the RDP or the brine contain peaks characteristic of the chemical bonds constituting them and their concentration. In this study, we focused on the peak at 930 cm^{-1} , directly related to RDP. We monitored its intensity over the course of the experiment to better understand its development. We therefore traced the evolution of the

minimum temperature reached by the RDP over time. To achieve this, however, we required a radiative correction of the thermal data by applying Equation 1 [36] for.

$$T_{measured}^4 = \varepsilon_{sample} * T_{sample}^4 + (1 - \varepsilon_{sample}) * T_{environment}^4, \quad [Eq\ 1]$$

where $T_{measured}$ corresponds to the corrected thermal value, ε_{sample} is the ice emissivity (0.97) [37], T_{sample} is the measured temperature of the sample during the test, and $T_{environment}$ is the mirror temperature during the test.

The top curve in Figure 4-8(A) shows the evolution of the significant peak of the RDP at 930 cm^{-1} over time, and the bottom curve presents the evolution of the minimum temperature of the RDP over time.

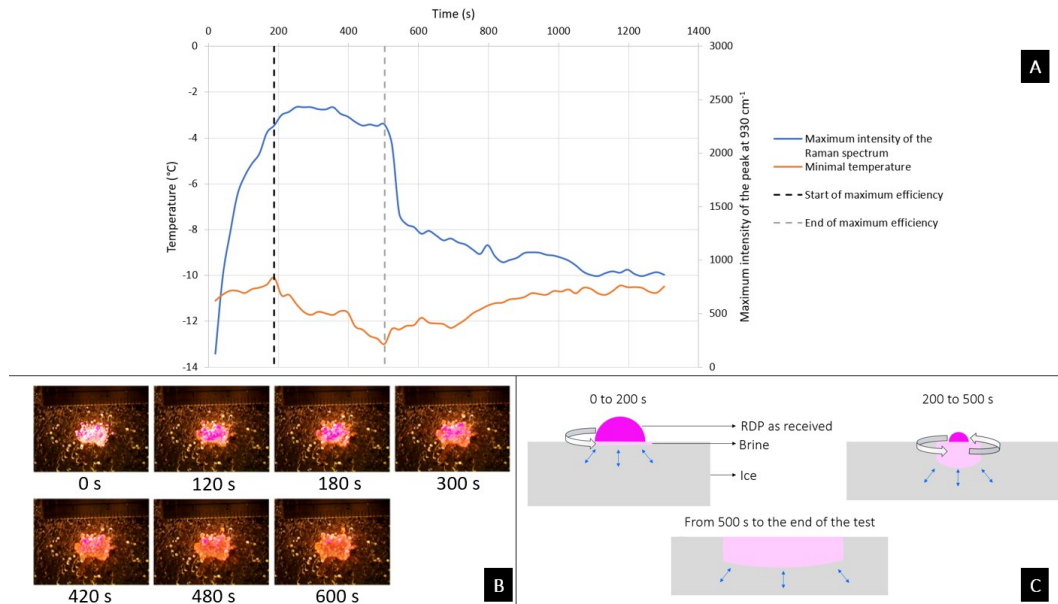


Figure 4-8: Coupled thermographic and spectral analyses; (A) maximum intensity of a Raman peak at 930 cm^{-1} and minimum temperature during the test with 0.05 mL of the RDP sodium formate (NaFo) at $-10\text{ }^{\circ}C$; (B) RDP with rhodamine B melting on ice at $-10\text{ }^{\circ}C$; and (C) a 2D representation of the RDP de-icing phenomenon.

Inflections in both Raman intensity and temperature occurred simultaneously. Between 0 and 188 s, the temperature and Raman intensity increased as ice melted and concentrated brine formed. Between 188 and 503 s, the 930 cm^{-1} peak intensity plateaued, whereas the temperature slowly decreased because of a locally saturated brine and latent

dissolution heat. After 503 s, the Raman peak of the RDP reached maximum efficacy, coinciding with the minimum temperature. All available RDP was used, allowing for additional ice melting and diluting of the brine and causing a decrease in Raman peak intensity. Subsequently, the efficiency decreased and the minimum temperature rose, although the product remained effective throughout the test.

Note that the minimum temperature rises at the start of this test, whereas it falls in the ice melting test (Figure 4-5). This can be explained by the camera angle and the number of grains. In the ice melting test, the camera is positioned above the petri dish and there are several grains present in the test. As a result, the minimum temperature observed can be a very precise point in a fairly large area. In the Raman spectrometer test, the camera is tilted to observe the interface between the RDP and the ice, and focuses on a single grain, so that the minimum temperature observed is more precise and the measurement area much smaller.

To visually understand this phenomenon without spectroscopic support, we ran an observational test at -10°C . Solid RDP powder was mixed with rhodamine B, which is used in ice penetration [21] and ice undercutting [22] tests and does not alter RDP properties. Unfortunately, compaction of RDP was not possible when mixed with rhodamine B; however, this did not affect the visual observations made to understand the phenomenon.

The RDP started to create brine 3 min after being placed on the ice surface (displayed as a sharper pink color; Figure 4-8B). This intense melting state continued until approximately 8 min and then gradually diminished (turning faded pink). From 0 to 200 s, the RDP produced an exothermic reaction and melted to form brine (Figure 4-8C), a similar pattern to that observed previously [12]. Between 200 and 500 s, heat exchange occurred between the RDP and the ice, resulting in the dissolution of the RDP. From 500 s until the end of the test, only brine remained, which had limited heat exchange with the ice.

4.7 Discussion

Our approach involved continuously monitoring ice melt using different analytical techniques to provide specific visual, thermal, and chemical information. The collected information is consistent and allows us to quantify the effectiveness and kinetics of applied RDP, data that are valuable for product developers. Our tests also provide information on the concentration of RDP brine, which, if too diluted and, depending on the temperature, may cause the system to freeze again, posing a skidding risk to air-craft. The use of a portable Raman spectrometer would help by taking data directly from the runway to be more effective in the RDP analysis with a lot of parameters as wind.

The integration of advanced technological tools such as thermal cameras, Raman spectrometry, and visual cameras has great potential for enhancing the efficiency and safety of winter runway operations. When combined with artificial intelligence (AI) programs, these tools significantly improve decision-making processes [38]. By applying data-mining techniques to analyze data from thermal cameras, Raman spectrometry, and visual cameras, a comprehensive understanding of RDP behavior in dynamic environments can be achieved. Neural networks can process this data along with in-puts such as air and ground temperatures, temperature variations, and precipitation intensity (e.g., freezing rain or snow). Operators can then make well-informed decisions regarding the optimal timing of RDP replacement. Moreover, AI-driven systems can forecast runway conditions and slippage probabilities [39], offering valuable support to runway operations teams. This sophisticated approach represents a notable advancement in runway management, particularly considering the rapid changes in weather conditions that require prompt and accurate decision-making [40]. By leveraging AI and integrating data-mining techniques, runway operations can be

carried out with greater precision, efficiency, and safety to ensure smooth air traffic flow, even in challenging winter environments.

4.8 Conclusions

We used thermal and chemical analyses to comprehensively characterize the interaction between runway de-icing products (RDP) and ice during ice melting tests. Existing standard practice results in excessive product usage. By applying Montréal Airports' current application concentration, we observed that each salt grain reacts individually with the ice. Correlating results obtained from infrared thermography and Raman spectroscopy provided a better understanding of the dynamic exchange between RDP and ice, shedding light on ice melting kinetics and variations. Notably, the intensity of observed peaks in Raman spectroscopy decreased as RDP was diluted, indicating increased ice melting.

This spectroscopic approach allowed real-time measurements directly on the runway, eliminating the need for sample collection and preparation typically associated with other methods like FTIR or DSC. Visual tests confirmed the observed reactions within a specific time frame, demonstrating the effectiveness of our approach.

These insights significantly contribute to our understanding of RDP–ice interactions in laboratory environment which can be transpose in natural airport conditions. Future research should use airport traffic simulator to study the mechanical activation of solid RDP since the standard ice melting test omits this parameter, simulating interactions with spreader truck wheels and passing aircraft. Such simulations will help us understand how traffic accelerates the dissolution process, thereby offering ideas on how to further improve the efficacy of the applied de-icing product, but may

also enable us to look at the anti-icing properties of the products used following different winter contaminations. Additionally, further exploration of Raman spectroscopy could provide deeper insights into the molecular dynamics of RDP–ice interactions, aiding the development of more sophisticated AI-driven tools for improved runway de-icing strategies.

4.9 Acknowledgement

We acknowledge the support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Anti-icing Materials International Laboratory (AMIL). This research was conducted with the support of the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Québec (CRIAQ) and the Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec, and the support provided by Montréal Airports, WPred, and Nachur Alpine Solutions.

4.10 References

- [1] A. Klein-Paste, "Airplane braking friction on dry snow, wet snow or slush contaminated runways," *Cold Regions Science and Technology*, 2017/02/20/ 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.02.004>.
- [2] Boeing. "Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents". https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf (Consulté le 2022-01-19).
- [3] EASA, "Annual Safety Review," 2020. [En ligne]. Disponible: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/annual-safety-review-2020>
- [4] L. KORNSTAEt et R. Lignee, "Operational Landing Distances, A new standard for in-flight landing distance assessment," *Safety*, no. 1/5, 2010.
- [5] T. S. B. o. Canada. "Runway overruns". <https://www.tsb.gc.ca/eng/surveillance-watchlist/aviation/2022/air-02.html>
- [6] J. Procházka et M. Kameník, "Contaminated Runway Operations-Adverse weather," *MAD-Magazine of Aviation Development*, vol. 1, no. 4, pp. 3-7, 2013.
- [7] Y. Niu *et al.*, "Techniques and Methods for Runway Friction Measurement: A Review of State-of-the-Art," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021.

- [8] R. Canada, "Un avion fait une sortie de piste à l'aéroport de Bagotville," 2019. [En ligne]. Disponible: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1151839/incident-voyageurs-bagotville-aeroport-urgence>
- [9] G. Comfort, "Wet Runway Friction: Literature and Information Review," 2001.
- [10] J. D. Brassard, C. Laforte, F. Guerin, et C. Blackburn, "Icephobicity: Definition and measurement regarding atmospheric icing," in *Advances in Polymer Science* vol. 284, 2019, pp. 123-143. doi: 10.1007/12_2017_36.
- [11] H. Lissner, M. Wehrer, M. Jartun, et K. U. Totsche, "Degradation of deicing chemicals affects the natural redox system in airfield soils," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 21, no. 15, pp. 9036-9053, 2014/08/01 2014. doi: 10.1007/s11356-013-2096-9.
- [12] C. Charpentier, J.-D. Brassard, G. Momen, et J. Perron, "Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization," *Cold Regions Science and Technology*, p. 103932, 2023.
- [13] J.-D. Brassard, A. Beaulieu, M. M. Tremblay, et G. Momen, "Assessment of Runway Surface Conditions by British Pendulum Testing under the Global Reporting Format Winter Conditions," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, p. 9646, 2022.
- [14] M. Marchetti, M. Fois, L. Ibos, J. Dumoulin, P. Bourson, et J.-M. Piau, "Comparative study in the identification of liquid to solid transition phase with DSC, Raman spectra analysis and chemiometrics methods applied to phase change materials used for icing-delay in civil engineering infrastructures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 49-61, 2018.
- [15] Cryotech, "LC17 Liquid Runway Deicer AMS 1435," 2015.
- [16] Cryotech, "QS50 Solid Deicer AMS 1431 Certified," 2015.
- [17] N. T. Mining, "The science of De-icing," 2021.
- [18] A. d. Paris, "Plan d'action en saison hivernale," 2021.
- [19] (2021). *Advisory Circular (AC) No. 300-019: Global Reporting Format (GRF) for Runway Surface Conditions*. doi:
- [20] *AS6170 Ice Melting Test Method for AMSI431 and AMSI435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [21] *AS6211 Ice Penetration Test Method for AMSI431 and AMSI435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [22] *AS6172 Ice Undercutting Test Method for AMSI431 and AMSI435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [23] S. Kulyakthin et A. Klein-Paste, "Can calorimetry be used to measure the melting rate of deicers?," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 181, p. 103170, 2021.
- [24] K. Nilssen, A. Klein-Paste, J. Wählin, et M. A. Delapaz, "Use of calorimetry to measure ice-melting capacity," *Transportation research record*, vol. 2613, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [25] K. Nilssen, A. Klein-Paste, et J. Wählin, "The Effect of Additives on the Low Temperature Ice-Melting Capacity of NaCl," *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 12, pp. 158-166, 2018. doi: 10.1177/0361198118767412.
- [26] A. Ružinskas, M. Bulevičius, et H. Sivilevičius, "Laboratory investigation and efficiency of deicing materials used in road maintenance," *Transport*, vol. 31, no. 2, pp. 147-155, 2016.
- [27] B. Gerbino-Bevins, C. Y. Tuan, et M. Mattison, "Evaluation of ice-melting capacities of deicing chemicals," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 40, no. 6, pp. 952-960, 2012.
- [28] A. Klein-Paste et J. Potapova, "Thermal aspects of melting ice with deicer chemicals," *Transportation Research Record*, vol. 2440, no. 1, pp. 69-75, 2014.
- [29] H. U. Sajid, D. L. Naik, et R. Kiran, "Improving the ice-melting capacity of traditional deicers," *Construction and Building Materials*, vol. 271, p. 121527, 2021.

