

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR  
SHAN YANG

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES PRODUITS  
DÉVERGLAÇANTS POUR PISTES ET VOIES D'ACCÈS D'AÉROPORT

AVRIL 1999



### Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## Résumé

L'objectif principal de cette étude est de déterminer une procédure d'évaluation de l'efficacité des produits déverglaçants utilisés de façon préventive sur les pistes d'aéroports. La procédure déterminée dans ce travail sera proposée pour être incluse dans les normes SAE AMS 1431 et AMS 1435.

Le second objectif de ce travail est de comparer quelques produits commerciaux en utilisant la procédure déterminée précédemment. Les essais d'évaluation de la performance des produits déverglaçants ont été effectués dans une chambre climatique sous précipitation surfondue. Ils sont basés sur l'aptitude des produits à empêcher l'adhésion de la glace à un substrat. Pour simuler les opérations effectuées en aéroport, un appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction a été construit spécialement pour ces essais par le laboratoire international des matériaux anti-givre (LIMA) de l'Université du Québec à Chicoutimi.

Les résultats des essais effectués avec des produits commerciaux ont montré que les produits solides testés, l'urée et le formiate de sodium, atteignent leur seuil d'efficacité plus tard que les produits liquides testés, soit le glycol-urée et deux produits à base d'acétate de sodium. Ce délai est causé par la lenteur relative de la dissolution des grains d'urée ou de formiate de sodium dans l'eau. Par contre, les produits solides sont performants pour des temps de précipitation plus longs que les produits liquides.

*Shan Yang*

Shan Yang,

étudiante

*Jean-Louis Laforte*

Jean-Louis Laforte,

directeur de recherche

## Remerciements

Je tiens à remercier premièrement Monsieur Jean-Louis Laforte, D.Sc. A. Professeur titulaire au département des Science Appliquées, et responsable du LIMA (Laboratoire International des matériaux Antigivre), et madame Sylvie Bernardin, gérante du LIMA, qui sont respectivement directeur et codirectrice de ma maîtrise, pour avoir dirigé mes travaux et pour m'avoir donné de judicieux conseils lorsque nécessaire. Je remercie également tout le personnel du LIMA pour leur aide très appréciée.

De plus, je remercie également mon mari Xiaofei Wang, ma fille Wenjia et mon fils Simon pour le support moral qu'ils m'ont offert si gentiment et la grande compréhension qu'ils m'ont démontrée tout au long de cette démarche.

## Table des matières

Résumé .....	ii
Remerciements .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	ix
Liste des figures .....	xv
Notations .....	xviii
1. Introduction.....	1
1.1 Problématique .....	1
1.2 Historique .....	3
1.2.1. Techniques de dégivrage.....	3
1.2.2. Produits déverglaçants utilisés dans les aéroports .....	5
1.2.3. Information sur la consommation des produits déverglaçants .....	10
1.2.4. Tests de performance des produits déverglaçants .....	11
1.3 Objectifs .....	12
1.3.1. Objectif principal .....	12
1.3.2. Second objectif .....	13
1.4 Méthodologie.....	13
1.5 Tests préliminaires .....	14
1.5.1. Introduction .....	14
1.5.2. Résultats d'observation des tests préliminaires .....	15
2. Procédure d'essai.....	17
2.1 Introduction .....	17
2.2 Description des opérations d'antigivrage en aéroport .....	18
2.3 Description de la procédure de test.....	18
2.4 Conditions des essais .....	19
3. Équipements .....	21
3.1 Introduction .....	21
3.2 Chambre climatique .....	21
3.3 Génération de précipitation .....	23
3.4 Support des plaques .....	24
3.5 Types des plaques .....	27

3.5.1. Introduction .....	27
3.5.2. Béton de ciment et béton de polymère .....	27
3.5.3. Plaque d'aluminium moulée et plaque d'aluminium enduite de PFS ..	28
3.6 Appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction.....	30
3.6.1. Chariot mobile et raclage .....	30
3.6.2. Bloc de friction .....	33
3.6.3. Cellule de charge .....	35
4. Étalonnage .....	36
4.1 Introduction .....	36
4.2 Distribution de la glace sur les plaques.....	37
4.2.1. Intensité de givrage sur les plaques .....	37
4.2.2. Épaisseur de glace déposée sur les plaques.....	40
4.3 Étalonnage de la cellule de charge .....	41
5. Méthodologie de comparaison des substrats .....	45
5.1 Introduction .....	45
5.2 Méthodologie.....	45
5.2.1. Évaluation de la reproductibilité des essais .....	47
5.2.2. Évaluation de la correspondance entre observation visuelle et le coefficient de friction .....	49
6. Étude de la plaque de béton de ciment.....	50
6.1 Cas de l'urée .....	50
6.1.1. Application de 30 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	50
6.1.2. Application de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	56
6.1.3. Application de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	61
6.1.4. Application de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	64
6.1.5. Conclusions sur le cas de l'urée .....	67
6.2 Cas du glycol-urée .....	70
6.2.1. Application de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	70
6.2.2. Application de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	73
6.2.3. Conclusion sur le cas du glycol-urée .....	76
6.3 Conclusion pour le béton de ciment.....	78

7. Étude de la plaque de béton de polymère.....	80
7.1 Cas de l'urée .....	80
7.1.1. Application de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	80
7.1.2. Application de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	83
7.1.3. Application de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	87
7.1.4. Conclusion sur les cas de l'urée .....	89
7.2 Cas du glycol-urée .....	91
7.2.1. Application de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	92
7.2.2. Application de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	95
7.2.3. Application de 50 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	98
7.2.4. Conclusions sur le cas du glycol-urée.....	101
7.3 Conclusions pour le béton de polymère.....	104
8. Étude de la plaque d'aluminium moulée .....	106
8.1 Cas de l'urée .....	106
8.1.1. Application de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	106
8.1.2. Application de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	110
8.1.3. Application de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	113
8.1.4. Conclusion sur les cas de l'urée .....	115
8.2 Cas du glycol-urée .....	117
8.2.1. Application de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	117
8.2.2. Application de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	121
8.2.3. Conclusion sur les cas du glycol-urée.....	124
8.3 Conclusion pour l'aluminium moulé.....	126
9. Étude de la plaque d'aluminium enduite de PFS.....	128
9.1 Cas de l'urée .....	128
9.1.1. Application de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	128
9.1.2. Application de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	131
9.1.3. Application de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée .....	134
9.1.4. Conclusion sur les cas de l'urée .....	136
9.2 Cas du glycol-urée .....	138
9.2.1. Application de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	138
9.2.2. Application de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée.....	141
9.2.3. Conclusion sur les cas du glycol-urée.....	144
9.3 Conclusion sur l'aluminium enduit de PFS.....	146

10. Comparaison des substrats.....	149
10.1 Introduction .....	149
10.2 Comparaison des substrats.....	149
10.2.1. Reproductibilité .....	149
10.2.2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction .....	151
10.2.2.1 Cas de succès .....	151
10.2.2.2 Cas d'échec .....	153
10.3 Résumé des caractéristiques des quatre substrats .....	154
10.3.1. Béton de ciment .....	154
10.3.2. Béton de polymère.....	155
10.3.3. Aluminium moulé .....	156
10.3.4. Aluminium enduit de PFS .....	156
10.4 Conclusion .....	157
10.4.1. Le meilleur substrat.....	157
11 Performance des produits déverglaçants.....	158
11.1 Introduction .....	158
11.2 Produits testés sous l'intensité de précipitation de 25 g/dm <sup>2</sup> h .....	159
11.2.1 KA1 (Acétate de potassium) .....	159
11.2.2 KA2 (Acétate de potassium) .....	160
11.2.3 SF1 (Formate de potassium) .....	162
11.2.4 Conclusion .....	164
11.3 Produits testés sous l'intensité de précipitation de 40 g/dm <sup>2</sup> h .....	165
11.3.1 Urée .....	165
11.3.2 Glycol-urée.....	167
11.3.3 KA1 (Acétate potassium) .....	170
11.3.4 KA2 (Acétate de potassium) .....	173
11.3.5 SF1 (Formate de sodium) .....	175
11.3.6 Conclusion .....	178
11.4 Essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS non réfrigéré.....	181
12. Conclusion.....	183

## Liste des tableaux

Tableau 1.1	Demande chimique en oxygene des produits déverglaçants et antigels.....	9
Tableau 1.2	Exemple de consommation des produits déverglaçants à Halifax .....	10
Tableau 1.3	Taux d'application de produit déverglaçant requis pour enlever 3 mm de glace.....	12
Tableau 4.1	Intensité de givrage dans différentes conditions d'essai .....	38
Tableau 4.2	Paramètres pour l'intensité de givrage de 25 g/dm <sup>2</sup> h.....	39
Tableau 4.3	Paramètres pour l'intensité de givrage de 40 g/dm <sup>2</sup> h.....	39
Tableau 4.4	Épaisseur moyenne de glace pour l'intensité de précipitation moyenne de 25 g/dm <sup>2</sup> h.....	40
Tableau 4.5	Épaisseur moyenne de glace pour l'intensité de précipitation moyenne de 40 g/dm <sup>2</sup> h.....	41
Tableau 4.6	Exemple d'étalonnage de cellule de charge .....	42
Tableau 5.1	Exemple des essais.....	48
Tableau 6.1	Performance de 30 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	52
Tableau 6.2	Reproductibilité (30 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	56
Tableau 6.3	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (30 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	56
Tableau 6.4	Performance de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	58
Tableau 6.5	Reproductibilité (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	61
Tableau 6.6	Correspondance entre observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	61
Tableau 6.7	Performance de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	62
Tableau 6.8	Reproductibilité (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	64
Tableau 6.9	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	64

Tableau 6.10 Performance de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	65
Tableau 6.11 Reproductibilité (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	67
Tableau 6.12 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	67
Tableau 6.13 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas de l'urée .....	68
Tableau 6.14 Performance de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	71
Tableau 6.15 Reproductibilité (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	73
Tableau 6.16 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	73
Tableau 6.17 Performance de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	74
Tableau 6.18 Reproductibilité (40 mL/m <sup>2</sup> d'urée) .....	76
Tableau 6.19 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	76
Tableau 6.20 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas du glycol-urée.....	76
Tableau 6.21 Résumés des résultats sur le béton de ciment.....	78
Tableau 7.1 Performance de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	81
Tableau 7.2 Reproductibilité (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	82
Tableau 7.3 Correspondance entre observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	82
Tableau 7.4 Performance de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	84
Tableau 7.5 Reproductibilité (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	86
Tableau 7.6 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	86
Tableau 7.7 Performance de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	87

Tableau 7.8	Reproductibilité (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	89
Tableau 7.9	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	89
Tableau 7.10	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère dans le cas de l'urée. ....	90
Tableau 7.11	Performance de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	92
Tableau 7.12	Reproductibilité (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	95
Tableau 7.13	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	95
Tableau 7.14	Performance de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	96
Tableau 7.15	Reproductibilité (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	98
Tableau 7.16	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	98
Tableau 7.17	Performance de 50 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	99
Tableau 7.18	Reproductibilité (50 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	101
Tableau 7.19	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (50 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	101
Tableau 7.20	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère dans le cas du glycol-urée. ....	102
Tableau 7.21	Résumé des résultats sur le béton de polymère. ....	104
Tableau 8.1	Performance de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	107
Tableau 8.2	Reproductibilité (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	109
Tableau 8.3	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	109
Tableau 8.4	Performance de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	110
Tableau 8.5	Reproductibilité (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	112

Tableau 8.6	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	113
Tableau 8.7	Performance de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	113
Tableau 8.8	Reproductibilité (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	115
Tableau 8.9	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	115
Tableau 8.10	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas de l'urée .....	116
Tableau 8.11	Performance de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	118
Tableau 8.12	Reproductibilité (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	120
Tableau 8.13	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	120
Tableau 8.14	Performance de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	122
Tableau 8.15	Reproductibilité (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	124
Tableau 8.16	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	124
Tableau 8.17	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas du glycol-urée .....	124
Tableau 8.18	Résumé des résultats sur l'aluminium moulé .....	126
Tableau 9.1	Performance de 60 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	128
Tableau 9.2	Reproductibilité (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	130
Tableau 9.3	Correspondance entre observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	131
Tableau 9.4	Performance de 120 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	131
Tableau 9.5	Reproductibilité (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	133
Tableau 9.6	Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	133

Tableau 9.7 Performance de 180 g/m <sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	134
Tableau 9.8 Reproductibilité (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	136
Tableau 9.9 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	136
Tableau 9.10 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas de l'urée.....	137
Tableau 9.11 Performance de 20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	139
Tableau 9.12 Reproductibilité (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	141
Tableau 9.13 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	141
Tableau 9.14 Performance de 40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C.....	142
Tableau 9.15 Reproductibilité (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	144
Tableau 9.16 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	144
Tableau 9.17 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas du glycol-urée. ....	145
Tableau 9.18 Résumé des résultats sur l'aluminium enduite de PFS. ....	147
Tableau 10.1 Comparaison de reproductibilité.....	150
Tableau 10.2 Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction (Cas des succès) .....	152
Tableau 10.3 Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction (Cas des échecs).....	153
Tableau 11.1 KA1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	159
Tableau 11.2 KA2 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	161
Tableau 11.3 SF1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	162
Tableau 11.4 Résumé des périodes d'anti-adhésion pour les produits commerciaux. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h .....	164

Tableau 11.5 Urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	166
Tableau 11.6 Glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	168
Tableau 11.7 KA1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	171
Tableau 11.8 KA2 appliqué sur la plaque enduite de PFS. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	174
Tableau 11.9 SF1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	176
Tableau 11.10 Résumé des périodes d'anti-adhésion (produits déverglaçants sur la plaque réfrigérée). Ta = -3 °C, Tp = -3 °C .....	179
Tableau 11.11 Comparaison des résultats des essais (plaques réfrigérée et non réfrigérée) .....	182

## Liste des figures

Figure 1.1	Distribution de la taille des grains d'urée.....	6
Figure 3.1	Chambre climatique .....	22
Figure 3.2	Graphique des températures enregistrées pendant un test.....	26
Figure 3.3	Plaque de béton de ciment .....	28
Figure 3.4	Plaque de béton de polymère .....	28
Figure 3.5	Plaque d'aluminium enduite de "PFS" (gauche) et la plaque de d'aluminium moulée (droite).....	29
Figure 3.6	Vue de dessus d'appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction.....	31
Figure 3.7	Vue de profil d'appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction.....	32
Figure 3.8	Raclage .....	32
Figure 3.9	Bloc en acier pour mesurer le coefficient de friction.....	33
Figure 3.10	Mesure du coefficient de friction.....	34
Figure 4.1	Étalonnage de cellule de charge .....	43
Figure 6.1	Application de l'urée sur les plaques de béton de ciment.....	51
Figure 6.2	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (30 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	55
Figure 6.3	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (60 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	59
Figure 6.4	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (120 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	63
Figure 6.5	Glace déposée sur la plaque de béton de ciment traitée avec 180 g/m <sup>2</sup> de l'urée .....	65
Figure 6.6	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (180 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	66

Figure 6.7	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas de l'urée .....	69
Figure 6.8	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	72
Figure 6.9	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) .....	75
Figure 6.10	Comparaison le critère de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas du glycol-urée.....	77
Figure 7.1	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère (60 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	81
Figure 7.2	Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère (120 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	85
Figure 7.3	Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère (180 g/m <sup>2</sup> d'urée) .....	88
Figure 7.4	Comparaison le critère d'échec sur la plaque de béton de polymère dans le cas de l'urée.....	91
Figure 7.5	Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	93
Figure 7.6	Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	97
Figure 7.7	Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère (50 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	100
Figure 7.8	Comparaison du critère de performance sur la plaque de béton de polymère dans le cas du glycol-urée .....	103
Figure 8.1	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée (60 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	108
Figure 8.2	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée (120 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	111
Figure 8.3	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée (180 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	114
Figure 8.4	Comparaison le critère de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas de l'urée .....	117
Figure 8.5	Comparaison des critères d'échec sur la plaque d'aluminium moulée (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	119

Figure 8.6	Comparaison des critères d'échec sur la plaque d'aluminium moulée (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée).....	123
Figure 8.7	Comparaison le critère de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas du glycol-urée.....	125
Figure 9.1	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (60 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	129
Figure 9.2	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (120 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	132
Figure 9.3	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (180 g/m <sup>2</sup> d'urée).....	135
Figure 9.4	Comparaison le critère de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas de l'urée .....	138
Figure 9.5	Comparaison le critère de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (20 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) ...	140
Figure 9.6	Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (40 mL/m <sup>2</sup> de glycol-urée) ...	143
Figure 9.7	Comparaison le critère de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas du glycol-urée .....	146
Figure 11.1	Période d'anti-adhésion pour KA1. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h .....	160
Figure 11.2	Période d'anti-adhésion pour KA2. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h .....	161
Figure 11.3	Période d'anti-adhésion pour SF1. I = 25 g/dm <sup>2</sup> h.....	163
Figure 11.4	Période d'anti-adhésion pour l'urée. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h .....	167
Figure 11.5	Période d'anti-adhésion du glycol-urée. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h.....	170
Figure 11.6	Période d'anti-adhésion pour KA1. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h .....	173
Figure 11.7	Période d'anti-adhésion pour KA2. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h .....	175
Figure 11.8	Période d'anti-adhésion pour SF1. I = 40 g/dm <sup>2</sup> h.....	177

## Notations

$\mu$	Coefficient de friction.	
$\sigma_p$	Écart type pondéré.	
AMS	Aircraft Material Specification	
d	Densité de la glace	920 g/dm <sup>3</sup>
DBO	Demande biologique en oxygène	
DCO	Demande chimique en oxygène	
DOT	Les demandes totales en oxygène	
É	Échec	
EEAG	Essai d'endurance à l'adhésion de la glace	
F	Force de traction	
h	Épaisseur moyenne du film de glace	mm
I	Intensité de précipitation	g/dm <sup>2</sup> h
I <sub>moy</sub>	Intensité moyenne de givrage	g/dm <sup>2</sup> h
KA1	Premier produit commercial à base d'acétate de potassium	
KA2	Deuxième produit commercial à base d'acétate de potassium	
LIMA	Laboratoire international de matériaux antigivre	
M <sub>p</sub>	Moyenne pondérée	
N <sub>cé</sub>	Nombre de cas où l'observateur a rapporté un échec et le coefficient de friction est inférieur à 0,5	

$N_{cs}$	Nombre de cas où l'observateur a rapporté un succès et le coefficient de friction est supérieur à 0,5	
$N_r$	Nombre de cas où tous les tests effectués avec le même temps d'exposition ont donné le même résultat selon l'observation	
$N_m$	Nombre de cas où tous les tests effectués avec le même temps d'exposition ont donné des résultats différents selon l'observation	
$N_t$	Nombre total de cas où les tests ont été faits au moins deux fois dans les mêmes conditions	
$N_{té}$	Nombre total d'échecs rapportés par l'observateur	
$N_{ts}$	Nombre total de succès rapportés par l'observateur	
PAA	Période d'anti-adhésion	
$P_{cs}$	Pourcentage de correspondance pour les cas de succès	
$P_{és}$	Pourcentage de correspondance pour les cas d'échecs	
PFS	Precision Friction Surface	
$P_r$	Pourcentage de la reproductibilité	
Rh	Humidité relative	
S	Succès	
SAE	Society of Automotive Engineers	
SF1	Produit commercial à base de formiate de sodium	
t	Temps de précipitation	minute
Tair	Température de l'air	°C
Tp	Température de la plaque	°C

USAF United States Air Force

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Problématique

Chaque hiver, de nombreux aéroports de l'hémisphère nord se trouvent confrontés au gel, à la neige et aux pluies verglaçantes qui perturbent le trafic aérien. La glace (gelée, givre, neige, verglas, etc.), déposée sur les pistes d'aéroport, peut occasionner des dérapages au décollage ou à l'atterrissage des avions. Maintenir de bonnes conditions de sécurité pour le public voyageant durant ces mois d'hiver posent des problèmes de fonctionnement aux gestionnaires des compagnies aériennes et des aéroports. Afin de surmonter ces problèmes, on utilise des produits spécialement conçus pour dégivrer les pistes et les voies d'accès sur lesquelles roulent les avions. Ces produits peuvent être utilisés de façon préventive en les appliquant sur le sol avant la précipitation pour empêcher la formation de glace (Bernardin, S., Laforte, J.-L., Louchez, P.R., November 1996), ou de façon curative en les appliquant lorsque le sol est déjà couvert de glace ou de neige (Bernardin, S. and al., March 1998).

Les normes «SAE AMS 1431B» "SAE AMS 1431B: compound, solide runway and taxiway deicing/Anti-icing", et SAE AMS 1435 incluent plusieurs

exigences pour les produits de dégivrage et antigel pour les pistes et les voies de circulation des aéroports (SAE Standards, 1995). Ces exigences concernent les propriétés biochimiques, les propriétés physiques et l'impact environnemental. Des tests sont exigés pour évaluer les propriétés suivantes:

- La demande biologique en oxygène (DBO) pour les périodes de 5, 15 et 20 jours.
- Les demandes totales en oxygène (DTO).
- La faible toxicité pour l'humain et la vie aquatique.
- Les traces de soufre, halogène, nitrate, et métaux lourds (plomb, chrome, cadmium et mercure) doivent être mesurées.

Les fabricants doivent aussi fournir des informations sur les propriétés physiques de leur produit:

- pH.
- Point de combustion (au moins 100 °C).
- Stabilité du produit (conservation minimum d'un an).
- L'effet du produit sur la surface des avions peints ou non.
- L'effet sur le revêtement de surface de piste.
- La corrosion des métaux.
- L'effet sur les plastiques transparents.

La norme exige aussi que les produits puissent fondre la glace déposée sur les pistes d'aéroport et facilitent l'élimination de la glace ou de la neige. Cependant, aucun test n'est proposé pour vérifier la performance des produits. La

norme spécifique que les dirigeants des aéroports doivent mesurer le coefficient de friction de la piste après que celle-ci ait été traitée par les produits de dégivrage pour maintenir de bonnes conditions de sécurité pour le décollage et l'atterrissage des avions.

On remarque qu'il n'y a aucun test de performance des produits déverglaçants dans les normes précédentes. Par conséquent, il est nécessaire de développer une méthode pour évaluer la performance des produits dans différentes conditions environnementales. Pour ne pas dépendre du caractère aléatoire de la météorologie, cette évaluation doit se faire en laboratoire. La procédure déterminée dans ce travail sera proposée pour être incluse dans les normes AMS 1431 et AMS 1435.

## **1.2 Historique**

### **1.2.1. Techniques de dégivrage**

Il existe plusieurs techniques pour enlever ou contrôler les accumulations de neige ou de glace. On peut les classer en trois grandes catégories : le contrôle mécanique, le contrôle thermique et le contrôle chimique.

#### ***Le contrôle mécanique***

Il consiste à racler la glace et la neige déposées sur la route. Du sable est appliqué ensuite sur la neige compactée ou la glace pour augmenter la friction (Comfort, G. and al., 1995). Dans la pratique, on utilise un balai tournant qui brosse la glace associé à un jet d'air dégageant la masse d'eau sur le côté. Le

frottement occasionné par le brossage produit un apport thermique qui contribue au déglacage.

### ***Le contrôle thermique***

Des éléments chauffants intégrés au revêtement de la chaussée sont parfois utilisés sur les petites surfaces près des portes d'entrées. Sur certaines routes du Japon, on utilise de l'eau tiède souterraine pour faire fondre la glace ou la neige (Kazuhiko Itagaki, 1990).

### ***Le contrôle chimique***

C'est la méthode la plus répandue. Elle est principalement utilisée pour rendre la circulation hivernale plus sécuritaire sur les routes. Cette méthode de contrôle consiste à épandre une certaine quantité d'une substance déverglaçante, qui a la propriété d'abaisser le point de fusion de l'eau, sur les parties où l'on veut réduire la présence de neige et de glace afin d'augmenter la friction. Le produit déverglaçant peut être appliqué seul ou combiné à des matériaux abrasifs comme le sable.

Les produits chimiques utilisés pour le contrôle de la neige et de la glace vont être efficaces dans la mesure où ils vont prévenir la formation d'une couche de glace, réduire l'adhérence de la neige sur la route et faire fondre la neige ou la glaces déposée. Les recherches effectuées sur les produits chimiques ont montré que l'efficacité d'un produit à contrôler la neige et la glace est liée aux caractéristiques suivantes :

1. Abaisser le point de fusion de l'eau à la température qui prévaut l'hiver.

2. Faire fondre la neige ou la glace en un temps raisonnable.
3. Pénétrer dans la neige et la glace, et affaiblir l'adhérence des couches de glace et de neige au pavage.
4. Être disponible en grande quantité et à très faible coût.
5. Être facile à entreposer et à manipuler.
6. Se comporter comme un produit non lubrifiant lorsqu'il est appliqué sur un pavage sec ou humide.
7. Ne pas endommager les structures métalliques, les véhicules, le pavage et les vêtements.

Les produits utilisés en pratique pour le contrôle chimique sur la route sont le dichlorure de sodium ( $\text{NaCl}_2$ ), le dichlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ), le mélange des deux produits, ou le mélange avec des produits abrasifs.

#### 1.2.2. Produits déverglaçants utilisés dans les aéroports

Les produits de dégivrage communément utilisés dans les aéroports peuvent être solides (sous forme de graines) ou liquides, ou les deux solides et liquides.

Parmi les autres produits d'emploi courant, citons :

- L'urée, solide, également appliquée comme engrais.

L'urée est un produit solide blanc dont la taille des grains est variable. La Figure 1.1 présente la distribution de taille des grains. Environ 78% des grains ont un diamètre compris entre 2,4 et 2,8 mm.

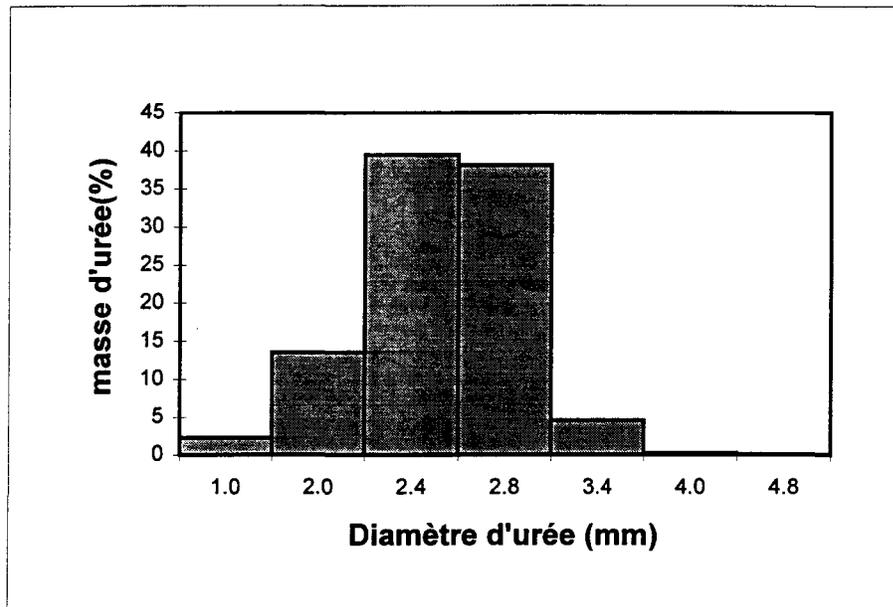


Figure 1.1 Distribution de la taille des grains d'urée

- L'éthylène glycol, liquide,
- L'acétate de potassium (KA), liquide, utilisé surtout aux États-Unis et en Suède et approuvé par l'USAF ;
- Le propylène glycol, liquide, également employé comme additif alimentaire ;
- L'acétate de magnésium et de calcium (AMC), solide ;
- Le formiate de sodium (NaFo), solide.
- Le formiate de potassium, liquide.

Il y a une trentaine d'années, le Canada a été l'un des premiers pays à utiliser dans les aéroports canadiens l'urée granulaire à grande échelle en tant que produit de dégivrage sur les pistes d'envol. Le choix avait été motivé par les propriétés de l'urée qui est peu corrosive pour les composantes d'avion,

l'aluminium en particulier, qui ne tache pas la peinture et qui n'abîme pas le plastique des hublots (John, R. D., November 1992).

De par le monde, la prise de conscience écologique a attiré l'attention sur les dommages que les produits chimiques causent à l'environnement, par exemple par contamination de la nappe phréatique.

- Urée :

Les produits dérivés de l'urée sont le nitrate, le nitrite et l'ammoniaque. Des concentrations élevées en ammoniaque peuvent être toxiques pour les organismes vivant en eau douce, tandis que les nitrates, en plus d'accélérer la formation d'algues, peuvent également poser des problèmes de santé aux hommes.

- L'éthylène-glycol :

L'éthylène-glycol peut être toxique pour les humains et la vie aquatique, s'il est ingéré. Sa demande biologique en oxygène est relativement élevée mais plus faible que celle de l'urée.

- Le propylène-glycol :

Sa demande biologique en oxygène est légèrement supérieure à celle de l'éthylène-glycol.

- L'acétate de potassium (KA) :

L'impact du KA sur la qualité de l'eau et l'activité biologique ont été étudiés à l'aéroport international d'Halifax au Canada. Le KA est un produit chimique relativement bénin qui a moins d'impacts sur l'environnement que l'urée, mais il coûte assez cher (John, R. D., November 1994).

- L'acétate de magnésium et de calcium (AMC)

Les études effectuées à l'aéroport d'Halifax ont montré que l'AMC n'a pratiquement pas eu d'impact décelable sur les eaux superficielles et souterraines, la végétation et la vie microbienne dans le sol et les ruisseaux. L'AMC présente aussi l'avantage de ne pas produire de concentration toxique d'ammoniaque comme l'urée et ses propriétés tampons ont même pu avoir un effet bénéfique compte tenu de l'acidité des eaux dans la région de l'aéroport (John, R. D., November, 1994).

- Le formiate de sodium (NaFo)

Dans l'ensemble, le NaFo n'a qu'un impact minime sur l'environnement et se dissipe en l'espace de quelques jours (John, R. D., November, 1994).

La demande biologique en oxygène (DBO) des différents produits déverglaçants et antigels pour les pistes est la suivante (concentrations des produits liquides appliqués) (Hoechst Chemical, 1990):

- Urée: 2,1 g O<sub>2</sub> / g.
- Monoéthylène glycol: 1,1 g O<sub>2</sub> / g.
- Diéthylène glycol: 1,3 g O<sub>2</sub> / g.
- 1.2-propylène glycol: 1,5 g O<sub>2</sub> / g.
- KA: 0,3 g O<sub>2</sub> / g.

L'information concernant le formiate de sodium n'est pas disponible.

La demande chimique en oxygène (DCO) des différents produits déverglaçants et antigels ont montré des différences notables d'un produit à un

autre selon des informations offertes par différents fournisseurs. On le peut constater au Tableau 1.1 qui présentent les résultats du DCO mesuré sur les produits de quatre différents fournisseurs, les valeurs étant comprises entre 821,176 mg / litre et 1618,824 mg / litre, soit une variation de près de 100%.

Tableau 1.1 Demande chimique en oxygène des produits déverglaçants et antigels

Fournisseur	Dénomination	Type	DCO (mg / litre)	Composition	Utilisation
UNION CARBIDE	UCAR <sup>+</sup>	IV	1110,588		Pur ou 75 / 25 ou 50 / 50
SPCA	DE 825	I	1447,059	60 % Éthylène	Dilué de 40 / 60 à 60 / 40
	AD104	I ou II	1014,118	50 % Propylène	Pur ou 75 / 25 ou 50 / 50
	AD 480	IV	1115,294	50 % Propylène	Pur ou 75 / 25 ou 50 / 50
	DE910	I	1421,177	80 % Propylène	75 / 25 ou 50 / 50
CLARIANT	DG I 1937	I	1618,824	90 % Diéthylène	Dilué de 40 / 60 à 60 / 40
	MP IV 2002	IV	821,176	50 % Propylène	Pur ou 75 / 25 ou 50 / 50
	MP II 1951	I ou II	847,059	50 % Propylène	Pur ou 75 / 25 ou 50 / 50
KILFROST	ABC 3	I ou II	1475,294	50 % Propylène	Pur ou 75 / 25 ou 50 / 50

### 1.2.3. Information sur la consommation des produits déverglaçants

Chaque hiver, une grande quantité de produits déverglaçants est appliquée sur les pistes d'aéroport et les voies de circulation. Le Tableau 1.2 présente des données concernant les consommations des produits déverglaçants à l'aéroport d'Halifax entre 1988 et 1994 (John, R. D., November, 1994).

Bien que les données ne soient pas complètes, plusieurs conclusions peuvent être tirées. Jusqu'en 1994, l'urée était encore le produit de choix pour le dégivrage des pistes à Halifax. La consommation d'AMC, NaFo et KA relève et plutôt de l'expérimentation. Il semble que la consommation annuelle normale de produits déverglaçants à Halifax se situe autour de 300 tonnes. L'augmentation drastique observée en 1993/1994 témoigne sans doute de conditions météorologiques exceptionnelles.

Tableau 1.2 Exemple de consommation des produits déverglaçants à Halifax

Nom de produit	1988/1989 (tonne)	1989/1991 (tonne)	1991/1992 (tonne)	1993/1994 (tonne)
Urée + AMC	322	124	165	645
Urée		113	150	600
AMC		11		
NaFo			15	
KA				45

#### 1.2.4. Tests de performance des produits déverglaçants

D'un point de vue environnemental et économique, il faudrait donc utiliser moins de produits déverglaçants et obtenir le meilleur effet antigel. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer la performance antigivre des produits déverglaçants en fonction de la quantité de produit utilisée.

Des tests de performance de déverglaçage (processus curatif) ont été effectués en laboratoire avec divers produits chimiques dont l'acétate de potassium, l'acétate de sodium et l'urée (Comfort, G., 1993). Les tests ont été effectués à différentes températures d'air, -2 °C, -5 °C, et -10 °C. Un film de glace d'environ 3 mm d'épaisseur était obtenu en congelant de l'eau sur un substrat de béton de 0,3 m × 0,9 m. Une quantité de produit déverglaçant était ensuite appliquée sur ce film de glace. Les tests ont montré, qu'après un certain temps, la glace fondait autour du produit et formait des "fosses". La glace était alors raclée, puis on mesurait le coefficient de friction avec une roue d'avion suspendue à un pendule qui glissait sur la surface du substrat à une vitesse de 17 km / h.

On a observé le phénomène intéressant suivant : si les "fosses" atteignent le fond du substrat, une grande quantité de glace peut être raclée, sinon, la glace ne peut pas être enlevée. Les taux d'application requis pour enlever la glace complètement après une heure de traitement avec le produit déverglaçant sont présentés dans le Tableau 1.3 pour les trois produits testés par G. Comfort.

B. Cowper a effectué plusieurs séries de tests pour évaluer le niveau de friction entre les pneus d'avion et la piste contaminée par des produits

déverglaçants pour les pistes et / ou des produits de dégivrage pour les avions (Cowper, B. and al., 1995).

Les résultats des tests indiquent une diminution du coefficient de friction de 0,2 environ quand le substrat est contaminé par les produits de dégivrage pour avions, ce qui est tolérable. Lorsque le substrat est aussi contaminé par des produits déverglaçants comme l'urée, le coefficient de friction peut se trouver augmenté (Cowper, B. and al., 1995).

Tableau 1.3 Taux d'application de produit déverglaçant requis pour enlever 3 mm de glace.

Température de l'air et le substrat (°C)	Taux d'application requis (g/m <sup>2</sup> )		
	Urée	Acétate de potassium	Acétate de sodium
-2	150	200	100
-5	300	500	200
-10	Non testé	700	300

### 1.3 Objectifs

#### 1.3.1. Objectif principal

L'objectif principal de ce travail est le développement d'une procédure d'essai pour des produits déverglaçants utilisés sur les pistes d'aéroports de façon préventive. La procédure sera proposée pour être incluse dans les normes AMS 1431 et AMS 1435.

### 1.3.2. Second objectif

Le second objectif est l'évaluation de la performance antigivres de plusieurs produits commerciaux dans différentes conditions de précipitation.

## 1.4 Méthodologie

Pour répondre aux objectifs de ce travail, il était nécessaire de développer des tests de laboratoire contrôlés et répétitifs. Pour ce faire, on a utilisé l'infrastructure du laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) de l'université du Québec à Chicoutimi. En se basant sur l'expertise acquise dans le domaine des tests de performance antigivre des fluides déverglaçants pour avions, on a pu utiliser des techniques éprouvées de simulation contrôlée de précipitation givrante, construire un appareillage spécialisé pour la procédure de test, et concevoir et mettre en place un logiciel permettant de donner les résultats instantanément après chaque test.

Pour développer la nouvelle procédure de tests et pour sa validation, on a bénéficié de la coopération de plusieurs fabricants qui ont accepté de fournir leur produit déverglaçant.

Le développement de la procédure de test s'est réalisé selon les sept étapes suivantes :

1. Recueil de l'information sur la méthode d'utilisation des produits en aéroport.

2. Ébauche de la procédure de laboratoire.
3. Mise en place du matériel requis.
4. Tests préliminaires pour déterminer la mesure de la performance.
5. Amélioration de la procédure et du matériel selon les résultats préliminaires.
6. Tests de validation.
7. Tests complémentaires (autre condition de tests, autres produits).

## **1.5 Tests préliminaires**

### **1.5.1. Introduction**

Afin d'observer le comportement anti-givre de l'urée sous les précipitations givrantes, des tests préliminaires ont été effectués. Ces tests ont été basés sur des tests d'endurance normalisés pour les fluides déverglaçants conçus pour les avions. Pour ces tests d'endurance, des plaques d'aluminium inclinées à 10° sont recouvertes d'un fluide et exposées ensuite à des précipitations surfondues d'intensité prédéterminée. Un front de glace se forme généralement sur le bord supérieur de la plaque et progresse le long de la plaque. Le temps écoulé entre le début des précipitations et le moment où le front de glace atteint 25 mm est enregistré et sert de référence comme le temps d'endurance du produit.

Cette procédure a donc été reprise pour les tests des produits pour piste d'aéroport. Cependant, les plaques ne sont pas inclinées et le produit appliqué ne recouvre pas complètement la plaque.

Six plaques d'aluminium de  $10 \times 30$  cm sont placées sur un support refroidi soumis à une précipitation surfondue. Quatre des six plaques sont recouvertes avec des plaques d'aluminium de  $10 \times 10$  cm pour collecter la glace et vérifier la distribution de l'intensité de givrage. Les deux autres sont utilisées pour tester des produits. L'intensité de givrage moyenne se situe entre 20 et 30 g/dm<sup>2</sup>h selon les tests. La température d'essai est -3 °C. Le produit testé est l'urée granulaire.

#### 1.5.2. Résultats d'observation des tests préliminaires

50 g/m<sup>2</sup> urée sont appliqués sur chaque plaque, et les plaques sont soumises aux précipitations surfondues. La glace se forme immédiatement entre les grains d'urée. La glace fond progressivement lorsque les grains d'urée se dissolvent.

- La dissolution de l'urée est plus rapide sous intensité de précipitation élevée, environ 15 minutes pour une intensité de 30 g/dm<sup>2</sup>h, et environ 27 minutes pour une intensité de 20 g/dm<sup>2</sup>h.

- Les gros grains supérieurs à environ 3,4 mm de diamètre ne sont dissous que partiellement.