- [30] M. Riehm, T. Gustavsson, J. Bogren, et P.-E. Jansson, "Ice formation detection on road surfaces using infrared thermometry," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 83, pp. 71-76, 2012.
- [31] G. Simon, "Spectroscopies vibrationnelles," Editions des archives contemporaines, 2020.
- [32] V. P. Danilova, E. A. Frolova, et D. F. Kondakova, "Phase Equilibria in the Sodium-Acetate–Sodium-Formate–Water System at Temperatures of from 0 to –22°C and the Anti-icing Properties of Compositions Based on These Salts," 2017.
- [33] J. Wåhlin et A. Klein-Paste, "The effect of mass diffusion on the rate of chemical ice melting using aqueous solutions," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 139, pp. 11-21, 2017. doi: 10.1016/j.coldregions.2017.04.001.
- [34] J. Wåhlin et A. Klein-Paste, "Ice Melting Rates at– 5° C,– 10° C, and– 15° C Using Chloride Solutions: a Physical Explanation," 2018.
- [35] W. W. Rudolph et G. Irmer, "Raman spectroscopic studies and DFT calculations on NaCH₃CO₂ and NaCD₃CO₂ solutions in water and heavy water," *RSC Advances*, vol. 5, no. 28, pp. 21897-21908, 2015.
- [36] M. Marchetti, M. Mouton, S. Ludwig, L. Ibos, V. Feuillet, et J. Dumoulin, "Implementation of an infrared camera for road thermal mapping," Dans *Proceedings of the 2010 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2010: QIRT Council.
- [37] W. L. Wolfe et W. L. Wolfe, *Handbook of military infrared technology*: Office of Naval Research, Department of the Navy Washington, DC, 1965.
- [38] H.-C. Jen *et al.*, "A discrete-event simulation tool for airport deicing activities: Dallas-Fort Worth International Airport," *Simulation*, vol. 98, no. 12, pp. 1097-1114, 2022.
- [39] B. Chen, C. Zhou, Y. Liu, et J. Liu, "Correlation analysis of runway icing parameters and improved PSO-LSSVM icing prediction," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 193, p. 103415, 2022.
- [40] A. D. Midtfjord, R. De Bin, et A. B. Huseby, "A decision support system for safer airplane landings: Predicting runway conditions using XGBoost and explainable AI," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 199, p. 103556, 2022.

CHAPITRE 5

SIMULATEUR DE TRAFIC AÉROPORTUAIRE POUR LES PRODUITS HIVERNAUX ANTIGIVRE DES PISTES : PERFORMANCE CHIMIQUE PAR ACTIVATION MÉCANIQUE

Avant-propos

État de l'acceptation : Déposé, en révision

Journal : Results in Engineering

Titre en français : Simulateur de trafic aéroportuaire pour les produits
hivernaux antigivre des pistes : performance chimique par activation mécanique

5.1 Résumé

Les produits chimiques utilisés dans les aéroports sont essentiels pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic aérien pendant l'hiver. Cependant, peu d'informations fiables sont disponibles concernant leur performance et leur utilisation optimale. Il est donc essentiel de caractériser correctement ces produits et de définir leurs taux d'application optimaux en fonction des différents paramètres des précipitations (type, intensité, température) et d'autres paramètres météorologiques (force du vent, niveau d'humidité, etc.), actuels et à venir. La contribution mécanique du trafic est souvent citée comme une contribution significative à leur efficacité. L'activation mécanique joue un rôle essentiel dans l'efficacité du produit de dégivrage des pistes (RDP) en tant qu'agent antigivrant. Par exemple, si une saleuse assure une activation mécanique constante du produit, cela peut permettre aux aéroports d'éviter d'épandre à nouveau du RDP et de réduire le risque de saturation des pistes, ce qui permet d'économiser de l'argent et de prolonger la durée d'action du produit. C'est pourquoi le développement d'un simulateur de trafic aéroportuaire (ATS) a été entrepris afin de

reproduire en laboratoire les conditions réelles des pistes d'aéroport et de leur environnement. Il n'y aucune référence bibliographique sur le sujet. Les exploitants aéroportuaires reconnaissent cependant le bénéfice de l'activation mécanique mais n'ont pas pris la peine d'en rechercher les paramètres optimaux ni d'en quantifier les effets. L'originalité du travail présenté repose sur la jonction entre ces observations de terrain et les phénomènes physico-chimiques qui y sont associés. L'évaluation de l'efficacité de l'antigivrage fournit aux équipes de maintenance des aéroports des outils pour optimiser les coûts d'application du produit tout en maintenant une sécurité maximale. L'échec de ces tests est déterminé par la réaction exothermique causée par la formation de glace sur la surface circulée, identifiée à l'aide d'une caméra thermique. Le temps d'efficacité du produit augmente au fur et à mesure que la température augmente et que l'intensité des précipitations diminue. Cette relation souligne l'importance de tenir compte des conditions météorologiques pour déterminer la stratégie d'application optimale du RDP. En outre, le broyage par l'ATS des contaminants de surface d'une RDP a démontré qu'une activation mécanique plus fréquente améliore de manière significative l'efficacité du produit en tant qu'agent antigivre. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet servent de base à l'élaboration d'un cadre analytique plus large, grâce à la méthodologie robuste employée, qui peut être étendue à d'autres conditions météorologiques.

Airport Traffic Simulator for Anti-icing Runway Winter Products: Chemical Performance by Mechanical Activation

Claire Charpentier ^{1,*}, Jean-Denis Brassard ¹, Mario Marchetti ² and Gelareh

Momen ¹

¹Anti-Icing Materials International Laboratory, Université du Québec à
Chicoutimi,

Saguenay, QC G7H 2B1, Canada; jnbrassa@uqac.ca (J.-D.B.);

gmomen@uqac.ca (G.M.)

²Unité Mixte de Recherche-Matériaux pour une Construction Durable (UMR MCD),
Université Gustave
Eiffel-Cerema, Cedex 2, F-77454 Marne-la-Vallée, France; mario.marchetti@univ-eiffel.fr

* Correspondence: claire.charpentier1@uqac.

Keywords: Airport; Anti-icing; Runway deicing product; Airport Traffic Simulator;
Winter maintenance

5.2 Abstract

The chemicals products used in airports are essential to keep air traffic flowing safely and smoothly during winter time. However, there is limited reliable information available regarding both their performance and optimal use. It is therefore essential to properly characterize these products and to define their optimum application rates according to the various precipitation parameters (type, intensity, temperature) and other meteorological ones (wind strength, humidity level, etc.), either current and those to come. The mechanical contribution of traffic is often cited as a significant contribution on their efficiency. Mechanical activation plays a critical role in the effectiveness of Runway De-icing Product

(RDP) as an anti-icing agent. For instance, if a spreader provides consistent mechanical activation of the product, this can enable airports to avoid spreading again RDP and reducing the risk of runway saturation, saving money and extending the product's effective time. Thus, the development of an Airport Traffic Simulator (ATS) was undertaken to replicate real-world airport runway conditions and their surrounding environment within a laboratory setting. The evaluation of anti-icing efficiency provides airport maintenance teams with tools to optimize product application costs while maintaining maximum safety. The failure of these tests is determined by the exothermal reaction caused by the ice formation on the circulated surface, which is identified using a thermal camera. The product's efficiency time increases as the temperature rises and the precipitation intensity decreases. This relationship underscores the importance of considering weather conditions when determining the optimal application strategy for RDP. In addition, the ATS crushing of surface contaminant of a RDP has demonstrated that a more frequent mechanical activation significantly enhances the product efficiency as an anti-icing agent. The results obtained in this project serve as a thriving basis for developing a broader analytical framework, thanks to the robust methodology employed, which can be extended to other weather conditions.

5.3 Introduction

Inclement and changing winter weather conditions are a major issue in the aerospace industry. Contamination of both aircraft and runways by snow or ice can have critical consequences for air traffic [1], in terms of user safety (passengers and crew members), of environmental impact of chemical usage and of financial implications due to traffic delays or stoppages [2, 3]. It is therefore essential to develop innovative solutions and strategies to enhance safety, minimize environmental incidence, and reduce operational costs in winter

conditions.

There are various available tools to airports to remove contaminants from runways [4]:

- Firstly, mechanical methods such as plows and brushes are used to efficiently remove snow from the runway, according to a process established by the airport [5]. However, they are limited when it comes to ice, as shovels are not always capable of unsticking it from the runway surface.

Consequently, the use of chemical agents becomes crucial. Chemicals weaken its structure and bonding with the concrete / asphalt surface, facilitating its removal [6]. They also provide preventive protection against freezing and frozen precipitations maintaining safe operational condition and ensuring the continuity of air traffic.

The literature has shown that the runway products currently in use are derived from five main molecules. These include aqueous solutions of potassium acetate (KAC), potassium formate (KFO), and glycerol-based hybrids, all in liquid form, as well as solid de-icing agents such as sodium formate (NAFO), sodium acetate (NAAC), and a 50/50 w/w blend of the two [7]. Historically, products based on chloride and urea were used. However, it has been shown that urea, despite its low purchase cost, is harmful to the environment, since its biodegradation into water generates ammonia, which is highly toxic to nearby flora and fauna [8]. Similarly, chloride salts (sodium, magnesium or calcium chloride), used mainly on roads, are unsuitable for airport runways because of its strong corrosion effect for the steel and aluminum alloys used in aircrafts [8]. Thus, 86% of airports in North America use potassium acetate, 41% use sodium formate, and only 14% use sodium acetate [9].

In literature, little research has been carried out on pre-wetted products consisting of a solid Runway Deicing Products (RDP) on which a liquid RDP is applied [10, 11]. Moreover, these products are tested using a method that does not take into account the importance of the contact surface [12]. It therefore seems important to adopt an experimental protocol that appropriately addresses this issue. Indeed, the use of a method that allows solid products to be used as they are at airports, i.e. pre-wetted with liquid RDP, seems essential to reach a correct interpretation of the results.

Table 5-1 [7] shows the characteristics of the main product used for de-icing products. Solids stand out as being more robust than RDPs in solution known as liquid. However, liquid RDPs act immediately, whereas solids require prior handling and dissolution into water. It can be seen that solid RDP is longer-acting than liquid, while liquid RDP is quick-acting. A combination of the two (prewet) would give a fast-acting, long-lasting RDP, which is the best possible combination for airports.

Table 5-1 : Summary of de-icing product characteristics [7]

	Liquid (in solution)	Solid	Pre-wetted (Solid + Liquid)
Adhesion to concrete /asphalt surfaces	Easily adheres	Adhesion varies with particle size	Greater adhesion than solids alone
Efficiency	Acts immediately	Slow acting (Need moisture and mechanical activation)	Synergistic effect. Act faster than solid alone but slower than RDPs in solution alone
Lasting time	Protect for a lower time	Long-lasting effect	Long-lasting effect

RDPs are essential for maintaining safe airport operations during winter conditions, and they come in both solid and liquid forms [13, 14]. These products are primarily used as freezing point depressants, applied directly to runways and taxiways to prevent ice formation

and facilitate mechanical removal of snow and ice. The current RDPs are chosen for their deicing performance and their relatively lower environmental impact [14]. The deicing performance of RDPs is evaluated through various standardized tests that measure ice melting capacity [15], ice penetration [16], and ice undercutting [17]. These tests are designed to simulate real-world conditions and assess the rapidity and endurance of the deicing products [1].