- Une couche de glace couvrant presque toute la plaque se forme après 40 minutes sous la précipitation de 20 g/dm<sup>2</sup>h. La glace n'adhère pas à la plaque d'aluminium et elle est facile à enlever.

Le temps de dissolution des gros grains est plus long que celui des petits. Après que les grains d'urée se soient dissous dans l'eau, un film liquide d'urée et

d'eau se forme entre la couche de glace et la surface de la plaque. La glace n'adhère donc pas à la plaque d'aluminium. Cette couche de glace peut être facilement enlevée.

Les tests préliminaires ont montré que la procédure d'essais utilisée était prometteuse, cependant elle ne permettait pas d'obtenir une valeur de référence pour caractériser la performance des produits. On a donc cherché à améliorer cette procédure en se basant sur l'utilisation effective des produits déverglaçants dans les aéroports.

## **CHAPITRE 2**

### **PROCÉDURE D'ESSAIS**

#### **2.1 Introduction**

La procédure expérimentale devant être proche de celle pratiquée sur les pistes des aéroports, il était important de connaître de façon précise les conditions d'opérations en milieu naturel. Ces données, issues des opérations effectuées sur les pistes, ont permis de mieux définir la simulation en laboratoire.

D'après les informations fournies par Transport Canada et Aéroports de Paris, il apparaît que le principe de base de dégivrage des pistes est le même au Canada et en France. Les informations communiquées par Aéroports de Paris ont permis de connaître les procédures couramment utilisées à Roissy-Charles de Gaulle et à Orly. Si le coefficient de friction est très faible, le produit est appliqué directement sur la piste après le passage des équipements de déneigement en cas de présence de neige. Le choix du type de traitement (préventif, curatif, simple passage, double passage, quantités de produits...) se fait en fonction de la température, du vent et de l'épaisseur de la couche de neige ou glace (Dampoux, D., février 1996).

Dans ce projet, on étudie le traitement **préventif**. La procédure correspondant à ce type de traitement est présentée dans la section suivante.

## **2.2 Description des opérations d'antigivrage en aéroport**

(1) Le produit déverglaçant est répandu sur la piste et les voies d'accès, avant le début des précipitations glacées.

(2) Pendant la précipitation, quand l'opérateur juge que le produit a atteint son efficacité maximum, la neige ou la glace est raclée.

(3) Le coefficient de friction est mesuré.

## **2.3 Description de la procédure de test**

Les quatre étapes suivantes basées sur les opérations de dégivrage en aéroport, ont été retenues:

1. Appliquer un produit sur un substrat refroidi à une température inférieure à 0°C.
2. Soumettre le produit à une précipitation d'eau surfondue.
3. Racler la glace.
4. Mesurer le coefficient de friction du substrat.

**La procédure qui a été utilisée pour les essais est détaillée ci-dessous :**

1. Tous les essais sont exécutés avec six plaques horizontales, trois étant utilisées pour tester le produit de dégivrage et trois autres servant à vérifier l'intensité des précipitations.

2. Quand les plaques et le produit déverglaçant ont atteint une température adéquate ( $-3\text{ °C}$ ), une quantité appropriée de produit déverglaçant est appliquée.
3. Les produits solides sont appliqués à la main.
4. Les produits liquides sont appliqués avec une seringue.
5. Le produit de dégivrage est soumis à des précipitations surfondues de  $25\text{ g/dm}^2\text{h}$  ou  $40\text{ g/dm}^2\text{h}$  pendant une durée spécifique pour chaque plaque, cette durée varie entre 10 et 180 minutes par intervalle de 10 minutes.
6. Quand une plaque a été soumise aux précipitations surfondues pendant le temps prédéterminé, on la place dans un appareil spécialement conçu pour racler la glace. Ensuite, on mesure le coefficient de friction de la surface de la plaque.
7. Le test est répété plusieurs fois en augmentant la durée de précipitation jusqu'à ce que la glace ne puisse plus être ôtée par raclage. Lorsque la glace peut être enlevée sur au moins 90% de la surface de la plaque, le test est considéré comme un succès.

#### **2.4 Conditions des essais**

Deux produits déverglaçants ont été utilisés: un solide, l'urée et un liquide, le glycol-urée.

Les conditions d'essai sont les suivantes:

1. Température de l'air :  $-3 \pm 0,5\text{ °C}$ .

2. Température de plaque :  $-3 \pm 0,5$  °C.
3. Intensité de précipitation :  $25 \pm 0,5$  g/dm<sup>2</sup>h;  $40 \pm 0,5$  g/dm<sup>2</sup>h.
4. Temps de précipitation minimal de 10 minutes, en augmentation par intervalle de 10 minutes.
5. Quatre quantités différentes d'urée : 20; 30; 60; 180 g/m<sup>2</sup>.
6. Trois quantités différentes de glycol-urée : 20; 40; 60 mL/m<sup>2</sup>.

## **CHAPITRE 3**

### **ÉQUIPEMENT**

#### **3.1 Introduction**

Ce chapitre décrit les équipements de laboratoire nécessaires à l'évaluation de la performance des produits déverglaçants utilisés sur les pistes d'aéroport dans des conditions hivernales. Ces équipements permettent d'effectuer la simulation des précipitations surfondues et la simulation des opérations de dégivrage des pistes : chambre climatique, système de génération des précipitations, support des plaques, appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction.

#### **3.2 Chambre climatique**

Ce travail a été réalisé dans la chambre de bruine verglaçante du LIMA à l'Université du Québec à Chicoutimi. Il s'agit d'une chambre froide de 4 mètres de hauteur généralement utilisée pour les simulations expérimentales de précipitation verglaçant de particules de taille moyenne (ordre de 200  $\mu\text{m}$ ).

Un schéma de la chambre est présenté à la Figure 3.1.

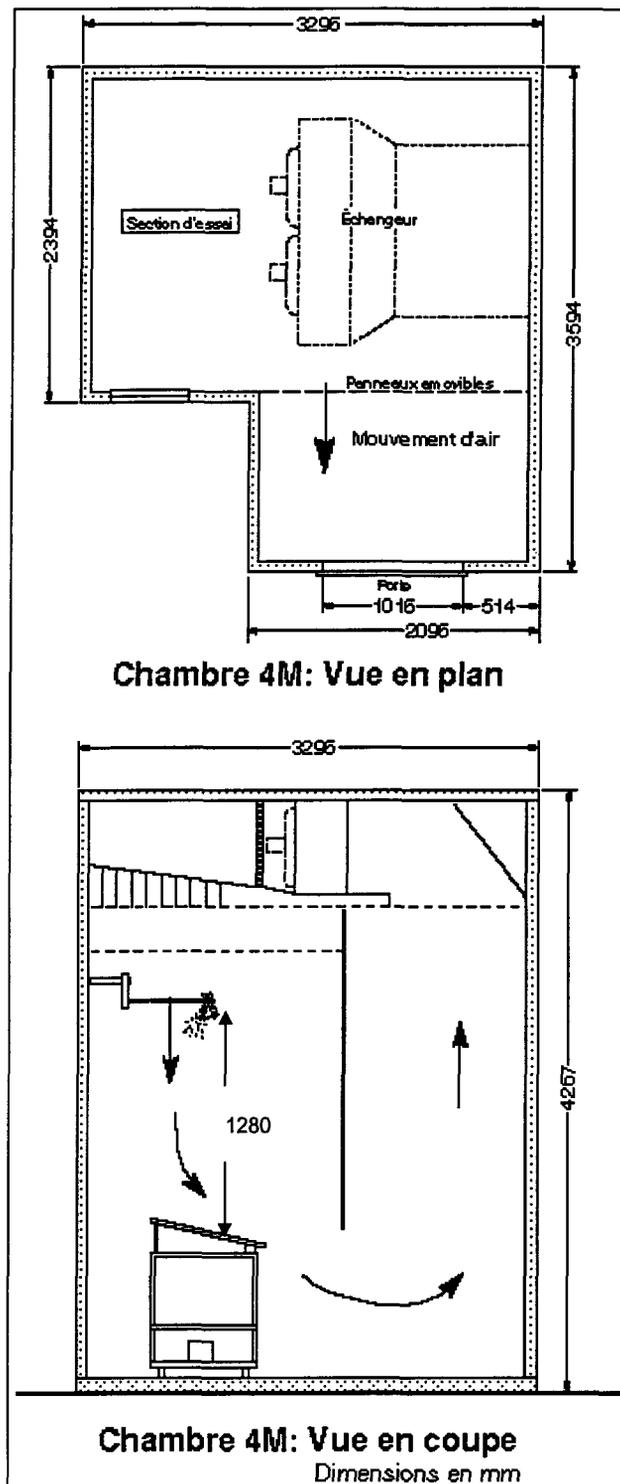


Figure 3.1 Chambre climatique

Une fenêtre munie d'un double vitrage pour prévenir la condensation permet d'observer de l'extérieur les tests effectués dans la chambre. Un panneau sépare la chambre en deux parties: la section d'essai, et la section utilisée pour les manipulations complémentaires. Cette séparation permet aussi de garder le mouvement de l'air constant et uniforme dans la zone de test. Un échangeur d'air placé au-dessus d'un plafond perforé apporte l'air froid dans la section d'essai.

La température de la chambre climatique est contrôlée par un ordinateur entre  $0\text{ °C} \pm 0,5$  et  $-30\text{ °C} \pm 0,5$ . La vitesse moyenne de l'air est  $0,5\text{ m/s}$  quand on la mesure environ  $5\text{ cm}$  au-dessus du montage utilisé pour les tests.

### **3.3 Génération des précipitations**

Le type de précipitation simulée est la bruine verglaçante. La hauteur de la chambre ne permet pas de simuler la pluie verglaçante qui est caractérisée par des gouttelettes d'eau d'au moins  $1\text{ mm}$  de diamètre volumique médian. Des gouttes de cette taille requièrent une distance d'au moins  $6\text{ m}$  pour parvenir à l'état surfondu. Les gouttelettes de la bruine verglaçante inférieures à  $0,5\text{ mm}$  peuvent devenir surfondues sur une plus courte distance.

Les dépôts de givrage sont obtenus à partir de la congélation de gouttelettes d'eau surfondues générées par un système constitué d'un système hydraulique et d'un réservoir d'eau pressurisée.

Le système hydraulique comprend un gicleur hydraulique qui est placé à  $128\text{ cm}$  au-dessus du support (voir Figure 3.1). L'angle d'oscillation du gicleur est

55°. Le diamètre des gouttelettes d'eau surfondues est d'environ  $200 \pm 25 \mu\text{m}$ . La période d'oscillation du gicleur est de 20 secondes. Un système pulsatif permet de contrôler la quantité d'eau sortant du gicleur. L'intensité de précipitation est obtenue en sélectionnant la période d'oscillation du gicleur et le temps d'ouverture et fermeture "on / off" du système pulsatif. Ce ratio "on / off" est d'environ 0,5 / 2,1 pour  $25 \text{ g/dm}^2\text{h}$  et 0,4 / 0,9 pour  $40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ . Pour éviter le gel de l'eau à l'orifice du gicleur et dans le tuyau d'alimentation en eau pendant les essais ou dans l'intervalle entre deux essais, le gicleur et le tuyau sont chauffés au-dessus de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  par un élément chauffant de type résistance électrique.

Le réservoir d'eau pressurisée d'une capacité totale de 90 litres contient un volume d'eau filtrée de 50 litres. La pression de l'eau est 65 psi pour l'intensité de  $25 \text{ g/dm}^2\text{h}$  et 85 psi pour l'intensité de  $40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ .

L'eau utilisée est de l'eau déionisée en accord avec la norme ASTM type IV.

### **3.4 Support des plaques**

Pour simuler la piste d'aéroport, on utilise un montage supportant des plaques. Selon le besoin, le support peut être réfrigéré par un système de refroidissement à base de glycol ou non réfrigéré.

Le support non réfrigéré est utilisé avec des plaques, en béton de ciment ou en béton de polymère, assez épaisse pour présenter une masse thermique capable de maintenir une température basse jusqu'à la fin du test.

Le support réfrigéré est utilisé avec des plaques en aluminium de 0,5 cm d'épaisseur. La simulation de la masse thermique de la surface de la piste est effectuée par un système de refroidissement à l'éthylène-glycol. Ce support est installé sur une table horizontale. L'éthylène-glycol, refroidi par une petite unité réfrigérée, circule à travers des canaux creusés dans un bloc d'aluminium sur lequel les plaques minces sont installées. Le système de réfrigération des plaques, contrôlé par un thermostat est opéré de façon indépendante de celui de la chambre climatique. La Figure 3.2 donne un exemple d'enregistrement de la température de l'air et de celle des plaques en fonction du temps.

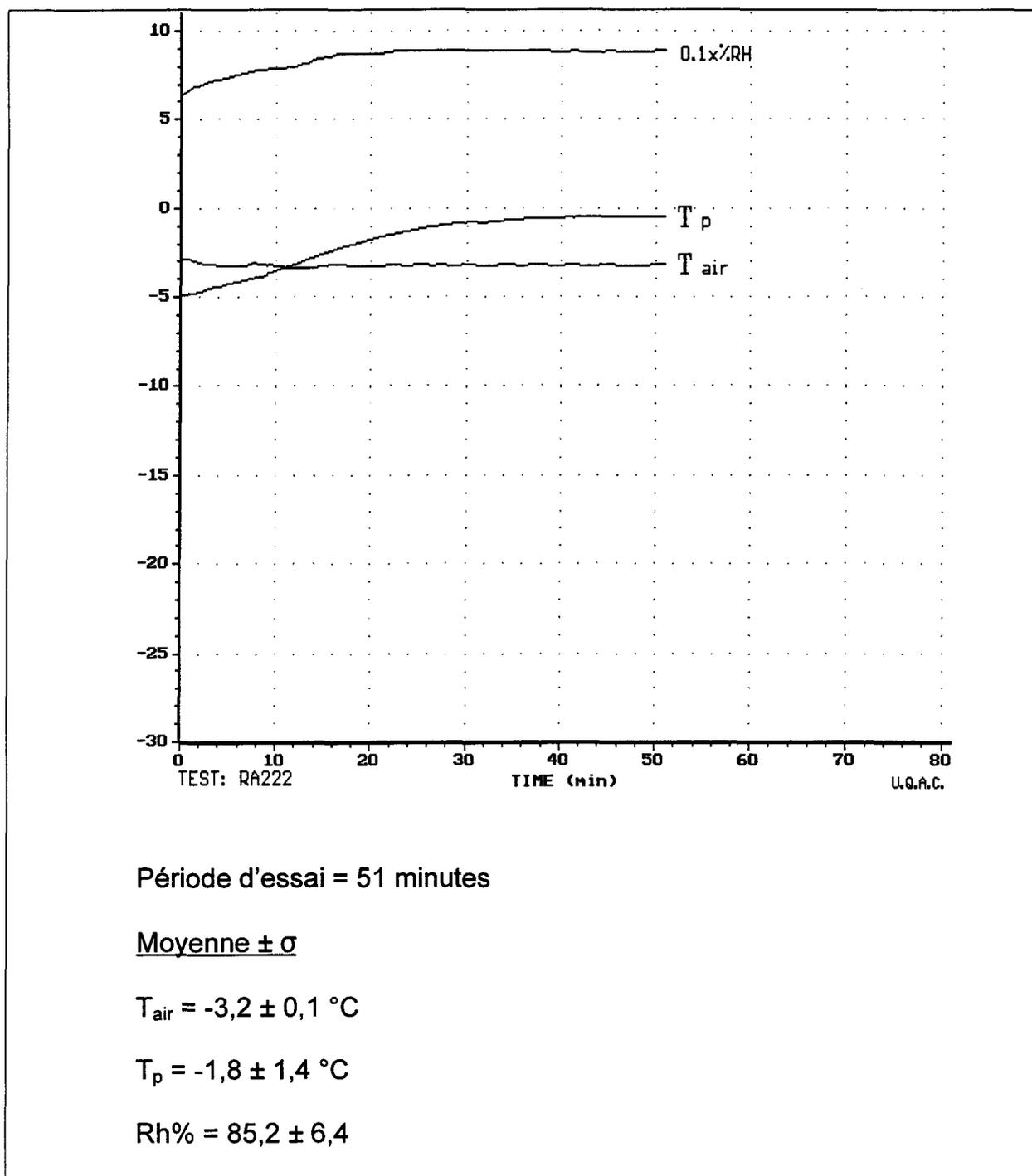


Figure 3.2 Graphique des températures enregistrées pendant un test

### 3.5 Types des plaques

#### 3.5.1. Introduction

La nature des plaques est très importante pour le test de performance de produit déverglacant. La performance des produits est influencée par la rugosité de surface de la plaque, sa porosité et ses caractéristiques thermiques. Pour obtenir des résultats répétitifs et plus proches de la réalité, différents types de substrats ont été essayés : le béton de ciment ; le béton de polymère ; l'aluminium moulé et l'aluminium enduit d'un revêtement spécial.

#### 3.5.2. Béton de ciment et béton de polymère

Les pistes et voies d'accès des aéroports sont en béton ou en asphalte. Les dalles de béton, disponibles en quincaillerie, ont été le premier substrat utilisé. Les plaques présentées à la Figure 3.3 et la Figure 3.4, ont une surface de 10 × 30 cm, et une épaisseur de 5 cm. Placées dans la chambre froide plusieurs heures avant le test, elles ont une masse thermique suffisante pour leur permettre de rester à basse température jusqu'à la fin de la précipitation.

Le béton de polymère utilisé est un produit breveté fabriqué par la compagnie Synertech Inc, de Boucherville, Québec. Il est utilisé à la place du béton ordinaire en cas de besoin de résistance élevée, d'inertie chimique et de résistance à l'eau. Son apparence est semblable à celle du béton de ciment, et sa densité est plus élevée. Son avantage sur le béton de ciment est de présenter un

faible porosité, son taux d'absorption de l'eau étant d'environ 0,12 %, tout en préservant la rugosité du béton de ciment.

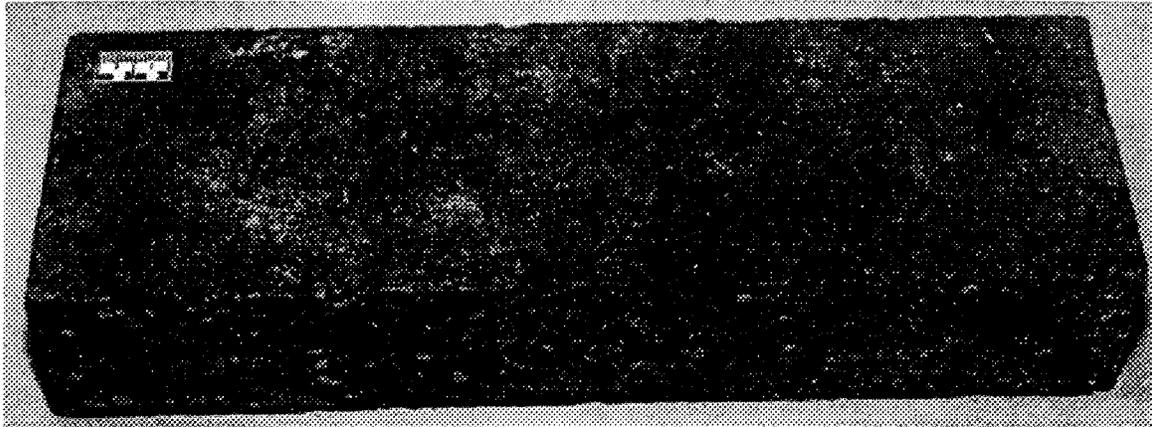


Figure 3.3 Plaque de béton de ciment

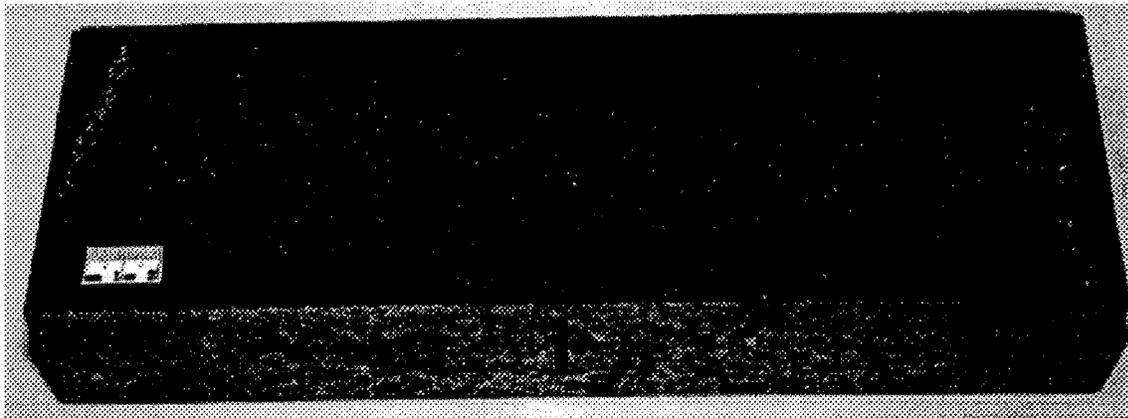


Figure 3.4 Plaque de béton de polymère

### 3.5.3. Plaque d'aluminium moulée et plaque d'aluminium enduite de PFS

Deux substrats à base d'aluminium ont été testés : la plaque d'aluminium moulée et la plaque d'aluminium enduite de "Precision Friction Surface" appelé "PFS" (Figure 3.5), la surface est 30×10 cm, l'épaisseur d'environ 0,5 cm. Le

support des plaques est refroidi pendant les tests pour simuler les conditions de la piste.



Figure 3.5 Plaque d'aluminium enduite de "PFS" (gauche) et la plaque de d'aluminium moulée (droite)

L'aluminium a été choisi parce qu'il est un bon conducteur thermique, imperméable, facile à nettoyer, et ne rouille pas dans l'environnement humide. La surface rugueuse est une caractéristique essentielle de la surface de béton. Il était donc nécessaire de la préserver. Pour le premier substrat en aluminium, une empreinte de la surface de béton a été prise, et deux plaques d'aluminium ont été moulées dans une fonderie à partir de ces empreintes. Malheureusement, les plaques d'aluminium se sont courbées pendant la période de refroidissement.

Le deuxième substrat à base d'aluminium est un produit breveté fabriqué par Safeway Traffic Inc. à High Wycombe, Bucks, Angleterre. Il est utilisé pour les plates-formes d'atterrissage des hélicoptères dans la marine. Il est constitué d'une plaque d'aluminium recouverte d'un revêtement de résine d'époxy renforcée avec des minéraux. Selon le fabricant, la résine est résistante aux produits chimiques et aux forces mécaniques. Ce substrat est aussi imperméable. Son coefficient de friction est élevé et quasiment le même pour toutes les plaques.

### **3.6 Appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction**

L'appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction a été construit par le LIMA (voir Figure 3.6 et Figure 3.7). Cet appareil est constitué des parties suivantes: un chariot mobile, un appareil pour contrôler la vitesse de chariot, des blocs de poids, un bloc en acier pour mesurer le coefficient de friction, une lame de raclage et une cellule de charge.

#### **3.6.1. Chariot mobile et raclage**

Le chariot mobile, montré à la Figure 3.6 et la Figure 3.7, se déplace avec une très faible friction à la vitesse constante de  $7,0 \pm 0,01$  mm/s. La Figure 3.8 présente le raclage d'une couche de glace de 2 mm d'épaisseur. Une lame en acier de 110 mm de largeur et de 3 mm d'épaisseur permet de racler la glace. Lorsque la lame racle la glace, le chariot est chargé avec des poids totalisant 11,72 kg pour simuler la pression exercée par la lame d'un camion: 0,35 MPa.

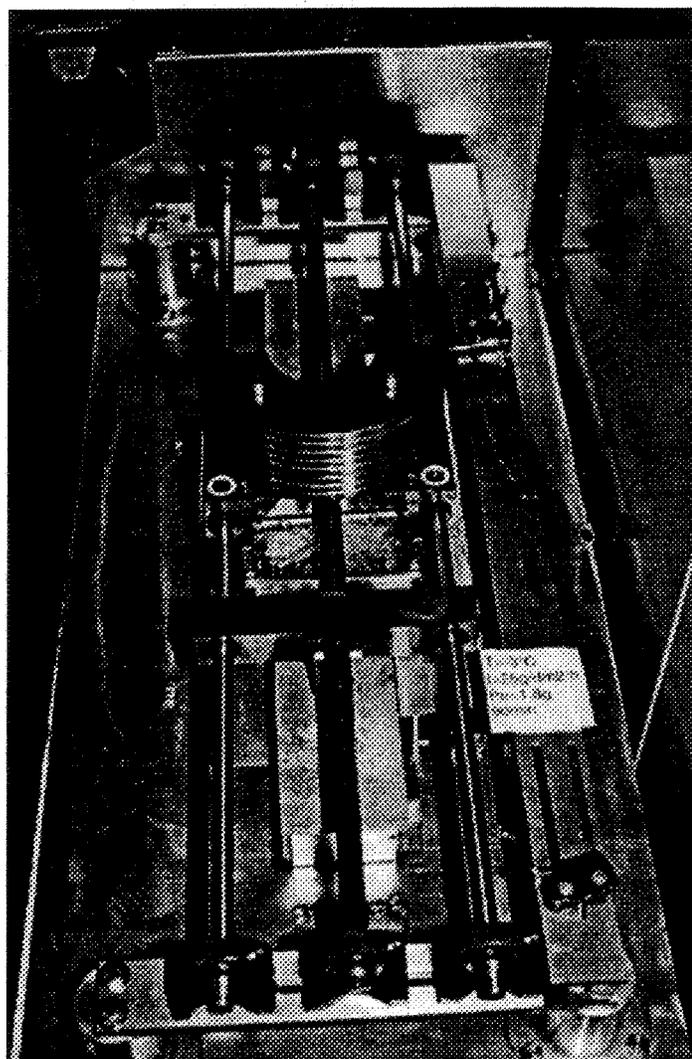


Figure 3.6 Vue de dessus d'appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction

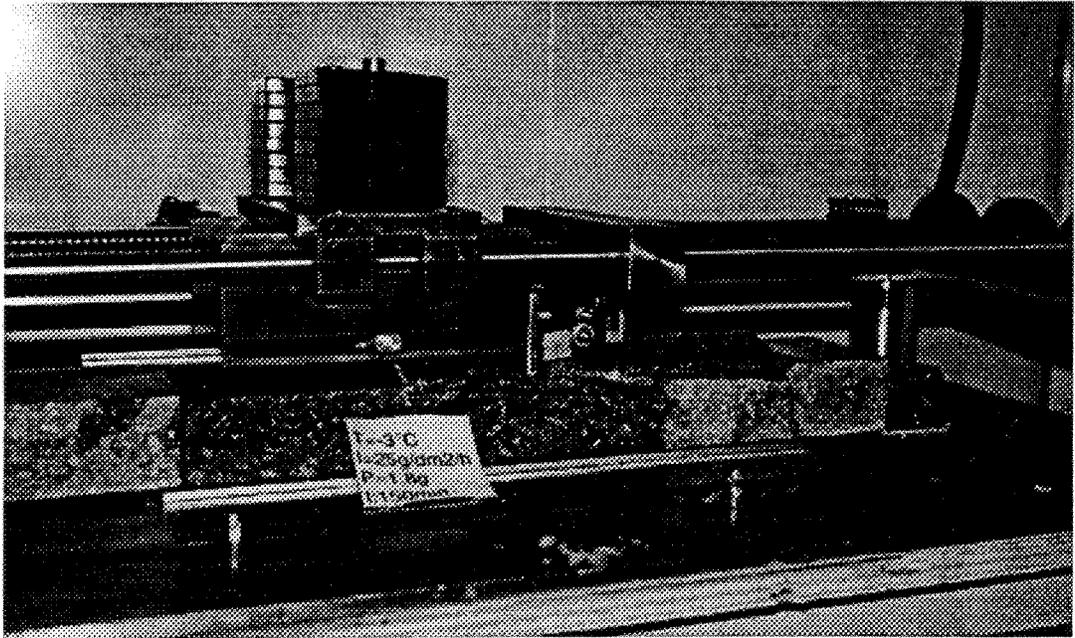


Figure 3.7 Vue de profil de l'appareil de raclage et de mesure du coefficient de friction

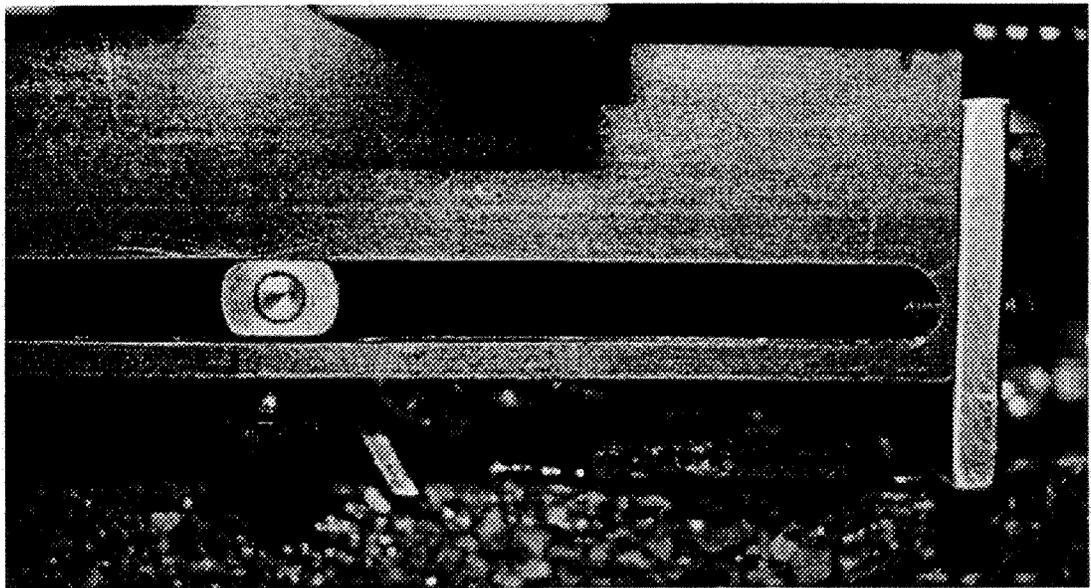


Figure 3.8 Raclage

### 3.6.2. Bloc de friction

Pour la mesure du coefficient de friction des plaques, on utilise le même montage que pour le raclage de la glace, à l'exception de la lame d'acier à laquelle on substitue un bloc d'acier (Figure 3.8). Le bloc en acier (Figure 3.9) est muni d'un coussin en caoutchouc de 6 mm d'épaisseur de qualité similaire à celle d'un pneu de roue d'avion. Sa surface de friction est  $85 \times 50$  mm, son épaisseur est 50 mm et il pèse 1,69 kg. Ce bloc est déplacé par le chariot mobile pendant la mesure du coefficient de friction à la vitesse constante de  $7,0 \pm 0,01$  mm/s. Le poids total du chariot et du bloc déplacé est 5,62 kg.

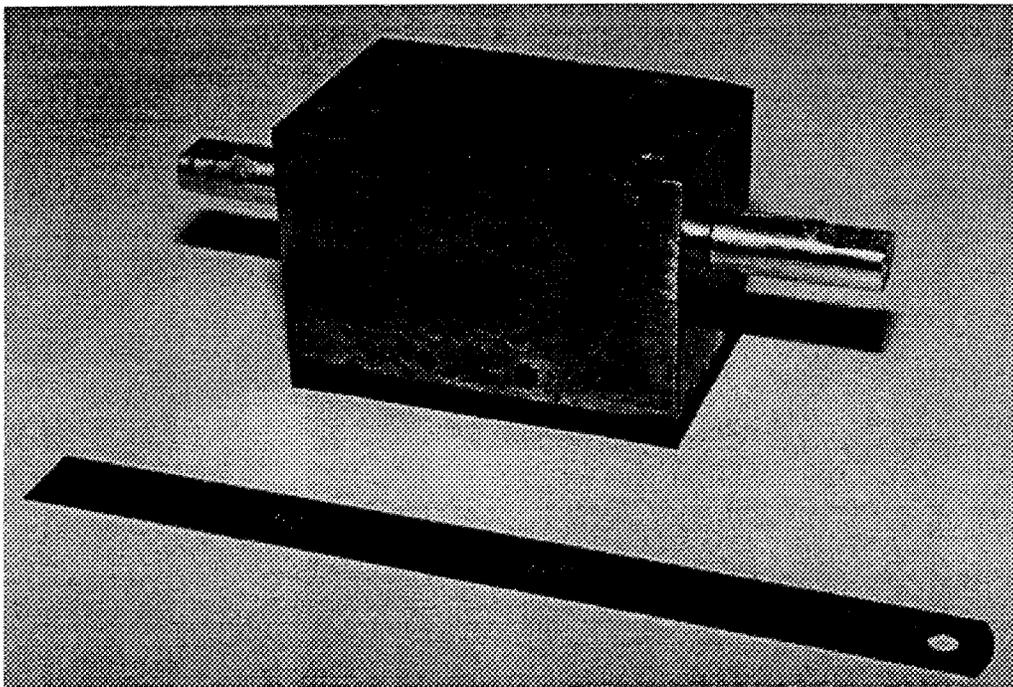


Figure 3.9 Bloc en acier pour mesurer le coefficient de friction

On peut obtenir le coefficient de friction par l'équation suivante:

$$\mu = F/P \quad (\text{Équation 3.1})$$

$\mu$  : coefficient de friction.

F : force de traction.

P : poids total du chariot et du bloc.

La force de traction est mesurée par une cellule de charge, et sa valeur ainsi que celle de la vitesse de déplacement sont enregistrées en temps réel par un ordinateur (Figure 3.10). La fréquence d'acquisition est 22 données par seconde.

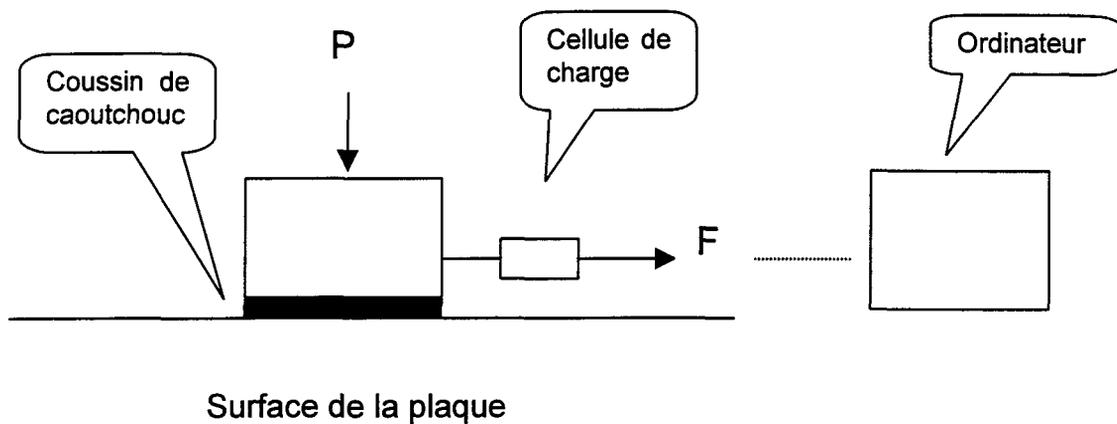


Figure 3.10. Mesure du coefficient de friction

### 3.6.3. Cellule de charge

Une cellule de charge (LDC) est utilisée pour mesurer la force de traction. La capacité maximale de la cellule de charge utilisée est 40 lb (18,14 Kg). La force de traction est enregistrée par un ordinateur.

## CHAPITRE 4

### ÉTALONNAGE

#### 4.1 Introduction

Deux types d'étalonnage doivent être effectués initialement et régulièrement afin d'avoir des tests reproductibles : l'étalonnage de distribution de la glace sur les plaques et l'étalonnage de la cellule de charge utilisée pour mesurer le coefficient de friction.

Il est nécessaire d'avoir une intensité de givrage uniforme sur toute la surface du support. Des essais préliminaires d'étalonnage ont du être exécutés pour trouver les réglages adéquats.

Le but de l'étalonnage de la cellule de charge est initialement de déterminer la relation entre le voltage et la force de traction, et subséquemment de vérifier sa validité.

## 4.2 Distribution de la glace sur les plaques

### 4.2.1. Intensité de givrage sur les plaques

Pendant les essais d'étalonnage, dix-huit plaques de 10×10 cm sont placées sur le support pour recueillir la glace. L'équation donnant d'intensité de givrage sur chaque plaque est présentée ci-dessous.

$$I_n = \frac{60 * P}{S * t} \quad (\text{Équation 4.1})$$

$I_n$ : intensité de givrage sur chaque plaque (g/dm<sup>2</sup>h).

P: poids de glace sur la plaque (g).

S: surface de plaque (dm<sup>2</sup>).

t: temps de précipitation (minute).

Dans l'essai de l'étalonnage de la distribution de givrage, l'intensité moyenne des précipitations est donnée par la moyenne des poids de givrage mesurés sur toutes les plaques (18), selon l'équation suivante:

$$I_{\text{moy}} = \frac{\sum_{n=1}^{18} I_n}{18} \quad (\text{Équation 4.2})$$

$I_{\text{moy}}$ : intensité de givrage moyenne (g/dm<sup>2</sup>h).

$I_n$ : intensité de givrage sur chaque plaque (g/dm<sup>2</sup>h).

Les conditions d'expérience et les résultats de quelques-uns de ces essais d'étalonnage sont présentés dans le Tableau 4.1.

L'intensité de givrage est très sensible à plusieurs paramètres: la pression de l'eau, le temps d'ouverture et fermeture du système pulsatif "on / off", la distance du gicleur au support, et surtout le gicleur lui-même puisque lorsque le gicleur est changé, le jet d'eau est différent et par conséquent l'intensité de givrage et la distribution de givrage changent aussi, bien que les autres conditions expérimentales restent les mêmes.

Tableau 4.1 Intensité de givrage dans différentes conditions d'essai

N° d'essai	Pression d'eau (psi)	On / Off (seconde)	D* (cm)	I <sub>moy</sub> (g/dm <sup>2</sup> h)
C1	70	0,5 / 1,1	128	32,38
C2	70	0,5 / 1,9	128	22,30
C3	65	0,6 / 2,3	128	24,95
C4	65	0,7 / 0,5	136	50,09
C5	85	0,4 / 0,7	136	39,67

\*D : Distance du gicleur au support.

Deux intensités de givrage ont été sélectionnées pour faire les tests : 25 et 40 g/dm<sup>2</sup>h. Selon la classification météorologique, 25 g/dm<sup>2</sup>h correspond à la valeur maximum de la catégorie des précipitations de faible intensité et 40 g/dm<sup>2</sup>h correspond à une valeur moyenne de la catégorie des précipitations d'intensité modérée. Les valeurs des paramètres correspondants à un essai normalisé sont présentés dans le Tableau 4.2 et le Tableau 4.3.