The capability of RDPs to melt ice is meticulously assessed through a variety of methodologies, each designed with the specific aim of accurately quantifying the effectiveness of these products under carefully controlled conditions representative of real-world scenarios. One widely adopted approach in this evaluation process is the ice melting capacity test, which quantitatively measures the mass of ice that a particular deicing product is capable of melting within a one-minute timeframe, thereby providing valuable insights into the speed and efficiency with which the product operates in melting ice [1, 18]. This test is typically carried out in accordance with established standards, such as SAE AS6170, where a predetermined quantity of deicer is methodically applied onto an ice sample, and the subsequent amount of ice that has melted is recorded and analyzed over specified time intervals, which may include 5, 10, and 30 minutes to ensure a thorough assessment [15]. The procedure for conducting this test involves placing a Petri dish containing a sample of ice within a cold room environment, applying the deicing agent to the ice, and then meticulously measuring the remaining ice after a designated period has elapsed to accurately calculate the total amount of ice that has been melted.

In addition to these traditional methods, calorimetry has also gained attention as a viable technique for measuring the ice-melting capacity of various deicing products. This approach employs a calorimeter to monitor the thermal changes that occur throughout the

melting process, thereby facilitating a more precise quantification of the deicer's ice-melting capabilities without necessitating the physical separation of the brine generated from the melted ice from the residual ice [19, 20]. The calorimeter method has been demonstrated to enhance the accuracy of measurements when compared to conventional tests, as it effectively eliminates the potential complications associated with manual handling and mechanical separation, both of which can inadvertently introduce errors into the results [19, 20]. Moreover, the innovative application of infrared thermography has been suggested as a means to evaluate the anti-icing performance of runway deicers, offering both visual and quantitative assessments of their effectiveness in preventing the formation of ice under simulated environmental conditions [21]. Collectively, these diverse methodologies contribute to a thorough and comprehensive evaluation of RDPs, enabling a detailed assessment not only of the immediate ice melting capacity but also of the longer-term anti-icing performance, both of which are absolutely critical for ensuring safe and effective runway operations in challenging winter conditions [11].

Ice penetration test has been recently used to characterize RDP. Recent studies have been conducted to create a dynamic ice penetration model to deepen the understanding of the product [22]. This research centers on developing a dynamic ice penetration model to advance the understanding of runway de-icing product performance. Through ice melting, undercutting, and penetration tests conducted in compliance with aerospace standards, the study seeks to enhance the efficiency of de-icing products, thereby reducing operational costs and mitigating environmental impacts. The proposed numerical model, validated through rigorous laboratory experiments, reveals that product effectiveness follows a distinct trend over time. Additionally, the research identifies the predominant heat transfer mechanism and introduces a simplified modeling approach that accurately predicts ice

penetration rates. These findings provide valuable insights for optimizing de-icing strategies in the aviation industry. Beyond improving de-icing technology, this study establishes a robust foundation for future research aimed at enhancing safety, efficiency, and sustainability in winter operations.

Recent advancements in testing methodologies, such as the use of infrared thermography, have improved the sensitivity and accuracy of these evaluations, allowing for better classification and optimization of RDPs [1, 18, 22].

On the other hand, Ice Penetration (IP) and artificial intelligence have been used to obtaining more efficient RDP [23]. This research aims to tackle environmental challenges associated with deicing agents by leveraging machine learning to improve their efficiency. The study explores the ice-melting mechanisms of various salts and organic solvents, with a particular focus on understanding ice penetration capacity (IPC) as a critical factor for developing eco-friendly deicers. Using advanced analytical tools such as extreme gradient boosting (XGBoost) and Shapley additive explanation (SHAP), the research identifies the primary mechanisms driving ice melting. It highlights the synergistic benefits of combining organic solvents and salts in deicer formulations. The findings propose a promising solution: a propylene glycol (PG) and sodium formate mixture, which offers superior IPC and a significantly lower environmental impact compared to conventional commercial deicers. This work underscores a clear pathway toward more sustainable and efficient deicing practices.

These chemicals used in airports are essential to keep air traffic flowing smoothly. However, there is limited accurate information available about their performance, optimal application rates, and environmental effects. It is therefore essential to conduct in-depth

characterization of these products to optimize their use under varying meteorological conditions. Parameters such as the type and the intensity of precipitation, air temperature, wind speed, and humidity levels must all be considered to determine their effectiveness. Standards do exist to establish minimum requirements for aircraft de-icing and anti-icing to ensure global safety for all individuals involved (airport staff, airline personnel, and passengers) [24]. However, there are currently no lower limits concerning the de-icing and anti-icing performance for airport runways chemical products. This regulatory gap presents an opportunity to address runway safety holistically while considering environmental sustainability and economic performance.

Despite these advancements, there is still a need for further research to refine these methods and ensure they accurately reflect field conditions, as current laboratory tests often use higher application rates than those typically employed in practice [18, 25]. Additionally, the environmental impact of RDPs remains a concern, as their application can affect surrounding ecosystems, necessitating ongoing development of more sustainable formulations [25]. Overall, the main characteristics of current RDPs include their chemical composition, performance under standardized testing conditions, and the ongoing efforts to balance effectiveness with environmental sustainability. Future studies should focus on integrating real-world data and long-term field trials to enhance the reliability of RDP evaluations, ultimately leading to more informed decision-making in airport practices [18].

In addition to the advancements in testing methodologies, there is an increasing focus on developing more environment-friendly RDP formulations that maintain efficacy while reducing ecological risks [26]. Recent research has explored alternative materials such as bio-based deicers and less corrosive chemical compounds that can effectively melt ice

without causing significant nor critical harm to surrounding ecosystems or infrastructure [26]. The transition towards these sustainable options not only addresses environmental concerns but also aligns with regulatory pressures aimed at minimizing harmful runoff from airport operations [26]. Furthermore, integrating predictive modeling techniques could enhance the understanding of how different RDPs perform under varying temperature conditions and application rates, ultimately leading to more tailored and efficient usage strategies that optimize both safety and environmental stewardship in winter maintenance practices [22]. By adopting these innovative approaches, airports can significantly reduce their ecological footprint while ensuring safe and reliable operations during adverse weather conditions.

A representative standardized method is therefore needed to evaluate the performance of RDP in anti-icing mode in the laboratory. To assist in the development of a comprehensive standard defining optimum spreading rates for airport runways, this study focused on the application of pre-wetted solid products. A preliminary test was conducted to observe and to analyse the interaction between chemical products and a freezing drizzle [25]. A concrete block (representative of a runway surface) was treated with a defined quantity of product (solid and liquid), and was then exposed to a freezing drizzle precipitation. The results revealed that solid products exhibit efficiency limitations under these conditions. Indeed, after discussions with various airports operators and manufacturers confirmed that solid products require mechanical activation, such as crushing, to significantly enhance their performance in protecting critical runway surfaces.

It therefore seems critical to experimentally include and to replicate the mechanical activation of products as occurs in real airports operations, to properly and accurately evaluate their performance. Mechanical activation involves crushing the solid product with

the wheel of a vehicle, simulating airport traffic conditions (Figure 5-1).

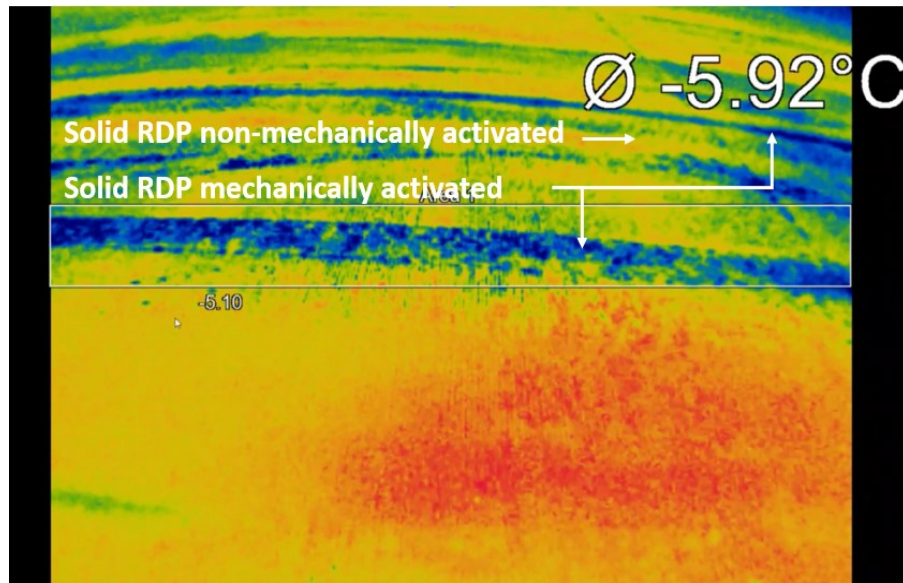


Figure 5-1: Thermal image of a test campaign on a Montreal airport runway to evaluate the benefit of a mechanical activation of a RDP. Blue pixels are colder than red pixels.

As can be seen in Figure 5-1, a drop of temperature is observed in the passage of the wheels. The observed endothermic reaction due to the dissolution of the salt into available water indicates that the product has been activated, making it possible to protect the runway more effectively.

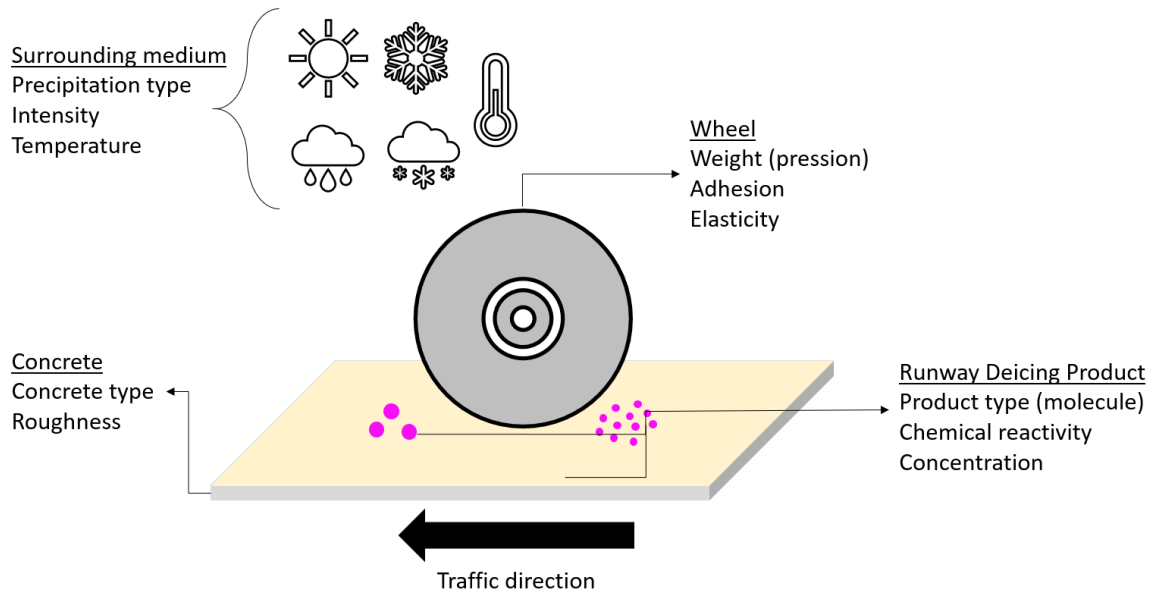


Figure 5-2: Diagram of the parameters involved in an RDP being mechanically activated by a wheel on an airport runway

In Figure 5-2, we can see several parameters involved in an RDP being mechanically activated by a wheel. Indeed, the surrounding medium, the wheel, the RDP and the concrete are involved in this phenomenon. In this study, we worked with airport concrete sample to be sure to have the same parameters as the field one. Also, we worked with known environmental parameters and RDP. We decided to work with a wheel without grooves, to ensure uniform contact with the surface, as grooves create areas where the deicing product is not effectively crushed.

To address this need, the development of an Airport Traffic Simulator (ATS) was undertaken. This innovative tool reproduces airport runway conditions under controlled laboratory settings, allowing the evaluation of solid deicing and anti-icing products.

The ATS enables the testing of products under various types of winter precipitation while controlling critical parameters such as temperature, precipitation intensity, wind strength, and surface characteristics. This study focused on freezing drizzle at different temperatures and intensities, with particular emphasis on the application of pre-wetted solid

products on a simulated runway surface. These parameters were selected based on the SAE ARP5485B standard [27], which governs aircraft deicing and anti-icing protocols. By adopting this methodology, the study offers a pathway to improve the understanding and the application of deicing products for airport runways, ensuring safer, more cost-effective, and environment-friendly winter operations.

5.4 Methodology

As indicated before, a mechanical activation of the chemicals applied on runways and taxiways is often indicated by airports operators as an improvement of their efficiency. Thus, the design of the Airport Traffic Simulator (ATS) enables us to reproduce both the crushing and the mixing of solid Runway Deicing Product (RDP) necessary for its activation, as also demonstrated during test campaigns on Montreal airport runways in winter 2023 and 2022.

The ATS consists of a steel structure with surrounding protection in which a moving table with a translation maximum speed of around 0.10 km/h is installed and upon which a wheel with a fixed rotational axis could move, all mounted on a rigid steel frame painted to protect it from corrosion. A scheme of the apparatus and a photo are shown in Figure 5-3[25]. A dedicated space is provided for positioning the test sample at the same level of the surface. The wheel incorporated into the assembly, designed to rotate freely as the table/sample moves back and forth. This wheel is solid and smooth, without grooves, to ensure uniform contact with the surface.

To replicate real-world conditions, two compressed-air cylinders are strategically positioned on either side of the wheel. These cylinders apply a controlled load perpendicular

to the surface being tested. This applied load can be adjusted up to 2200 kg, offering flexibility to simulate various operational scenarios. For the specific series of tests presented here, the load was set at its maximum value, replicating the pressure exerted by the passage of a spreader truck over the sample.

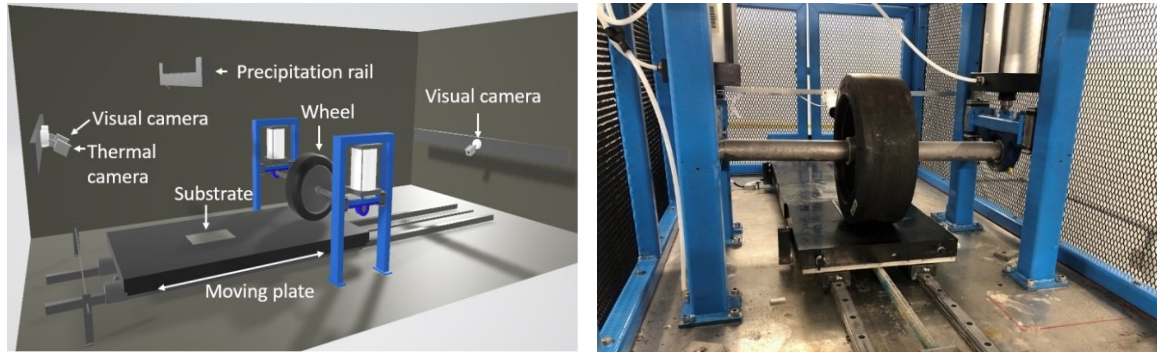


Figure 5-3: Diagram (a) and photograph (b) of the Airport Traffic Simulator (ATS) [25]

Two cameras are positioned at opposite ends of the assembly (Figure 5-3a) to visually validate the experiment, ensuring a comprehensive view of the test process. Additionally, a thermal camera is employed to monitor and record the temperature distribution across the tested surface during the test, providing critical data for the analysis.

The ATS device is located within a climatic chamber maintained at controlled temperature, operating under a precipitation rail with a specialized nozzle designed to simulate freezing drizzle conditions. This setup is specifically tailored for anti-icing studies, enabling precise control and reproducibility.

The testing conditions were established based on the experimental protocols detailed in the Global Report Format (GRF) for aircraft anti-icing products [27]. These tests were conducted out at varying precipitation intensities (5, 8.5 and 13 g/dm²/h) and ambient winter temperatures (-2°C, -5°C and -10°C) to assess the effectiveness of the products under diverse conditions. The temperature of the precipitation in the chamber is monitored at 4°C to ensure that the nozzle does not freeze and that it freezes on contact with a surface. Prior to testing,

concrete substrates were preconditioned in the climatic chamber to reach the desired test temperature during a minimum of 8 hours, ensuring consistency and reliability in the results.

Subsequently, 0.5 g of solid RDP, specifically sodium formate (NAFO) (Figure 5-4 (a)) was carefully deposited onto the surface of the concrete sample. In addition, 0.35 g of potassium acetate (KAC) (Figure 5-4 (b)) was applied by spraying, replicating the application rates commonly observed in airports operations based on oral exchanges with airports. Since the grains are randomly distributed in space, there is no choice regarding the grains selected, as is the case in the field. The solid is therefore simply weighed to be representative of the reality in the field [18].



(a)



(b)

Figure 5-4: Images of the concrete sample with sodium formate (NAFO) applied (a) and potassium acetate (KAC) sprayed (b) on its surface prior to mechanical activation by the ATS wheel.

Finally, the sample was subjected to the ATS with precipitation until product failure occurred. This failure condition is defined by the formation of ice which is detected through an exothermal reaction (sudden temperature increase) detected by a thermal camera (Optris Pi450i) and its corresponding software (Optris PIX Connect) dedicated to thermal images analyses. The device consisted in an uncooled 382 x 288 pixels frame plane array (FPA)

microbolometer detector. It was equipped with a Ge lens with a field of view (FOV) of $18^{\circ} \times 14^{\circ}$. The distance between the camera lens and the target was almost 40 cm. The camera was installed in the climate chamber and switched on at least 30 minutes before the start of measurements, in order to achieve thermal equilibrium of its electronic parts. The camera has a NETD of 60mK with no further specifications provided by the manufacturer. Thermal images were collected in video mode at a frequency of 80 Hz. A visual inspection was performed after the failure detected by the thermal camera to confirm the ice occurrence. Each test was performed 3 times to ensure his consistency.

5.5 Results and discussion

In these experiments, there is always mechanical activation. The objective of these experiments is to assess the effect of the frequency of activation.

An important aspect of this study was the emphasis on using a thermal camera to determine RDP failure. Relying solely on the human eye, particularly under varying light conditions, may not provide a reliable assessment of whether the concrete surface is ice-contaminated or simply wet. This comparison is illustrated in Figure 5-5.

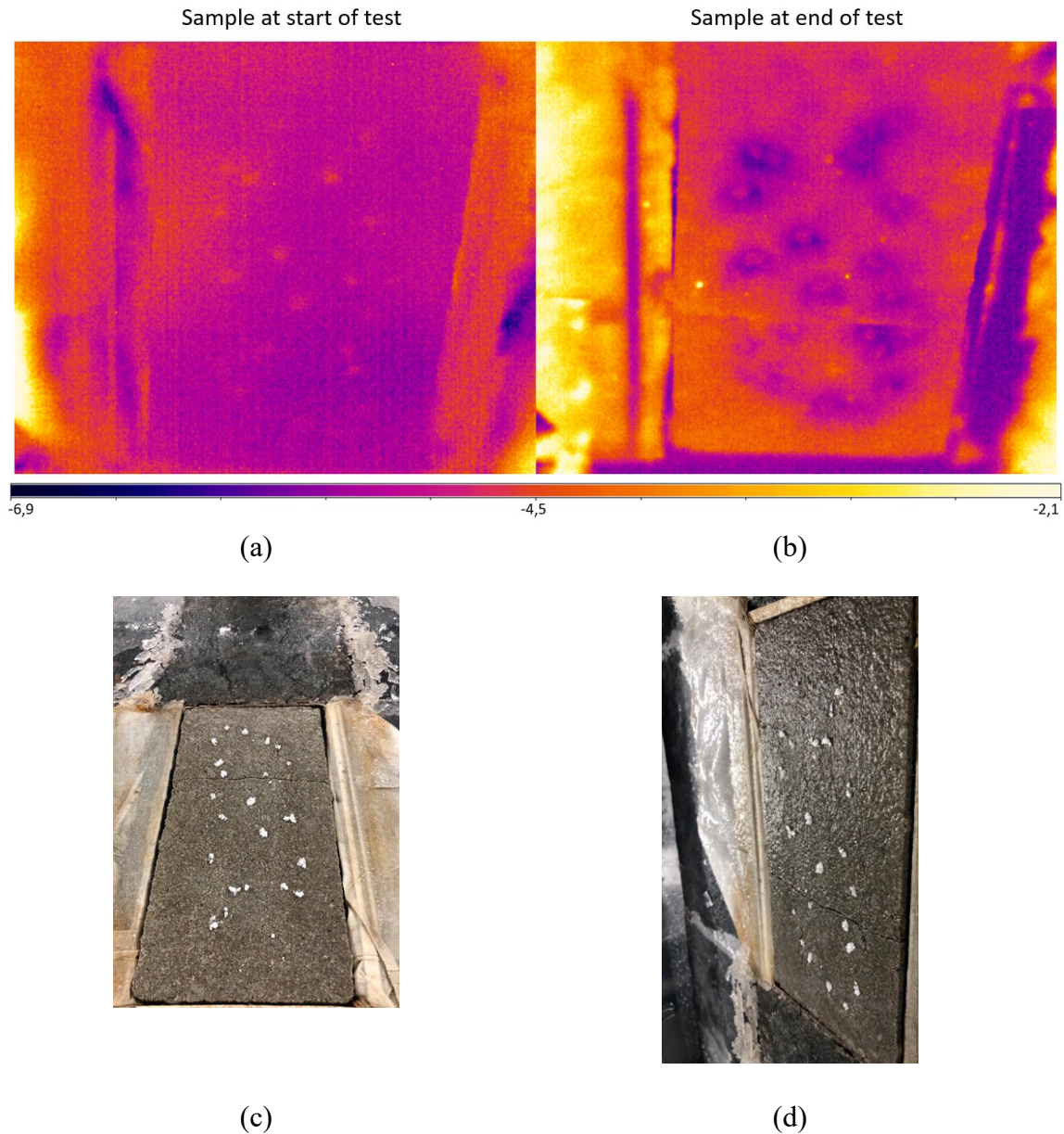


Figure 5-5: Thermal images of the concrete sample at the start of the test at -5°C (a) and under a precipitation intensity of $6.5 \text{ g/dm}^2/\text{h}$ (b) along with corresponding visual photographs (c, d) of the block at the end of the NAFO pre-wetted with KAC test.

In Figure 5-5 (a), before the icing, we can slightly distinguish the grains of RDP on the thermal image because of a difference of emissivity between them and the concrete. When the precipitation work (Figure 5-5 (b)), the thermal camera reveals the presence colder temperature zones around dissolved salt grains, showing the endothermal reaction due to their dissolution, and then higher temperature zones due to ice, showing and exothermal

reaction of its occurrence. This ice formation corresponds with the icing protection time, the failure of the RDP once the concentration in salt is too weak with respect to ambient temperature to remain in the liquid state. This detection is made possible by the distinct temperature contrast between the ice and the surrounding surface, eased by the choice of a color scale. Conversely, the photograph in Figure 5-5 (c) demonstrates that under certain lighting conditions and viewing angles, the presence of ice may not be perceptible to the naked eye, even though it is present due to precipitation and the negative surface temperature. In contrast, as illustrated in Figure 5-5 (d), the ice becomes clearly visible in appropriate lighting or observation. Consequently, the thermal camera proves to be a reliable and effective tool for identifying both RDP time of effectiveness and the onset of ice formation, considered as the RDP time of failure, independently of visible light conditions, with a greater accuracy than visual inspection.