Tableau 4.2 Paramètres pour l'intensité de givrage de 25 g/dm<sup>2</sup>h

Type de gicleur	hydraulique (11001)
Distance du gicleur au support	128 cm
Inclinaison des plaques	horizontal
Pression d'eau	65 psi
Diamètre de gouttelettes	200 ± 25 µm
Température des plaques	-5 °C
Température de l'air	-3 °C
Ratio (on / off) (seconde)	0,5 / 2,1

Tableau 4.3 Paramètres pour l'intensité de givrage de 40 g/dm<sup>2</sup>h

Type de gicleur	Hydraulique (11001)
Distance du gicleur au support	136 cm
Inclinaison des plaques	horizontal
Pression d'eau	85 psi
Diamètre de gouttelettes	200 ± 25 µm
Température des plaques	-5 °C
Température de l'air	-3 °C
Ratio (on / off) (seconde)	0,4 / 0,9

#### 4.2.2. Épaisseur de glace déposée sur les plaques

Lorsque les précipitations surfondues commencent, une couche de glace se forme sur la surface des plaques. La relation donnant l'épaisseur moyenne de la glace en fonction de l'intensité de givrage, du temps de précipitation et de la densité de la glace est représentée par l'équation suivante:

$$h = \frac{I_{\text{moy}} * t}{d} \quad (\text{Équation 4.3})$$

h: épaisseur moyenne du film de glace (mm).

$I_{\text{moy}}$ : intensité moyenne de givrage ( $\text{g}/\text{dm}^2\text{h}$ ).

t: temps de précipitation (minute).

d: densité de la glace ( $920 \text{ g}/\text{dm}^3$ ).

L'épaisseur moyenne de glace accumulée en fonction du temps de précipitation est présentée dans le Tableau 4.4 et le Tableau 4.5.

Tableau 4.4 Épaisseur moyenne de glace pour l'intensité de précipitation moyenne de  $25 \text{ g}/\text{dm}^2\text{h}$

Temps de précipitation (minute)	10	20	30	40	50	60
Épaisseur de la glace (mm)	0,5	0,9	1,4	1,8	2,3	2,7

Tableau 4.5 Épaisseur moyenne de glace pour l'intensité de précipitation moyenne de 40 g/dm<sup>2</sup>h

Temps de précipitation (minute)	10	20	30	40	50	60
Épaisseur de la glace (mm)	0,7	1,4	2,2	2,9	3,6	4,3

### 4.3 Étalonnage de la cellule de charge

Le but de l'étalonnage de la cellule de charge est de trouver les paramètres de la relation entre le voltage et la force de traction. Avant de procéder à l'étalonnage, il faut s'assurer de la stabilité mécanique de la cellule de charge. Pour bien étirer la cellule, celle-ci est soumise pendant plusieurs heures à une charge de 40 lb. Ensuite, pour trouver la relation entre la force connue et la force mesurée par la cellule de charge, on utilise la méthode suivante:

La cellule de charge est soumise à une force connue qui est convertie en voltage. Chaque valeur de voltage correspond à une valeur de la force connue. La relation entre la force et le voltage est toujours linéaire. Les valeurs des constantes de la droite varient pour chaque cellule de charge. Les résultats d'une série d'étalonnage sont présentés dans le Tableau 4.6 et la Figure 4.1.

Tableau 4.6 Exemple d'étalonnage de cellule de charge

Étalonnage de cellule de charge		
No. de test: 4		
Date: 5 /03 /97		
Capacité maximum de cellule de charge: 40 lb		
Charge (kg)	Voltage (mV) charge croissante	Voltage (mV) charge décroissante
0,000	-0,13	-0,11
1,005	0,67	0,69
2,010	1,44	1,50
3,016	2,23	2,30
4,022	3,04	3,10
5,029	3,76	3,89
6,035	4,56	4,70
7,040	5,33	5,47
8,045	6,13	6,26
9,050	6,89	7,04
10,056	7,67	7,81
11,064	8,45	8,60
12,071	9,25	9,38
13,076	10,02	10,21
14,081	10,78	10,94
15,086	11,59	11,73
16,097	12,36	12,49
17,096	13,18	13,21
18,102	13,94	13,90

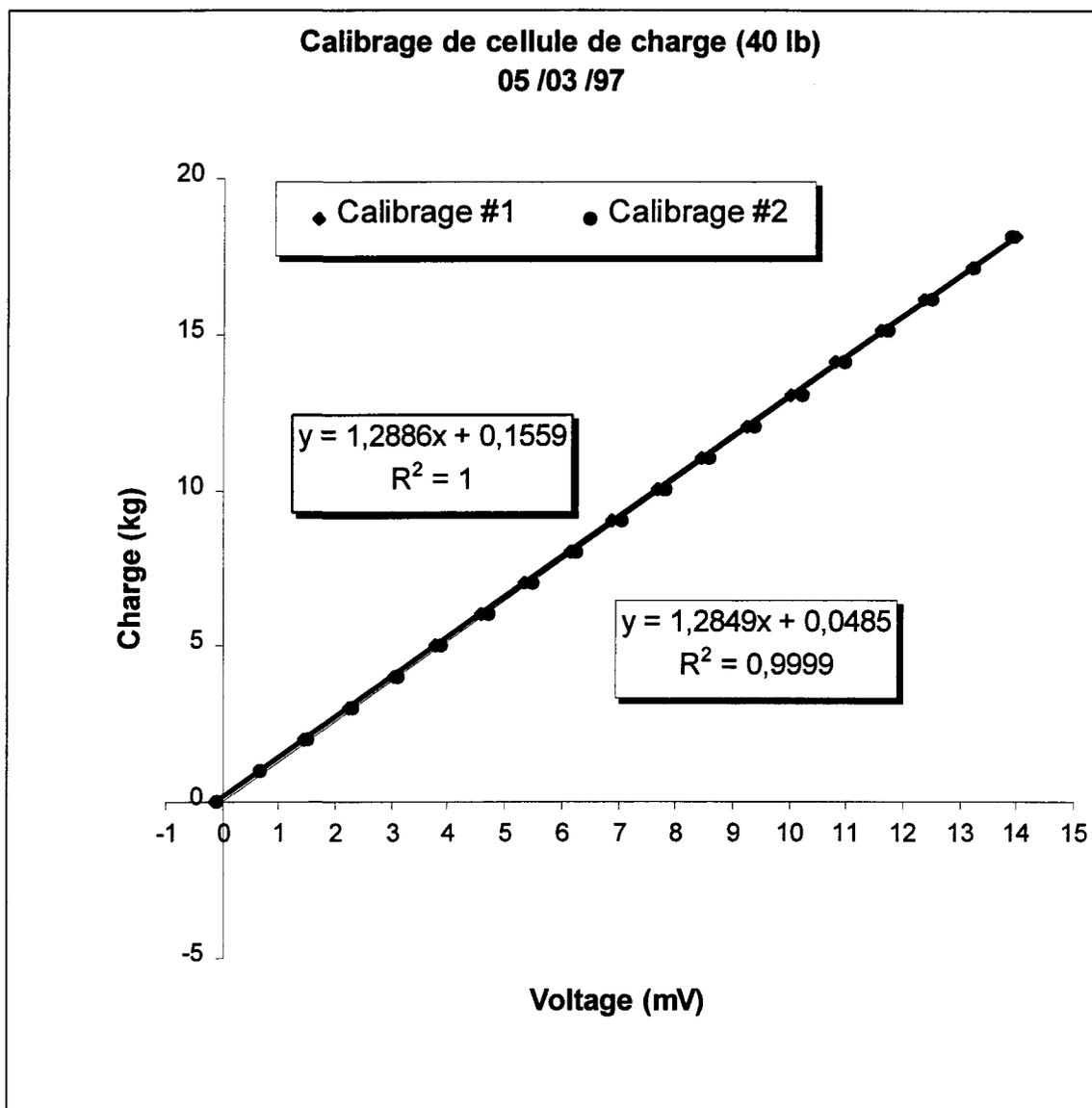


Figure 4.1 Étalonnage de cellule de charge

La relation entre le voltage et la force est trouvée par régression linéaire (Figure 4.1). La série des points correspondant à l'étalonnage # 1 est obtenue par l'accroissement successif de la charge de 0 kg à 18,102 kg. La série des points correspondant à l'étalonnage # 2 est obtenue par diminution successive de la

charge de 18,102 kg à 0 kg. Les deux courbes sont linéaires. Les équations des deux droites sont présentées ci-dessous.

$$Y = 1,2886 x + 0,1559 \quad R^2 = 1 \quad (\text{Équation 4.4})$$

$$Y = 1,2849 x + 0,0485 \quad R^2 = 0,9999 \quad (\text{Équation 4.5})$$

Les constantes de l'équation dont le coefficient de corrélation est le plus proche de la valeur 1 sont entrées dans le programme informatique de mesure du coefficient de friction.

## **CHAPITRE 5**

### **MÉTHODOLOGIE DE COMPARAISON DES SUBSTRATS**

#### **5.1 Introduction**

La série de tests préliminaires a permis le développement de l'essai d'endurance à l'adhésion de la glace (EEAG). Cet essai consiste en fait en l'évaluation de l'efficacité d'un produit à empêcher l'adhérence de la glace à un substrat. Puisque la force d'adhérence de la glace est dépendante du substrat, les performances d'un produit peuvent varier selon le substrat utilisé. Le choix du substrat est donc déterminant pour le succès de la procédure. Dans les quatre chapitres suivants, on va donc étudier les performances des essais réalisés avec quatre substrats différents : le béton de ciment ; le béton de polymère ; l'aluminium moulé et l'aluminium enduit de PFS. Puis dans le chapitre 10, on effectuera une comparaison de ces substrats.

#### **5.2 Méthodologie**

Afin de comparer les quatre substrats entre eux, deux produits ont été utilisés pour les essais : un produit solide, l'urée, et un produit liquide, le glycol-urée.

Les conditions environnementales étaient les mêmes pour tous les essais, soit 25 g/dm<sup>2</sup>h pour l'intensité de givrage, et -3 °C pour la température de l'air et celle du substrat.

Selon la procédure décrite au chapitre 2, les plaques sont traitées avec un produit déverglaçant, puis soumises à une précipitation surfondue. À la fin d'une durée prédéterminée, la couche de glace formée est raclée. Si la surface libre de glace représente au moins 90 % de la surface de la plaque, le raclage est considéré comme un succès. Le coefficient de friction est aussi mesuré. On considère 0,5 comme la limite minimale de succès basé sur le coefficient de friction : si le coefficient de friction est supérieur à cette limite, le test est un succès pour le produit, sinon c'est un échec.

Les deux éléments, observation visuelle et coefficient de friction, sont aussi importants l'un que l'autre. Le coefficient de friction est un critère plus objectif que l'observation visuelle. Il est cependant nécessaire de s'assurer d'une bonne correspondance entre les deux critères. C'est à dire que si la glace est enlevée, le coefficient de friction doit être relativement élevé, mais s'il reste de la glace, le coefficient de friction doit être bas. Cette correspondance est un critère important dans l'évaluation des substrats. Un autre critère tout aussi important est la reproductibilité des tests. La sélection du substrat qui sera inclus dans la procédure définitive des essais de performance de produits de dégivrage doit donc être basée sur deux critères : d'une part la reproductibilité des essais, et d'autre

part la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle de l'état de la plaque après raclage.

### 5.2.1. Évaluation de la reproductibilité des essais

L'évaluation de la reproductibilité des essais est basée sur le pourcentage de reproductibilité,  $P_r$ , défini par l'équation 5.1.

$$P_r = N_r / N_t \quad (\text{Équation 5.1})$$

où

$N_r$  : nombre de cas reproductibles où tous les tests effectués avec le même temps d'exposition ont donné le même résultat selon l'observation.

$N_{nr}$  : nombre de cas non reproductibles où tous les tests effectués avec le même temps d'exposition ont donné des résultats différents selon l'observation.

$N_t$  : nombre total de cas reproductibles ( $N_r$ ) et non reproductibles ( $N_{nr}$ ) où les tests ont été faits au moins deux fois dans les mêmes conditions.

Un exemple est présenté au Tableau 5.1, deux tests ont été effectués juste une seule fois soit ceux où les temps de précipitations sont de 10 et 20 minutes; c'est pourquoi les résultats de ces deux tests ne sont pas considérés pour l'évaluation de la reproductibilité.

Les autres tests ont été effectués au moins deux fois pour les précipitations de 30, 40, 50 et 60 minutes, c'est pourquoi, les résultats de ces tests sont considérés pour le calcul du pourcentage de reproductibilité.

Tableau 5.1 Exemple des essais

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra014	24,82	10	É	0,23
ra014	24,82	20	É	0,21
ra014	24,82	30	É	0,22
ra018	24,44	30	É	0,19
ra015	23,99	40	É	0,20
ra025	23,74	40	É	0,19
ra018	24,44	40	S	0,91
ra018	24,44	50	É	0,29
ra017	22,09	50	S	0,90
ra017	22,09	60	S	0,87
ra024	22,13	60	S	0,42

Le nombre d'essais répétés de façon reproductible:

$$N_r = 2 \quad (30 \text{ et } 60 \text{ minutes})$$

Le nombre d'essais répétés de façon non reproductible:

$$N_{nr} = 2 \quad (40 \text{ et } 50 \text{ minutes})$$

Le nombre total d'essais répétés au moins de deux fois:

$$N_t = N_r + N_{nr} = 2 + 2 = 4 \quad (30, 40, 50 \text{ et } 60 \text{ minutes})$$

Le pourcentage de la reproductibilité:

$$P_r = N_r / N_t = (2 / 4) \times 100 \% = 50 \%$$

### 5.2.2. Évaluation de la correspondance entre observation visuelle et le coefficient de friction

L'évaluation de la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est déterminée par deux nombres :  $P_{cs}$ , le pourcentage de correspondance pour les cas de succès, et  $P_{cé}$ , le pourcentage de correspondance pour les cas d'échecs:

$$P_{cs} = N_{cs} / N_{ts} \quad (\text{Équation 5.2})$$

où

$N_{cs}$  : nombre de cas avec succès où l'observateur a rapporté un succès et le coefficient de friction est supérieur à 0,5.

$N_{ts}$  : nombre total de cas avec succès rapportés par l'observateur.

$$P_{cé} = N_{cé} / N_{té} \quad (\text{Équation 5.3})$$

où

$N_{cé}$  : nombre de cas avec échec où l'observateur a rapporté un échec et le coefficient de friction est inférieur à 0,5.

$N_{té}$  : nombre total de cas avec échecs rapportés par l'observateur.

## **CHAPITRE 6**

### **ÉTUDE DE LA PLAQUE DE BÉTON DE CIMENT**

#### **6.1 Cas de l'urée**

La quantité de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée est la quantité suggérée par les utilisateurs pour enlever la glace sur les pistes aéroportuaire. Pour évaluer comment la quantité appliquée influence les résultats des essais, ceux ci ont été effectués en variant la quantité d'urée de 30 à 180 g/m<sup>2</sup>.

##### **6.1.1. Application de 30 g/m<sup>2</sup> d'urée**

Dans cette série d'essais, 30 g/m<sup>2</sup> d'urée ont été répartis, uniformément et à la main, sur les plaques de béton de ciment (Figure 6.1). Neuf autres petites plaques d'aluminium de 10 × 10 cm ont été déposées sur les plaques de béton pour vérifier l'intensité de givrage.

Les plaques ont été soumises aux précipitations surfondues pendant des périodes variant de 10 minutes à 130 minutes.

Le béton étant poreux, il absorbait facilement le mélange d'eau et d'urée formée pendant la précipitation. Par conséquent, la glace adhérait au béton et ne pouvait pas être enlevée. Cependant, après une semaine d'essais, les plaques de

béton étaient presque saturées de liquide, et l'urée s'est alors avérée plus efficace. Les résultats de ces derniers essais sont présentés au Tableau 6.1. La température de l'air,  $T_a$ , et celle des plaques,  $T_p$ , sont  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

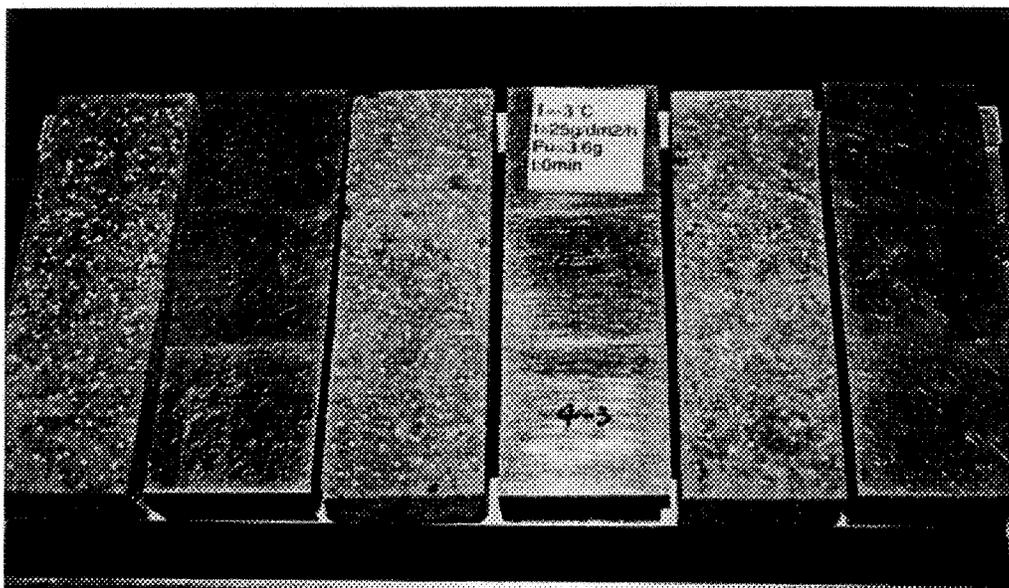


Figure 6.1 Application de l'urée sur les plaques de béton de ciment

Pour chaque essai, le numéro de l'essai est présenté dans la première colonne. L'intensité de givrage et le temps pendant lequel la plaque est soumise aux précipitations sont présentés dans la deuxième et la troisième colonne respectivement. La quatrième et la cinquième colonne présentent la performance du produit évalué, dans un cas par l'observation visuelle: "S" représente un succès, "É" un échec, et dans l'autre cas par le coefficient de friction mesuré sur la plaque après le raclage. Dans quelques cas, le coefficient de friction n'a pas pu être mesuré. La plupart du temps, cette absence de mesure est due à la présence de gros morceaux de glace qui se coinçaient sous le bloc de mesure du coefficient de friction.

Tableau 6.1 Performance de 30 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment,  
 Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra014	24,82	10	É	0,23
ra014	24,82	20	É	0,21
ra014	24,82	30	É	0,22
ra018	24,44	30	É	0,19
ra015	23,99	40	É	n.m
ra025	23,74	40	É	0,19
ra018	24,44	40	S	0,91
ra015	23,99	50	É	n.m
ra018	24,44	50	É	0,29
ra024	22,13	50	É	0,19
ra017	22,09	50	S	0,90
ra015	23,99	60	S	n.m
ra017	22,09	60	S	0,87
ra024	22,13	60	S	0,42
ra027	23,98	70	É	n.m
ra017	22,09	70	S	0,84
ra027	23,98	80	É	n.m
ra026	23,09	90	É	0,14
ra021	23,69	90	S	0,44
ra026	23,09	100	É	0,16
ra024	22,13	100	S	0,60
ra025	23,74	110	É	0,18
ra023	22,59	120	É	0,18
ra023	22,59	130	É	0,10

\*n.m : non mesuré.

### 1. Reproductibilité

Dans le cas de 30 minutes de précipitation, la glace n'a pas pu être raclée et les tests étaient reproductibles. Seulement dans le cas de 60 minutes de précipitation, la couche de glace, qui a atteint 2,5 mm d'épaisseur, a pu être enlevée par le raclage, et les tests étaient reproductibles. Dans les cas de 40, 50, 70, 80 et 90 minutes de précipitation, les résultats sont très variables, tantôt succès tantôt échec.

Le nombre d'essais répétés de façon reproductible:

$$N_r = 2 \quad (30 \text{ et } 60 \text{ minutes})$$

Le nombre d'essais répétés de façon non reproductible:

$$N_{nr} = 5 \quad (40, 50, 70, 90 \text{ et } 100 \text{ minutes})$$

Le nombre total d'essais répétés au moins de deux fois:

$$N_t = N_r + N_{nr} = 2 + 5 = 7 \quad (30, 40, 50, 60, 70, 90 \text{ et } 100 \text{ minutes})$$

Le pourcentage de la reproductibilité:

$$P_r = N_r / N_t = (2 / 7) \times 100 \% = 29 \%$$

### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des tests sont présentés dans le Tableau 6.1 et la Figure 6.2. Le Tableau 6.1 et la Figure 6.2 montrent le coefficient de friction mesuré en fonction du temps de précipitation, pour des cas d'application de 30 g/m<sup>2</sup> d'urée à -3 °C et une intensité de givrage de 25 g/dm<sup>2</sup>h. Les losanges pleins indiquent un raclage réussi, les cercles indiquent un raclage inefficace, tels que rapportés par l'observateur. La ligne horizontale à 0,5 délimite les zone de succès et d'échec

déterminé par le coefficient de friction. Selon ce critère, les points au-dessus de la ligne sont des succès, ceux situés au-dessous sont des échecs.

Cette figure montre que dans tous les cas d'échecs observés visuellement (cercles), le coefficient de friction est en-dessous de la limite. Dans la plupart des cas de succès observés visuellement (losanges), le coefficient de friction est sur ou au-dessus de la limite, (5 cas sur 7). Cependant, dans deux cas correspondant à 60 et 90 minutes de précipitation, l'observateur a noté que la glace était complètement enlevée par le raclage, alors que le coefficient de friction mesuré était au-dessous de la limite. Cette discordance s'explique par l'existence d'un film liquide situé entre la couche de glace et la surface de la plaque. Ce film était très mince mais suffisait à combler les creux de la surface rugueuse. Le temps écoulé entre le raclage et la mesure du coefficient de friction était parfois assez long, jusqu'à 30 minutes, et le film pouvait alors geler entraînant une valeur faible du coefficient de friction. Cette situation a été corrigée et intégrée dans la procédure d'essais finale.

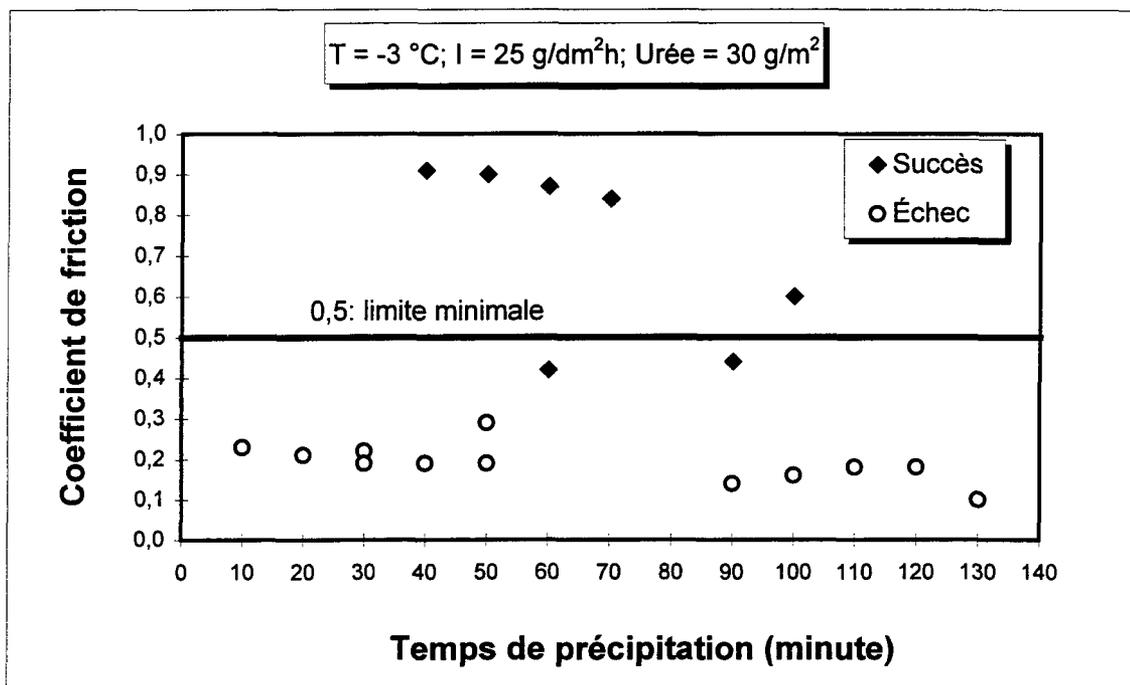


Figure 6.2 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment ( $30 \text{ g/m}^2$  d'urée)

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 5$  (40, 50, 60, 70 et 100 minutes)

$N_{ts} = 7$  (40, 50, 60, 70, 90 et 100 minutes)

$P_{cs} = 71 \%$

Pour les cas d'échec:

$N_{cé} = 12$  (10, 20, 30, 40, 90, 100, 110, 120 et 130 minutes)

$N_{té} = 12$  (10, 20, 30, 40, 90, 100, 110, 120 et 130 minutes)

$P_{cé} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Les tests sur la plaque de béton de ciment avec 30 g/m<sup>2</sup> d'urée, ont montré un problème de reproductibilité (Tableau 6.2). Par contre, la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle est assez bonne (Tableau 6.3).

Tableau 6.2 Reproductibilité (30 g/m<sup>2</sup> d'urée)

P <sub>r</sub>	N <sub>t</sub>
29 %	7

Tableau 6.3 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (30 g/m<sup>2</sup> d'urée)

P <sub>cs</sub>	N <sub>ts</sub>	P <sub>cé</sub>	N <sub>té</sub>
71 %	7	100 %	12

#### 6.1.2. Application de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 60 g/m<sup>2</sup> dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des tests sont montrés au Tableau 6.4 et à la Figure 6.3.

#### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 10, 20, 30, 40, 150 et 180 minutes de précipitation, la glace n'a pas pu être enlevée, et les résultats des tests tels que rapportés par l'observateur sont très reproductibles.

À partir de 50 minutes jusqu'à 2 heures de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée. Les résultats des tests sont très reproductibles aussi. Il y a seulement un cas critique, celui du test effectué à 90 minutes. Il est surprenant qu'un échec ait été observé pour ce temps alors que pour des temps d'exposition plus courts et plus longs, on a observé des succès. Pour les essais présentés dans cette section, le raclage n'était pas toujours efficace à cause du montage. Lorsque la couche de glace était épaisse, si la lame de raclage n'était pas très bien positionnée au début de la plaque, elle glissait sur la glace au lieu de la pousser. Le système a été amélioré pour la procédure finale.

$N_r = 6$  (10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes)

$N_t = 6$  (10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes)

$P_r = 100 \%$

Tableau 6.4 Performance de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment,  
Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de Tests	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra009	24,55	10	É	0,23
ra135	24,27	10	É	0,28
ra138	24,65	10	É	0,31
ra009	24,55	20	É	0,20
ra135	24,27	20	É	0,27
ra138	24,65	20	É	0,26
ra009	24,55	30	É	0,25
ra135	24,27	30	É	0,25
ra138	24,65	30	É	0,24
ra011	23,89	40	É	0,22
ra016	24,11	40	É	0,57
ra011	23,89	50	S	0,71
ra016	24,11	50	S	0,95
ra007	23,78	60	S	0,99
ra011	23,89	60	S	0,79
ra016	24,11	60	S	0,93
ra007	23,78	70	S	1,00
ra007	23,78	80	S	0,90
ra010	20,92	90	É	0,17
ra008	22,52	100	S	0,67
ra008	22,52	110	S	0,44
ra008	22,52	120	S	0,72
ra010	20,92	150	É	0,25
ra010	20,92	180	É	0,19

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais pour  $60 \text{ g/m}^2$  d'urée sont présentés dans le Tableau 6.4 et la Figure 6.3.

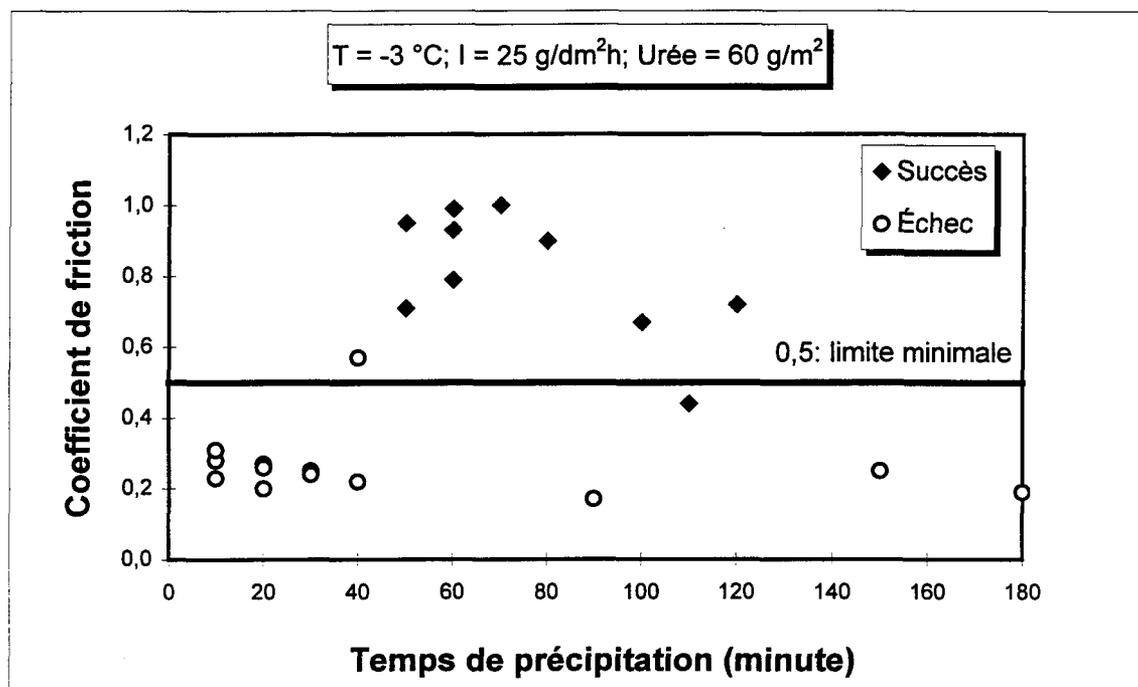


Figure 6.3 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment ( $60 \text{ g/m}^2$  d'urée)

Le Tableau 6.4 et la Figure 6.3 montrent que dans presque tous les cas d'échecs observés visuellement (cercle), le coefficient de friction est en dessous de la limite (13 cas sur 14). Le cas de 40 minutes est un cas limite où la glace a pu être partiellement enlevée alors qu'il subsistait plus de 10 % de glace sur la surface de la plaque. Cependant la surface libre de la glace était suffisamment

grande pour donner au coefficient de friction une valeur légèrement supérieure à la limite (0,57).

Dans la plupart des cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction est au-dessus de la limite (9 cas sur 10). Cependant, dans un seul cas correspondant à 110 minutes de précipitation, l'observateur a noté que la glace était complètement enlevée par le raclage, alors que le coefficient de friction mesuré était au-dessous de la limite. Cette discordance s'explique par l'existence d'un film liquide situé entre la couche de glace et la surface de la plaque qui gèle après le raclage et avant la mesure du coefficient de friction.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 9$  (50, 60, 80, 100 et 120 minutes)

$N_{ts} = 10$  (50, 60, 80, 100, 110 et 120 minutes)

$P_{cs} = 90 \%$

Pour les cas d'échec:

$N_{cé} = 13$  (10, 20, 30, 40, 90, 150 et 180 minutes)

$N_{té} = 14$  (10, 20, 30, 40, 90, 150 et 180 minutes)

$P_{cé} = 93 \%$

### 3. Conclusion

Les essais effectués sur la plaque de béton de ciment avec 60 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré une très bonne reproductibilité (Tableau 6.5). La correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle est très bonne (Tableau 6.6).

Tableau 6.5 Reproductibilité (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	6

Tableau 6.6 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
90 %	10	93 %	14

### 6.1.3. Application de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 6.7.

#### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 10, 20, 30 minutes de précipitation, la glace n'a pas pu être enlevée, et les résultats des essais tels que rapportés par l'observateur sont variables.

Pour 40 et 50 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée. Les résultats des tests répétés à 40 minutes sont reproductibles, mais pas ceux à 50 minutes.

$N_r = 1$  (40 minutes)

$N_t = 4$  (10, 20, 30 et 40 minutes)

$P_r = 25 \%$

Tableau 6.7 Performance de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de ciment,  
Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra012	24,70	10	É	0,29
ra112	24,70	10	S	0,42
ra012	24,70	20	É	0,72
ra111	24,77	20	S	0,53
ra012	24,70	30	É	0,56
ra013	24,06	30	É	0,47
ra109	24,31	30	S	0,40
ra110	24,76	30	S	0,47
ra013	24,06	40	S	1,06
ra022	24,76	40	S	0,68
ra013	24,06	50	S	0,94

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 6.7 et la Figure 6.4 montrent que sur les onze cas présentés, seulement six indiquent une bonne correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction. Deux échecs rapportés par l'observateur, à 20 et 30 minutes, correspondent à des coefficients de friction supérieurs à 0,5, et trois succès, un à 10 et deux à 30 minutes, correspondent à des coefficients de friction inférieurs à 0,5. On peut aussi remarquer que six cas sur dix sont des cas limites puisque le coefficient de friction est proche de 0,5, et que ces six cas correspondent aux temps d'exposition problématiques soit 10, 20, et 30 minutes.

Les cas d'échecs observés associés à des coefficients de friction élevés pourraient être expliqués par le grand nombre de grains d'urée restant sur la plaque après le raclage, ce qui aurait pu augmenter le coefficient de friction. Pour 40 et 50 minutes, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est bonne.

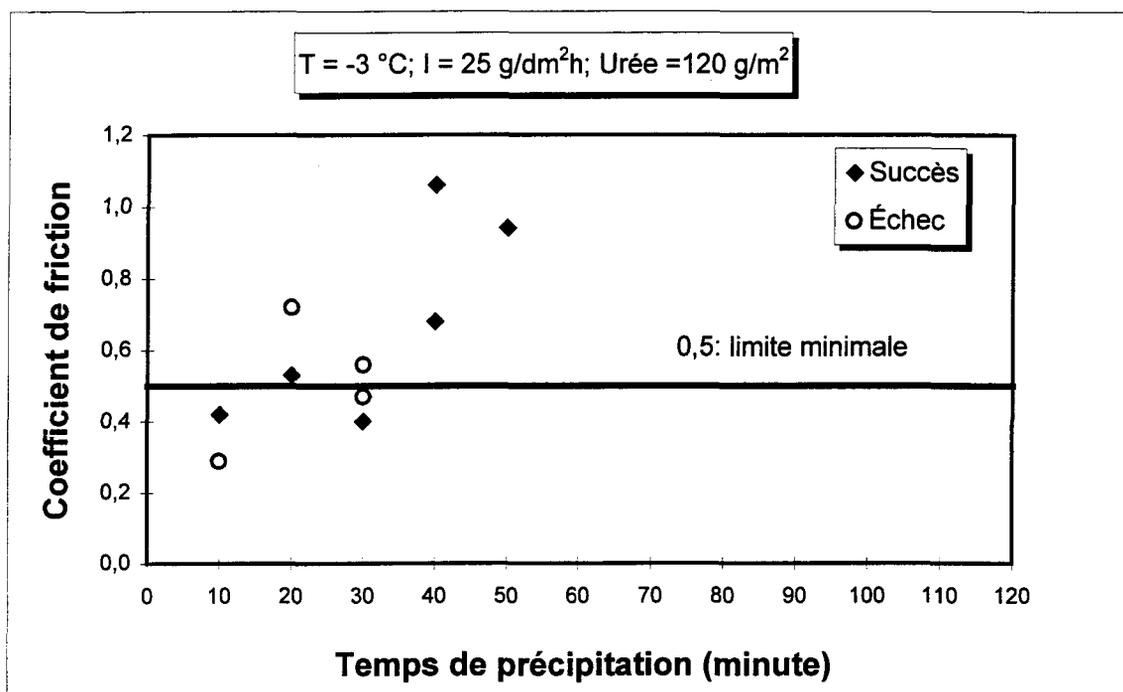


Figure 6.4 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment ( $120\text{ g/m}^2$  d'urée)

Pour les cas de succès :

$$N_{cs} = 4 \quad (20, 40 \text{ et } 50 \text{ minutes})$$

$$N_{ts} = 7 \quad (10, 20, 30, 40 \text{ et } 50 \text{ minutes})$$

$$P_{cs} = 57\%$$

Pour les cas d'échec :

$$N_{cé} = 2 \quad (10 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_{té} = 4 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_{c\acute{e}} = 50 \%$$

### 3. Conclusion

Les tests sur la plaque de béton de ciment avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré un problème de reproductibilité (Tableau 6.8), et un problème de correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle (Tableau 6.9).

Tableau 6.8 Reproductibilité (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
25 %	4

Tableau 6.9 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{c\acute{e}}$	$N_{t\acute{e}}$
57 %	7	50 %	4

#### 6.1.4. Application de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée

Pour cette série d'essais, la quantité d'urée a été augmentée à 180 g/m<sup>2</sup>. Les résultats sont présentés au Tableau 6.10. La Figure 6.5 montre la glace déposée sur la plaque de béton de ciment.