The first series of tests involved maintaining a constant air temperature (-5°C), and a fixed quantity of RDP (0.5g NAFO and 0.35g KAC) while varying the precipitation intensity. The effectiveness time as a function of precipitation intensity is illustrated in Figure 5-6. As expected, the product's performance decreases as precipitation intensity increases. At a precipitation intensity of $5 \text{ g/dm}^2/\text{h}$, the icing protection time is 32.5 ± 2.5 minutes. When the intensity rises to $8.5 \text{ g/dm}^2/\text{h}$, the protection time reduces significantly to 17.5 ± 2.5 minutes. Further increasing the intensity to $13 \text{ g/dm}^2/\text{h}$ shortens the protection time to 12.5 ± 2.5 minutes. This shows a quasi-linearity in the results presented on Figure 5-6. To facilitate interpretation, a line connecting the data points has been added to the graph. These results are significantly different, demonstrating that the process is highly sensitive to variations in precipitation intensity. This trend aligns with our observations under operational conditions.

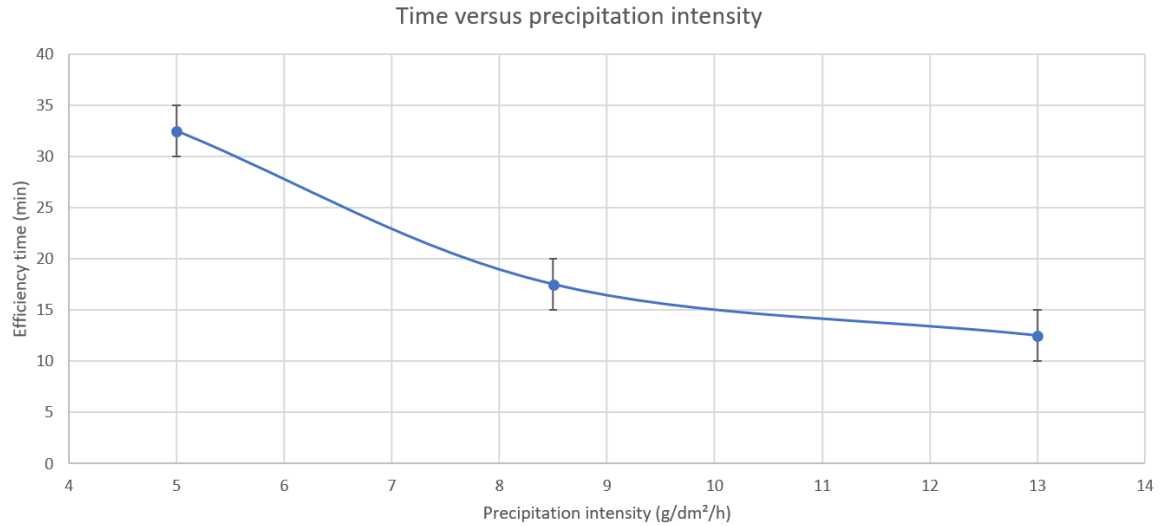


Figure 5-6: Efficiency time (min) as a function of precipitation intensity (g/dm²/h) for NAFO pre-wetted with KAC

The second series of tests focused on maintaining a constant precipitation intensity at 8.5 g/dm²/h and a fixed quantity of RDP of 0.5g NAFO and 0.35g KAC, while varying the test temperature. The temperatures values were determined using the standard governing tests on aircraft anti-icing and deicing fluids [27] and were set at -2°C, -5°C and -10°C. Results are presented in Figure 5-7.

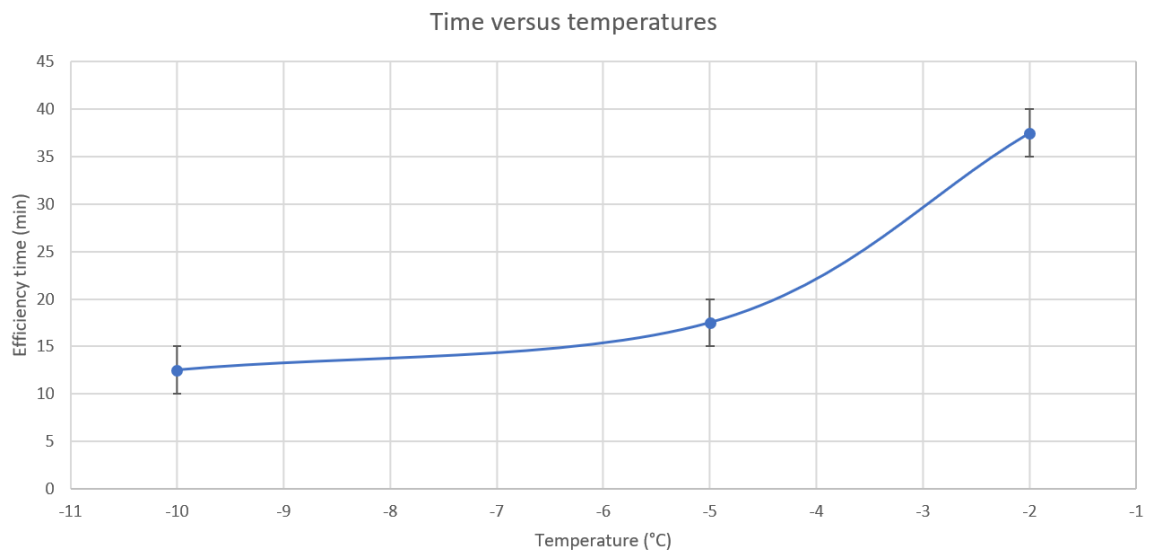


Figure 5-7: Temperature (°C) versus time (min) for NAFO pre-wetted with KAC at 8.5 g/dm²/h and a fixed quantity of RDP of 0.5g NAFO and 0.35g KAC

The lower the temperature, the lower the product's performance; conversely, the higher the temperature, the higher the product's performance.

At a temperature of -10°C the icing protection time is 12.5 ± 2.5 minutes. When the temperature rises to -5°C , the protection time increases significantly to 17.5 ± 2.5 minutes. Further increasing the test temperature to -2°C increases the protection time to 37.5 ± 2.5 minutes. This shows a quasi-linearity in the results.

These results are significantly different, demonstrating that the process is highly sensitive to variations in temperature. This trend aligns with observations under operational conditions. To facilitate interpretation, a line connecting the data points has been added to the graph.

It is important to note that the standard deviations in these trends are quite large. This is primarily due to the fact that the concrete sample appears within the thermal camera's field of view only once every five minutes because of the back and forth movement of the concrete sample below the wheel. It results in a failure time estimation with an error margin equivalent to this interval. Consequently, it is currently only possible to determine the failure time with a precision, of 2 minutes and 30 s. Enhancing the experimental setup by positioning thermal cameras at both the precipitation and wheel levels to continuously track the concrete block would significantly improve measurement accuracy.

As part of the testing process, the temperature variation during the cited test is carefully monitored to ensure the reliability and proper functioning of the apparatus, thereby guaranteeing accurate and reproducible results. Analysing time-dependent evolution of the minimum temperature on the surface of the concrete recorded throughout the tests provides valuable insights. The results for the three temperatures are presented on Figure 5-8.

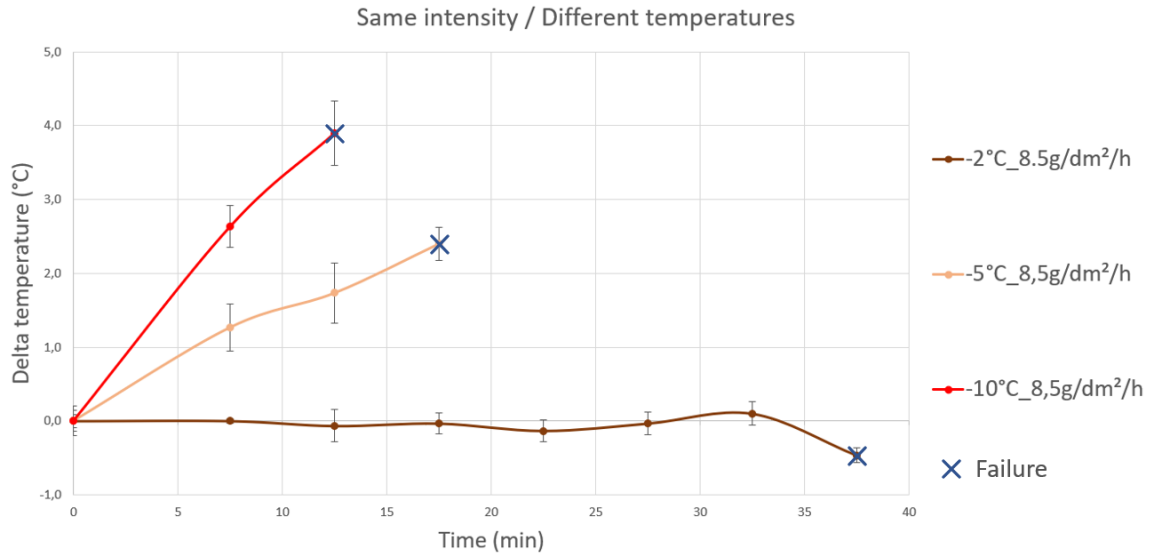


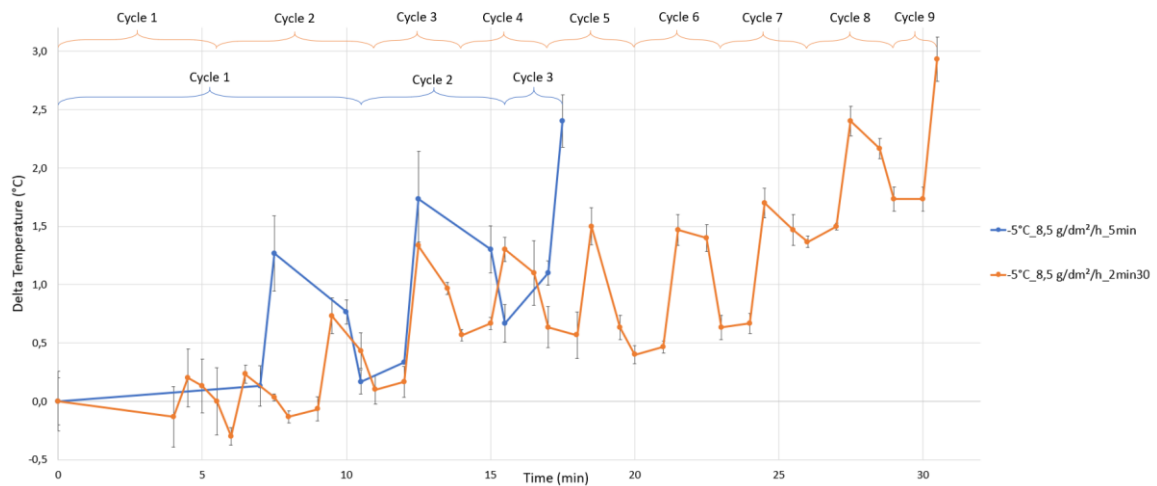
Figure 5-8: Evolution of minimum temperature (°C) as a function of time (min) during a test with a constant precipitation rate (8.5 g/dm²/h) for NAFO pre-wetted with KAC

To ensure proper analysis and comparison, the data were treated as a difference from the initial temperature (brown curve). The trials conducted at a precipitation intensity of 8.5 g/dm²/h at different temperatures (Figure 5-8) have a minimum temperature that increases until failure. This can be explained by the phenomenon detailed in the second phase of the study. Specifically, the deicing product applied onto the samples does not reach its maximum efficiency, as evidenced by the absence of a significant temperature drop during the test. This behavior suggests that the product's action is limited in terms of both its thermal response (temperature variation) and its duration of this variation which is related to the effectiveness under the given conditions. Consequently, the efficiency window of the product is relatively short for these specific samples and tests conditions. The results highlight the critical need to optimize the application rates and compositions of such products to ensure prolonged protection and enhanced thermal management under varying precipitation intensities.

In this context, monitoring the minimum temperature evolution throughout the test

provides a valuable tool for characterizing product performance and identifying opportunities for improvement in operational applications.