##### 1. Reproductibilité

Les résultats de l'observation sont reproductibles dans deux cas sur trois, le cas problématique correspondant à 10 minutes d'exposition.

$$N_r = 2 \quad (20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_t = 3 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$P_r = 67 \%$

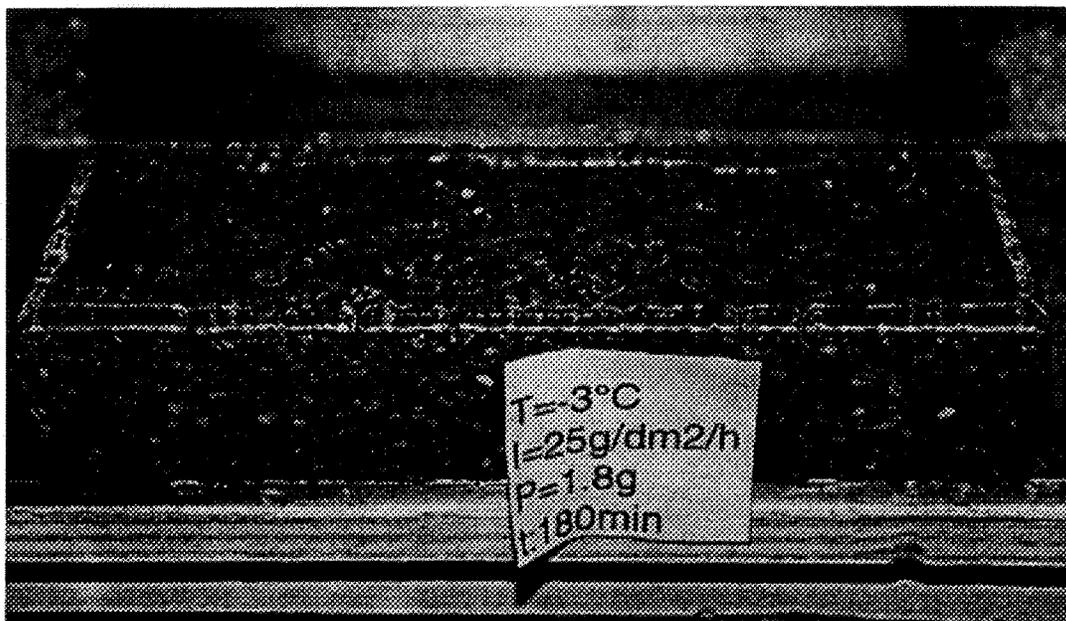


Figure 6.5 Glace déposée sur la plaque de béton de ciment traitée avec  $180 \text{ g/m}^2$  de l'urée

Tableau 6.10 Performance de  $180 \text{ g/m}^2$  d'urée sur la plaque de béton de ciment,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra025	23,74	10	É	0,32
ra114	24,54	10	S	0,43
ra022	24,76	20	S	0,59
ra025	23,74	20	S	0,93
ra022	24,76	30	S	0,65
ra113	23,98	30	S	0,52

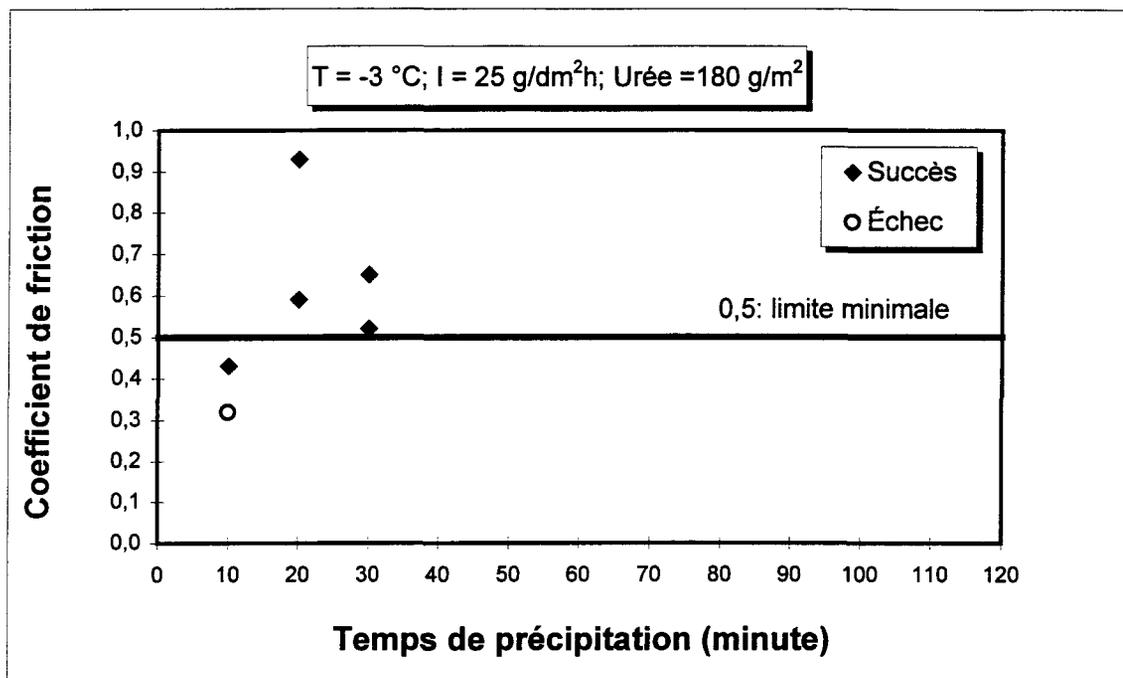


Figure 6.6 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 6.10 et la Figure 6.6 montrent que, dans la plupart des cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction était au-dessus de la limite (4 cas sur 5). Cependant, dans un seul cas correspondant à 10 minutes de précipitation, l'observateur a noté que la glace était complètement enlevée par le raclage, alors que le coefficient de friction mesuré était 0,43. On peut considérer ce cas comme un cas limite puisque la valeur du coefficient de friction est proche de 0,5 et que l'autre essai correspondant à 10 minutes de précipitation est un échec.

Pour les cas de succès :

$$N_{cs} = 4$$

(20 et 30 minutes)

$N_{ts} = 5$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{cs} = 80 \%$

Pour les cas d'échec :

$N_{cé} = 1$  (10 minutes)

$N_{té} = 1$  (10 minutes)

$P_{cé} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque de béton de ciment avec 180 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré une reproductibilité insuffisante (Tableau 6.11), et la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle est bonne (Tableau 6.12).

Tableau 6.11 Reproductibilité (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
67 %	3

Tableau 6.12 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
80 %	5	100 %	1

#### 6.1.5. Conclusions sur le cas de l'urée

Le résumé des résultats des essais est présenté dans le Tableau 6.13 et la Figure 6.7.

Tableau 6.13 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas de l'urée

Quantité de l'urée	30 g/m <sup>2</sup>	60 g/m <sup>2</sup>	120 g/m <sup>2</sup>	180 g/m <sup>2</sup>	M <sub>p</sub>	σ <sub>p</sub>
Reproductibilité P <sub>r</sub> (%)	29	100	25	67	55	32
Nombre de cas	7	6	4	3	20	
Correspondance P <sub>cs</sub> (%)	71	90	57	80	76	13
Nombre de succès observés	7	10	7	5	29	
Correspondance P <sub>cé</sub> (%)	100	93	50	100	90	16
Nombre d'échecs observés	12	14	4	1	31	

M<sub>p</sub> : moyenne pondérée.

σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré.

Dans le Tableau 6.13 on remarque que la reproductibilité sur la plaque de béton de ciment n'est pas satisfaisante avec une moyenne pondérée de 55 %. Elle est aussi variable, puisque les pourcentages de reproductibilité varient de 25 à 100 %, et n'est pas fonction de la quantité d'urée utilisée.

Comme le montrent la Figure 6.7 et le Tableau 6.13, dans la grande majorité des cas, les succès et les échecs rapportés par l'observateur sont respectivement au-dessus et en-dessous de la limite du coefficient de friction. Le pourcentage de correspondance en cas de succès est assez bon, 76 % (22 cas sur 29). Le pourcentage de correspondance en cas d'échec est excellent, 90 % (28 cas sur 31). Donc, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est généralement bonne.

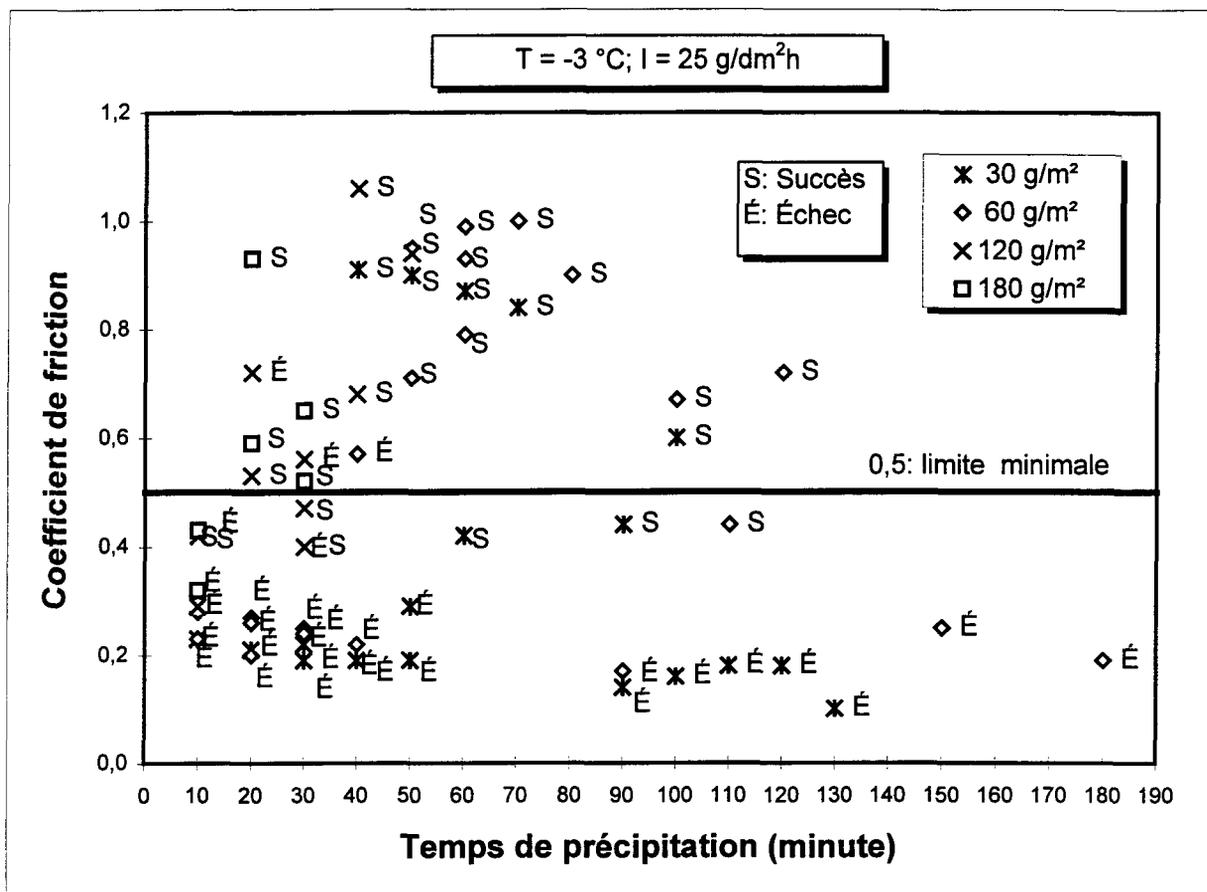


Figure 6.7 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas de l'urée

On peut donc conclure que dans le cas de la plaque de béton de ciment traité avec l'urée :

La reproductibilité n'est pas satisfaisante. Les problèmes expérimentés au début de la série d'essais indiquent que la porosité du béton de ciment pourrait être la cause de ce manque de reproductibilité.

La correspondance entre les deux critères d'échec est généralement bonne. La faiblesse rencontrée était causée par des défauts du montage susceptibles d'être corrigés.

## **6.2 Cas du glycol-urée**

### **6.2.1. Application de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée**

Dans cette série d'essais, 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont été appliqués à -3 °C sous forme de gouttes déposées sur les plaques de béton de ciment avec une seringue. Neuf autres petites plaques d'aluminium de 10 × 10 cm ont été déposées sur les plaques de béton pour vérifier l'intensité de givrage.

Les plaques ont été soumises aux précipitations surfondues pendant des périodes variant de 10 minutes à 30 minutes. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 6.14.

Dès le début des précipitations, la glace a commencé à se former sur les plaques autour des gouttes de produit. Puis des petites flaques de mélange produit-eau se sont formées et 10 minutes après le début des précipitations, ces flaques ont commencé à regeler en surface. Cependant, quelques zones situées au-dessous de la mince couche de glace restaient encore liquide. Environ 14 minutes après le début de la précipitation, la couche de glace couvrait toute la plaque. Dans tous les cas, la glace adhérait au béton et ne pouvait pas être raclée. Cette quantité de glycol-urée n'était donc pas suffisante pour empêcher l'adhésion de la glace.

Tableau 6.14 Performance de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra043	25.76	10	É	0,20
ra117	24,25	10	É	0,22
ra116	24,02	20	É	0,43
ra137	24,57	20	É	0,22
ra115	24,34	30	É	0,17
ra137	24,57	30	É	0,18

### 1. Reproductibilité

La couche de glace ne peut pas être enlevée avec cette quantité de produit.

Dans tous les cas de précipitation, la reproductibilité est bonne.

$N_r = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 100 \%$

### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 6.14 et la Figure 6.8.

Le Tableau 6.14 et la Figure 6.8 montrent le coefficient de friction mesuré en fonction du temps de précipitation, pour des cas d'application de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée à -3 °C et une intensité de givrage de 25 g/dm<sup>2</sup>h. Les cercles indiquent un raclage inefficace tel que rapporté par l'observateur.

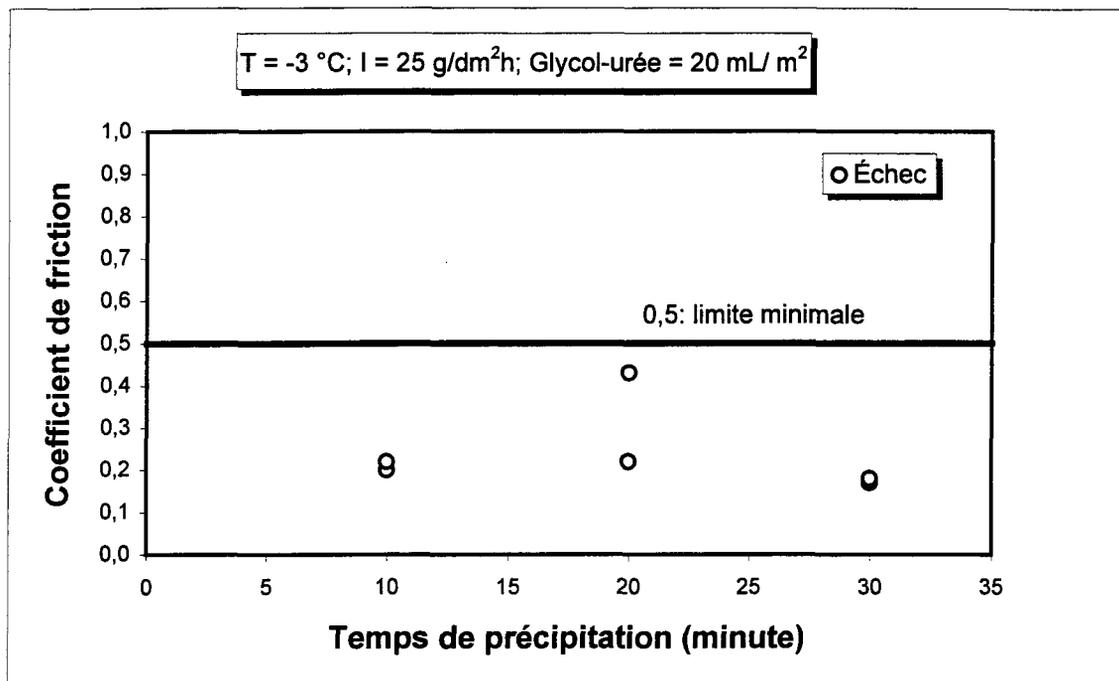


Figure 6.8 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

Cette figure montre que dans tous les cas d'échecs observés visuellement (cercles), le coefficient de friction est en-dessous de la limite.

Pour les cas d'échecs :

$N_{c\acute{e}} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_{t\acute{e}} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{c\acute{e}} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque de béton de ciment avec 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont montré une excellente reproductibilité (Tableau 6.15), et la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle est excellente (Tableau 6.16).

Tableau 6.15 Reproductibilité (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	3

Tableau 6.16 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cé}$	$N_{té}$
100 %	6

### 6.2.2. Application de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 40 mL/m<sup>2</sup> dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 6.17 et à la Figure 6.9.

En utilisant 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée, la glace a pu être raclée dans plusieurs cas.

#### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 20 et 30 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée par le raclage à chaque tentative. Dans les cas de 10 et 40 minutes de précipitation, les résultats sont variables, tantôt succès tantôt échec.

$$N_r = 2 \quad (20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_t = 4 \quad (10, 20, 30 \text{ et } 40 \text{ minutes})$$

$$P_r = 50 \%$$

Tableau 6.17 Performance de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de ciment, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra046	23,92	10	É	0,36
ra043	25,76	10	S	0,48
ra044	25,56	20	S	0,37
ra118	24,30	20	S	0,89
ra044	25,56	30	S	0,40
ra046	23,92	30	S	0,88
ra046	23,92	40	É	0,12
ra044	25,56	40	S	0,44
ra045	23,02	50	É	0,13
ra045	23,02	60	É	0,49

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 6.17 et la Figure 6.9 montrent que dans tous les cas d'échec observés visuellement (cercle), le coefficient de friction est en-dessous de la limite (4 cas sur 4). Par contre des six cas de succès observés, quatre présentent un coefficient de friction en-dessous de la limite. Ceci est dû à de minces résidus de la glace sur le béton après raclage qui, en se collant sous le bloc de mesure du coefficient de friction, diminuaient sa valeur.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 2$  (20 et 30 minutes)

$N_{ts} = 6$  (10, 20, 30 et 40 minutes)

$$P_{cs} = 33 \%$$

Pour les cas d'échec :

$$N_{c\acute{e}} = 4 \quad (10, 40, 50 \text{ et } 60 \text{ minutes})$$

$$N_{t\acute{e}} = 4 \quad (10, 40, 50 \text{ et } 60 \text{ minutes})$$

$$P_{c\acute{e}} = 100 \%$$

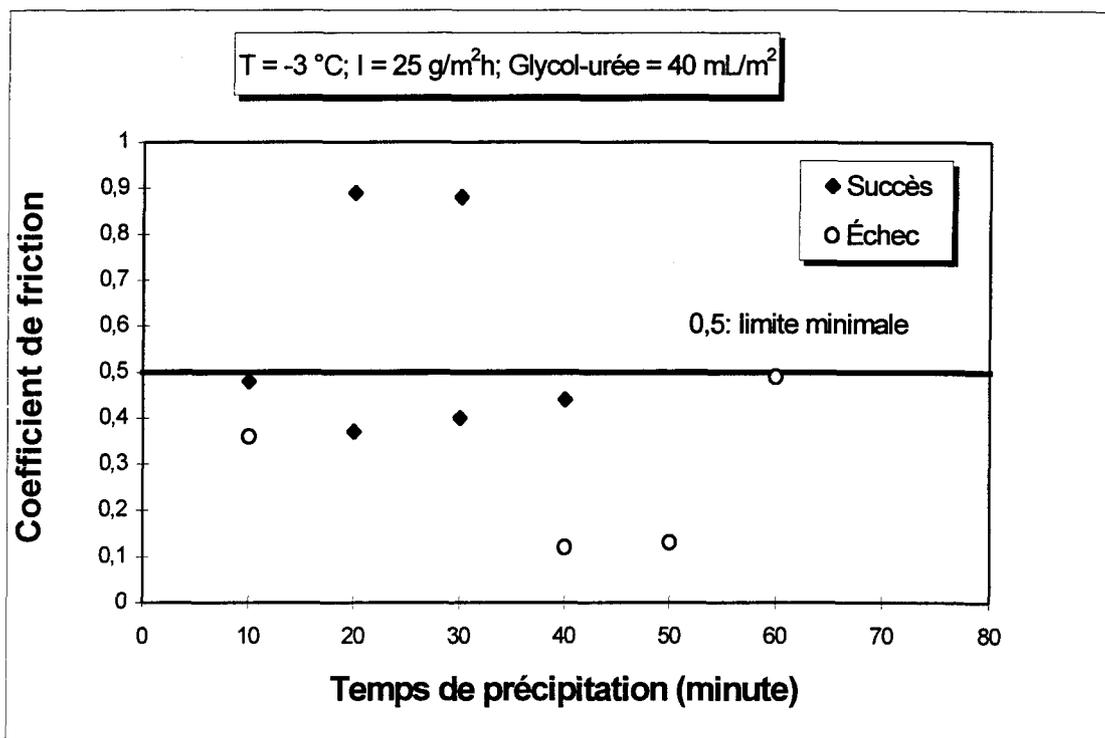


Figure 6.9 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

### 3. Conclusion

Les tests sur la plaque de béton de ciment avec 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée, ont montré un problème de reproductibilité (Tableau 6.18), et un problème de correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle en particulier pour les cas de succès (Tableau 6.19).

Tableau 6.18 Reproductibilité (40 mL/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
50 %	4

Tableau 6.19 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
33 %	6	100 %	4

## 6.2.3. Conclusion sur le cas de glycol-urée

Le résumé des résultats d'essais est présenté à la Figure 6.10 et dans le Tableau 6.20.

Tableau 6.20 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas du glycol-urée

Quantité de glycol-urée	20 mL/m <sup>2</sup>	40 mL/m <sup>2</sup>	*M <sub>p</sub>	*σ <sub>p</sub>
Reproductibilité $P_r$ (%)	100	50	71	25
Nombre de cas	3	4	7	
Correspondance $P_{cs}$ (%)	–	33	33	–
Nombre de succès observés		6	6	
Correspondance $P_{cé}$ (%)	100	100	100	0
Nombre d'échecs observés	6	4	10	

\*M<sub>p</sub> : moyenne pondérée.

\*σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré.

Dans le Tableau 6.20 on remarque que la reproductibilité sur la plaque de béton de ciment n'est pas satisfaisante avec une moyenne pondérée de 71 %. Elle est aussi variable, puisque les pourcentages de reproductibilité varient de 50 à 100 %.

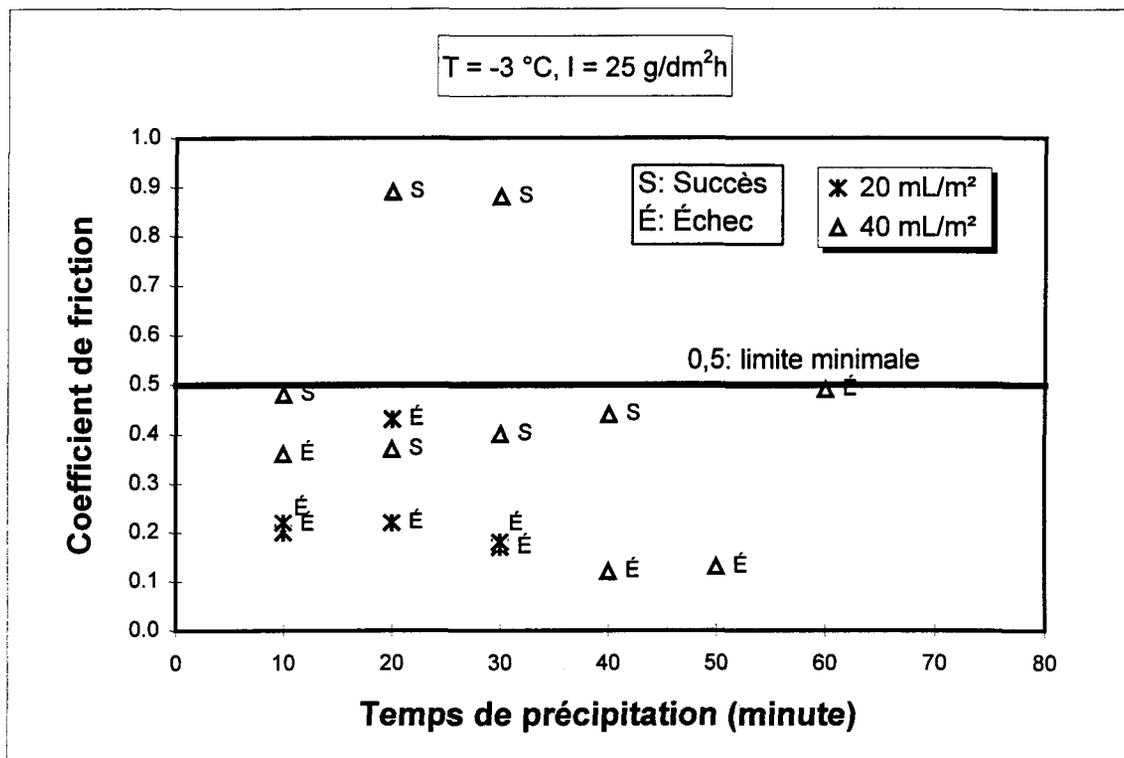


Figure 6.10 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de ciment dans le cas du glycol-urée

Comme le montrent la Figure 6.10 et le Tableau 6.20, le pourcentage de correspondance en cas de succès n'est pas bon, 33 % (2 cas sur 6). Dans tous les cas d'échecs rapportés par l'observateur, le coefficient de friction est en-dessous de la limite. Le pourcentage de correspondance en cas d'échec est très bon, 100 % (10 cas sur 10).

On peut donc conclure que dans le cas de la plaque de béton de ciment

traitée avec de glycol-urée :

Ni la reproductibilité ni la correspondance entre les deux critères d'échec ne sont satisfaisantes.

### 6.3 Conclusion pour le béton de ciment

Le Tableau 6.21 présente la moyenne des pourcentages de reproductibilité et de correspondance de succès et d'échecs dans le cas de la plaque de béton de ciment traitée avec l'urée et le glycol-urée. Comme le montre ce tableau, les essais sur la plaque de béton de ciment ont souvent montré des problèmes de reproductibilité, 59 % d'essais reproductibles en moyenne.

Tableau 6.21 Résumés des résultats sur le béton de ciment

	Urée		Glycol-urée		$M_p$
	$M_p$	$\sigma_p$	$M_p$	$\sigma_p$	
Reproductibilité Pr (%)	55	32	71	25	59
Nombre de cas	20		7		27
Correspondance Pcs (%)	76	13	33	0	69
Nombre de succès observés	29		6		35
Correspondance Pcé (%)	90	16	100	0	92
Nombre d'échecs observés	31		10		41

$M_p$  : moyenne pondérée.       $\sigma_p$  : écart-type pondéré

La reproductibilité moyenne est légèrement meilleure dans le cas du glycol-urée (71 %) que dans le cas de l'urée (55 %). Cependant, dans les deux cas, l'écart-type d'au moins 25 % indique une variation importante de la reproductibilité selon les tests. La porosité du béton de ciment est la cause la plus probable de ce problème de reproductibilité.

La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des échecs est excellente 92 % en moyenne. Dans le cas des succès, elle n'est pas acceptable (63 % en moyenne). Le cas du glycol-urée est le pire (33 %) à cause du phénomène de gel d'un film résiduel après l'opération de raclage. Une diminution du délai entre le raclage de la glace et la mesure du coefficient de friction devrait résoudre ce problème.

## CHAPITRE 7

### ÉTUDE DE LA PLAQUE DE BÉTON DE POLYMÈRE

#### 7.1 Cas de l'urée

Les essais ont été effectués avec des quantités variant de 60 à 180 g/m<sup>2</sup>.

##### 7.1.1. Application de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée

Les plaques traitées avec 60 g/m<sup>2</sup> d'urée ont été soumises aux précipitations surfondues pendant des périodes variant de 10 minutes à 60 minutes. La glace adhérait au béton et ne pouvait pas être enlevée. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 7.1 et la Figure 7.1.

##### 1. Reproductibilité

Dans tous les cas, la couche de glace n'a pas pu être enlevée par le raclage. Les résultats sont très stables.

$N_r = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 100 \%$

Tableau 7.1 Performance de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra091	24,60	10	É	0,43
ra096	25,12	10	É	0,38
ra091	24,60	20	É	0,34
ra096	25,12	20	É	0,35
ra091	24,60	30	É	0,38
ra097	23,36	30	É	0,27

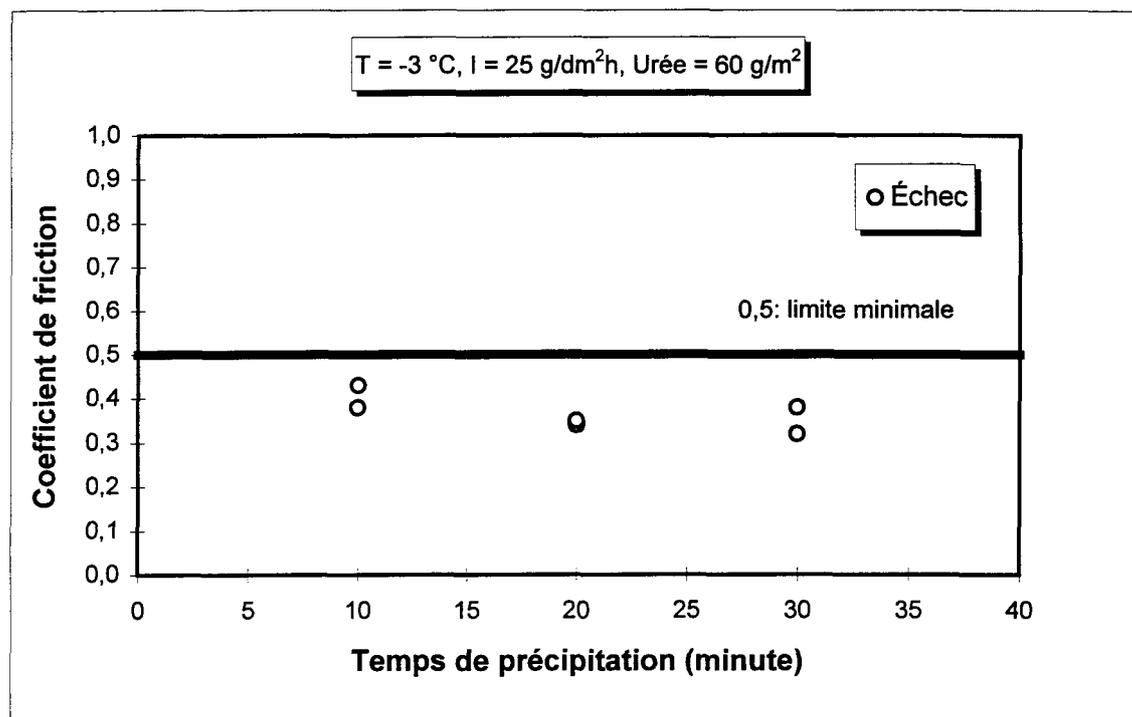


Figure 7.1 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère (60 g/m<sup>2</sup> de l'urée)

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 7.1 et la Figure 7.1.

Dans tous les cas d'échec observés visuellement le coefficient de friction est en-dessous de la limite.

Pour les cas d'échec :

$N_{cé} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_{té} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{cé} = 100 \%$

## 3. Conclusion

Les essais effectués sur la plaque de béton de polymère avec 60 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré une bonne reproductibilité (Tableau 7.2). La correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle est très bonne (Tableau 7.3).

Tableau 7.2 Reproductibilité (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	3

Tableau 7.3 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cé}$	$N_{té}$
100 %	6

### 7.1.2. Application de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 7.4.

#### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 10 et 20 minutes de précipitation, la glace n'a généralement pas pu être enlevée, et les résultats des essais tels que rapportés par l'observateur sont variables.

Pour 30 et 40 minutes, de nombreux essais, 8 et 6 respectivement ont été effectués pour vérifier la reproductibilité, et la glace a pu être enlevée dans tous les cas sauf deux. Pour 50, 60 et 70 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée et les tests sont reproductibles.

$N_r = 5$  (30, 40, 50, 60 et 70 minutes)

$N_t = 7$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 minutes)

$P_r = 71 \%$

Tableau 7.4 Performance de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de polymère,  
 Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra103	24,54	10	É	0,86
ra105	24,80	10	É	0,91
ra093	24,83	10	S	1,07
ra103	24,54	20	É	1,45
ra105	24,80	20	É	0,37
ra093	24,83	20	S	0,70
ra093	24,83	30	S	0,93
ra094	24,42	30	S	0,79
ra104	23,91	30	S	1,30
ra105	24,80	30	S	0,65
ra106	24,45	30	S	0,77
ra077	25,96	30	É	0,56
ra093	24,83	30	S	0,93
ra094	24,42	30	S	0,79
ra094	24,42	40	S	0,86
ra103	24,54	40	S	1,00
ra104	23,91	40	S	0,81
ra106	24,45	40	S	1,01
ra077	25,96	40	É	0,33
ra094	24,42	40	S	0,86
ra095	23,60	50	S	1,02
ra107	23,44	50	S	0,76
ra095	23,60	60	S	1,05
ra095	23,44	60	S	0,93
ra095	23,60	70	S	0,95
ra095	23,44	70	S	1,03

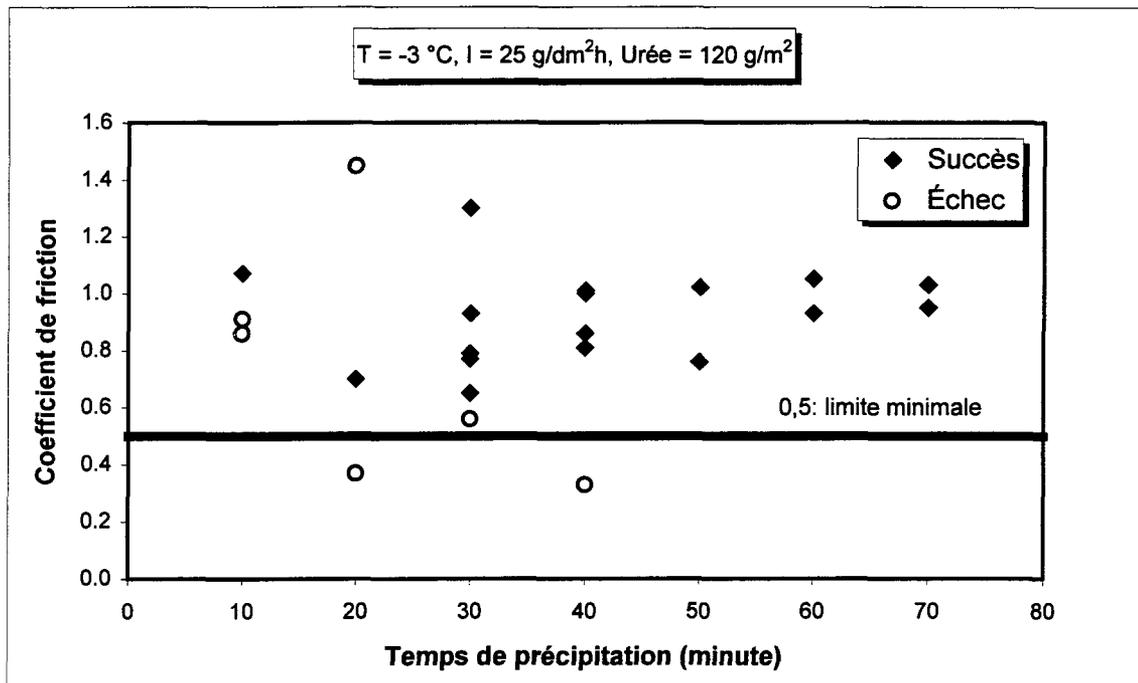


Figure 7.2 Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère (120 g/m<sup>2</sup> de l'urée)

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 7.4 et la Figure 7.2 montrent que, pour tous les cas de succès, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est bonne. Par contre, sur les six cas d'échec présentés, seulement deux indiquent une bonne correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction. Quatre échecs rapportés par l'observateur, à 10, 20 et 30 minutes, correspondent à des coefficients de friction supérieurs à 0,5. Les cas d'échecs observés, associés à des coefficients de friction élevés, pourraient être expliqués par le grand nombre de grains d'urée restant sur la plaque après le raclage, ce qui aurait pu augmenter le coefficient de friction.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 20$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 minutes)

$N_{ts} = 20$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 minutes)

$P_{cs} = 100 \%$

Pour les cas d'échec :

$N_{cé} = 2$  (20 et 40 minutes)

$N_{té} = 6$  (10, 20, 30 et 40 minutes)

$P_{cé} = 33 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque de béton de polymère avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré un niveau de reproductibilité insuffisant (Tableau 7.5), et un problème de correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas d'échecs (Tableau 7.6).

Tableau 7.5 Reproductibilité (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
71 %	7

Tableau 7.6 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
100 %	16	33 %	6

### 7.1.3. Application de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée

Pour cette série d'essais, la quantité d'urée a été augmentée à 180 g/m<sup>2</sup>.

Les résultats sont présentés au Tableau 7.7.

Tableau 7.7 Performance de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra083	23,79	10	S	*n.m
ra084	25,16	10	S	n.m
ra085	24,57	10	S	1,09
ra077	25,96	10	S	n.m
ra083	23,79	20	S	1,24
ra084	25,16	20	S	1,06
ra085	24,57	20	S	1,10
ra077	25,96	20	S	n.m
ra083	23,79	30	S	1,35
ra085	24,57	30	S	1,00
ra086	24,19	30	S	1,21
ra086	24,19	40	S	1,07
ra092	23,18	40	S	1,38
ra092	23,18	50	S	1,02
ra097	23,36	60	S	1,00
ra097	23,36	70	S	1,20

\*n.m : non mesuré.

### 1. Reproductibilité

Dans tous les cas, la glace a été enlevée par le raclage, et les essais tels que rapportés par l'observateur sont reproductibles.

$N_r = 4$  (10, 20, 30 et 40 minutes)

$N_t = 4$  (10, 20, 30 et 40 minutes)

$P_r = 100 \%$

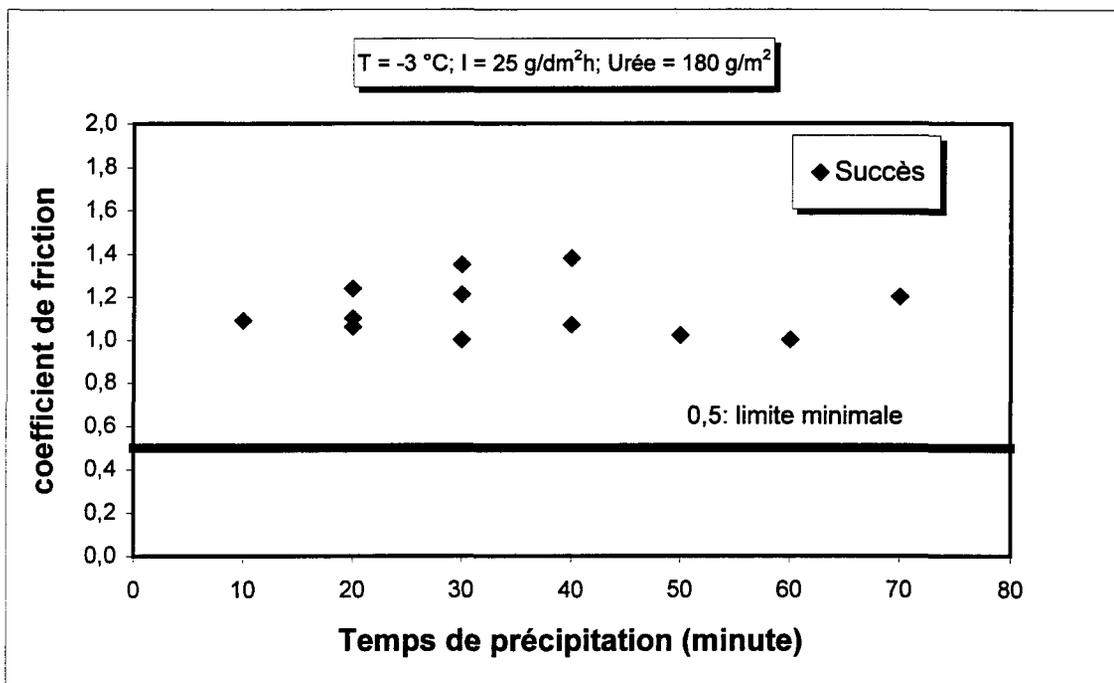


Figure 7.3 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère (180 g/m² d'urée)

### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 7.7 et la Figure 7.3 montrent que, dans tous les cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction est au-dessus de la limite.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 12$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 minutes)

$N_{ts} = 12$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 minutes)

$P_{cs} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque de béton de polymère avec  $180 \text{ g/m}^2$  d'urée, ont montré une excellente reproductibilité (Tableau 7.8), et une excellente correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle (Tableau 7.9).

Tableau 7.8 Reproductibilité ( $180 \text{ g/m}^2$  d'urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	4

Tableau 7.9 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction ( $180 \text{ g/m}^2$  d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$
100 %	12

#### 7.1.4. Conclusion sur les cas de l'urée

Les résumés des résultats d'essais sont présentés, à la Figure 7.4 et dans le Tableau 7.10.

Dans le Tableau 7.10 on remarque que la reproductibilité sur la plaque de béton de polymère, avec une moyenne de 86 %, est meilleure que dans le cas du

béton de ciment, 58 % en moyenne. Cependant, les pourcentages de reproductibilité sont assez variables, 71 % à 100 %.

Tableau 7.10 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère dans le cas de l'urée

Quantité de l'urée	60 g/m <sup>2</sup>	120 g/m <sup>2</sup>	180 g/m <sup>2</sup>	M <sub>p</sub>	σ <sub>p</sub>
Reproductibilité P <sub>r</sub> (%)	100	71	100	86	15
Nombre de cas	3	7	4	14	
Correspondance P <sub>cs</sub> (%)	–	100	100	100	0
Nombre de succès observés		16	12	28	
Correspondance P <sub>cé</sub> (%)	100	33	–	67	34
Nombre d'échecs observés	6	6		12	

M<sub>p</sub> : moyenne pondérée.

σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré.

Comme le montrent la Figure 7.4 et le Tableau 7.10, tous les cas de succès (32 cas) rapportés par l'observateur sont respectivement au-dessus de la limite du coefficient de friction. Le pourcentage de correspondance, 100 % en cas de succès, est très bon. Le pourcentage de correspondance en cas d'échec n'est pas acceptable, 67 % (8 cas sur 12). Donc, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction n'est pas satisfaisante.

On peut donc conclure que dans le cas de la plaque de béton de polymère traitée avec l'urée :

La reproductibilité est satisfaisante, mais la correspondance entre les deux critères d'échec n'est pas acceptable.

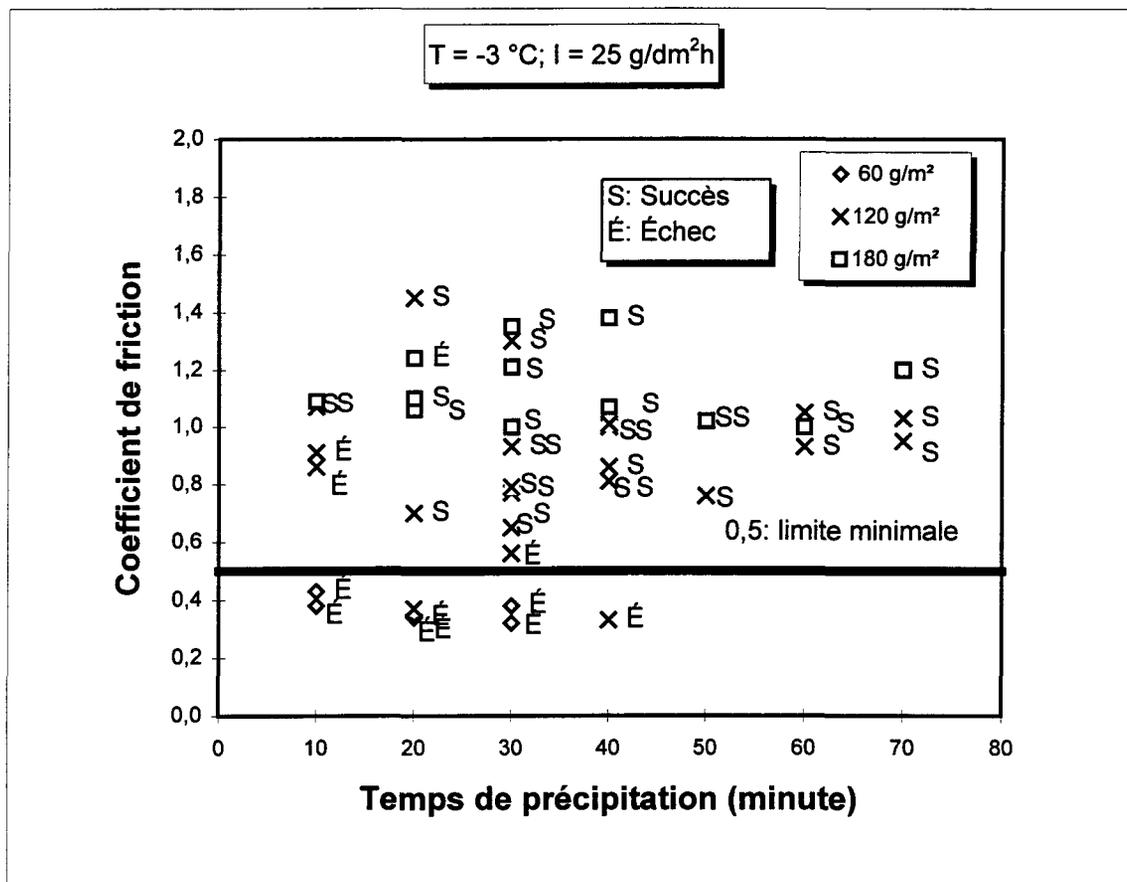


Figure 7.4 Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère dans le cas de l'urée

## 7.2 Cas du glycol-urée

Les essais ont été effectués avec trois quantités de glycol-urée 20, 40 et 50 mL/m<sup>2</sup>.

### 7.2.1. Application de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Dans cette série d'essais, 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont été appliqués à -3 °C sous la forme de gouttes déposées sur les plaques avec une seringue. La procédure d'essais est la même que celle utilisée pour la plaque de béton de ciment.

Les plaques ont été soumises aux précipitations surfondues pendant des périodes variant de 10 minutes à 30 minutes. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 7.11.

Tableau 7.11 Performance de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra079	25,01	10	É	0,40
ra082	24,76	10	É	0,49
ra078	25,31	10	S	0,41
ra118	24,30	10	É	0,28
ra119	24,39	10	S	0,37
ra119	24,39	20	S	0,23
ra120	24,56	20	É	0,22
ra121	24,48	30	É	0,20
ra122	24,04	30	É	0,20

Dès le début des précipitations, la glace a commencé à se former sur la plaque autour des gouttes de produit. Puis des petites flaques de mélange

produit / eau se sont formées, et après 10 minutes de précipitation, ces flaques ont commencé à regeler en surface.

### 1. Reproductibilité

La plupart du temps, la couche de glace n'a pas pu être enlevée avec cette quantité de produit. La reproductibilité des essais n'est pas bonne.

$N_r = 1$  (30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 33 \%$

### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 7.11 et la Figure 7.5.

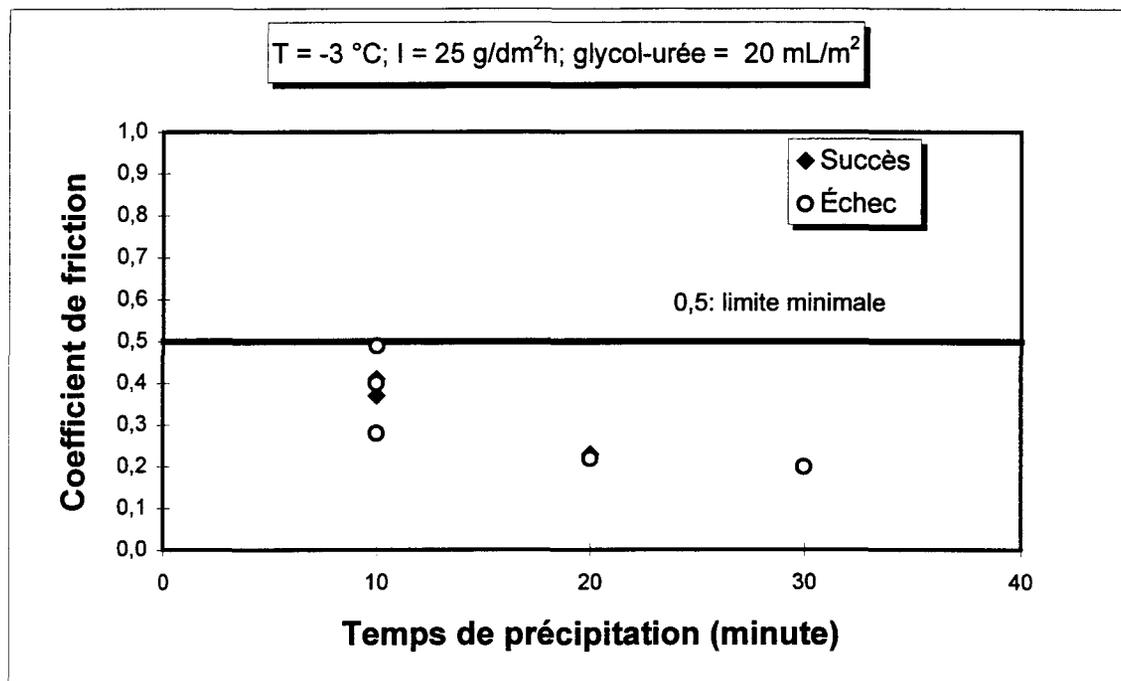


Figure 7.5 Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère ( $20 \text{ mL/m}^2$  de glycol-urée)

Le Tableau 7.11 et la Figure 7.5 montrent que pour les trois cas de succès rapportés par l'observateur (losange), deux cas à 10 minutes et un cas à 20 minutes, les valeurs du coefficient de friction sont trop basses. Cette discordance s'explique par l'existence d'un film de névasse sur la surface de la plaque qui a gelé après le raclage et avant la mesure du coefficient de friction.

Dans tous les cas d'échecs observés visuellement (cercles), le coefficient de friction est en-dessous de la limite.

Pour les cas de succès :

$$N_{cs} = 0$$

$$N_{ts} = 3 \quad (10 \text{ et } 20 \text{ minutes})$$

$$P_{cs} = 0 \%$$

Pour les cas d'échecs :

$$N_{cé} = 6 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_{té} = 6 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_{cé} = 100 \%$$

## 2. Conclusion

Le Tableau 7.12 et le Tableau 7.13 résument les informations sur la reproductibilité des essais et la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle. Le Tableau 7.12 montre que la reproductibilité des essais sur la plaque de béton de polymère avec 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée n'est pas bonne (33 %). La correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle

en cas de succès n'est pas bonne (0 %), alors que celle relativement aux cas d'échec est excellente (100 %).

Tableau 7.12 Reproductibilité (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
33 %	3

Tableau 7.13 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
0 %	3	100 %	6

### 7.2.2. Application de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 40 mL/m<sup>2</sup> dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 7.14 et à la Figure 7.6.

#### 1. Reproductibilité

Dans le cas de 10 minutes de précipitation, 6 essais ont été effectués et la glace a pu être enlevée chaque fois. Pour 20 minutes, 7 essais ont été effectués et les résultats sont variables. Pour 30 minutes, les trois essais n'ont pas permis d'ôter la glace. La reproductibilité, évaluée à 67 %, n'est donc pas satisfaisante.

$$N_r = 2 \quad (10 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_t = 3 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_r = 67 \%$$

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais sont présentés au Tableau 7.14 et à la Figure 7.6.

Tableau 7.14 Performance de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de polymère, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra078	25,31	10	S	1,35
ra079	25,01	10	S	0,41
ra082	24,76	10	S	0,63
ra087	24,47	10	S	*n.m
ra088	25,42	10	S	0,36
ra089	24,8	10	S	0,77
ra082	24,76	20	É	0,54
ra087	24,47	20	É	1,06
ra088	25,42	20	É	0,60
ra090	24,93	20	É	0,75
ra078	25,31	20	S	0,77
ra079	25,01	20	S	0,84
ra089	24,80	20	S	0,76
ra087	24,47	30	É	0,28
ra089	24,80	30	É	0,37
ra090	24,93	30	É	0,50

\*n.m : non mesuré.

Le Tableau 7.14 et la Figure 7.6 montrent que dans tous les cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction était au-dessus de la limite, sauf dans deux cas à 10 minutes. Ceci est dû à de minces résidus de la glace sur le

béton après raclage qui, en se collant sous le bloc de mesure du coefficient de friction, diminuaient sa valeur. Parmi les cas d'échec observés visuellement, plusieurs présentent un coefficient de friction en-dessous de la limite, ceci est dû au fait, qu'après le raclage, des morceaux de glace restaient à la surface de la plaque, augmentant ainsi le coefficient de friction.

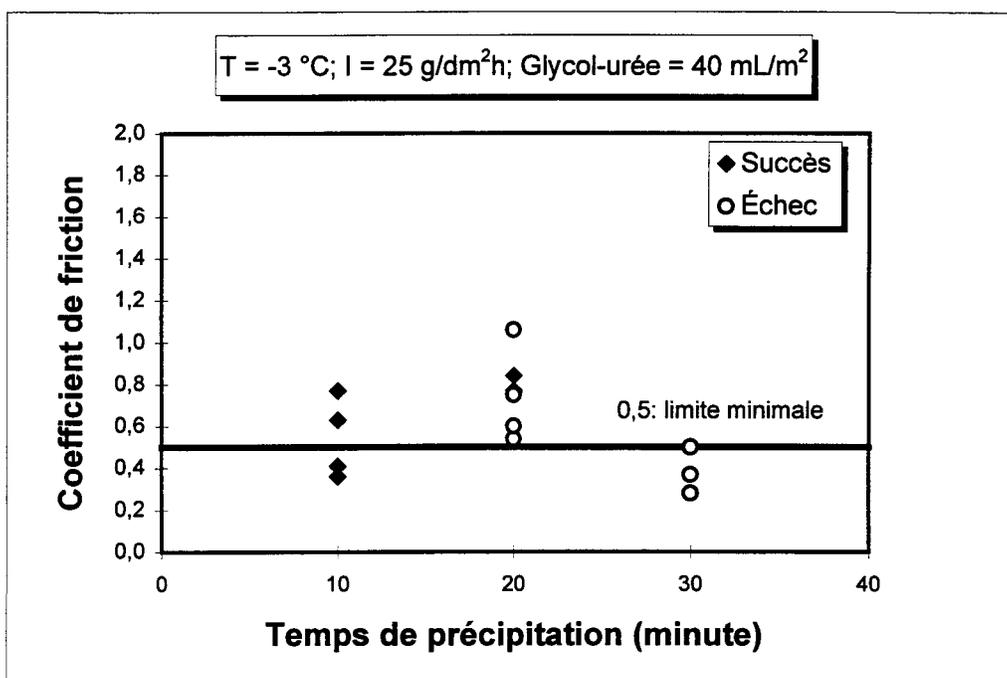


Figure 7.6 Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère ( $40\text{ mL/m}^2$  de glycol-urée)

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 6$  (10 et 20 minutes)

$N_{ts} = 8$  (10 et 20 minutes)

$P_{cs} = 75\%$

Pour les cas d'échecs :

$N_{cé} = 2$  (20 et 30 minutes)

$$N_{t\acute{e}} = 7$$

(20 et 30 minutes)

$$P_{c\acute{e}} = 28 \%$$

### 3. Conclusion

Le Tableau 7.15 et le Tableau 7.16 résumant les informations sur la reproductibilité des essais et la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle. Le Tableau 7.15 montre que la reproductibilité des essais sur la plaque de béton de polymère avec 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée n'est pas très bonne (67 %). La correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle n'est pas bonne, en particulier dans le cas des échecs (28 %).

Tableau 7.15 Reproductibilité (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
67 %	3

Tableau 7.16 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{c\acute{e}}$	$N_{t\acute{e}}$
75 %	8	28 %	7

#### 7.2.3. Application de 50 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 50 mL/m<sup>2</sup> dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 7.17 et à la Figure 7.7.

### 1. Reproductibilité

La couche de glace a généralement pu être enlevée. Les tests sont reproductibles pour 30 minutes, mais pas pour 40 minutes.

$N_r = 2$  (20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (20, 30 et 40 minutes)

$P_r = 67 \%$

Tableau 7.17 Performance de 50 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque de béton de polymère,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra098	24,62	10	S	1,54
ra098	24,62	20	S	0,95
ra099	24,56	20	S	1,01
ra100	24,13	20	S	1,04
ra098	24,62	30	É	0,29
ra099	24,56	30	S	1,34
ra100	24,13	30	S	0,99
ra101	25,05	30	S	0,96
ra102	24,55	30	S	1,04
ra100	24,13	40	É	0,24
ra101	25,05	40	S	0,99
ra102	24,55	40	S	1,07
ra102	24,55	50	S	1,09

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais sont présentés au Tableau 7.17 et à la Figure 7.7. Dans tous les cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction est au-dessus de la limite (11 cas sur 11). Pour tous les cas d'échec, le coefficient de friction est en-dessous de la limite (2 cas sur 2). La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est excellente.

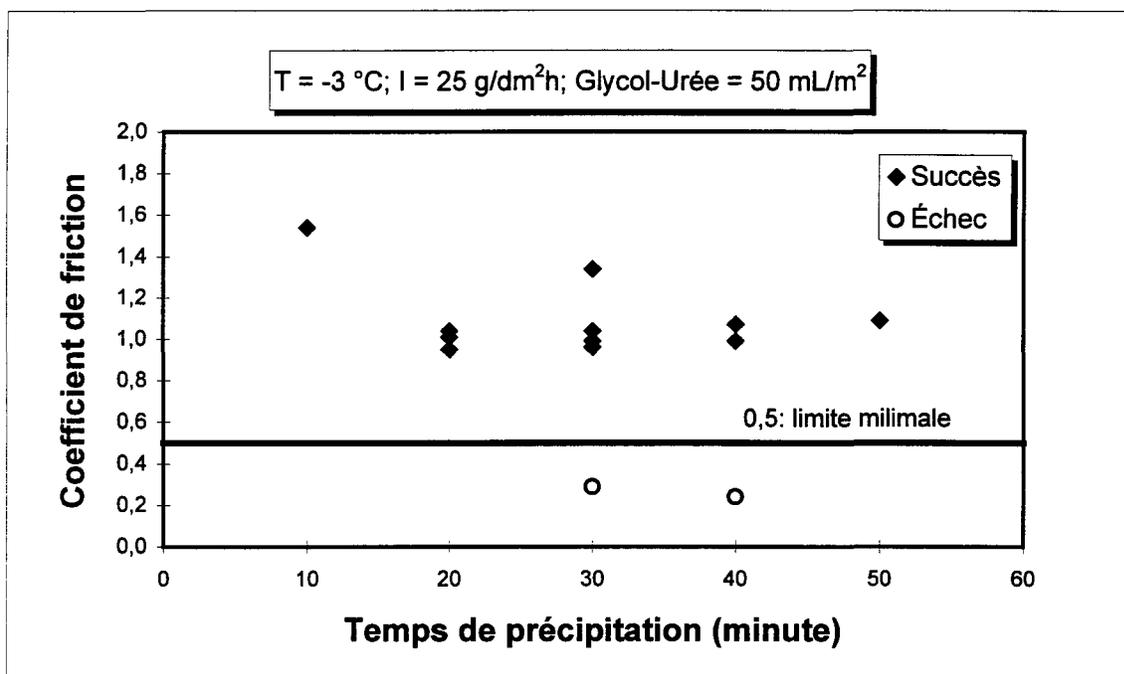


Figure 7.7 Comparaison des critères d'échec sur la plaque de béton de polymère (50 mL/m² de glycol-urée)

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 11$  (10, 20, 30, 40 et 50 minutes)

$N_{ts} = 11$  (10, 20, 30, 40 et 50 minutes)

$P_{cs} = 100 \%$

Pour les cas d'échecs :

$N_{c\acute{e}} = 2$  (30 et 40 minutes)

$N_{t\acute{e}} = 2$  (30 et 40 minutes)

$P_{c\acute{e}} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Le Tableau 7.18 et le Tableau 7.19 résumés les informations sur la reproductibilité des essais et la correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle. Le Tableau 7.18 montre que la reproductibilité des essais sur la plaque de béton de polymère avec 50 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée n'est pas très bonne (67 %). Les correspondances entre le coefficient de friction et l'observation visuelle en cas de succès et en cas d'échec sont excellentes 100 %.

Tableau 7.18 Reproductibilité (50 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
67 %	3

Tableau 7.19 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (50 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{c\acute{e}}$	$N_{t\acute{e}}$
100 %	11	100 %	2

#### 7.2.4. Conclusions sur le cas du glycol-urée

Le résumé des résultats des essais est présenté à la Figure 7.8 et dans le Tableau 7.20.

Dans le Tableau 7.20, on remarque que la reproductibilité sur la plaque de béton de polymère est très variable : les pourcentages de reproductibilité varient de 33 à 67 % pour une moyenne de 56 %. La reproductibilité n'est donc pas satisfaisante. Au fur et à mesure de son usage, le béton de polymère est devenu de plus en plus poreux, pour finalement présenter le même problème de reproductibilité que le béton de ciment.

Tableau 7.20 Comparaison des critères de performance sur la plaque de béton de polymère dans le cas du glycol-urée

Quantité du glycol-l'urée	20 mL/m <sup>2</sup>	40 mL/m <sup>2</sup>	50 mL/m <sup>2</sup>	M <sub>p</sub>	σ <sub>p</sub>
Reproductibilité P <sub>r</sub> (%)	33	67	33	56	16
Nombre de cas	3	3	3	9	
Correspondance P <sub>cs</sub> (%)	0	75	100	77	33
Nombre de succès observés	3	8	11	22	
Correspondance P <sub>cé</sub> (%)	100	28	100	67	36
Nombre d'échecs observés	6	7	2	15	

M<sub>p</sub> : moyenne pondérée.

σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré

Comme le montrent la Figure 7.8 et le Tableau 7.20, dans la grande majorité des cas, les succès et les échecs rapportés par l'observateur sont respectivement au-dessus et en-dessous de la limite du coefficient de friction. Le pourcentage de correspondance n'est cependant pas assez bon : 77 % (17 cas sur 22) en cas de succès et 67 % (12 cas sur 15) en cas d'échec. Donc, la

correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est inacceptable.

Il faut cependant noter que les cas de problèmes de correspondance entre les critères d'échec sont principalement dus à une déficience de la procédure du test (trop long délai entre le raclage et la mesure du coefficient de friction).

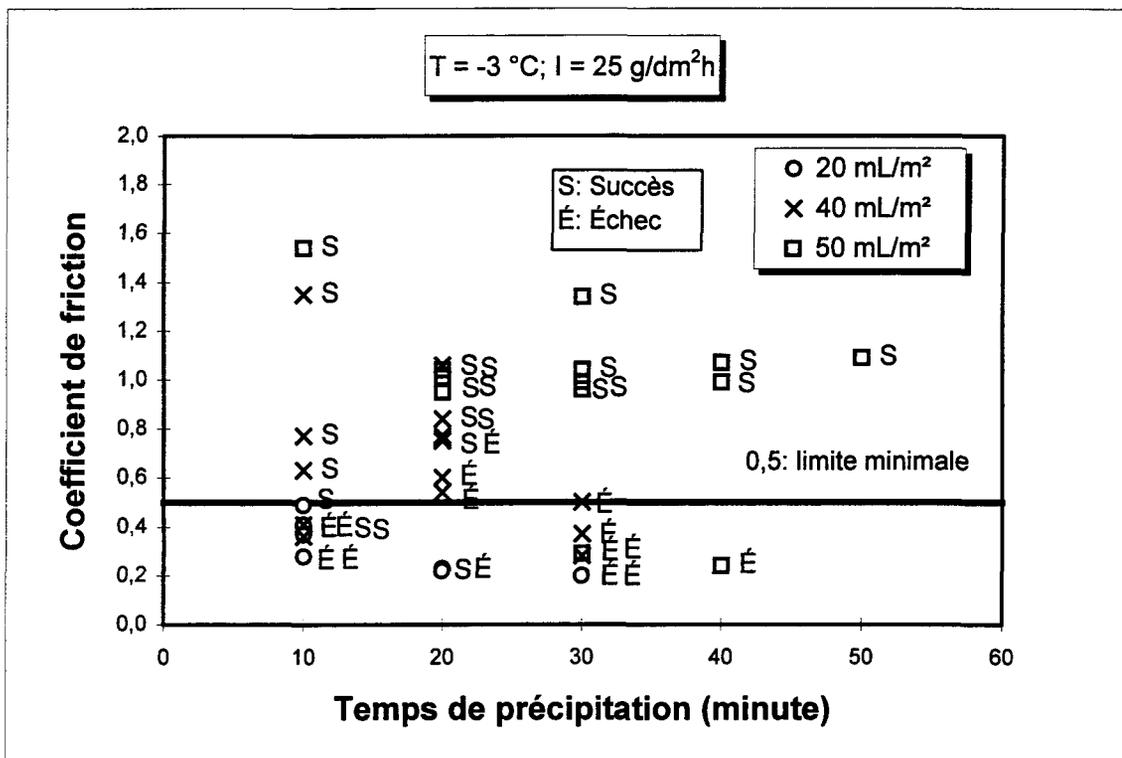


Figure 7.8 Comparaison du critère de performance sur la plaque de béton de polymère dans le cas du glycol-urée

On peut donc conclure que dans le cas de la plaque de béton de polymère traitée avec du glycol-urée :

Ni la reproductibilité ni la correspondance entre les critères de performance ne sont acceptables.

### 7.3 Conclusions pour le béton de polymère

Le Tableau 7.21 présente la moyenne des pourcentages de reproductibilité et de correspondance des critères de succès et d'échecs dans le cas de la plaque de béton de polymère traitée avec l'urée et le glycol-urée. Comme le montre ce tableau, les essais sur la plaque de béton de polymère ont souvent montré des problèmes de reproductibilité (74 % d'essais reproductibles en moyenne), en particulier dans le cas du glycol-urée (56 % d'essais reproductibles).

Tableau 7.21 Résumé des résultats sur le béton de polymère

	Urée		Glycol-urée		$M_p$
	$M_p$	$\sigma_p$	$M_p$	$\sigma_p$	
Reproductibilité Pr (%)	86	15	56	16	74
Nombre de cas	14		9		23
Correspondance Pcs (%)	100	0	77	33	90
Nombre de succès observés	28		22		50
Correspondance Pcé (%)	67	34	67	36	67
Nombre d'échecs observés	12		15		27

$M_p$  : moyenne pondérée

$\sigma_p$  : écart-type pondéré

On a remarqué que la porosité de béton de polymère augmentait avec l'usage. Les essais du glycol-urée ayant été effectués après la série de l'urée, le problème de reproductibilité causé par la porosité tel qu'observé dans les essais

du béton de ciment s'est à nouveau présenté avec le béton de polymère lors des essais effectués avec le glycol-urée.

La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas de succès est très bonne (90 % en moyenne), mais celle relativement aux échecs n'est pas satisfaisante (67 %).

## CHAPITRE 8

### ÉTUDE DE LA PLAQUE D'ALUMINIUM MOULÉE

#### 8.1 Cas de l'urée

Les essais ont été effectués avec des quantités d'urée variant de 60 g/m<sup>2</sup> à 180 g/m<sup>2</sup>.

##### 8.1.1. Application de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une série d'essais à été réalisée avec 60 g/m<sup>2</sup> d'urée dans les mêmes conditions que pour les autres plaques. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 8.1.

##### 1. Reproductibilité

Pour 10, 40 et 50 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée. Les résultats des tests sont très reproductibles.

Dans le cas de 30 minutes de précipitation, la glace n'a pas pu être enlevée et les tests sont reproductibles. Dans le cas de 20 minutes de précipitation, les résultats sont variables, il y a deux succès et deux échecs lors du raclage.

$N_r = 4$  (10, 30, 40 et 50 minutes)

$N_t = 5$  (10, 20, 30, 40 et 50 minutes)

$$P_r = 80 \%$$

Tableau 8.1 Performance de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium moulée,  
Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra109	24,31	10	S	0,40
ra110	24,76	10	S	0,40
ra111	24,77	10	S	0,44
ra109	24,31	20	S	0,40
ra110	24,76	20	S	0,23
ra111	24,77	20	É	0,47
ra020	24,64	20	É	0,27
ra020	24,64	30	É	0,42
ra139	24,69	30	É	0,32
ra019	23,99	40	S	0,60
ra021	23,69	40	S	0,40
ra026	23,09	40	S	0,30
ra019	23,99	50	S	0,64
ra021	23,69	50	S	0,44

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais pour 60 g/m<sup>2</sup> d'urée sont présentés dans le Tableau 8.1 et la Figure 8.1.

Ceux-ci montrent que sur les dix cas de succès présentés, seulement deux indiquent une bonne correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction. Huit succès rapportés par l'observateur, à 10, 20, 40 et 50 minutes, correspondent à des coefficients de friction inférieurs à 0,5. Pour tous les cas

d'échecs, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est bonne. Les cas de succès observés associés à des coefficients de friction bas sont dus au fait que la surface de la plaque d'aluminium moulée n'est pas assez rugueuse. Par conséquent, il n'y a pas assez de différence entre le coefficient de friction de la plaque mouillée par le mélange liquide eau-urée et celui de la couche de glace. Même si on diminuait le seuil d'acceptation du coefficient de friction, le problème ne serait pas résolu, car alors ce serait la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction en cas d'échec qui ne serait pas bonne.

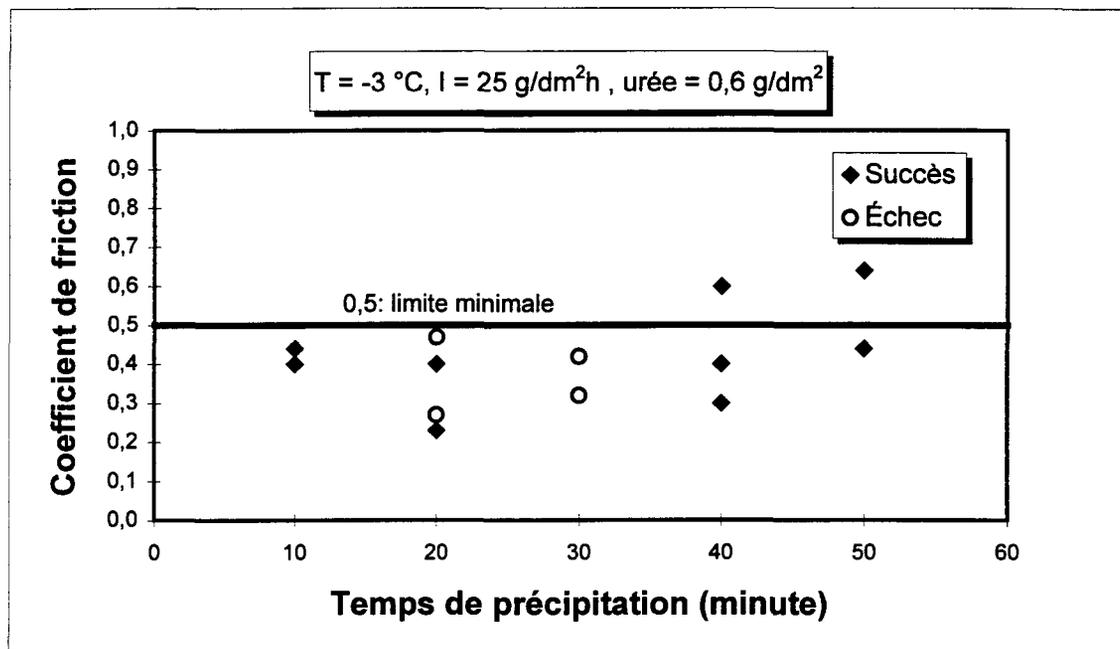


Figure 8.1 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée ( $60\text{ g/m}^2$  d'urée)

Pour les cas de succès :

$$N_{cs} = 2$$

(40 et 50 minutes)

$N_{ts} = 10$  (10, 20, 40 et 50 minutes)

$P_{cs} = 20 \%$

Pour les cas d'échec :

$N_{cé} = 4$  (20 et 30 minutes)

$N_{té} = 4$  (20 et 30 minutes)

$P_{cé} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium avec  $60 \text{ g/m}^2$  d'urée ont montré une assez bonne reproductibilité (Tableau 8.2) et une bonne correspondance entre l'observation et le coefficient de friction dans les cas d'échecs, mais un problème de correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas des succès (Tableau 8.3).

Tableau 8.2 Reproductibilité ( $60 \text{ g/m}^2$  d'urée)

$P_r$	$N_t$
80 %	5

Tableau 8.3 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction ( $60 \text{ g/m}^2$  d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
20 %	10	100 %	4

### 8.1.2. Application de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une série d'essais à été réalisée avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 8.4.

Tableau 8.4 Performance de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra113	23,98	10	S	0,59
ra114	24,54	10	S	0,57
ra112	24,70	20	S	0,60
ra113	23,98	20	S	0,42
ra112	24,70	30	É	0,51
ra114	24,54	30	S	0,51

#### 1. Reproductibilité

Pour 10 et 20 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée. Les résultats des tests sont reproductibles.

Dans le cas de 30 minutes de précipitation, les résultats sont variables, un succès et un échec au raclage.

$$N_r = 2 \quad (10 \text{ et } 20 \text{ minutes})$$

$$N_t = 3 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_r = 67 \%$$

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais pour  $120 \text{ g/m}^2$  d'urée sont présentés dans le Tableau 8.4 et la Figure 8.2.

Comme le montrent le Tableau 8.4 et la Figure 8.2, dans la plupart des cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction est au-dessus de la limite (4 cas sur 5). Cependant, dans un seul cas correspondant à 20 minutes de précipitation, l'observateur a noté que la glace était complètement enlevée par le raclage, alors que le coefficient de friction mesuré était légèrement au-dessous de la limite.

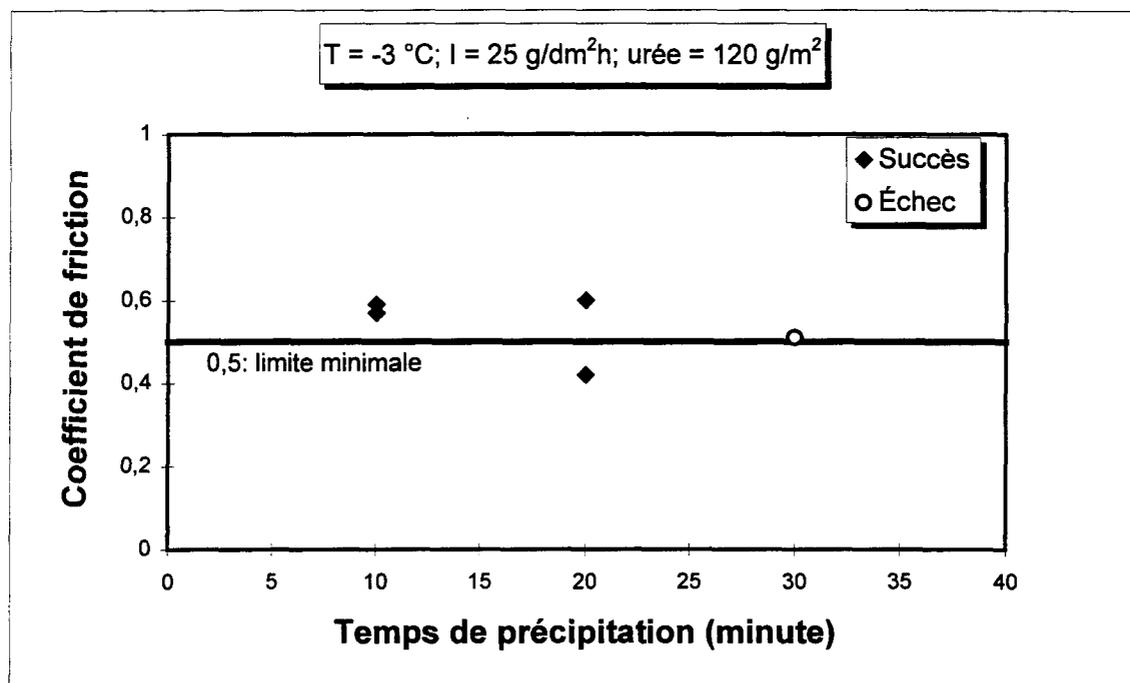


Figure 8.2 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée ( $120 \text{ g/m}^2$  d'urée)

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 4$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_{ts} = 5$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{cs} = 80 \%$

Bien que le pourcentage de correspondance entre les deux critères soit élevé dans les cas de succès, on remarque que le coefficient de friction reste toujours proche de la limite d'acceptation (entre 0,4 et 0,6).

Pour le seul cas d'échec, observé à 30 minutes, le coefficient de friction est sur la ligne d'acceptation.

Pour les cas d'échec :

$N_{cé} = 0$

$N_{té} = 1$  (30 minutes)

$P_{cé} = 0$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium moulée avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré un problème de reproductibilité, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est bonne dans les cas d'échec.

Tableau 8.5    Reproductibilité (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
67 %	3

Tableau 8.6 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

P <sub>cs</sub>	N <sub>ts</sub>	P <sub>cé</sub>	N <sub>té</sub>
80 %	5	0	1

### 8.1.3. Application de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée

Pour cette série d'essais, la quantité d'urée a été augmentée à 180 g/m<sup>2</sup>.

Les résultats sont présentés au Tableau 8.7.

#### 1. Reproductibilité

Dans tous les cas, la glace a été enlevée par le raclage, et les essais tels que rapportés par l'observateur sont reproductibles.

N<sub>r</sub> = 3 (10, 20 et 30 minutes)

N<sub>t</sub> = 3 (10, 20 et 30 minutes)

P<sub>r</sub> = 100 %

Tableau 8.7 Performance de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra115	24,34	10	S	0,58
ra116	24,02	10	S	0,61
ra115	24,34	20	S	0,54
ra117	24,25	20	S	0,59
ra116	24,34	30	S	0,51
ra117	24,25	30	S	0,54

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais pour 180 g/m<sup>2</sup> d'urée sont présentés dans la Figure 8.3 et le Tableau 8.7. La Figure 8.3 montre que, dans tous les cas de succès observés visuellement, le coefficient de friction était au-dessus de la limite.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_{ts} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{cs} = 100 \%$

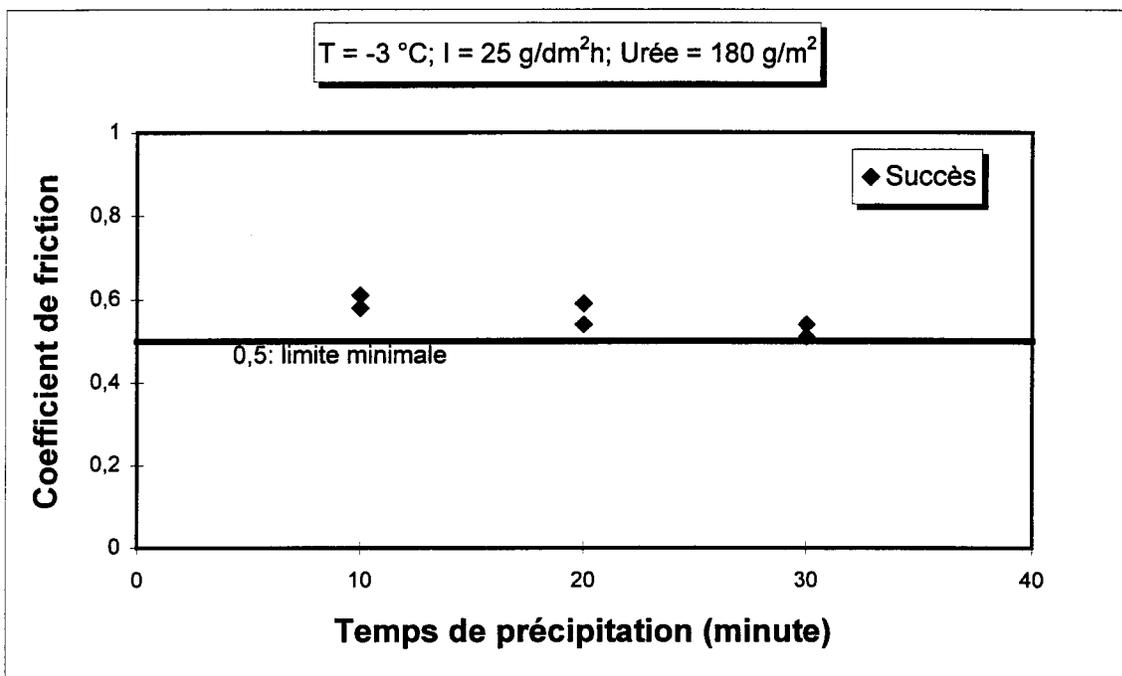


Figure 8.3 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium moulée avec 180 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré une excellente reproductibilité (Tableau 8.8) et une excellente correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle (Tableau 8.9). Cependant, le coefficient de friction mesuré est toujours proche de la limite (entre 0,51 et 0,61).