The study subsequently focused on analysing the evolution of the minimum temperature of the protected concrete sample at a temperature of -5°C and a precipitation rate of $8.5 \text{ g/dm}^2/\text{h}$ representing the best compromise in terms of test conditions. The investigation examined the effect of mechanical activation speed specifically the waiting time between two successive passes under the ATS. In the first scenario, the block passes under the ATS every 5 minutes (blue curve) and in the second scenario, the block passes under the ATS every 2 min 30 s (orange curve). The two scenarios are presented on Figure 5-9.



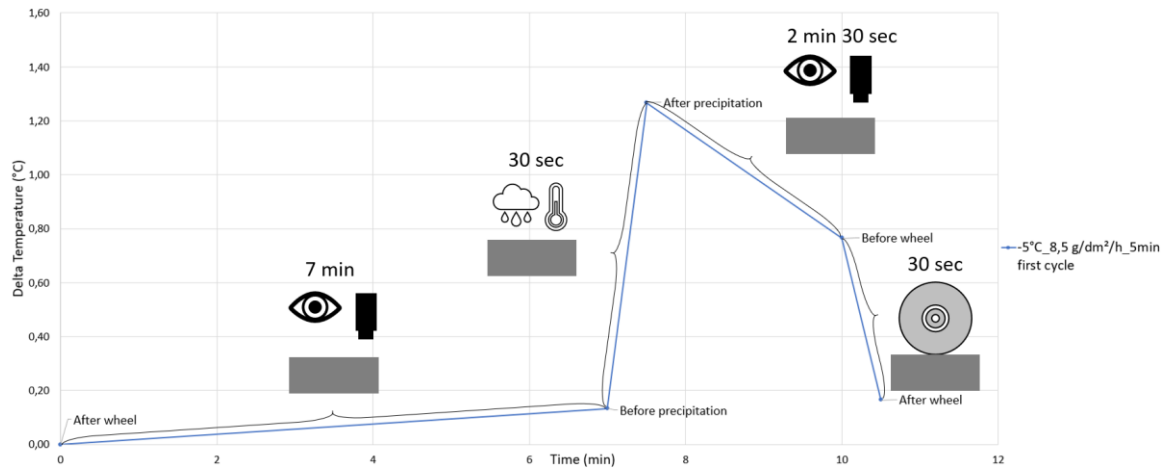


Figure 5-9: Evolution of minimum temperature (°C) observed according to waiting time for passage under the wheel every 5 minutes versus every 2min 30s as a function of time (min) for NAFO pre-wetted with KAC and an example of one cycle described with all phases of the process.

The main pattern of each cycle is presented on Figure 5-10.

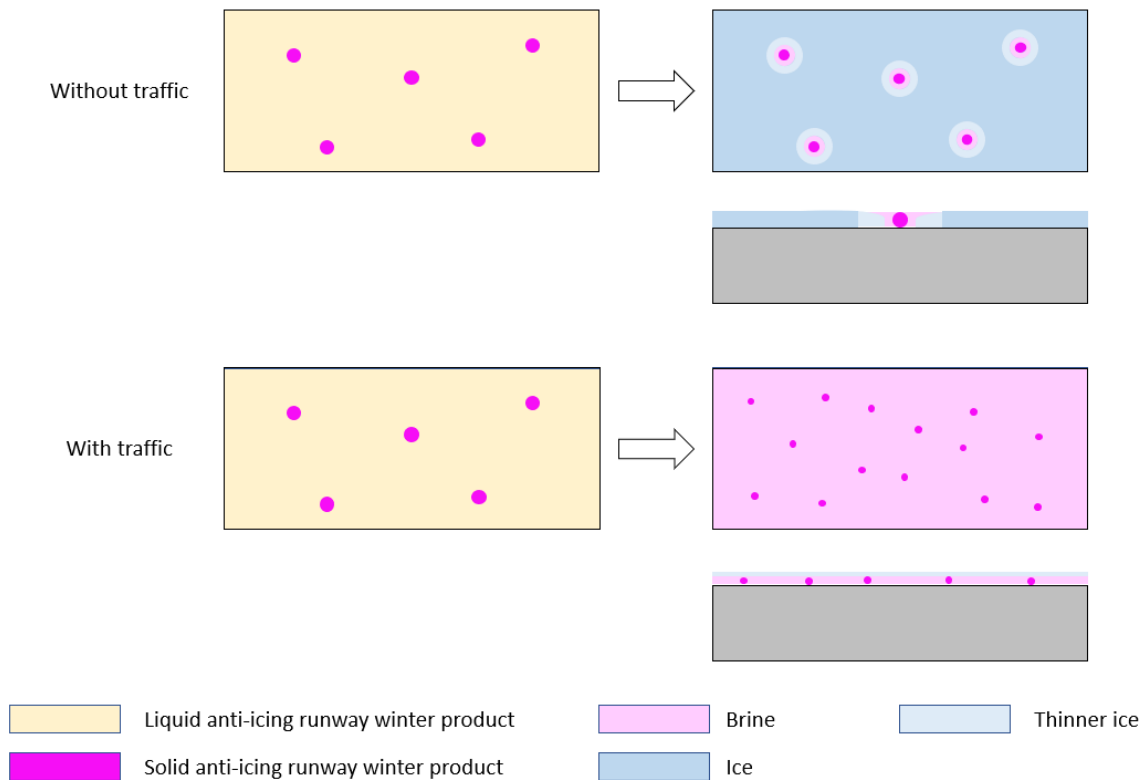


Figure 5-10: Representation of the impact of mechanical activation on RDP under anti-icing conditions.

A typical cycle involves several sequential stages. First, the concrete block passes

under the ATS, during which a slight decrease in temperature is observed due to the principle of mechano-chemical activation of RDP. This is followed by a waiting period, after which the block is exposed to precipitation, causing a slight increase in temperature of 0.1°C due to the precipitation temperature of 4°C and freezing of the water droplet on contact with the sample. Another waiting period ensues, during which the dilution reaction leads to a gradual temperature decrease. Finally, another passage under the wheel stage ends the sequence.

We can directly observe the impact of mechano-chemical activation on product performance under the same intensity of precipitation and temperature. Indeed, the minimum temperature increases with each pass over the block after precipitation and drops significantly after passing under the ATS. The speed of the moving table is sufficiently slow to ensure that each passage, along with the whole structure being at the test temperature, does not affect the surface temperature, resulting only a mechanical crushing of NAFO with the KAC solution and melted ice.

Furthermore, it is evident that the product's efficiency doubles when the sample is subjected to ATS every 2min30sec. This highlights mechanical activation as a beneficial and critical factor in enhancing the effectiveness of RDP as an anti-icing agent.

By ensuring that a spreader truck mechanically activates the product more frequently (2 min 30 s instead of 5 min), airports can increase the efficiency of RDP without requiring additional applications. This practice reduces the risk of runway saturation, save operational costs, prolongs the effective duration of the applied product and minimizes its dispersion into the environment, thereby contributing to more sustainable deicing operations.

The ATS demonstrates the benefits of mechanical activation on RDP efficiency through mechano-chemical processes. Frequent and consistent mechanical forces maximize the reactivity of RDP with available liquid water, enabling faster ice melting, better

distribution, and reduced product use. This process is characterized by the fracturing and reduction of RDP particle sizes, the generation of larger reactive surfaces, and favoring mixing with the ice/brine solutions. These findings provide actionable and quantified insights for integrating mechanical activation principles into runway deicing and clearance strategies.

On the upper part of Figure 5-10, it is evident that the absence of mechanical activation leads to significantly greater ice formation primarily due to the lack of disruption of the ice layer integrity, though weakens by the generation of brine and its local debonding from concrete surface. Without mechanical forces, the solid RDP only protect the surface at a fixed point, even the ice finish to form over the solid without any proper protection. While it demonstrates the RDP's efficiency at a single site, the product fails to adequately dissolve and disperse in the brine, limiting its long-term effectiveness. The brine created remains restricted to a small area, and while liquid RDP is initially effective in rapidly melting ice, it lacks longevity, leaving surrounding areas exposed.

In contrast, when mechanical activation is applied, the dynamics of the RDP's performance change drastically. The mechanical pressure eases the dissolution of the solid product more effectively into the brine, and forces the brine distribution evenly across between the ice layer and the runway surface. This results in the formation of a uniform protective layer that spreads over the runway surface. The brine formed in this process undermines the ice structure, making it more brittle and susceptible to weakening under traffic loads. The combined effects of mechanical activation and traffic stresses fragment the ice layer, facilitating its melting, as confirmed by ATS experiments, and eventual removal.

Moreover, the uniform distribution of brine created under mechanical activation enhances the RDP's effectiveness over a larger area and for a longer duration. The

continuous exposure of ice to this distributed brine prevents the resurgence of strong ice bonds, maintaining the protective layer and extending the period during which the runway remains free of contaminants.

In conclusion, we can summarize the RDP efficiency durations as a function of temperature and precipitation intensity (Table 5-2).

Table 5-2: Efficiency duration of NAF0 pre-wetted with KAC as a function of temperature and freezing drizzle precipitation intensity

	5 g/dm ² /h	8.5 g/dm ² /h	13 g/dm ² /h
-2 °C		37 min 30 sec ± 2 min 30 sec	
-5 °C	32 min 30 sec ± 2 min 30 sec	17 min 30 sec ± 2 min 30 sec	12 min 30 sec ± 2 min 30 sec
-10 °C		12 min 30 sec ± 2 min 30 sec	

The table shows that the product's efficiency time increases as the temperature rises and the precipitation intensity decreases. This relationship underscores the importance of considering weather conditions (current and to come) when determining the optimal application strategy for RDP. The table, developed using a defined protocol based on ATS and conditions derived from established standards, provides a practical framework for efficient product use.

However, these cells are only a small part of a bigger matrix covering a greater number of winter conditions that could be encountered. With this protocol, RDP can consistently be applied in the same quantity, while the waiting time between applications is adjusted according to prevailing weather conditions. This approach enables airports teams to optimize their spreading campaigns by aligning product application with environmental

demands. Moreover, these durations can inform runway maintenance schedules, establishing safe intervals for aircraft landings and take-offs during winter operations. By correlating efficacy times with operational needs, teams can better balance safety and efficiency.

However, while the protocol and data are promising, further testing is essential to refine these findings. Field tests under varying icing conditions, including snow accumulation and mixed precipitation scenarios, are necessary to establish accurate protection durations. These tests would provide critical insights into the product's performance across diverse environmental challenges and help validate its application strategy.

While the Airport Traffic Simulator (ATS) enables the reproduction of certain operational conditions encountered on chemically treated surfaces, several critical aspects related to mechanical activation remain insufficiently addressed within the current experimental configuration.

First, the effect of mechanical activation induced by wheel passage is inherently localized and confined to the contact trace of the tire. Although splashing or lateral redistribution of the product may occur, such effects fall outside the scope of the present study. In operational settings, it is unlikely that successive vehicle passages will follow identical trajectories. As such, the assumption that repeated passes will proportionally increase the extent of activation may not hold, and the overall efficiency of mechanical activation across a broader surface area remains uncertain.

Furthermore, the experimental apparatus operates at low speeds, which do not reflect the dynamic conditions typically encountered in airport ground operations. Parameters such as vehicle speed, wheel load, contact pressure, and vibrational characteristics may significantly influence the mechanisms of activation (e.g., shearing, film rupture, localized

thermal effects), yet these are not currently accounted for in the simulation protocol. As a result, recommendations regarding increased traffic frequency must be interpreted with caution, given the simplification of dynamic inputs.

In summary, while the current protocol offers a solid foundation for optimizing RDP use, additional studies and field validation are crucial to ensuring reliable and safe winter maintenance practices across all operational conditions.

Finally, it should be noted that the granulometry of the chemical product used in the simulation reflects commercially available formulations specifically designed for runway applications. These products are characterized by fine particle sizes, optimized for adherence and uniform distribution, and smaller granules are not considered viable due to operational and safety constraints. Consequently, while granulometry can influence the mechanical interaction with the surface, its variability is limited in practice. The present study therefore relies on fixed, industry-standard granulometry, which aligns with current field usage but inherently restricts the scope for evaluating its effect as an experimental parameter.

The quantity of product applied is also a parameter. However, the quantities of products applied cannot be modified by the equipment available to the ADM research partner, so the study would have lost its practical value.