Tableau 8.8    Reproductibilité (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

P <sub>r</sub>	N <sub>t</sub>
100 %	3

Tableau 8.9    Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

P <sub>cs</sub>	N <sub>ts</sub>
100 %	6

#### 8.1.4. Conclusion sur les cas de l'urée

Le résumé des résultats des essais est présenté à la Figure 8.4 et dans le Tableau 8.10.

Dans le Tableau 8.10, on remarque que la reproductibilité sur la plaque d'aluminium moulée est assez bonne, les pourcentages de reproductibilité variant de 67 % à 100 % pour une moyenne pondérée de 82 %.

Tableau 8.10 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas de l'urée

Quantité d'urée	60 g/m <sup>2</sup>	120 g/m <sup>2</sup>	180 g/m <sup>2</sup>	M <sub>p</sub>	σ <sub>p</sub>
Reproductibilité P <sub>r</sub> (%)	80	67	100	82	12
Nombre de cas	5	3	3	11	
Correspondance P <sub>cs</sub> (%)	20	80	100	57	36
Nombre de succès observés	10	5	6	21	
Correspondance P <sub>cé</sub> (%)	100	0	–	80	40
Nombre d'échecs observés	4	1		5	

M<sub>p</sub> : moyenne pondérée.

σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré.

Comme le montre la Figure 8.4 presque tous les cas d'échecs (4 cas sur 5) rapportés par l'observateur sont au-dessous de la limite du coefficient de friction. Le pourcentage de correspondance en cas d'échec est bon à 80 %. Pour les cas de succès, de nombreux points sont situés au-dessous de la limite et le pourcentage de correspondance ne sont donc pas bon, 57 % (12 cas sur 21). Donc, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction n'est pas acceptable de façon générale.

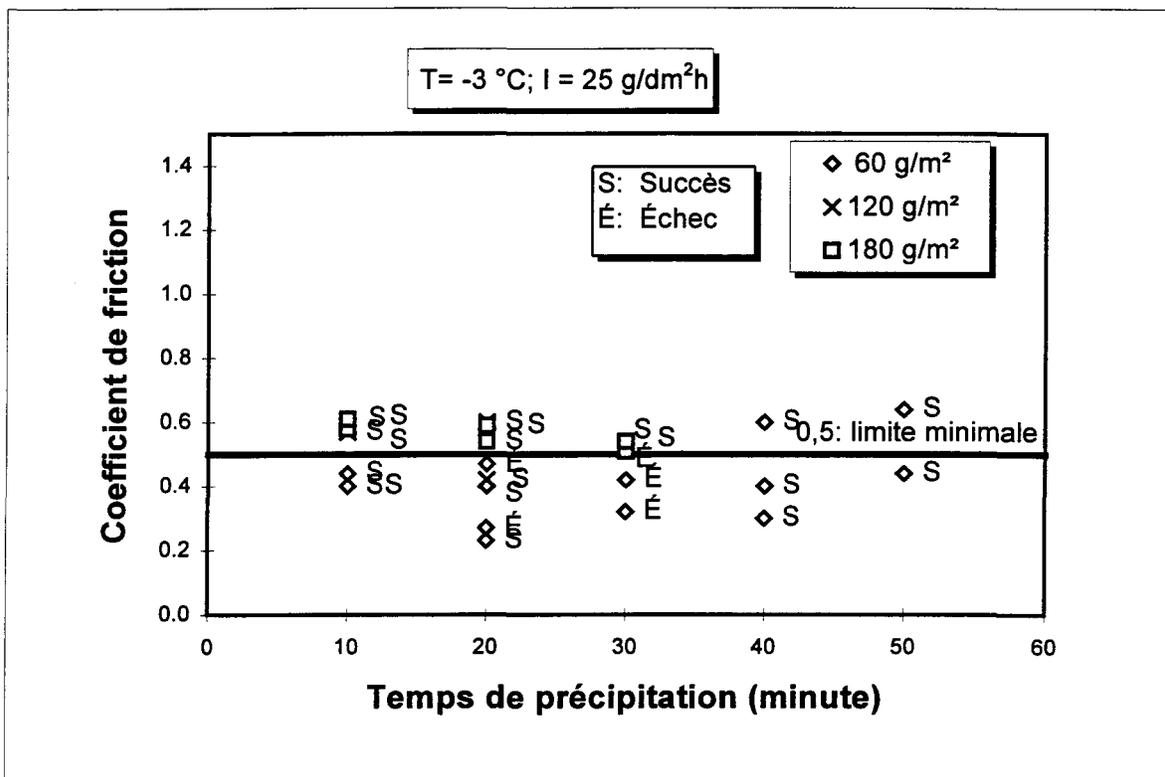


Figure 8.4 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas de l'urée

## 8.2 Cas du glycol-urée

Les essais ont été effectués avec deux quantités de glycol-urée 20 et 40 mL/m<sup>2</sup>.

### 8.2.1. Application de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Dans cette série d'essais, 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont été appliqués à -3 °C sous la forme de gouttes déposées sur les plaques avec une seringue. La procédure d'essais est la même que sur les autres plaques.

Tableau 8.11 Performance de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra036	25,53	10	É	0,24
ra080	25,00	10	S	0,62
ra081	25,97	10	S	0,65
ra080	25,00	20	S	0,54
ra081	25,97	20	S	0,47
ra119	24,39	30	S	0,37
ra120	24,56	30	S	0,41

Les plaques ont été soumises aux précipitations surfondues pendant des périodes variant de 10 minutes à 30 minutes. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 8.11.

### 1. Reproductibilité

Pour 20 et 30 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée. Les résultats des tests sont reproductibles.

Dans le cas de 10 minutes de précipitation, les résultats sont variables, deux succès et un échec au raclage.

$$N_r = 2 \quad (20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_t = 3 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_r = 67 \%$$

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais pour 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sont présentés dans le Tableau 8.11 et la Figure 8.5.

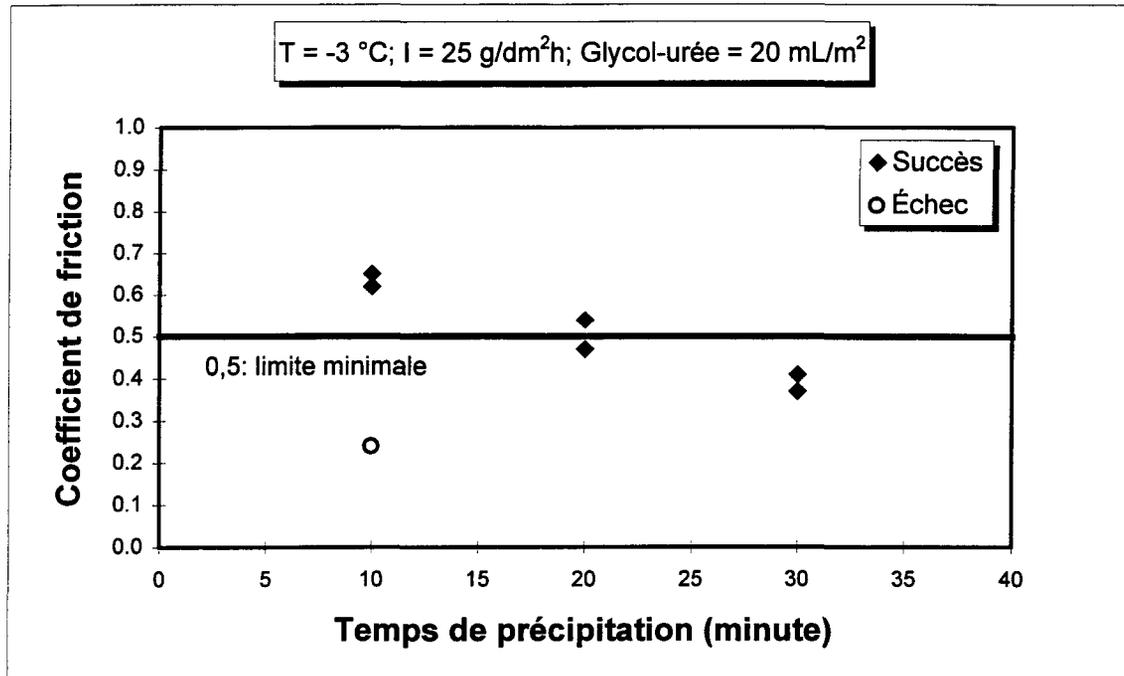


Figure 8.5 Comparaison des critères d'échec sur la plaque d'aluminium moulée (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

Le Tableau 8.11 et la Figure 8.5 montrent que, sur les six cas de succès présentés, seulement trois indiquent une bonne correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction. Trois succès rapportés par l'observateur, à 20 et 30 minutes, correspondent à des coefficients de friction inférieurs à 0,5. Pour le seul cas d'échec, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est bonne. Les cas de succès observés associés à des coefficients de friction bas sont vraisemblablement dus au manque de rugosité de la plaque d'aluminium moulée.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 3$  (10 et 20 minutes)

$N_{ts} = 6$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{cs} = 50 \%$

Pour les cas d'échec :

$N_{cé} = 1$  (10 minutes)

$N_{té} = 1$  (10 minutes)

$P_{cé} = 100 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium avec 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont montré un problème de reproductibilité (Tableau 8.12), ainsi qu'un problème de correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas de succès (Tableau 8.13).

Tableau 8.12 Reproductibilité (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
67 %	3

Tableau 8.13 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
50 %	6	100 %	1

### 8.2.2. Application de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Dans cette série d'essais, 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont été appliqués sur les plaques. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 8.14.

#### 1. Reproductibilité

Pour 10, 20, 30, 40, 110 et 150 minutes de précipitation, la couche de glace a pu être enlevée, et les résultats des tests sont très reproductibles.

Dans le cas de 180 minutes de précipitation, les résultats sont variables avec un succès et un échec rapportés par l'observateur, alors que le critère du coefficient de friction correspond à un échec dans les deux cas.

$N_r = 6$  (10, 20, 30, 40, 110 et 150 minutes)

$N_t = 7$  (10, 20, 30, 40, 110, 150 et 180 minutes)

$P_r = 86 \%$

#### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais pour 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sont présentés dans le Tableau 8.14 et la Figure 8.6.

Le Tableau 8.14 et la Figure 8.6 montrent que sur les vingt quatre cas de succès présentés, seulement onze indiquent une bonne correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction. Treize succès rapportés par l'observateur, à 10, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 160, 170 et 180 minutes, correspondent à des coefficients de friction inférieurs à 0,5. Les cas de succès observés, associés à des coefficients de friction bas, sont vraisemblablement dus au manque de rugosité de la plaque d'aluminium moulée.

Tableau 8.14 Performance de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium moulée, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra037	24,90	10	S	0,35
ra048	25,57	10	S	0,52
ra120	24,56	10	S	0,50
ra121	24,48	10	S	0,48
ra122	24,04	10	S	0,53
ra037	24,90	20	S	0,55
ra121	24,48	20	S	0,54
ra038	24,73	30	S	0,38
ra122	24,04	30	S	0,50
ra118	24,30	30	S	0,46
ra038	24,73	40	S	0,37
ra039	24,94	40	S	0,52
ra039	24,94	50	S	0,15
ra040	24,66	60	S	0,22
ra040	24,66	70	S	0,30
ra041	24,15	80	S	0,29
ra041	24,15	90	S	0,44
ra042	24,81	100	S	0,47
ra042	24,81	110	S	n.m
ra050	22,01	110	S	0,53
ra047	23,49	120	S	0,68
ra047	23,49	150	S	0,71
ra050	22,01	150	S	0,62
ra051	22,54	160	É	0,12
ra051	22,54	170	É	0,12
ra049	24,53	180	É	0,10
ra049	24,53	180	S	0,38

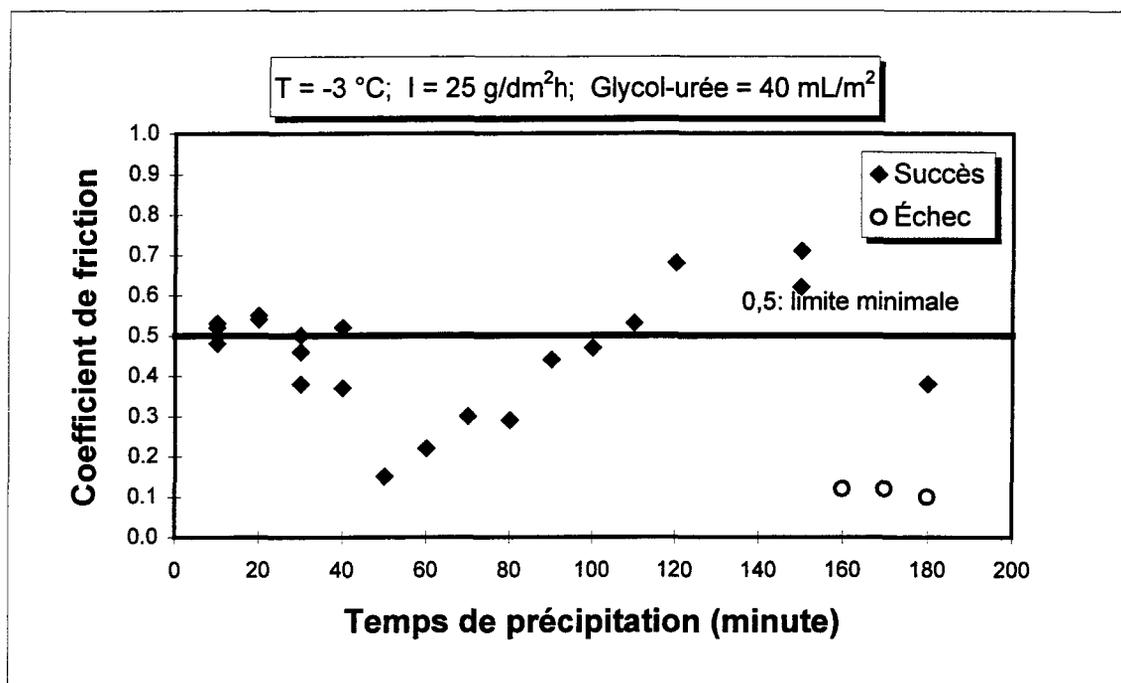


Figure 8.6 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

Pour les cas de succès :

$N_{CS} = 11$  (10 et 20 minutes)

$N_{ts} = 24$  (10 à 180 minutes)

$P_{CS} = 45\%$

Pour les cas d'échec :

$N_{c\acute{e}} = 3$  (160, 170 et 180 minutes)

$N_{t\acute{e}} = 3$  (160, 170 et 180 minutes)

$P_{c\acute{e}} = 100\%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium avec 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée, ont montré une bonne reproductibilité (Tableau 8.15), mais un problème de

correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas de succès (Tableau 8.16).

Tableau 8.15 Reproductibilité (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
86 %	7

Tableau 8.16 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
45 %	24	100 %	3

### 8.2.3. Conclusion sur les cas du glycol-urée

Le résumé des résultats des essais est présenté dans le Tableau 8.16 et à la Figure 8.7.

Tableau 8.17 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas du glycol-urée

Quantité de l'urée	20 mL/m <sup>2</sup>	40 mL/m <sup>2</sup>	$M_p$	$\sigma_p$
Reproductibilité $P_r$ (%)	67	86	80	9
Nombre de cas	3	7	10	
Correspondance $P_{cs}$ (%)	50	45	47	2
Nombre de succès observés	6	24	30	
Correspondance $P_{cé}$ (%)	100	100	100	0
Nombre d'échecs observés	1	3	4	

$M_p$  : moyenne pondérée.

$\sigma_p$  : écart-type pondéré.

Dans le Tableau 8.17 on remarque que la reproductibilité sur la plaque d'aluminium moulée est assez bonne, les pourcentages de reproductibilité variant de 67 % à 86 % pour une moyenne pondérée de 80 %.

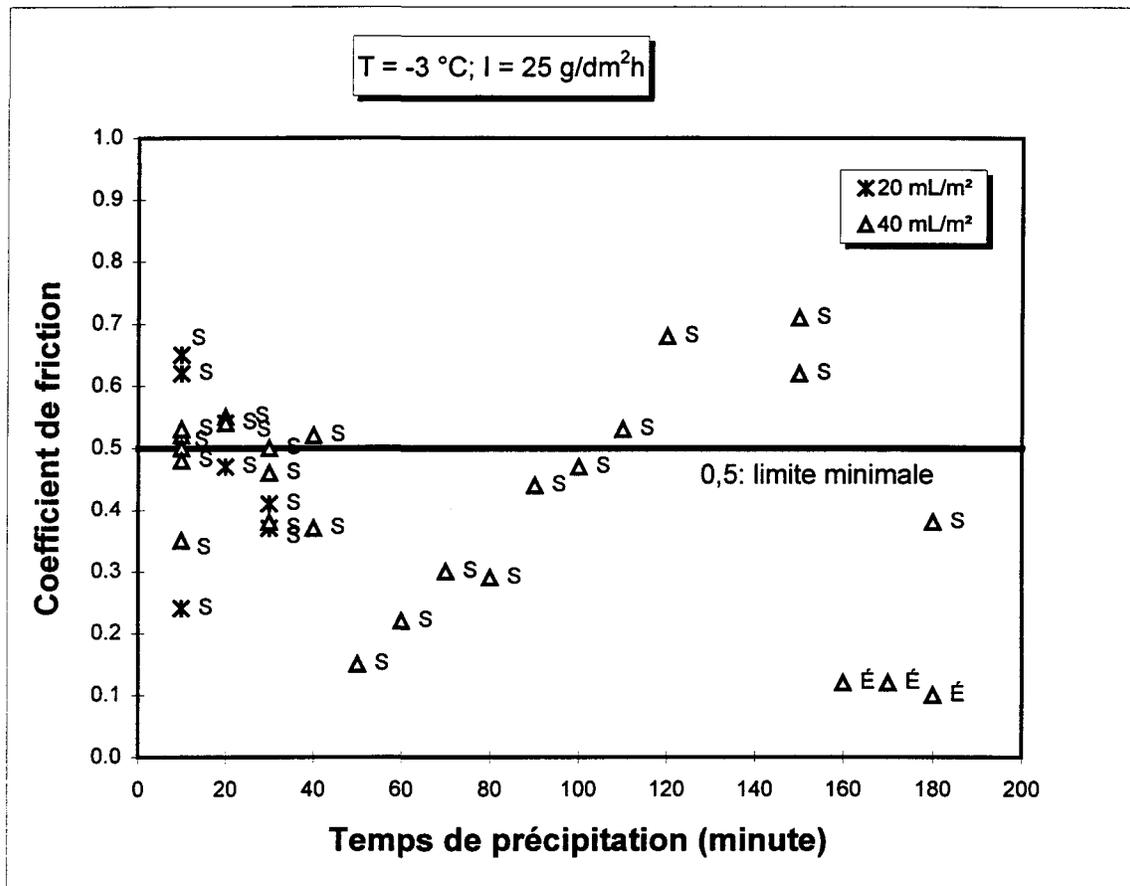


Figure 8.7 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium moulée dans le cas du glycol-urée

Comme le montrent le Tableau 8.17 et la Figure 8.7, tous les cas d'échecs (4 cas) rapportés par l'observateur sont en-dessous de la limite du coefficient de friction. Le pourcentage de correspondance en cas d'échec est donc excellent à 100 %. Pour les cas de succès de nombreux points sont situés au-dessous de la

limite et le pourcentage de correspondance ne sont pas bon, 47 % (14 cas sur 30).  
Donc, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction n'est pas bonne.

### 8.3 Conclusion pour l'aluminium moulé

Le Tableau 8.18 présente la moyenne des pourcentages de reproductibilité et de correspondance des critères de succès et d'échecs dans le cas de la plaque d'aluminium moulée traitée avec l'urée et le glycol-urée. Comme le montre ce tableau, les essais sur la plaque d'aluminium moulée ont montré une bonne reproductibilité (81 % en moyenne), qui s'explique par l'imperméabilité de la plaque.

Tableau 8.18 Résumé des résultats sur l'aluminium moulée

	Urée		Glycol-urée		$M_p$
	$M_p$	$\sigma_p$	$M_p$	$\sigma_p$	
Reproductibilité Pr (%)	82	12	80	9	81
Nombre de cas	11		10		21
Correspondance Pcs (%)	57	36	47	2	51
Nombre de succès observés	21		30		51
Correspondance Pcé (%)	80	40	100	0	89
Nombre d'échecs observés	5		4		9

$M_p$  : moyenne pondérée.

$\sigma_p$  : écart-type pondéré.

Par contre, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas de succès n'est pas acceptable (51 % en moyenne). Le cas du glycol-urée est le pire (47 %). Ceci est dû au manque de rugosité de la plaque d'aluminium moulée. Il n'y a alors pas assez de différence entre le coefficient de friction de la plaque mouillée par le mélange liquide eau / produit déverglaçant et celui de la couche de glace. Par conséquent, le coefficient de friction est bas même lorsque la couche de glace a été complètement enlevée.

## CHAPITRE 9

### ÉTUDE DE LA PLAQUE D'ALUMINIUM ENDUITE DE PFS

#### 9.1 Cas de l'urée

Les essais ont été effectués avec des quantités variant de 60 à 180 g/m<sup>2</sup>.

##### 9.1.1. Application de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée

Les plaques traitées avec 60 g/m<sup>2</sup> d'urée ont été soumises aux précipitations surfondues pendant des périodes variant de 10 minutes à 30 minutes. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 9.1.

Tableau 9.1 Performance de 60 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra123	24,65	10	É	1,12
ra128	24,84	10	S	0,54
ra123	24,65	20	É	0,33
ra128	24,84	20	É	0,32
ra123	24,65	30	É	0,32
ra128	24,84	30	É	0,24

### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 20 et 30 minutes, la couche de glace n'a pas pu être enlevée par le raclage. Pour 10 minutes de précipitation, le résultat est variable.

$N_r = 2$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 67 \%$

### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 9.1 et la Figure 9.1.

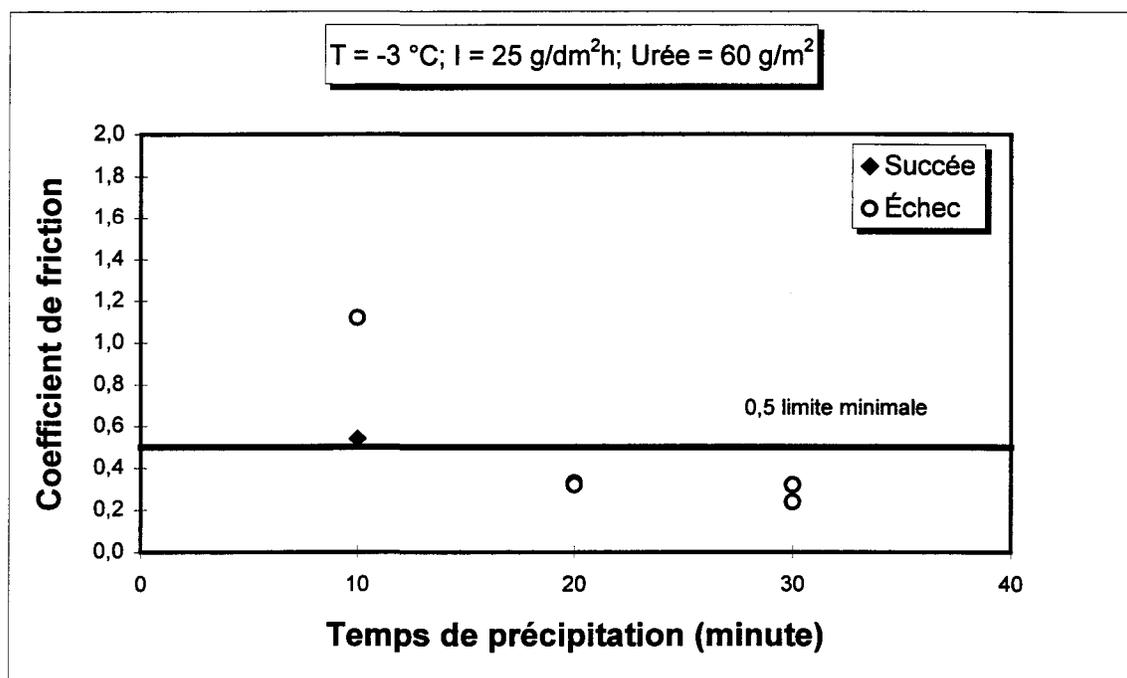


Figure 9.1 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

Dans le cas du succès observé visuellement, le coefficient de friction est au-dessus de la limite. Tous les points correspondant aux cas d'échecs sauf un sont au-dessous de la limite. Ce point s'explique par la minceur de la couche de glace

déposée sur la plaque après 10 minutes de précipitation. Cette couche de glace n'est pas suffisante pour remplir les creux de la surface de la plaque. Que la glace soit enlevée ou non, la surface est toujours rugueuse.

Pour les cas de succès :

$$N_{cs} = 1 \quad (10 \text{ minutes})$$

$$N_{ts} = 1 \quad (10 \text{ minutes})$$

$$P_{cs} = 100 \%$$

Pour les cas d'échec :

$$N_{cé} = 4 \quad (20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_{té} = 5 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_{cé} = 80 \%$$

### 3. Conclusion

Les essais effectués sur la plaque d'aluminium enduite de PFS avec 60 g/m<sup>2</sup> d'urée, ont montré un niveau de reproductibilité insatisfaisant (Tableau 9.2). La correspondance entre le coefficient de friction et l'observation visuelle est très bonne (Tableau 9.3).

Tableau 9.2    Reproductibilité (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
67 %	3

Tableau 9.3 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (60 g/m<sup>2</sup> d'urée)

P <sub>cs</sub>	N <sub>ts</sub>	P <sub>cé</sub>	N <sub>té</sub>
100 %	1	80 %	5

#### 9.1.2. Application de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une série d'essais à été réalisée avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 9.4.

Tableau 9.4 Performance de 120 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra124	24,65	10	S	1,31
ra129	24,59	10	S	1,35
ra124	24,65	20	S	0,68
ra129	24,59	20	S	0,85
ra124	24,65	30	S	0,56
ra129	24,59	30	É	1,08
ra133	23,94	30	S	0,59
ra133	23,94	30	S	1,20
ra133	23,94	30	S	0,40

#### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 10, 20 et 30 minutes de précipitation, la glace a pu être enlevée dans tous les cas sauf un. Pour 30 minutes, de nombreux essais ont été effectués pour vérifier la reproductibilité. Le cas échec rapporté par l'observateur

est suspect, car c'est le seul échec observé parmi 5 essais effectués dans les mêmes conditions et le coefficient de friction mesuré est très élevé. On ne tiendra donc pas compte de cette donnée dans l'analyse des résultats. Les résultats des tests sont donc très reproductibles.

$N_r = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 100 \%$

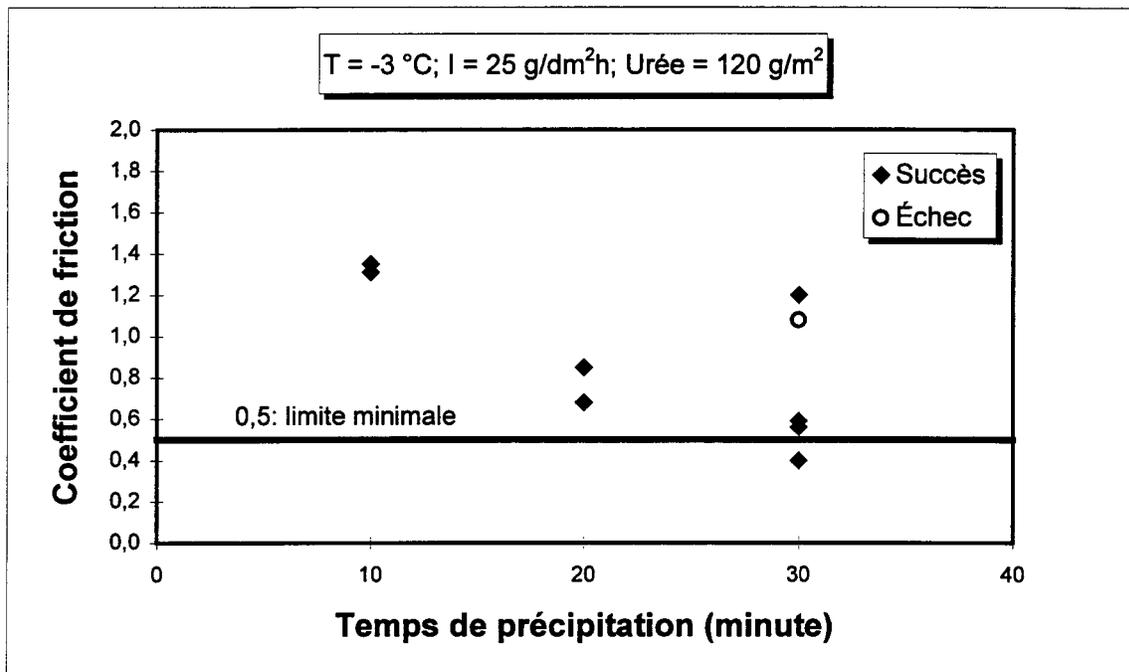


Figure 9.2 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS ( $120 \text{ g/m}^2$  d'urée)

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 9.4 et la Figure 9.2 montrent que dans les cas de succès, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est bonne (7

cas sur 8). Le cas où le succès observé est associé à une valeur du coefficient de friction inférieur à 0,5 correspond probablement à un regel partiel du film liquide eau-urée avant la mesure du coefficient de friction.

Pour les cas de succès :

$N_{cs} = 7$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_{ts} = 8$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_{cs} = 88 \%$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS avec 120 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré une excellente reproductibilité (Tableau 9.5), et la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction pour les cas de succès est bonne (Tableau 9.6).

Tableau 9.5 Reproductibilité (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	3

Tableau 9.6 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (120 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$
88 %	8

### 9.1.3. Application de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée

Une série d'essais à été réalisée avec 180 g/m<sup>2</sup> d'urée dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats d'essais sont présentés au Tableau 9.7.

Tableau 9.7 Performance de 180 g/m<sup>2</sup> d'urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (g/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra125	24,60	10	S	1,41
ra130	24,59	10	S	1,39
ra125	24,60	20	S	1,40
ra130	24,59	20	S	1,16
ra125	24,60	30	S	1,37
ra130	24,59	30	S	0,83

#### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 10, 20, 30 minutes de précipitation, la glace a pu être enlevée. Les résultats des tests sont très reproductibles.

$N_r = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 100 \%$

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le Tableau 9.7 et la Figure 9.3 montrent que, pour tous les cas de succès présentés, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est excellente (100 %).

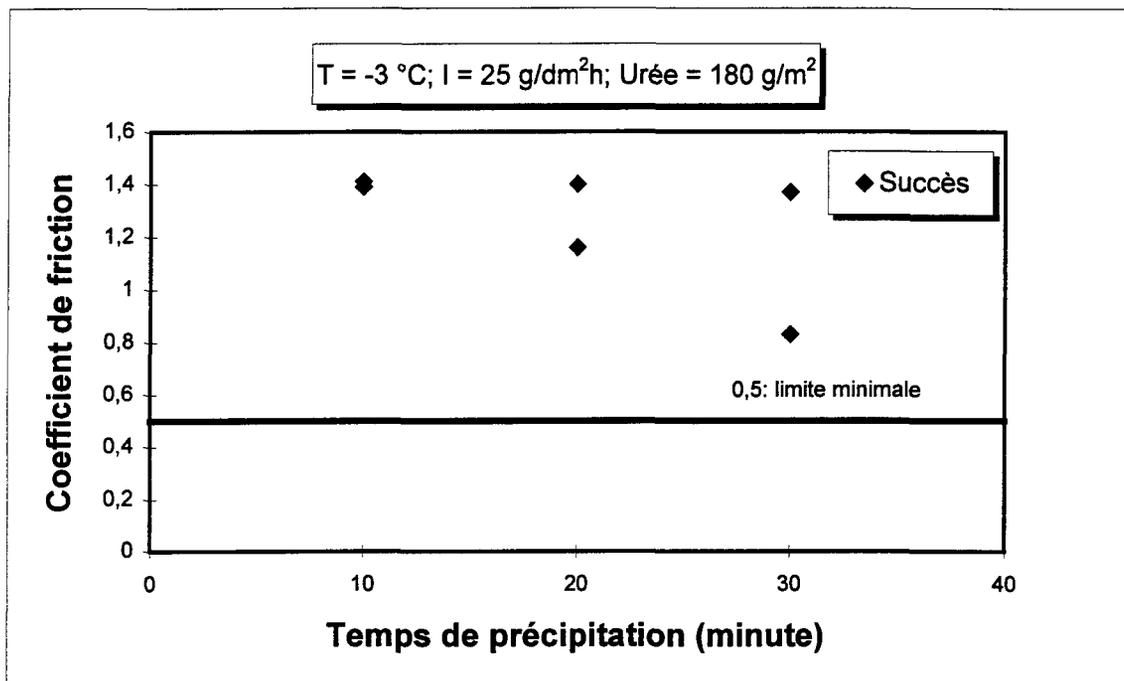


Figure 9.3 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

Pour les cas de succès :

$$N_{cs} = 6 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$N_{ts} = 6 \quad (10, 20 \text{ et } 30 \text{ minutes})$$

$$P_{cs} = 100 \%$$

## 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS avec 180 g/m<sup>2</sup> d'urée ont montré une excellente reproductibilité (Tableau 9.8), et la correspondance

entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est excellente (Tableau 9.9).

Tableau 9.8 Reproductibilité (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	3

Tableau 9.9 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (180 g/m<sup>2</sup> d'urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$
100 %	6

#### 9.1.4. Conclusion sur les cas de l'urée

Le résumé des résultats des essais est présenté à la Figure 9.4 et dans le Tableau 9.10.

Dans le Tableau 9.10, on remarque que la reproductibilité sur la plaque d'aluminium enduite de PFS est bonne avec un pourcentage de reproductibilité de 89 % en moyenne. Le pourcentage de reproductibilité pour 60 g/m<sup>2</sup> (67 %) n'est pas satisfaisant. Il est dû aux cas correspondant à 10 minutes de précipitation alors que l'observateur a rapporté un succès et un échec. Or, la valeur du coefficient de friction pour le cas d'échec observé est très élevée (1,12). Si on se base sur le coefficient de friction au lieu de l'observation pour évaluer la reproductibilité, celle-ci devient excellente avec 100 %.

Comme le montrent le Tableau 9.10 et la Figure 9.4, les cas de succès de nombreux points sont situés au-dessous de la limite et le pourcentage de correspondance est très bon, 94 % (15 cas sur 16).

Tableau 9.10 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas de l'urée

Quantité de l'urée	60 g/m <sup>2</sup>	120 g/m <sup>2</sup>	180 g/m <sup>2</sup>	M <sub>p</sub>	σ <sub>p</sub>
Reproductibilité P <sub>r</sub> (%)	67	100	100	89	17
Nombre de cas	3	3	3	9	
Correspondance P <sub>cs</sub> (%)	100	88	100	94	6
Nombre de succès observés	2	8	6	16	
Correspondance P <sub>cé</sub> (%)	80	–	–	80	0
Nombre d'échecs observés	5			5	

M<sub>p</sub> : Moyenne pondérée.

σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré.

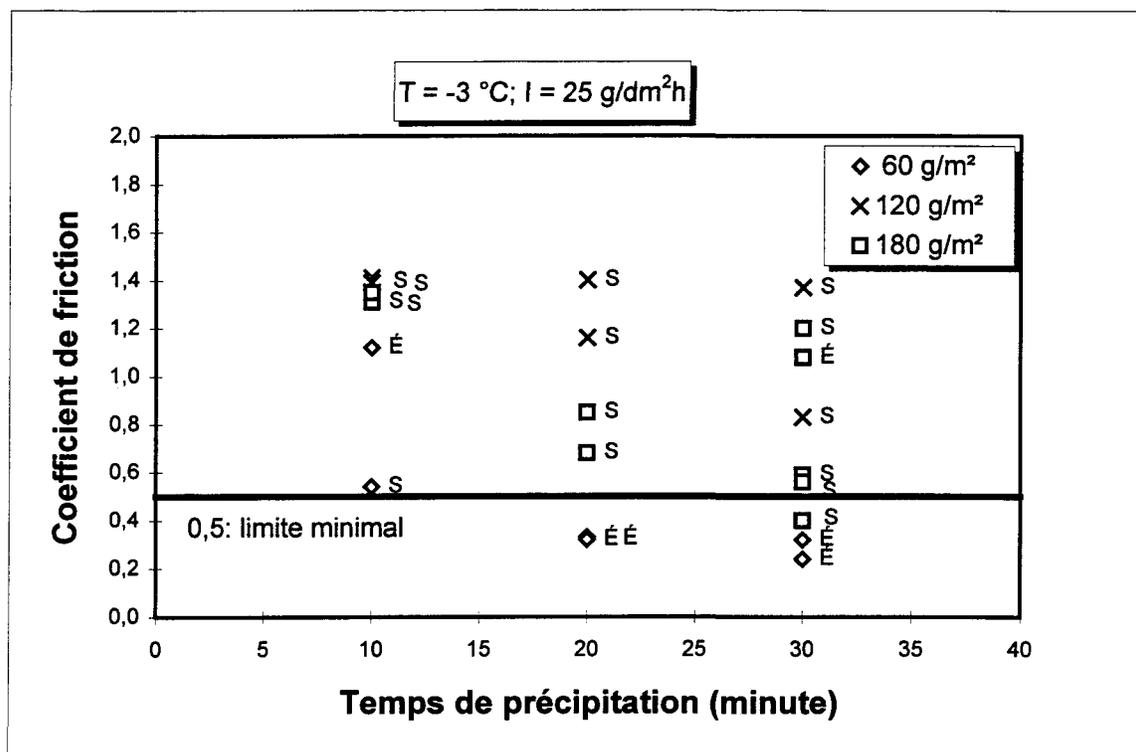


Figure 9.4 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas de l'urée

## 9.2 Cas du glycol-urée

### 9.2.1. Application de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Dans cette série d'essais, le glycol-urée a été appliqué sur la plaque. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 9.11.

Tableau 9.11 Performance de 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (mL/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra126	24,60	10	É	0,35
ra131	24,49	10	É	0,52
ra136	24,76	10	É	0,37
ra136	24,76	10	É	0,54
ra136	24,76	10	É	0,57
ra126	24,60	20	É	0,35
ra131	24,49	20	É	0,28
ra134	23,67	20	É	0,27
ra134	23,67	20	É	0,26
ra134	23,67	20	É	0,31
ra126	24,60	30	É	0,22
ra131	24,49	30	É	0,23

### 1. Reproductibilité

Dans tous les cas de précipitation, la glace n'a pas pu être enlevée. Les résultats des tests sont très reproductibles.

$N_r = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 100 \%$

## 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

La Figure 9.5 et le Tableau 9.11 montrent que dans la plupart des cas d'échecs, le coefficient de friction est au-dessous de la limite. Dans trois cas correspondant à 10 minutes de précipitation, le coefficient de friction est supérieur de 0,5. Ceci s'explique par la minceur de la glace qui ne remplit pas les creux de la surface. Par conséquent, bien que la glace n'ait pas été enlevée, le coefficient de friction reste élevé. La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction reste élevé. La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction n'est pas satisfaisante (75 %).

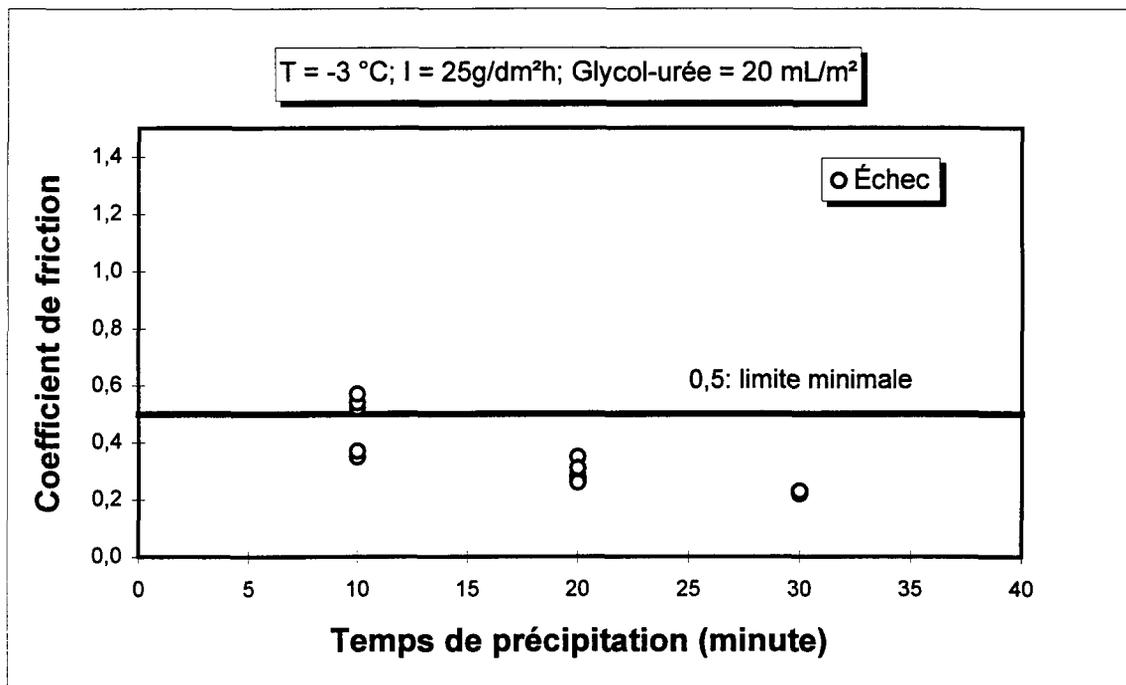


Figure 9.5 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

Pour les cas d'échec:

$$N_{cé} = 9$$

(10, 20 et 30 minutes)

$$N_{t\acute{e}} = 12$$

(10, 20 et 30 minutes)

$$P_{c\acute{e}} = 75 \%$$

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS avec 20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont montré une excellente reproductibilité (Tableau 9.12), mais la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction n'est pas satisfaisante à cause des cas correspondant à 10 minutes de précipitation (Tableau 9.13).

Tableau 9.12 Reproductibilité (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	3

Tableau 9.13 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (20 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{c\acute{e}}$	$N_{t\acute{e}}$
75 %	12

#### 9.2.2. Application de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée

Une autre série d'essais a été réalisée avec 40 mL/m<sup>2</sup> dans les mêmes conditions que précédemment. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 9.14 et à la Figure 9.6.

Tableau 9.14 Performance de 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Intensité de précipitation (mL/dm <sup>2</sup> h)	Temps de précipitation (minute)	Performance (observation)	Performance (coefficient de friction)
ra127	24,84	10	S	0,89
ra132	24,49	10	S	0,70
ra127	24,84	20	S	0,65
ra132	24,49	20	S	0,57
ra127	24,84	30	É	0,28
ra132	24,49	30	É	0,28

### 1. Reproductibilité

Dans les cas de 10 et 20 minutes de précipitation, la glace a pu être enlevée. Pour 30 minutes, la glace n'a pas pu être enlevée dans tous les cas. Les résultats des essais sont donc très reproductibles.

$N_r = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$N_t = 3$  (10, 20 et 30 minutes)

$P_r = 100 \%$

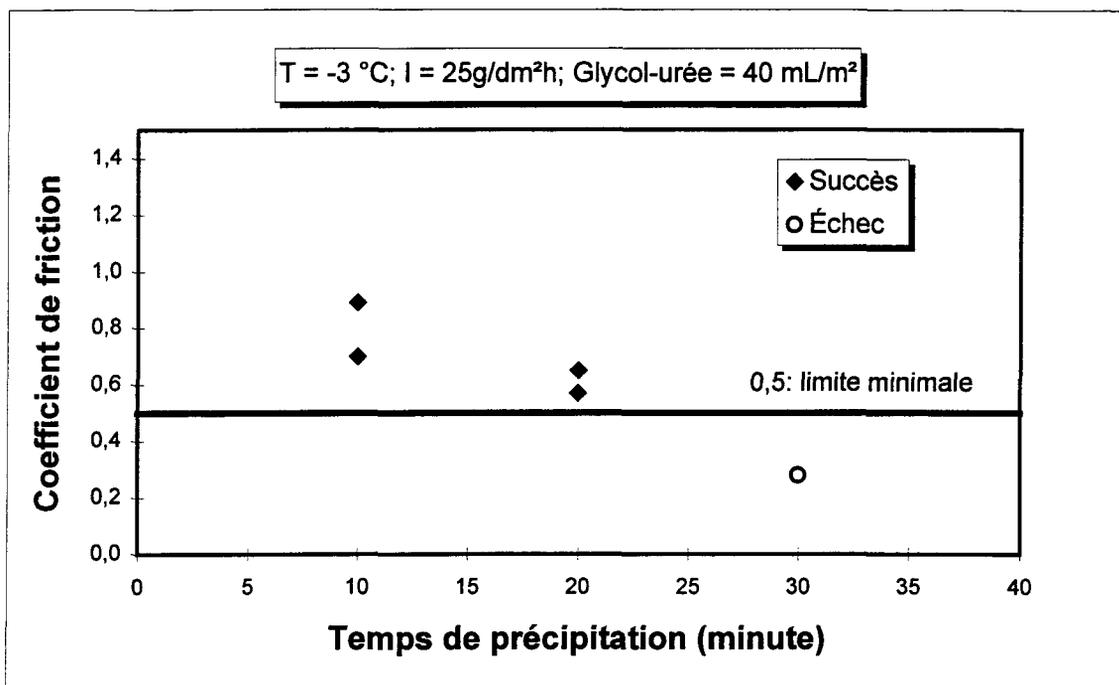


Figure 9.6 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

### 2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

La Figure 9.6 et le Tableau 9.14 montrent que, pour tous les cas de succès et d'échec présentés, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est excellente (100 %).

### 3. Conclusion

Les essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS avec 40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée ont montré une excellente reproductibilité, et la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est excellente (Tableau 9.15 et Tableau 9.16).

Tableau 9.15 Reproductibilité (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_r$	$N_t$
100 %	3

Tableau 9.16 Correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction (40 mL/m<sup>2</sup> de glycol-urée)

$P_{cs}$	$N_{ts}$	$P_{cé}$	$N_{té}$
100 %	4	100 %	2

### 9.2.3. Conclusion sur les cas du glycol-urée

Le résumé des résultats des essais est présenté à la Figure 9.7 et dans le Tableau 9.17.

Dans le Tableau 9.17, on remarque que la reproductibilité sur la plaque d'aluminium enduite de PFS est excellente, avec un pourcentage de reproductibilité moyen de 100 %.

Comme le montrent les cas d'échecs, de nombreux points rapportés par l'observateur sont en-dessous de la limite du coefficient de friction. Le pourcentage de correspondance en cas d'échec est donc bon, avec une moyenne pondérée de 79 % (9 cas sur 12). Si on ne tenait pas compte des cas correspondant à 10 minutes de précipitation, ce pourcentage serait de 100 %.

Pour tous les cas de succès, les points sont situés au-dessus de la limite et le pourcentage de correspondance est excellent, 100 % (4 cas sur 4). Donc, la

correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est acceptable.

Tableau 9.17 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas du glycol-urée

Quantité de glycol-urée	20 mL/m <sup>2</sup>	40 mL/m <sup>2</sup>	M <sub>p</sub>	σ <sub>p</sub>
Reproductibilité P <sub>r</sub> (%)	100	100	100	0
Nombre de cas	3	3	6	
Correspondance P <sub>cs</sub> (%)	—	100	100	0
Nombre de succès observés		4	4	
Correspondance P <sub>cé</sub> (%)	75	100	79	9
Nombre d'échecs observés	12	2	14	

M<sub>p</sub> : Moyenne pondérée.

σ<sub>p</sub> : écart-type pondéré.

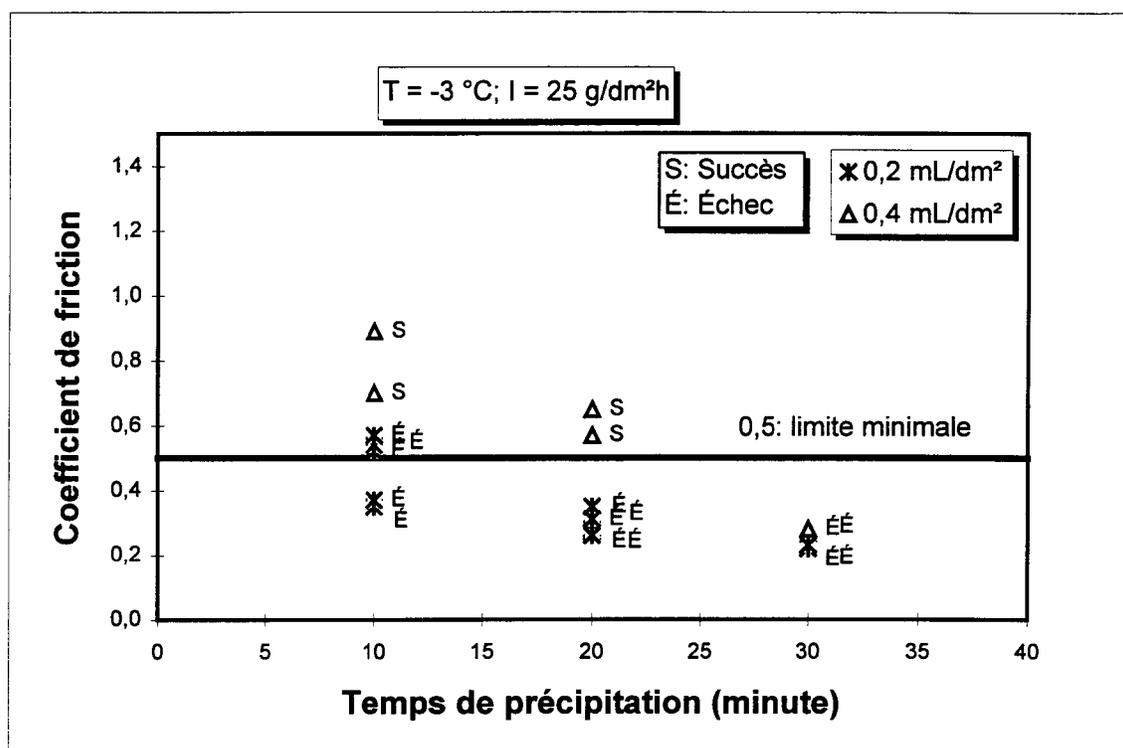


Figure 9.7 Comparaison des critères de performance sur la plaque d'aluminium enduite de PFS dans le cas du glycol-urée

### 9.3 Conclusion sur l'aluminium enduit de PFS

Le Tableau 9.18 présente la moyenne des pourcentages de reproductibilité et de correspondance des critères en cas de succès et d'échecs dans le cas de la plaque d'aluminium enduite de PFS traitée avec l'urée et le glycol-urée.

Tableau 9.18 Résumé des résultats sur l'aluminium enduit de PFS

	Urée		Glycol-urée		$M_p$
	$M_p$	$\sigma_p$	$M_p$	$\sigma_p$	
Reproductibilité Pr (%)	89	17	100	0	93
Nombre de cas	9		6		15
Correspondance Pcs (%)	94	6	100	0	95
Nombre de succès observés	16		4		20
Correspondance Pcé (%)	80	0	79	9	79
Nombre d'échecs observés	5		14		19

$M_p$  : moyenne pondérée.       $\sigma_p$  : écart-type pondéré

Comme le montre ce tableau, les essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS ont montré une excellente reproductibilité, 95 % d'essais reproductibles en moyenne.

La reproductibilité est excellente dans le cas du glycol-urée (100 %) et bonne dans le cas de l'urée (89 %). En fait, dans ce dernier cas, on aurait aussi 100 % pour la reproductibilité si ce n'était d'un seul essai correspondant à 10 minutes de précipitation et 60 g/m<sup>2</sup> d'urée pour lequel un échec a été observé, alors que le coefficient de friction était très élevé.

L'imperméabilité de l'aluminium enduit de PFS explique l'excellence de la reproductibilité.

La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas de succès est excellente (95 % en moyenne). La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des échecs est bonne (79 % en moyenne). Si les essais correspondant à 10 minutes de précipitation étaient ignorés, la correspondance dans le cas des échecs serait de 100 %.

# **CHAPITRE 10**

## **COMPARAISON DES SUBSTRATS**

### **10.1 Introduction**

Dans ce chapitre les quatre substrats évalués précédemment sont comparés et le meilleur substrat est sélectionné pour les essais d'anti-adhésion subséquents.

### **10.2 Comparaison des substrats**

#### **10.2.1. Reproductibilité**

Les essais ont été effectués avec quatre substrats différents dans les mêmes conditions environnementales. Le résumé des résultats de ces essais est présenté au Tableau 10.1.

Dans le Tableau 10.1, on peut remarquer que la reproductibilité des essais sur la plaque de béton de ciment est mauvaise, 59 % en moyenne. Le béton de ciment est un matériau poreux, il absorbe donc facilement les produits liquides. Par conséquent, les plaques utilisées pour les essais d'anti-adhésion ne sont jamais exactement dans les mêmes conditions. Lorsque la plaque de béton de ciment est

très sèche, elle absorbe la solution d'urée, et les essais doivent être considérés comme invalides. De plus, la plaque de béton de ciment est difficile à nettoyer complètement, des traces d'urée réapparaissant quand les plaques sèchent. Par conséquent, Il est préférable d'utiliser un matériau moins poreux pour les essais d'anti-adhésion.

Tableau 10.1 Comparaison de reproductibilité

Substrat	M <sub>p</sub> (%)		M <sub>p</sub> (%)
	Urée	Glycol-urée	
<b>Béton de ciment</b>	55	71	59
<b>Béton de polymère</b>	86	56	74
<b>Aluminium moulé</b>	82	80	81
<b>Aluminium enduit de PFS</b>	89	100	93

La reproductibilité des essais sur la plaque de béton de polymère, 74 % en moyenne, est un peu meilleure que celle du béton de ciment. La plaque de béton de polymère à l'état neuf est imperméable. On a cependant remarqué que sa porosité augmentait avec l'usage. Les essais du glycol-urée ayant été effectués après la série de l'urée, le problème de reproductibilité causé par la porosité s'est à nouveau présenté lors des essais effectués avec le glycol-urée sur le béton de polymère.

Les essais sur la plaque d'aluminium moulée ont montré une bonne reproductibilité, 81 % en moyenne. Celle-ci s'explique par l'imperméabilité de la plaque.

Les essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS ont montré une excellente reproductibilité, 93 % d'essais reproductibles en moyenne. La reproductibilité est excellente dans le cas du glycol-urée (100 %) et bonne dans le cas de l'urée (89 %). L'imperméabilité de l'aluminium enduit de PFS explique l'excellence de la reproductibilité.

#### 10.2.2. Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction

Le résumé des résultats des essais sur la correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction est présenté dans le Tableau 10.2 pour les cas de succès, et dans le Tableau 10.3 pour les cas d'échecs.

##### 10.2.2.1 Cas de succès

La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des succès sur les quatre substrats est présentée au Tableau 10.2.

Sur la plaque de béton de ciment, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des succès n'est pas acceptable (69 % en moyenne). Le cas du glycol-urée est le pire (33 %) à cause du phénomène de gel d'un film résiduel après l'opération de raclage. Une diminution

du délai entre le raclage de la glace et la mesure du coefficient de friction devrait résoudre ce problème.

Tableau 10.2 Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction (Cas des succès)

Substrat	M <sub>p</sub> (%)		M <sub>p</sub> (%)
	Urée	Glycol-urée	
<b>Béton de ciment</b>	76	33	69
<b>Béton de polymère</b>	100	77	90
<b>Aluminium moulé</b>	57	47	51
<b>Aluminium enduit de PFS</b>	94	100	95

Sur la plaque de béton de polymère, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas de succès est très bonne (90 % en moyenne).

Sur la plaque d'aluminium moulée, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas de succès n'est pas acceptable (51 % en moyenne). Le cas du glycol-urée est le pire (47 %). Ceci est dû au manque de rugosité de la plaque d'aluminium moulée. Il n'y a alors pas assez de différence entre le coefficient de friction de la plaque mouillée par le mélange liquide eau / produit déverglaçant et celui de la couche de glace. Par conséquent, le coefficient de friction est bas même lorsque la couche de glace a été complètement enlevée.

Sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas de succès est excellente (95 % en moyenne).

#### 10.2.2.2 Cas d'échec

La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des succès sur les quatre substrats est présenté au Tableau 10.3.

Tableau 10.3 Correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction (Cas des échecs)

Substrat	M <sub>p</sub> (%)		M <sub>p</sub> (%)
	Urée	Glycol-urée	
<b>Béton de ciment</b>	90	100	92
<b>Béton de polymère</b>	67	67	67
<b>Aluminium moulé</b>	80	100	89
<b>Aluminium enduit de PFS</b>	80	79	80

Sur la plaque de béton de ciment, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des échecs est excellente 92 % en moyenne.

Sur la plaque de béton de polymère, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des échecs n'est pas satisfaisante (67 % en moyenne).

Sur la plaque d'aluminium moulée, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas d'échec est très bonne (89 % en moyenne).

Sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des échecs est bonne (80 % en moyenne). Si les essais correspondant à 10 minutes de précipitation étaient ignorés, la correspondance dans le cas des échecs seraient de 100 %. La couche de glace de 0,4 mm d'épaisseur formée après 10 minutes de précipitation à 25 g/dm<sup>2</sup>h n'est pas assez épaisse pour couvrir les aspérités de la surface et le coefficient de friction reste élevé, même en cas d'échec au raclage.

### **10.3 Résumé des caractéristiques des quatre substrats**

#### 10.3.1. Béton de ciment

- *En condition sèche ou humide :*
  1. Simule assez bien la rugosité du béton de piste et présente une valeur acceptable du coefficient de friction, 0,92 en condition humide.
  2. N'est pas facile à nettoyer (risque de contamination).
  3. Présente une mauvaise reproductibilité (59 % en moyenne).
  4. Présente une correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction mauvaise pour les cas de succès (69 % en moyenne), mais bonne pour les cas d'échec (92 % en moyenne).

- *En condition sèche*
  1. Absorbe l'eau et les mélanges d'eau et d'urée ou de glycol-urée.
  2. Présent une grande variation dans les coefficients de friction mesurés.
- *En condition humide*
  1. Absorbe moins l'eau et les mélanges d'eau et d'urée ou de glycol-urée qu'en condition sèche.
  2. Présente des valeurs du coefficient de friction plus stables qu'en condition sèche.

#### 10.3.2. Béton de polymère

1. Simule assez bien la rugosité du béton de piste mais présente une valeur élevée du coefficient de friction: 1,24 en condition humide.
2. Est facile à nettoyer.
3. À l'état neuf, n'absorbe pas le mélange d'eau et d'urée, mais la porosité augmente avec l'usage.
4. Présente des valeurs du coefficient de friction assez stable.
5. Présente une reproductibilité insuffisante (74 % en moyenne).
6. Présente une correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction bonne pour les cas de succès (90 % en moyenne), mais mauvaise pour les cas d'échec (67 % en moyenne).

### 10.3.3. Aluminium moulé

1. Simule mal la rugosité du béton de piste, et présente une valeur un peu faible du coefficient de friction, 0,67 en condition humide.
2. Est facile à nettoyer.
3. N'absorbe pas l'eau et les mélanges d'eau et d'urée et glycol-urée.
4. Présente des valeurs stables du coefficient de friction.
5. Présente une assez bonne reproductibilité (81 % en moyenne).
6. Présente une correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction mauvaise pour les cas de succès (51 % en moyenne), mais bonne pour les cas d'échec (89 % en moyenne).

### 10.3.4. Aluminium enduit de PFS

1. Simule assez bien la rugosité du béton de piste, bien que le coefficient de friction de la plaque humide soit plus élevé que celui du béton de piste, 1,38 en condition humide.
2. Est facile à nettoyer.
3. N'absorbe pas le mélange d'eau et d'urée.
4. Présente une excellente reproductibilité (95 % en moyenne).
5. Présente une correspondance entre observation visuelle et coefficient de friction excellente pour les cas de succès (93 % en moyenne), et bonne pour les cas d'échec (80 % en moyenne).

## 10.4 Conclusion

### 10.4.1. Le meilleur substrat

Selon le résumé des essais, la plaque d'aluminium enduite de PFS montre une excellente reproductibilité et une bonne correspondance entre le coefficient de friction et l'observation. De plus, ce substrat est facile à nettoyer et n'est pas affecté par des raclages successifs. Son seul défaut est son coefficient de friction qui reste élevé lorsque la glace ne peut pas être enlevée lors des temps de précipitation courts (10 minutes). Ceci est dû à la grande rugosité de la plaque. En effet, lorsqu'une couche de glace mince se forme sur la plaque, elle ne couvre pas toutes les aspérités de la surface et le coefficient de friction reste relativement élevé. Si le coefficient de friction est supérieur à 0,5, la surface de plaque est assez rugueuse malgré que la glace n'a pas été complètement enlevée. Dans les aéroports, on considère que les pistes commencent à être roulable lorsque le coefficient de friction est supérieure à 0,5. On suggère donc d'ignorer le critère d'observation visuelle. Le critère de succès ou d'échec sera alors basé sur la valeur du coefficient de friction dans la procédure finale. En fait, la plaque de PFS présente l'avantage de permettre de différencier plus nettement la présence ou l'absence de glace du fait de forte rugosité assurant un coefficient de friction.

On recommande donc la plaque d'aluminium enduite de PFS comme le substrat d'essais pour les tests de performance des produits déverglaçants.

# CHAPITRE 11

## PERFORMANCE DES PRODUITS DÉVERGLAÇANTS

### 11.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des essais effectués avec cinq produits déverglaçants testés sur la plaque d'aluminium enduite de PFS sont présentés. Deux produits sont ceux qui ont été utilisés comme produits standards dans les essais précédents : l'urée et le glycol-urée. Les trois autres produits sont des produits commerciaux : deux liquides à base d'acétate de potassium, codés KA1 et KA2, et un solide à base de formiate de sodium, codé SF1. On utilise un code pour identifier les produits afin de préserver la confidentialité des fabricants.

La procédure d'essais est la même que précédemment, la température d'air et celle de la plaque sont à  $-3\text{ °C}$  et l'intensité de précipitation est  $25\text{ g/dm}^2\text{h}$  et  $40\text{ g/dm}^2\text{h}$ . Le critère de succès ou d'échec est basé sur la valeur du coefficient de friction.

Les limites inférieures et supérieures de la période d'anti-adhésion seront les critères pour déterminer la performance d'anti-adhésion des produits. On a analysé les résultats des essais, et trouvé la quantité optimale de produit pour atteindre l'effet d'anti-adhésion de la glace.

## 11.2 Produits testés sous l'intensité de précipitation de 25 g/dm<sup>2</sup>h

Les essais des trois produits commerciaux ont été effectués sous une précipitation de 25 g/dm<sup>2</sup>h.

### 11.2.1 KA1 (Acétate de potassium)

Deux quantités de produit ont été appliquées sur la plaque d'aluminium enduite de PFS, 160 et 200 mL/m<sup>2</sup>. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.1.

Tableau 11.1 KA1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
I = 25 g/dm<sup>2</sup>h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Quantité de produit (mL/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultats d'essai	Coefficient de friction
ra255	160	10	S	1,16
ra256	160	10	S	1,56
ra255	160	20	É	0,31
ra256	160	20	É	0,36
ra255	160	30	É	0,33
ra256	160	30	É	0,31
ra262	200	10	S	1,56
ra261	200	10	S	1,59
ra262	200	20	É	0,29
ra261	200	20	É	0,28
ra262	200	30	É	0,27
ra261	200	30	É	0,29

Comme le montrent le Tableau 11.1 et la Figure 11.1, dans les deux cas d'application de produit, 160 et 200 mL/m<sup>2</sup>, la glace a seulement pu être enlevée pour 10 minutes de précipitation. Donc la période d'anti-adhésion de KA1 pour

l'intensité de précipitation de 25 g/dm<sup>2</sup>h est 10 minutes. Le produit n'est donc efficace que pour une période très courte.

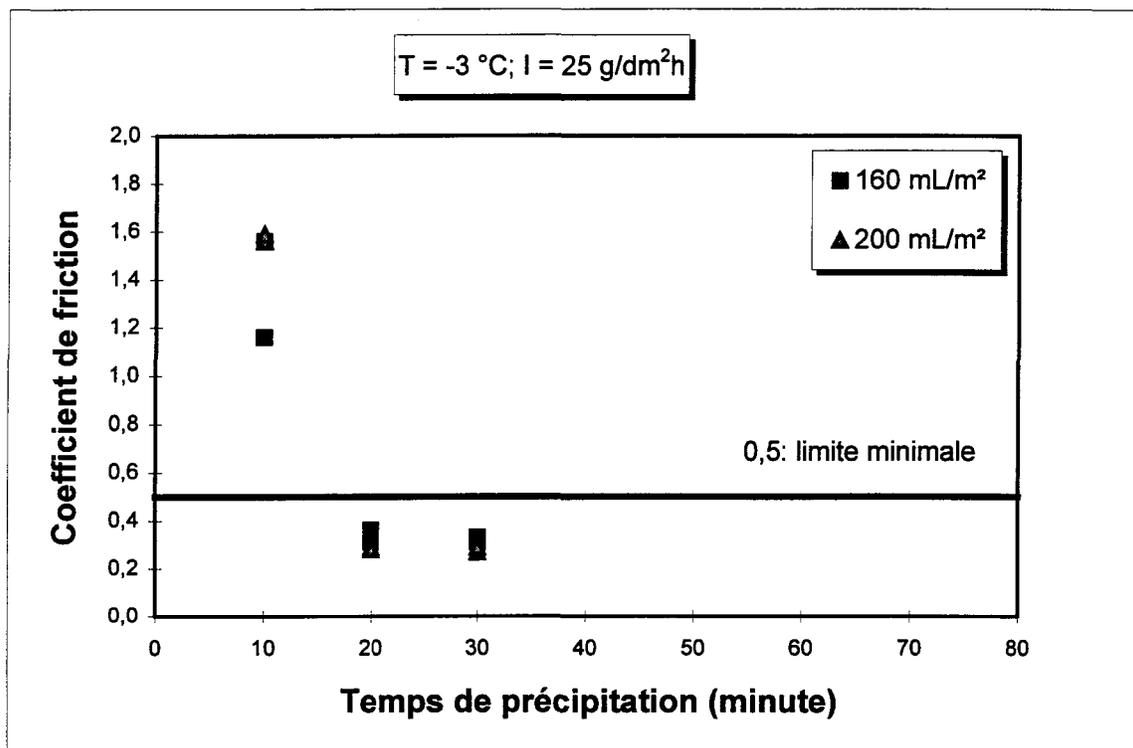


Figure 11.1 Période d'anti-adhésion pour KA1

### 11.2.2 KA2 (Acétate de potassium)

Deux quantités de produit KA2 ont été appliquées sur la plaque, 120 et 400 mL/m<sup>2</sup>. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.2.

Comme le montrent le Tableau 11.2 et la Figure 11.2, la glace a seulement pu être enlevée pour 10 minutes de précipitation dans les deux cas. Donc la période d'anti-adhésion est 10 minutes pour le produit KA2.

Tableau 11.2 KA2 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 25 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

N° de test	Quantité de produit (mL/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultat d'essai	Coefficient de friction
ra272	120	10	S	1,64
ra272	120	20	É	0,29
ra272	120	30	É	0,32
ra258	400	10	S	1,45
ra257	400	10	S	1,91
ra258	400	20	É	0,24
ra257	400	20	É	0,29
ra258	400	30	É	0,27
ra257	400	30	É	0,29

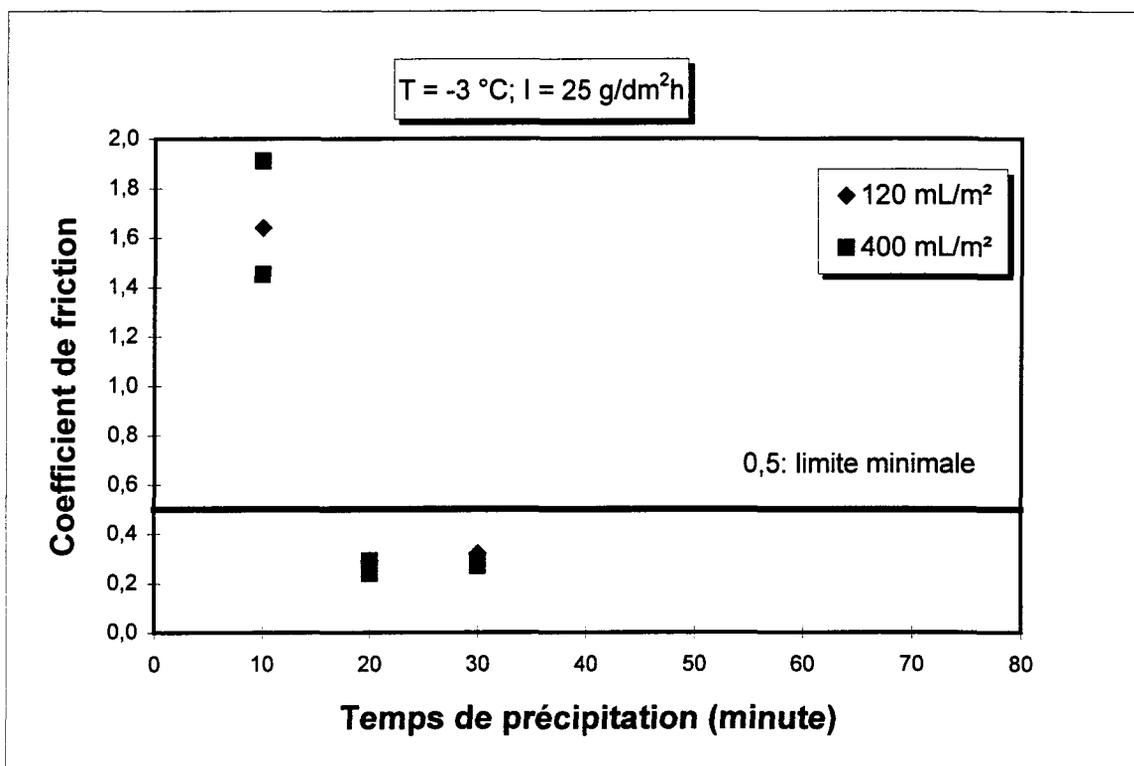


Figure 11.2 Période d'anti-adhésion pour KA2

### 11.2.3 SF1 (Formiate de potassium)

Deux quantités de 180 et 210 g/m<sup>2</sup> ont été appliquées sur la plaque. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.3.

Tableau 11.3 SF1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
I = 25 g/dm<sup>2</sup>h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Quantité de produit (g/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultat d'essai	Coefficient de friction
ra260	180	10	S	0,56
ra259	180	10	É	0,41
ra260	180	20	S	0,60
ra259	180	20	É	0,49
ra260	180	30	S	0,55
ra259	180	30	S	0,53
ra263	210	10	É	0,42
ra264	210	10	S	0,53
ra263	210	20	S	0,61
ra264	210	20	S	0,57
ra263	210	30	S	0,70
ra264	210	30	S	1,12

Comme le montrent le Tableau 11.3 et la Figure 11.3, pour 180 g/m<sup>2</sup> de SF1, les résultats sont variables tantôt succès tantôt échec pour 10 et 20 minutes de précipitation, car les valeurs du coefficient de friction sont proches de la limite d'acceptation de 0,5. La glace a pu être enlevée pour 30 minutes de précipitation. Lorsque la quantité a été augmentée à 210 g/m<sup>2</sup>, la glace a été enlevée après 20 et 30 minutes de précipitation. La période d'anti-adhésion de SF1 est de 30 minutes pour 180 g/m<sup>2</sup>, et de 20 à 30 minutes pour 210 g/m<sup>2</sup>.

Il semble que pour empêcher l'adhésion de la glace, les produits solides ont besoin d'une quantité suffisante d'eau pour se dissoudre. Avec  $180 \text{ g/m}^2$ , le coefficient de friction est proche de la limite d'acceptation (entre 0,4 et 0,6) pour 10, 20 et 30 minutes de précipitation. Avec  $210 \text{ g/m}^2$ , le coefficient de friction reste proche de la limite pour 10 et 20 minutes, mais pour 30 minutes, il y a assez de produit dilué pour bien enlever la glace et le coefficient de friction est nettement supérieur à la limite (0,7 et 1,1).

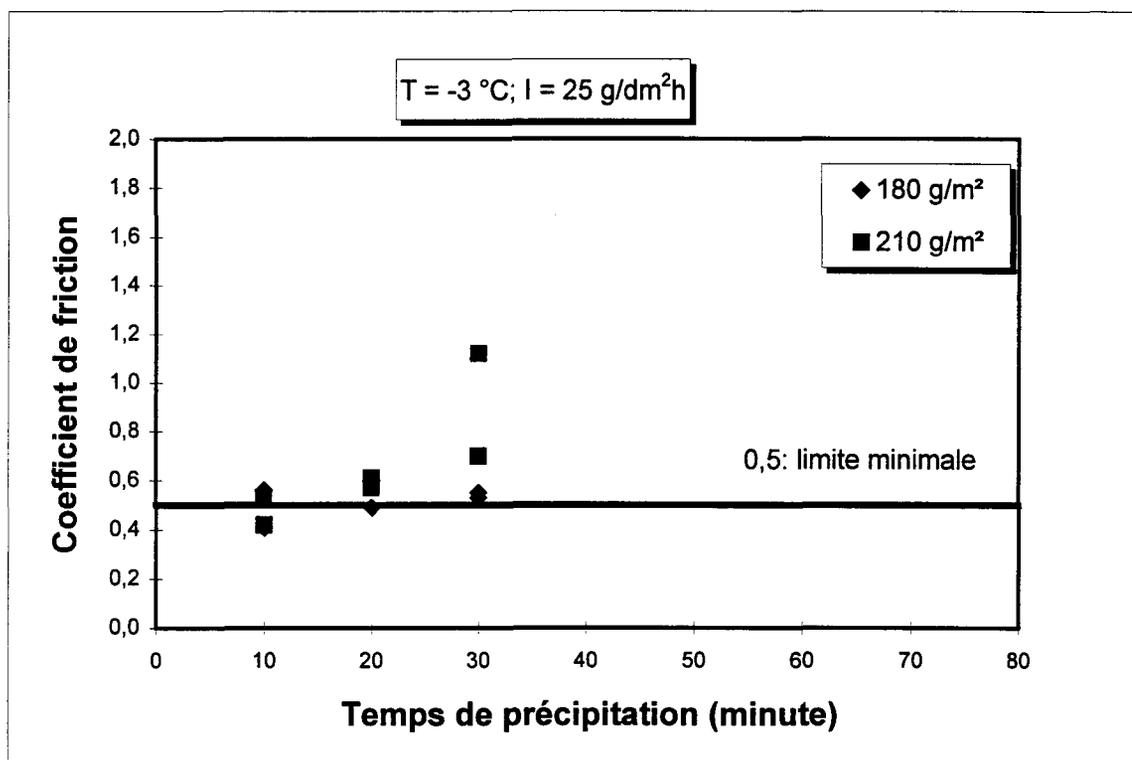


Figure 11.3 Période d'anti-adhésion pour SF1

### 11.2.4 Conclusion

Les périodes d'anti-adhésion pour les trois produits commerciaux ainsi que celles de l'urée et le glycol-urée obtenus sous 25 g/dm<sup>2</sup>h de précipitation sont présentées dans le Tableau 11.4.

Tableau 11.4 Résumé des périodes d'anti-adhésion pour les produits commerciaux. I = 25 g/dm<sup>2</sup>h

Produit	Quantité de produit	Période d'anti-adhésion (minute)
Urée (g/m <sup>2</sup> )	60	Échec
	120	10 ≤ T ≤ 30
	180	10 ≤ T ≤ 30
SF1 (g/m <sup>2</sup> )	180	T = 30
	210	20 ≤ T ≤ 30
Glycol-urée (mL/m <sup>2</sup> )	20	Échec
	40	10 ≤ T ≤ 20
KA1 (mL/m <sup>2</sup> )	160	T = 10
	200	T = 10
KA2 (mL/m <sup>2</sup> )	120	T = 10
	400	T = 10

Les produits solides, urée et SF1, sont efficaces plus longtemps que les liquides, glycol-urée, KA1 et KA2 : 30 minutes pour les solides et seulement 10 ou 20 minutes pour les liquides. L'urée semble être efficace plus rapidement que le SF1 pour une même quantité de produit : avec un taux d'application de 180 g/m<sup>2</sup>,

la période anti-adhésion commence à 10 minutes pour l'urée et à 30 minutes pour SF1.

Pour les produits liquides : glycol-urée, KA1 et KA2, la période d'anti-adhésion commence à 10 minutes mais ne dure pas longtemps, puisque les produits à base d'acétate de potassium échouent à 20 minutes et le glycol-urée à 30 minutes.

### **11.3 Produits testés sous l'intensité de précipitation de 40 g/dm<sup>2</sup>h**

#### **11.3.1 Urée**

Dans cette série d'essais, trois quantités d'urée, 60, 120 et 180 g/m<sup>2</sup> ont été utilisées. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.5.

Comme le montrent le Tableau 11.5 et la Figure 11.4, la glace n'a pas pu être enlevée avec les quantités de 60 et 120 g/m<sup>2</sup>. La glace a seulement pu être enlevée à partir de 20 minutes de précipitation en utilisant 180 g/m<sup>2</sup> d'urée.

Pour l'intensité de précipitation de 40 g/dm<sup>2</sup>h, il faut donc utiliser au moins 180 g/m<sup>2</sup> d'urée pour enlever la glace, et la période d'anti-adhésion est de 20 à 30 minutes.