5.6 Conclusions

The mechanical activation of a solid deicer is considered as a way to enhance their efficiency during winter operations by operators. Nevertheless, the literature does not really provide elements to support these impressions of efficiency. The ATS was specifically elaborated to provide experimental and objective answers. The crushing of RDP on a

contaminated surface has demonstrated that more frequent mechanical activation indeed significantly enhances the product efficiency as an anti-icing agent. This innovative laboratory approach addresses a lesser-known operational challenge faced by airports: optimizing the application rate of deicing products on runways. Instead of increasing the quantity of product or introducing additional applications, this method suggests that spreader trucks simply has to pass over the runway again after the initial application, without dispensing additional product. Such a procedure activates the product more effectively, extending its functional duration and reducing overall product consumption.

In addition, the product's efficiency time increases as the temperature rises and the precipitation intensity decreases. This relationship underscores the importance of considering weather conditions when determining the optimal application strategy for RDP.

Furthermore, this methodology allows RDP to be applied in consistent quantities, with waiting times between applications adjusted to suit weather conditions. This adjustment not only improves the efficiency of spreading campaigns but also aligns product use with operational needs, minimizing waste and reducing environmental impact.

The observed results are influenced by the time elapsed between runway cleaning and subsequent product application. However, for a more robust implementation, it is crucial to develop adaptive tools capable of responding to real-time changes in precipitation and weather conditions. Runways are expansive, and variations in precipitation intensity, type, and temperature across their length are common (e.g., low-intensity freezing drizzle at one end, high-intensity freezing rain at the other). By integrating robust sensors and artificial intelligence into spreader trucks, employees could access real-time data on weather conditions, product efficacy, and reapplication schedules, allowing for more precise and efficient maintenance operations.

To achieve this, additional studies under diverse weather conditions are necessary to build a comprehensive and representative matrix of configurations. The current results represent a foundational precursor to such a matrix. The deployed methodology can be expanded to include data from various scenarios, such as dry snow, wet snow, freezing rain, and slush, although a surface contaminated by snow must be mechanically cleared before the application of any chemical. Using advanced tools like Raman spectroscopy [28-30], it will be possible to monitor product concentration and surface temperature accurately. In fact, the inclusion of a Raman probe in the assembly following the block would provide real-time information on the concentration of the product, as well as its solid-liquid transition. To achieve this, the Raman spectrometer will need to be fitted with a grid plate, which will enable different grains to be analyzed simultaneously, thus enabling a representative average to be obtained for the test.

This integrated approach lays the groundwork for smarter, more efficient, and environmentally conscious runway maintenance strategies, ensuring optimal safety and sustainability in winter operations.

5.7 Acknowledgement

We acknowledge the support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Anti-icing Materials International Laboratory (AMIL). This research was conducted with the support of the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Québec (CRIAQ) and the Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec, and the support provided by Montréal Airports, WPred, and Nachur Alpine Solutions. We acknowledge Luc Capobianco from Paris Airport for his support and comments on the methodology.

5.8 References

- [1] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M.-M. Tremblay, et G. Momen, "A Refined Procedure for Evaluating the Airport Runway De-icing Products Performance,"
- [2] A. Klein-Paste, "Runway Operability under Cold Weather Conditions. Tire-pavement friction creation by sand particles on iced pavements, and non-contacting detection of sand particles on pavements," *NTNU*, 2007.
- [3] A. Klein-Paste, "Airplane braking friction on dry snow, wet snow or slush contaminated runways," *Cold Regions Science and Technology*, 2017/02/20/ 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.02.004>.
- [4] R. Canada, "Un avion fait une sortie de piste à l'aéroport de Bagotville," 2019. [En ligne]. Disponible: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1151839/incident-voyageurs-bagotville-aeroport-urgence>
- [5] A. Klein-Paste et R. Dalen, "The fundamentals of plowing, anti-icing, de-icing and sanding," *Sustainable winter road operations*, pp. 82-100, 2018.
- [6] J. S. F. Johan Wåhlin, Kaj Thomsen, Alex Klein-Paste, "Thermodynamics of deicing chemicals," 2017.
- [7] N. SCHWEIGERT et S. POISSONNIER, "Caractérisation des produits de déverglaçage," 2016.
- [8] C. Cireau. "Les différents produits de déglacement des pistes d'aéroports et leurs impacts". <http://www.infrastructures.com/0713/cireau2.htm>
- [9] S. Aerospace, "Collection of Runway Deicer Types used on Airports ", 2010.
- [10] S. Koefod, R. Mackenzie, et J. Adkins, "Effect of Prewetting Brines on the Ice-Melting Rate of Salt at Very Cold Temperatures," *Transportation Research Record*, vol. 2482, no. 1, pp. 67-73, 2015. doi: 10.3141/2482-09.
- [11] M. P. Trzaskos et A. Klein-Paste, "Effect of Temperature and Prewetting for Ice Penetration with Sodium Formate," *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 6, pp. 140-150, 2020. doi: 10.1177/0361198120917974.
- [12] M. P. Trzaskos et A. Klein-Paste, "Effect of Temperature and Prewetting for Ice Penetration with Sodium Formate," 2020.
- [13] C. Laforte et M. M. Tremblay, "Comparative evaluation of the anti-icing protection time of runway deicers using infrared thermography," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 138, pp. 57-62, 6// 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.03.003>.
- [14] J.-D. Brassard, C. Laforte, M. M. Tremblay, et C. Volat, "Runway Deicing Product Anti/Deicing Performance Assessment: Review and Future Directions," 2019. doi: 10.4271/2019-01-1974.
- [15] *AS6170 Ice Melting Test Method for AMSI431 and AMSI435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [16] *AS6211 Ice Penetration Test Method for AMSI431 and AMSI435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [17] *AS6172 Ice Undercutting Test Method for AMSI431 and AMSI435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [18] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M. Marchetti, et G. Momen, "Advancing Insights into Runway De-Icing: Combining Infrared Thermography and Raman Spectroscopy to Assess Ice Melt," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 12, p. 5096, 2024.
- [19] K. Nilssen, A. Klein-Paste, J. Wåhlin, et M. A. Delapaz, "Use of calorimetry to measure ice-melting capacity," *Transportation research record*, vol. 2613, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [20] M. Marchetti, M. Fois, L. Ibos, J. Dumoulin, P. Bourson, et J.-M. Piau, "Comparative study in the identification of liquid to solid transition phase with DSC, Raman spectra

- analysis and chemiometrics methods applied to phase change materials used for icing-delay in civil engineering infrastructures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 49-61, 2018.
- [21] A. Klein-Paste et J. Potapova, "Thermal aspects of melting ice with deicer chemicals," *Transportation Research Record*, vol. 2440, no. 1, pp. 69-75, 2014.
 - [22] C. Charpentier, J.-D. Brassard, G. Momen, et J. Perron, "Development of a dynamic ice penetration model for runway de-icing products through performance experimental characterization," *Cold Regions Science and Technology*, p. 103932, 2023.
 - [23] K. Ito, A. Fukatsu, K. Okada, et M. Takahashi, "Machine learning-assisted chemical design of highly efficient deicers," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 12453, 2024.
 - [24] *AMS1431F Compound, Solid Runway and Taxiway Deicing/Anti-icing*, SAE International, 2024. [En ligne]. Disponible: <http://www.sae.org>
 - [25] C. Charpentier, J.-D. Brassard, M. Marchetti, et G. Momen, "Airport Traffic Simulator to Enhance the Application of Runway De-icing Product," présenté à IWAIS, Narvik, Norway, 2024.
 - [26] P. Friedman et X. Shi, "Assessing the impact of pavement de-icing products on aircraft and airfield infrastructure," *Journal of Airport Management*, vol. 3, no. 3, pp. 223-237, 2009.
 - [27] *ARP5485B: Endurance Time Test Procedures for SAE Type II/III/IV Aircraft Deicing/Anti-Icing Fluids*, SAE International, 2017 2017.
 - [28] M. Marchetti *et al.*, "Chemometrics-assisted monitoring in raman spectroscopy for the biodegradation process of an aqueous polyfluoroalkyl ether from a fire-fighting foam in an environmental matrix," *Environnements*, vol. 7, no. 1, p. 4, 2020.
 - [29] M. Marchetti, P. Bourson, M. D. Fontana, C. Jobard, B. Saintot, et G. Casteran, "Spectroscopic and chemiometrics supported studies on discrimination, phase transition and concentration identifications of 1,2-propylene glycol solutions, and of a mixture of potassium acetate with 1,3-propanediol solutions as anti-icing fluids," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 142, pp. 34-41, 2017/10/01/ 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.07.009>.
 - [30] I. Đuričković, R. Claverie, P. Bourson, M. Marchetti, J. M. Chassot, et M. D. Fontana, "Water-ice phase transition probed by Raman spectroscopy," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 42, no. 6, pp. 1408-1412, 2011.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Dans la première phase d'étude, nous avons démontré que la modélisation simplifiée de la pénétration dans la glace, basée sur le protocole AS6211 [1], prédit de manière fiable le taux de fonte de celle-ci. Nos résultats expérimentaux pour les essais de pénétration et de fonte de la glace confirment les estimations de sortie du modèle numérique. Nous avons ensuite obtenu une équation permettant de prédire la quantité de produit de dégivrage des pistes (RDP) nécessaire pour réaliser la fusion d'une épaisseur de glace donnée. Les taux de pénétration prévus au début du test semblent être inférieurs aux observations. Cependant, la profondeur de fonte au début de l'essai n'est pas nécessairement représentative du taux de fonte de la glace dans toute la section du tube. Les propriétés des fluides, telles que la courbe de fusion en fonction de la concentration, sont le principal facteur affectant l'efficacité des produits, à l'exclusion, bien sûr, des méthodes d'application dans des cas réels. Pour le modèle, le transfert de chaleur du fluide dégivrant lorsqu'il entre en contact avec la glace est supposé uniforme. Cependant, en réalité, ce n'est pas nécessairement le cas. D'autres méthodes de caractérisation des RDP sont disponibles, et l'application de notre modèle simplifié à ces méthodes alternatives isolerait les effets des produits de dégivrage des pistes solides dilués ou non dilués sur les taux de fonte de la glace.

Dans un deuxième temps, l'étude visait à caractériser de façon exhaustive l'interaction entre le RDP et le givre pendant les essais de fonte de la glace, à l'aide d'analyses

thermiques et chimiques couplées. Il ressort désormais clairement que la pratique normalisée en vigueur spécifie d'utiliser une quantité trop importante de produit afin de caractériser leurs performances, rendant la norme insuffisamment discriminante. En mettant en œuvre le taux d'application actuel d'Aéroports de Montréal, il est devenu inhérent que chaque grain de sel réagit seul face à la fonte de la glace présente. En corrélant les résultats obtenus par thermographie infrarouge avec ceux de la spectroscopie Raman, une compréhension plus approfondie de la dynamique d'échanges entre le RDP et la glace a été obtenue, mettant en lumière la cinétique de la fonte de la glace et ses variations tant thermiques que physico-chimiques. Notamment, l'intensité des bandes spectrales observées en spectroscopie Raman était inversement corrélée à la dilution du RDP, indiquant une occurrence plus élevée de la fusion de la glace présente. Cette approche spectroscopique a permis d'effectuer des mesures in situ en temps réel directement sur la piste, évitant ainsi la collecte et la préparation des échantillons généralement associés à d'autres techniques analytiques telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ou la calorimétrie différentielle (DSC). Des observations visuelles ont corroboré les réactions dans un laps de temps précis, soulignant l'efficacité de l'approche.

Ces informations contribuent de manière significative à notre compréhension des interactions RDP-glace dans les environnements aéroportuaires, cruciales pour déterminer les taux d'application optimaux sur les pistes afin d'améliorer la sécurité des utilisateurs tout en minimisant l'impact environnemental.

Dans un dernier aspect du projet, il a été question de reproduire les conditions d'application des RDP sur les pistes d'aéroport et d'appliquer les connaissances acquises précédemment pour proposer une solution à la problématique de gestion de l'adhérence par

les services d'exploitation des aéroports. Pour rappel, ce protocole a été établi grâce aux normes et au Global Report Format (GRF).

Ainsi, dans un premier temps, le simulateur de trafic aéroportuaire (STA) montre que la configuration avec activation mécanique du RDP par le passage de la roue fournit des résultats plus représentatifs que le RDP non activé lors des essais en dégivrage. Il permet de simuler efficacement l'écrasement de RDP solide sur une piste d'aéroport, fournissant des résultats expérimentaux davantage représentatifs de la réalité de la problématique de la décontamination hivernale des pistes d'aéroport. Cela montre clairement que cette meilleure représentativité aide à mieux caractériser les RDP et à les différencier de manière pertinente.

Dans un second temps, l'écrasement régulier du RDP par la roue a pu mettre en évidence que le produit est plus efficace en antigivrage. De plus, cette nouvelle approche permet d'aider les aéroports avec une problématique méconnue qu'est le réglage de la variation du taux d'épandage sur les camions. Ainsi, plutôt que de proposer aux aéroports de régler la quantité de produit ou de proposer de rajouter du produit, il peut être davantage profitable de simplement faire circuler les camions d'épandage sur les pistes après application des produits sans rien y déverser afin d'aider à l'activation du produit et que celui-ci puisse être efficace plus longtemps, bien que les résultats présentés ici méritent d'être consolidés par des expérimentations supplémentaires. De même, le RDP peut toujours être épandu dans la même quantité mais, le temps d'attente entre deux applications changera selon les conditions météorologiques, permettant ainsi aux équipes d'être plus performantes dans leurs campagnes d'épandage.

La performance des RDP et des pratiques a donc été définie et déterminée suivant différents aspects se complétant afin d'apporter plus de connaissance, répondant pleinement

aux objectifs tels que définis dans le titre de la thèse, "outils de détermination des critères de performance des produits antigivre et dégivrants pour piste d'aéroport afin de définir les taux d'épandage optimaux".

Grâce à la spectroscopie Raman, le type de RDP ainsi que sa concentration permettent de déterminer la transition solide-liquide et ainsi que la durée de performance du produit. Ces informations sont primordiales pour déterminer l'efficacité du RDP suivant les conditions qu'il rencontre. La thermographie infrarouge révèle la synergie entre les produits, notamment grâce au solide prémouillé, et permet de connaître avec précision la température lors de la transition de phase. Combinée à la spectroscopie Raman, la détermination du temps d'échec du produit s'obtient avec plus de précision. Ces deux aspects permettent donc de mieux comprendre les interactions du produit et déterminer ainsi sa performance.

L'activation mécanique du produit solide grâce au simulateur de trafic aéroportuaire a permis, quant à elle, de mettre en évidence que son efficacité dépend de celle-ci et augmente considérablement la performance du RDP en antigivrage, favorisant ainsi les opérations hivernales dans différents aspects tels que le coût, l'environnement mais également la sécurité. En effet, le produit étant plus efficace grâce à l'activation mécanique, il n'est pas nécessaire d'en épandre aussi souvent que les opérateurs le pensaient. Cela constitue de nouvelles connaissances quant aux campagnes d'épandage à développer.

Pour le taux d'épandage, il est à noter que le terme se présente plutôt au pluriel puisqu'il a été mis en avant qu'il existe différents taux optimaux pour différentes conditions de performance rencontrées. De plus, les taux d'épandage ne peuvent pas se présenter par l'évolution d'un grammage à cause de différents critères tels que notamment l'impossibilité de modification de ce paramètre sur les engins dédiés, le changement de condition d'état de

la piste étant susceptible fausser l'épandage effectué. Ainsi, le travail a été fait sur le temps d'efficacité du produit afin de permettre un épandage optimal et durable puisque si une condition météorologique change au cours de la campagne, seul le temps d'efficacité sera modifié, sans compromettre la campagne d'épandage dans son entièreté (Table 5-2).

6.2 Recommandations

À la lumière des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin d'orienter les travaux futurs et l'utilisation optimale des produits dégivrants pour pistes aéroportuaires.

1. Élaboration d'une nouvelle norme aérospatiale pour l'évaluation de la performance et des taux d'épandage des produits dégivrants

Il est essentiel de développer une norme spécifique qui encadrera l'évaluation des performances des produits pour pistes ainsi que la détermination des taux d'épandage optimaux. Cette norme fournirait aux aéroports, notamment ceux de Montréal, des outils objectifs et rigoureux pour sélectionner les produits les plus performants en fonction des conditions opérationnelles et climatiques. Une telle initiative harmoniserait les pratiques et assurerait une gestion plus efficace, économique et durable des opérations hivernales.

2. Exploration de solutions plus écologiques et de stratégies d'application synergique

L'impact environnemental des produits dégivrants constitue désormais un enjeu majeur dans le secteur aéroportuaire. En effet, des essais sont conduits pour chaque produit commercialisé afin de répondre à des normes. Il est notamment question de quantifier le pourcentage de produit biodégradable en 5 jours à 68 °F (20 °C), la demande totale en oxygène

et le comportement écologique incluant la toxicité aquatique pour la formulation totale [2].

Il est donc recommandé d'explorer l'utilisation de formulations plus respectueuses de l'environnement, notamment en évaluant leur efficacité lorsqu'ils sont appliqués en combinaison avec des produits usuels ou des contaminants traditionnels des routes (bouts de pneus, gravats, etc.). L'étude des effets synergiques entre différents types de produits pourrait permettre d'optimiser leur performance tout en réduisant leur empreinte écologique, favorisant ainsi une transition vers des opérations plus durables.

3. Amélioration du simulateur de trafic aéroportuaire

En vue d'améliorer les capacités de mesure du Simulateur de Trafic Aéroportuaire (STA), il serait pertinent d'y ajouter divers éléments. Par exemple, une caméra infrarouge qui suivrait l'échantillon tout au long de l'essai permettrait d'obtenir avec plus de précision la température de surface et par conséquent les changements de température, notamment lors du contact de la précipitation apportant un contaminant avec la surface, mais aussi lors du contact de la roue en mouvement avec la surface afin d'augmenter la connaissance sur les interactions entre l'activation mécanique ou encore la précipitation et le produit utilisé. De plus, en utilisant des outils avancés comme la spectroscopie Raman, il sera possible de mieux surveiller l'évolution de la concentration du produit et la température de surface. En effet, l'inclusion d'une sonde Raman dans l'assemblage suivant le bloc fournirait des informations en temps réel sur la concentration du RDP, ainsi que sur sa transition de phase solide-liquide.

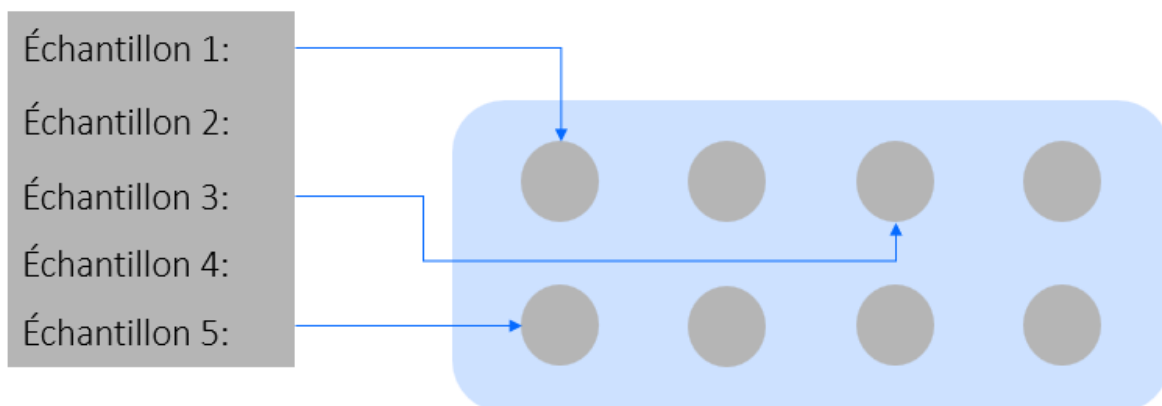


Figure 6-1: Schéma d'une plaque liée au spectromètre Raman

Pour ce faire, le spectromètre Raman devra être équipé d'une plaque sous forme de grille (Figure 6-1), ce qui permettra d'analyser simultanément différents grains et d'obtenir ainsi une moyenne représentative du test.

4. Amélioration des mesures en conditions réelles d'opération

Afin d'affiner l'évaluation de la performance des produits dégivrants, il est nécessaire d'implanter des méthodes de mesure plus précises en conditions réelles. Cela inclut l'utilisation de capteurs avancés et de protocoles de suivi rigoureux permettant d'obtenir des données fiables sur l'efficacité des produits dans divers contextes opérationnels. L'amélioration de ces mesures contribuerait à une meilleure compréhension des mécanismes d'action des dégivrants et à l'optimisation de leur application en milieu aéroportuaire.

5. Études supplémentaires dans diverses conditions météorologiques

Afin de compléter les analyses déjà réalisées, des mesures sous diverses conditions de givrage et de température sont nécessaires pour établir une matrice complète et représentative des configurations telle que celles disponibles pour les produits pour aéronefs.

Les résultats actuels représentent un précurseur fondamental d'une telle matrice. La méthodologie déployée peut être élargie pour inclure des données provenant d'autres scénarios, tels que la neige sèche, la neige mouillée, la pluie verglaçante et la neige fondue.

6. Exploration des outils d'intelligence artificielle pour optimiser les opérations

L'intégration des technologies d'intelligence artificielle (IA) dans les opérations aéroportuaires représente une avenue prometteuse pour améliorer l'efficacité et la gestion des interventions hivernales. En combinant des capteurs de nouvelle génération, installés à la fois sur les véhicules d'entretien et directement sur les pistes, avec des modèles d'IA avancés, il serait possible de transformer la prise de décision en matière de dégivrage et d'antigivrage. Les décisions basées résultats issus de cette approche par IA seront à confronter avec celles prises par l'exploitant pour en apprécier tant la pertinence que la cohérence.

L'exploitation de ces outils permettrait notamment :

- **Une surveillance en temps réel des conditions météorologiques et de l'état des surfaces** : Les capteurs en place fourniraient des données précises sur la température, l'humidité, la présence de glace ou de neige et l'épaisseur des résidus dégivrants, permettant ainsi une réaction aussi immédiate que possible et mieux adaptée aux variations climatiques.
- **L'optimisation de l'application des produits dégivrants** : Grâce à l'IA, il serait possible d'obtenir une appréciation numérique basée sur un grand nombre de variables et en continu de l'efficacité des produits appliqués, d'ajuster dynamiquement les taux d'épandage et de recommander les moments les plus

opportuns pour les ré-applications, en fonction des conditions spécifiques de chaque aéroport.

- **Une gestion proactive des opérations** : Des algorithmes prédictifs anticiperaient les besoins en dégivrage et ajusteraient les calendriers d'intervention, optimisant ainsi la consommation de produits chimiques, les coûts opérationnels et l'impact environnemental.
- **L'automatisation et l'aide à la décision** : En intégrant ces données dans un système intelligent de gestion, les opérateurs aéroportuaires bénéficieraient d'alertes en temps réel, de recommandations optimisées et, à terme, de véhicules semi-autonomes capables d'exécuter des opérations ciblées avec une précision accrue.

Le développement et l'implantation de telles solutions nécessitent une collaboration entre les experts en ingénierie nordique, en météorologie, en ingénierie des infrastructures aéroportuaires et en intelligence artificielle. Toutefois, ces avancées technologiques ouvrent la voie à une gestion plus efficace, durable et réactive vis à vis des opérations hivernales, améliorant ainsi la sécurité et la fluidité du trafic aérien en période de conditions météorologiques extrêmes.

Ces recommandations visent à soutenir l'évolution des pratiques en matière de dégivrage des pistes aéroportuaires, en mettant l'accent sur la performance, la durabilité et l'innovation technologique.

6.3 Références

- [1] *AS6211 Ice Penetration Test Method for AMS1431 and AMS1435 Runway Deicing/Anti-icing Products*, SAE International, 2021.
- [2] *AMS1435E Fluid, Generic, Deicing/Anti-icing Runways and Taxiways*, SAE International, 2024. [En ligne]. Disponible: <http://www.sea.org>