Tableau 11.5 Urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3^\circ\text{C}$

N° de test	Quantité de produit (g/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultats d'essai	Coefficient de friction
ra140	60	10	É	0,14
ra145	60	10	É	0,38
ra140	60	20	É	0,32
ra145	60	20	É	0,44
ra140	60	30	É	0,24
ra145	60	30	É	0,31
ra141	120	10	É	0,36
ra146	120	10	É	0,38
ra141	120	20	É	0,33
ra146	120	20	É	0,32
ra141	120	30	É	0,29
ra146	120	30	É	0,29
ra142	180	10	É	0,39
ra147	180	10	É	0,48
ra150	180	10	S	0,53
ra142	180	20	S	0,87
ra147	180	20	S	0,56
ra150	180	20	S	0,75
ra142	180	30	S	1,06
ra147	180	30	S	1,13
ra150	180	30	S	1,23

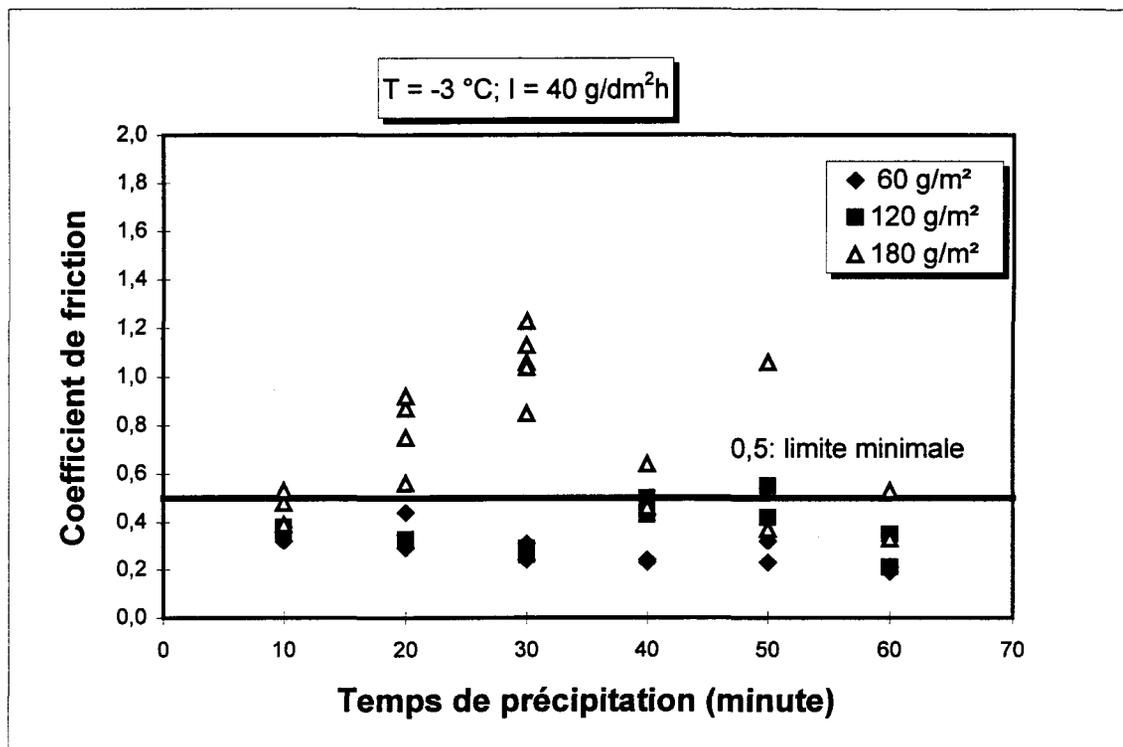


Figure 11.4 Période d'anti-adhésion pour l'urée. I = 40 g/dm²h

### 11.1.1 Glycol-urée

Dans cette série d'essais, quatre quantités de glycol-urée 20, 40, 60 et 80 mL/m², ont été utilisées. Les résultats des essais sont présentés au Tableau et à la Figure 11.5.

Pour les quantités de glycol-urée de 20, 40 et 60 mL/m², la glace n'a pas pu être enlevée. Pour 80 mL/m², la glace a pu être enlevée pour les temps de précipitation de 10 minutes à 30 minutes. À partir de 40 minutes les résultats des essais sont variables, tantôt succès tantôt échecs et le coefficient de friction est souvent proche de 0,5. La période d'anti-adhésion est donc de 10 à 30 minutes.

Tableau 11.6 Glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

N° de test	Quantité de produit (mL/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultat d'essai	Coefficient de friction
ra143	20	10	É	0,28
ra148	20	10	É	0,34
ra143	20	20	É	0,25
ra148	20	20	É	0,32
ra143	20	30	É	0,28
ra148	20	30	É	0,21
ra155	20	40	É	0,23
ra155	20	50	É	0,18
ra155	20	60	É	0,14
ra144	40	10	S	0,87
ra149	40	10	S	0,51
ra144	40	20	S	0,98
ra149	40	20	É	0,28
ra151	40	20	É	0,28
ra144	40	30	S	0,56
ra149	40	30	É	0,25
ra151	40	30	É	0,33
ra156	40	40	É	0,24
ra160	40	40	É	0,26
ra156	40	50	É	0,22
ra160	40	50	É	0,18
ra156	40	60	É	0,16
ra160	40	60	É	0,17
ra161	60	10	É	0,33
ra164	60	10	É	0,37
ra161	60	20	É	0,29
ra164	60	20	É	0,24
ra161	60	30	É	0,19
ra164	60	30	É	0,22

(suite)

Tableau11.6 Glycol-urée sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

ra162	80	10	S	0,51
ra163	80	10	S	0,39
ra169	80	10	S	0,62
ra171	80	10	S	0,60
ra162	80	20	S	0,68
ra163	80	20	S	0,50
ra162	80	30	S	0,92
ra163	80	30	S	0,74
ra165	80	40	É	0,26
ra166	80	40	É	0,43
ra167	80	40	S	0,66
ra165	80	50	É	0,22
ra166	80	50	S	0,63
ra167	80	50	S	0,77
ra165	80	60	É	0,21
ra166	80	60	S	0,54
ra167	80	60	S	0,51

Lorsque la plaque est traitée avec une faible quantité de produit déverglaçant, plusieurs petites parties de la surfaces de la plaque ne sont pas couvertes par le produit. Quand la plaque est soumise aux précipitations surfondues, la glace se forme directement sur les parties sans produit. Si la surface totale sans produit est grande, l'adhésion de la glace est forte et le raclage moins efficace. C'est ce qui se produit pour les quantités inférieures à  $80 \text{ mL/m}^2$ .

Pour  $80 \text{ mL/m}^2$  et à partir de 40 minutes, le glycol-urée devient trop dilué pour être suffisamment efficace.

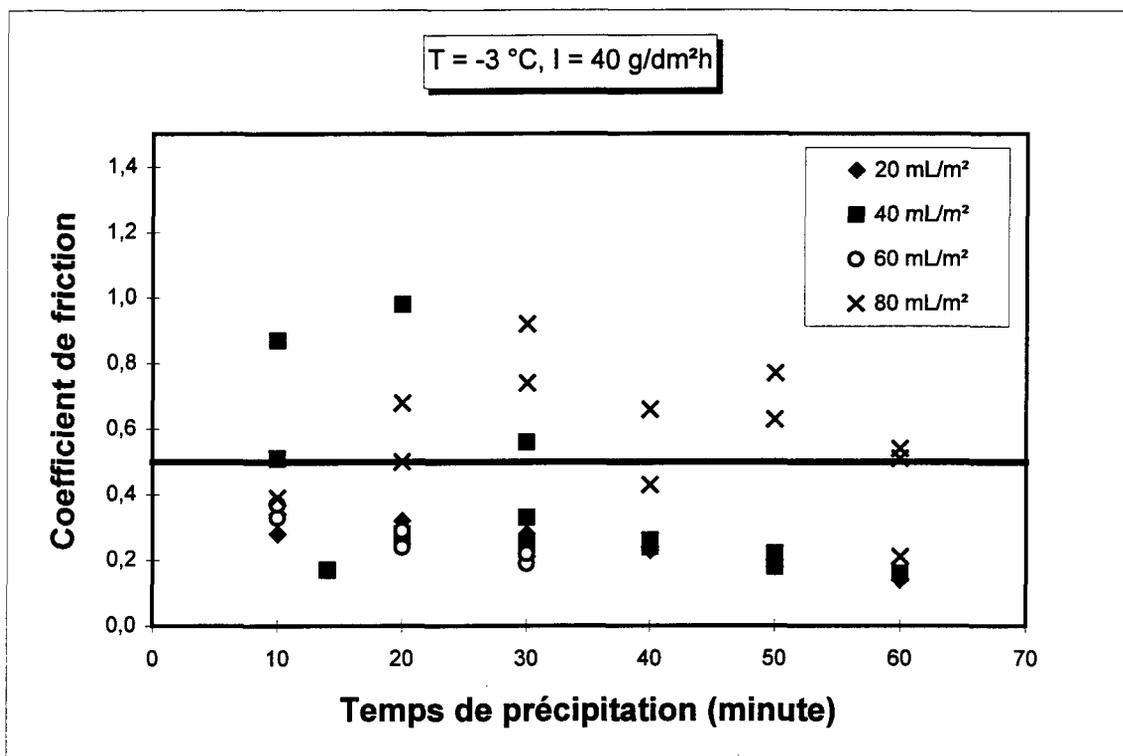


Figure 11.5 Période d'anti-adhésion du glycol-urée.  $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$

#### 11.1.1 KA1 (Acétate de potassium)

Dans cette série d'essais, trois quantités de KA1, 80, 120 et 160 mL/m<sup>2</sup> ont été utilisées. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.7.

Comme le montrent le Tableau 11.7 et la Figure 11.6, 80 et 120 mL/m<sup>2</sup> ne constituent pas des quantités suffisantes pour prévenir l'adhésion de la glace. Quelques succès obtenus avec 120 mL/m<sup>2</sup> indiquent qu'une augmentation de la quantité de produit pourrait donner de bons résultats.

Tableau 11.7 KA1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

N° de test	Quantité de produit (mL/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultat d'essai	Coefficient de friction
ra189	80	10	S	0,70
ra190	80	20	É	0,18
ra189	80	30	É	0,30
ra190	80	40	É	0,22
ra189	80	50	É	0,36
ra190	80	60	É	0,21
ra192	120	10	S	0,56
ra243	120	10	É	0,25
ra245	120	10	É	0,33
ra240	120	10	É	0,26
ra238	120	10	É	0,26
ra244	120	10	É	0,36
ra191	120	20	É	0,43
ra242	120	20	É	0,39
ra239	120	20	É	0,24
ra192	120	30	É	0,40
ra243	120	30	S	0,21
ra240	120	30	É	0,28
ra238	120	30	S	1,14
ra191	120	40	É	0,22
ra242	120	40	S	1,49
ra245	120	40	É	0,39
ra239	120	40	S	0,95
ra244	120	40	É	n.m
ra192	120	50	É	0,31
ra243	120	50	S	0,42
ra240	120	50	É	0,22
ra238	120	50	É	0,21

(suite)

Tableau 11.7 KA1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

ra191	120	60	É	0,22
ra242	120	60	S	1,00
ra245	120	60	É	0,28
ra239	120	60	S	1,15
ra244	120	60	É	0,29
ra196	160	10	S	0,93
ra194	160	10	S	0,61
ra211	160	10	É	0,48
ra246	160	10	É	0,36
ra247	160	10	É	0,28
ra195	160	20	É	0,20
ra193	160	20	É	0,42
ra197	160	20	É	0,47
ra198	160	20	S	0,80
ra196	160	30	S	1,11
ra194	160	30	S	1,16
ra195	160	40	É	0,15
ra193	160	40	S	0,82
ra197	160	40	S	1,00
ra246	160	40	S	n,m
ra247	160	40	S	1,42
ra196	160	50	S	1,15
ra194	160	50	S	0,89
ra195	160	60	É	0,16
ra193	160	60	S	1,03
ra197	160	60	S	1,12
ra246	160	60	É	0,26
ra247	160	60	S	0,66

Effectivement, pour  $160 \text{ mL/m}^2$ , la glace a pu être enlevée pour le temps de précipitation de 30 minutes (2 cas sur 2), 40 minutes (4 cas sur 5), 50 minutes (2 cas sur 2) et 60 minutes (3 cas sur 5). Donc pour  $160 \text{ mL/m}^2$  de KA1, la période d'anti-adhésion est de 30 à 60 minutes.

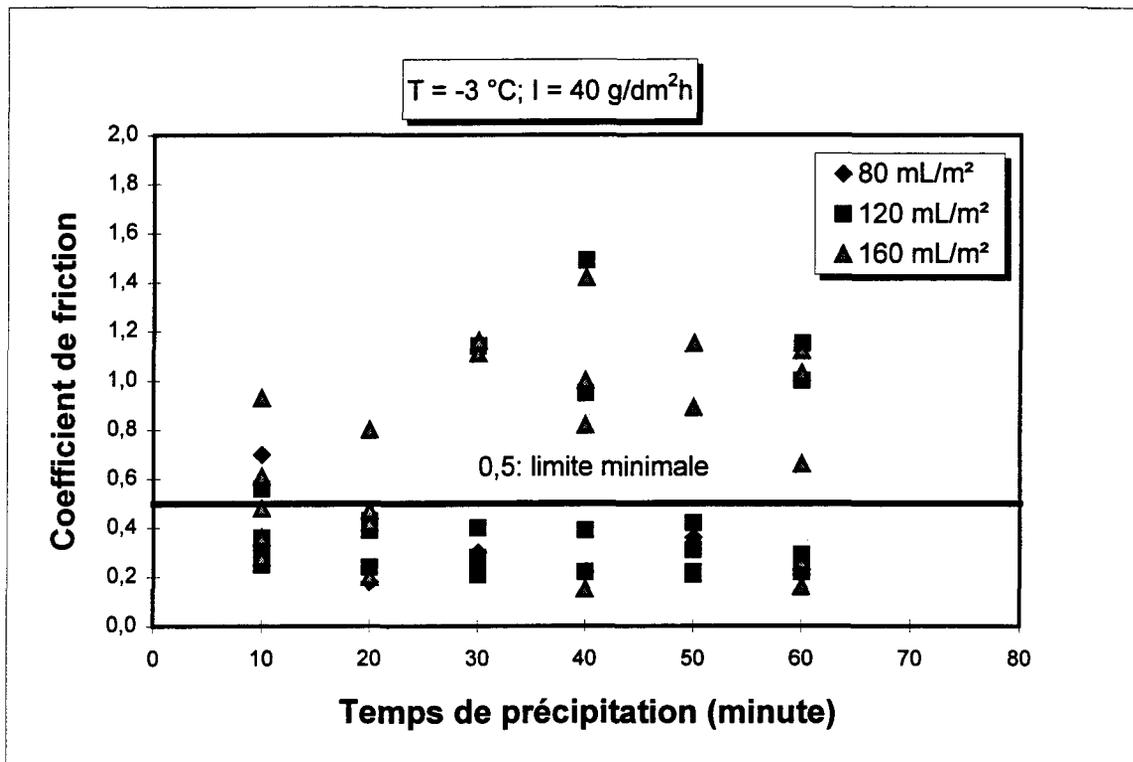


Figure 11.6 Période d'anti-adhésion pour KA1.  $I = 40\text{ g/dm}^2\text{h}$

### 11.1.2 KA2 (Acétate de potassium)

Dans cette série d'essais, trois quantités de KA2, 40, 80 et 120 mL/m<sup>2</sup> ont été appliquées. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.8.

Comme le montrent le Tableau 11.8 et la Figure 11.7, pour 40 mL/m<sup>2</sup>, la glace a pu être enlevée pour des temps de 30 à 50 minutes. La période d'anti-adhésion s'étend donc de 30 à 50 minutes. Pour 80 mL/m<sup>2</sup>, la période d'anti-adhésion s'étend de 20 à 60 minutes, et pour 120 mL/m<sup>2</sup>, de 20 à 50 minutes.

Il peut être surprenant que l'essai de 60 minutes avec 120 mL/m<sup>2</sup> de KA2 se soit conclu par un échec, alors qu'avec une quantité moindre, 80 mL/m<sup>2</sup>, et le même temps de précipitation, on a obtenu un succès. Il faut cependant remarquer

qu'un seul test a été effectué avec 80 mL/m<sup>2</sup> à 60 minutes et que le coefficient de friction est proche de la limite d'acceptation.

Tableau 11.8 KA2 appliqué sur la plaque enduite de PFS.  
I = 40 g/dm<sup>2</sup>h, Ta = -3°C, Tp = -3 °C

N° de test	Quantité de produit (mL/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultat d'essai	Coefficient de friction
ra277	40	10	É	0,30
ra274	40	20	É	0,24
ra276	40	20	É	0,21
ra277	40	30	S	1,54
ra274	40	40	S	1,44
ra276	40	40	S	1,33
ra277	40	50	S	0,79
ra276	40	60	É	0,39
ra274	40	60	É	0,38
ra273	80	20	S	1,53
ra273	80	40	S	1,61
ra273	80	60	S	0,56
ra267	120	20	S	1,63
ra266	120	20	S	0,83
ra207	120	20	É	0,35
ra267	120	30	S	1,60
ra266	120	30	S	1,45
ra268	120	30	S	0,68
ra267	120	40	S	1,53
ra266	120	40	S	1,45
ra207	120	40	S	0,53
ra268	120	50	S	1,60
ra207	120	60	É	0,33
ra268	120	60	É	0,21

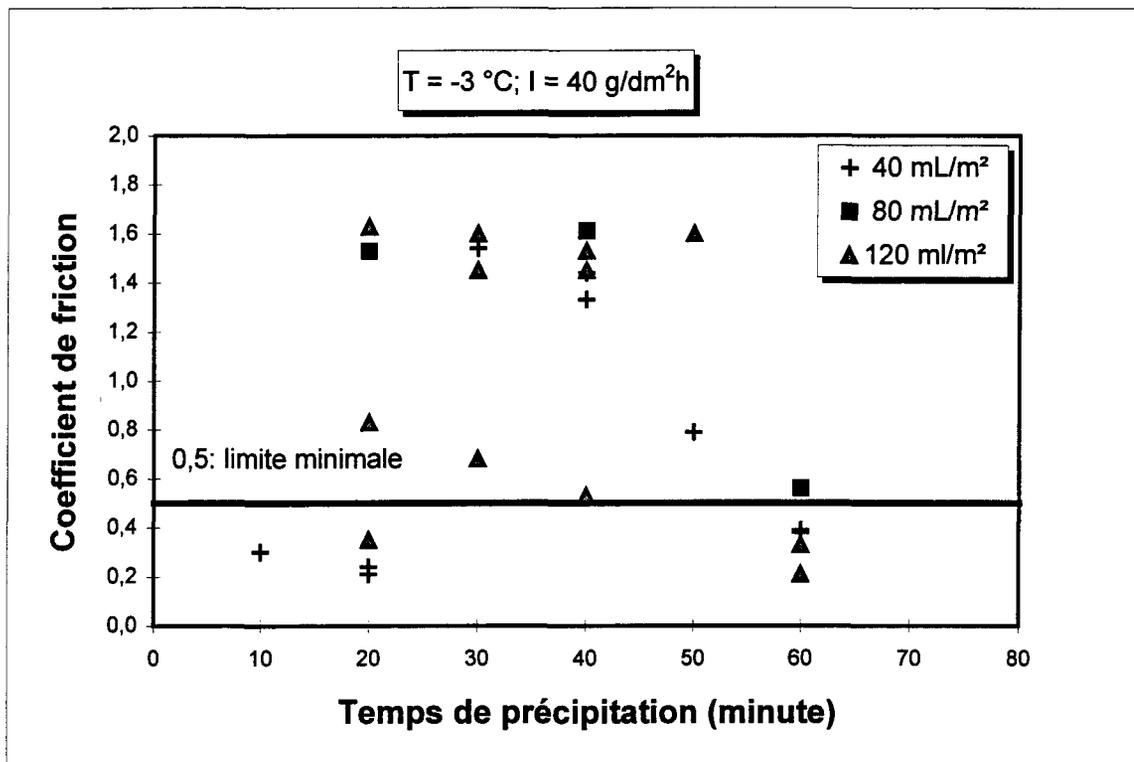


Figure 11.7 Période d'anti-adhésion pour KA2

#### 11.1.1 SF1 (Formiate de sodium)

Dans cette série d'essais, quatre quantités de SF1, 120, 180, 210 et 240 g/m<sup>2</sup> ont été utilisées. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.9.

Comme le montrent le Tableau 11.9 et la Figure 11.8, pour une quantité de 120 g/m<sup>2</sup>, la glace a pu être enlevée après 60 minutes de précipitation seulement. Pour les trois autres quantités de SF1, la glace a pu être enlevée pour 20, 40 et 60 minutes de précipitation. Donc pour 120 g/m<sup>2</sup> de SF1, la période d'anti-adhésion est 60 minutes seulement. Pour 180, 210 et 240 g/m<sup>2</sup> de SF1, la période d'anti-adhésion est de 20 à 60 minutes.

Tableau 11.9 SF1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.

I = 40 g/dm<sup>2</sup>h, Ta = -3 °C, Tp = -3 °C

N° de test	Quantité de produit (g/m <sup>2</sup> )	Temps de précipitation (minute)	Résultat d'essai	Coefficient de friction
ra251	120	20	É	0,38
ra252	120	20	É	0,31
ra251	120	40	É	0,42
ra252	120	40	É	0,49
ra251	120	60	S	1,66
ra252	120	60	S	1,42
ra254	180	20	S	1,37
ra254	180	40	S	1,42
ra254	180	60	S	1,62
ra205	210	10	É	0,48
ra204	210	10	S	0,78
ra203	210	20	S	0,89
ra206	210	20	S	0,56
ra205	210	30	S	0,80
ra204	210	30	S	0,82
ra203	210	40	S	0,95
ra206	210	40	S	0,76
ra205	210	50	S	0,91
ra204	210	50	É	0,31
ra211	210	50	S	0,80
ra203	210	60	S	0,72
ra206	210	60	S	0,71

(suite)

Tableau 11.9 SF1 sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.  
 $I = 40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ,  $T_a = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_p = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

ra202	240	10	S	0,55
ra200	240	10	E	0,48
ra201	240	20	S	1,03
ra199	240	20	S	0,91
ra202	240	30	S	1,07
ra200	240	30	S	0,90
ra201	240	40	S	0,80
ra199	240	40	S	1,22
ra202	240	50	S	0,68
ra200	240	50	S	0,52
ra201	240	60	S	0,82
ra199	240	60	S	0,94

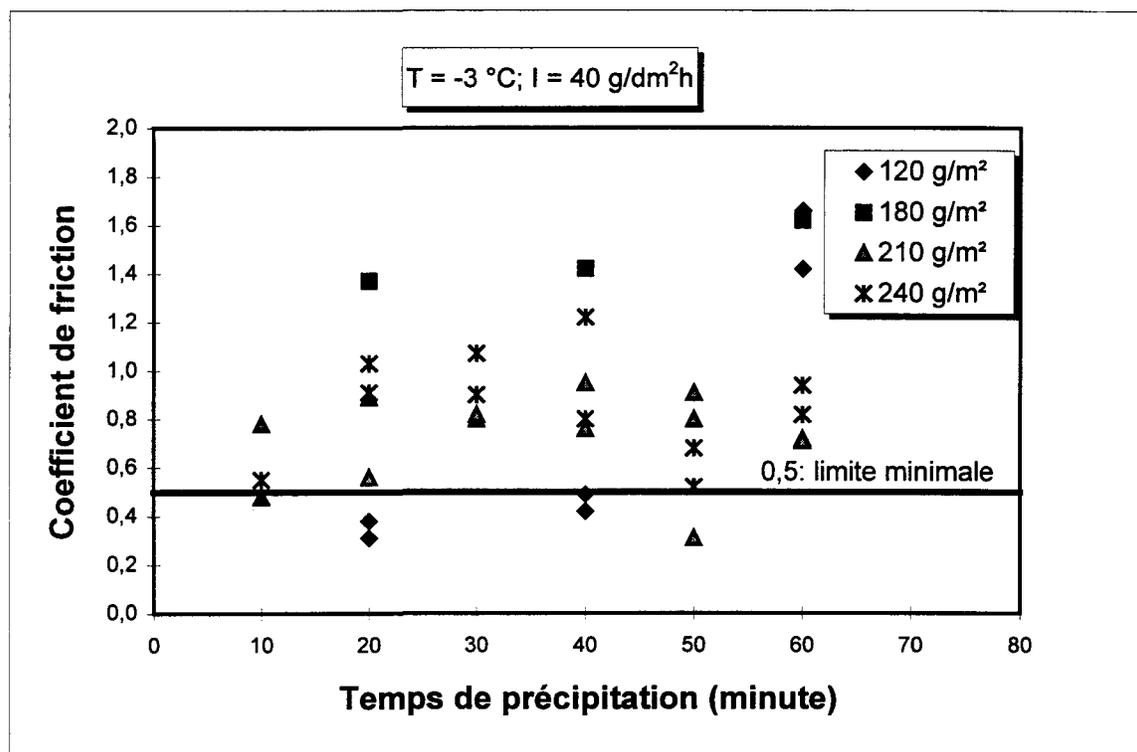


Figure 11.8 Période d'anti-adhésion pour SF1

### 11.1.2 Conclusion

Les périodes d'anti-adhésion pour les cinq produits sous  $40 \text{ g/dm}^2\text{h}$  de précipitation sont résumées au Tableau 11.10.

Il faut utiliser au moins  $180 \text{ g/m}^2$  d'urée pour enlever la glace, et la limite inférieure de la période d'anti-adhésion est 20 minutes. On ne peut pas enlever la glace formée après seulement 10 minutes de précipitation car il n'y a pas encore suffisamment de grains d'urée dissous par l'eau pour agir sur la glace qui se forme. Les essais n'ont pas été effectués pour les temps de précipitation supérieurs à 30 minutes. Le comportement de l'urée lors des essais précédents (3 heures à  $25 \text{ g/dm}^2\text{h}$ ) permet de penser que l'urée serait efficace pour des temps de précipitation d'au moins 50 minutes à  $40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ .

Pour le produit solide SF1, une quantité de  $120 \text{ g/m}^2$  suffit pour enlever la glace mais la limite inférieure de la période d'anti-adhésion est 60 minutes. Avant ce temps, il n'y a donc pas assez de SF1 dissous pour fondre la glace en formation. Lorsqu'on augmente la quantité de SF1 de 180 à  $240 \text{ g/m}^2$ , la limite inférieure de la période d'anti-adhésion décroît à 20 minutes. Les deux produits solides testés semblent donc offrir des performances similaires pour une intensité de précipitation de  $40 \text{ g/dm}^2\text{h}$ .

Tableau 11.10 Résumé des périodes d'anti-adhésion (produits déverglaçants sur la plaque réfrigérée).  $T_a = -3\text{ °C}$ ,  $T_p = -3\text{ °C}$

Produit	Quantité de produit	Période d'anti-adhésion (minute)	
		$I = 40\text{ g/dm}^2\text{h}$	$I = 25\text{ g/dm}^2\text{h}$
Urée ( $\text{g/m}^2$ )	60	Échec	Échec
	120	Échec	$10 \leq T \leq 30$
	180	$20 \leq T \leq 30$	$10 \leq T \leq 30$
SF1 ( $\text{g/m}^2$ )	120	$60 = T$	Non testé
	180	$20 \leq T \leq 60$	$T = 30$
	210	$20 \leq T \leq 60$	$20 \leq T \leq 30$
	240	$20 \leq T \leq 60$	Non testé
Glycol-urée ( $\text{mL/m}^2$ )	20	Échec	Échec
	40	Échec	$10 \leq T \leq 20$
	60	Échec	Non testé
	80	$10 \leq T \leq 30$	Non testé
KA1 ( $\text{mL/m}^2$ )	80	Échec	Non testé
	120	$T = 40$	Échec
	160	$30 \leq T \leq 60$	$T = 10$
	200	Non testé	$T = 10$
KA2 ( $\text{mL/m}^2$ )	40	$30 \leq T \leq 50$	Non testé
	80	$20 \leq T \leq 60$	Non testé
	120	$20 \leq T \leq 50$	$T = 10$
	400	Non testé	$T = 10$

En ce qui concerne les produits liquides, il faut utiliser au moins  $80\text{ mL/m}^2$  de glycol-urée pour enlever la glace, et la période d'anti-adhésion se situe entre 10 et 30 minutes. Pour les produits à base de potassium, les quantités sont très

différentes : au moins 160 mL/m<sup>2</sup> pour KA1 et une période d'anti-adhésion de 30 à 60 minutes, et 40 mL/m<sup>2</sup> pour KA2 et une période d'anti-adhésion de 20 à 60 minutes.

Il semble surprenant que certains produits liquides ne semblent pas fonctionner pour des temps courts de précipitation, alors qu'ils sont efficaces pour des temps plus longs quand ils sont plus dilués. L'hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène est basée sur la température des plaques. Les plaques sont réfrigérées par un système qui tend à les maintenir à -3 °C. Au fur et à mesure que la glace se forme sur la plaque, la chaleur latente dégagée par la glace lors de sa formation doit être compensée par le système de réfrigération. Dans le cas d'une intensité élevée, 40 g/dm<sup>2</sup>h, ce système n'est pas capable de maintenir la température à -3 °C. Par conséquent, pour des temps de précipitation courts, la température du substrat est plus basse que pour les temps plus longs et le produit est moins efficace.

Cependant, il est probable que la température de surface des pistes augmente lors de précipitation verglaçante, puisque la conduction thermique du béton ou de l'asphalte n'est pas très bonne. La procédure d'essai serait donc plus représentative si la température des plaques était fixée au début de l'essai, puis laissée libre d'augmenter au fur et à mesure de la formation de la glace.

Si on compare l'efficacité des produits solides testés en fonction de l'intensité de précipitations, on remarque un comportement différent des produits. En effet, la quantité nécessaire pour empêcher l'adhésion de la glace est plus

grande pour 40 g/dm<sup>2</sup>h que pour 25 g/dm<sup>2</sup>h dans les cas de l'urée et du glycol-urée, et plus petite dans les cas du formiate de sodium et des produits à base d'acétate de potassium.

## **11.2 Essais sur la plaque d'aluminium enduite de PFS non réfrigérée**

Les quantités de produit déverglaçant nécessaires pour enlever la glace telles que définies par les essais précédents sont beaucoup plus grandes que les quantités suggérées par les fabricants. Ceci est probablement dû au refroidissement des plaques pendant les essais. L'analyse des résultats des essais a montré que ceux-ci sont très sensibles au changement de température de la plaque. Dans la série d'essais suivante, on a modifié la procédure : les plaques sont refroidies à -5 °C et le refroidissement est interrompu quand la précipitation commence. L'intensité de précipitation est 40 g/dm<sup>2</sup>h.

Trois produits ont été testés, SF1, KA1 et le produit à base de glycol-urée. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 11.11. Pour les trois produits, on peut remarquer une diminution très significative de la quantité de produit nécessaire pour obtenir une performance similaire lorsque les plaques ne sont pas réfrigérées pendant l'essai. Cette diminution est de 33 % pour SF1, 25 % pour le glycol-urée et le KA1.

Un projet de mesure de la température des piste lors d'événements de pluie verglaçante est en cours en collaboration avec la base militaire canadienne de

Bagotville. Les résultats de cette étude devraient permettre d'établir les conditions de température des plaques optimales pour la procédure d'essai.

Tableau 11.11 Comparaison des résultats des essais  
(plaques réfrigérée et non réfrigérée)

Nom du produit	Performance du produit	Plaque réfrigérée	Plaque non réfrigérée
SF1	Quantité optimale *PAA	180 g/m <sup>2</sup> 20 ≤ T ≤ 60	120 g/m <sup>2</sup> 20 ≤ T ≤ 60
Glycol Urée	Quantité optimale *PAA	80 mL/m <sup>2</sup> 10 ≤ T ≤ 30	60 mL/m <sup>2</sup> 10 ≤ T ≤ 50
KA1	Quantité optimale *PAA	160 mL/m <sup>2</sup> 30 ≤ T ≤ 60	120 mL/m <sup>2</sup> 20 ≤ T ≤ 60

\*PAA : Période d'anti-adhésion.

## CHAPITRE 12

### CONCLUSION

Afin de prévenir la formation de glace ou de givre sur les pistes d'aéroport, des produits de dégivrage sont appliqués avant les précipitations. Certains produits déverglaçants ont fait l'objet de tests extérieurs pour évaluer leur performance. Cependant, il n'y a pas eu d'études scientifiques et systématiques réalisées dans des conditions climatiques variées. Pour tester la performance des produits déverglaçants sans dépendre du caractère aléatoire de la météorologie, une méthode d'essai en laboratoire devait être développée. L'objectif de cette étude est donc de déterminer une procédure d'évaluation de l'efficacité des produits déverglaçants utilisés de façon préventive sur les pistes d'aéroports.

Les essais d'évaluation de la performance des produits déverglaçants ont été effectués dans une chambre climatique où les conditions de température et d'intensités de précipitation sont contrôlées.

Une série d'essais préliminaires a permis le développement d'un test spécifique dénommé "essai d'endurance à l'adhésion de la glace" (EEAG). La procédure d'essai stipule que le produit déverglaçant doit être testé dans une chambre climatique à -3 °C. Le produit est appliqué sur un substrat puis soumis à

une précipitation surfondue de 25 g/dm<sup>2</sup>h, soit environ 2,5 mm/h. À la fin d'une durée prédéterminée, la couche de glace formée est raclée avec un appareil de raclage et le coefficient de friction est mesuré. Si la surface libre de glace représente au moins 90 % de la surface totale de la plaque, le raclage est considéré comme un succès par l'observateur.

Afin de choisir un bon substrat pour l'essai de EEAG, des essais comparables ont été effectués sur quatre substrats différents : le béton de ciment, le béton de polymère, l'aluminium moulé et l'aluminium enduit de PFS dans les mêmes conditions. On a analysé la reproductibilité des essais et la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas de succès et d'échec. On a fixé à 0,5 la limite minimale d'acceptation pour le coefficient de friction. Si le coefficient de friction dépasse 0,5, l'essai est réussi.

Une série d'EEAG a été effectuée sur des plaques de béton de ciment avec des quantités variées d'urée et de glycol-urée sous 25 g/dm<sup>2</sup>h de précipitation. Les essais ont mis en évidence un problème de reproductibilité. En effet, selon le degré de séchage du béton de ciment utilisé, l'eau de précipitation pouvait être plus ou moins absorbée par le béton. Ceci entraînait une variabilité de la dissolution de l'urée par l'eau. Par conséquent, la reproductibilité des essais sur la plaque de béton de ciment s'est avérée mauvaise, 59 % en moyenne. La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction n'est pas bonne dans les cas de succès, 69 % en moyenne, mais très bonne en cas d'échec, 92 % en moyenne.

Une série d'essais a aussi été effectuée avec des plaques de béton de polymère, qui sont supposées être imperméables. La porosité de ce béton a augmenté avec l'usage, et finalement, il présentait le même problème de reproductibilité que le béton de ciment. La reproductibilité n'est donc pas bonne, 74 % en moyenne. La correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction est très bonne dans les cas de succès, 90 % en moyenne, mais mauvaise dans les cas d'échec, 67 % en moyenne.

Une série d'essais a été effectuée avec des plaques d'aluminium moulé. Ces plaques ont été fabriquées en fonderie dans un moule conçu pour présenter une surface dont la rugosité était similaire à celle des plaques de béton de ciment. Le moulage n'a cependant pas donné la rugosité escomptée. Les essais ont montré une bonne reproductibilité, 81 % en moyenne, qui s'explique par l'imperméabilité de la plaque. Cependant, la correspondance entre l'observation visuelle et le coefficient de friction dans les cas de succès est très mauvaise (51 % en moyenne). Le cas du glycol-urée est le pire (47 %). Ceci est dû au manque de rugosité de la plaque d'aluminium moulé. Il n'y a alors pas assez de différence entre le coefficient de friction de la plaque mouillée par le mélange liquide eau / produit déverglaçant et celui de la couche de glace. Par conséquent, le coefficient de friction est bas même lorsque la couche de glace a été complètement enlevée.

Une dernière série d'essais a été effectuée sur la plaque d'aluminium enduite d'un revêtement de résine d'époxy renforcée avec des minéraux, le

“Precision Friction Surface” appelé “PFS”. Les essais ont montré une excellente reproductibilité, 95 % d’essais reproductibles en moyenne. La reproductibilité est excellente dans le cas du glycol-urée (100 %) et bonne dans le cas de l’urée (89 %). L’impermeabilité de l’aluminium enduit de PFS explique l’excellence de la reproductibilité. La correspondance entre l’observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des succès est excellente (95 % en moyenne). La correspondance entre l’observation visuelle et le coefficient de friction dans le cas des échecs est bonne (79 % en moyenne). Si les essais correspondant à 10 minutes de précipitation étaient ignorés, la correspondance dans le cas des échecs serait de 100 %. Les plaques enduites de PFS sont très rugueuses et la couche de glace de 0,4 mm d’épaisseur formée par 10 minutes de précipitation à 25 g/dm<sup>2</sup>h n’est pas suffisante pour couvrir les aspérités de la surface. Par conséquent, le coefficient de friction reste élevé même si la glace ne peut pas être raclée.

Si on se base sur la reproductibilité des essais et la correspondance entre coefficient de friction et observation visuelle pour évaluer les quatre substrats, la plaque d’aluminium enduite de PFS s’avère être le meilleur choix. De plus, elle est facile à nettoyer ce qui diminue les risques de contamination. On a donc décidé d’utiliser des plaques d’aluminium enduites de PFS pour l’évaluation de la performance des produits de dégivrage.

Cette performance est mesurée par la période d’anti-adhésion, PAA, définie par le temps le plus court et le temps le plus long pour lequel les tests EEAG ont

réussi. Des essais ont été réalisés avec cinq produits commerciaux et les résultats ont été analysés. La quantité optimale de chaque produit nécessaire pour atteindre l'effet d'anti-adhésion de la glace a été déterminée.

Les essais ont été effectués sous deux intensités de précipitation, 25 et 40 g/dm<sup>2</sup>h sur la plaque d'aluminium enduite de PFS.

◆ ***Produits solides***

En ce qui concerne l'urée, la quantité nécessaire pour empêcher l'adhésion de la glace est plus petite pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h que pour 40 g/dm<sup>2</sup>h. Dans le premier cas, 120 g/m<sup>2</sup> donnent une période d'anti-adhésion de 10 à 30 minutes. Dans le deuxième cas, 180 g/m<sup>2</sup> donnent 20 à 30 minutes.

Pour SF1, c'est l'inverse : il faut utiliser une plus grande quantité pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h que pour 40 g/dm<sup>2</sup>h. Dans le premier cas, 210 g/m<sup>2</sup> donnent une période d'anti-adhésion de 20 à 30 minutes. Dans le deuxième cas, 180 g/m<sup>2</sup> donnent 20 à 60 minutes.

Il faut donc utiliser beaucoup plus de SF1 que d'urée pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h. Par contre, pour 40 g/dm<sup>2</sup>h, les quantités de SF1 et d'urée nécessaires sont les mêmes.

Pour expliquer la nécessité d'utiliser plus de SF1 que d'urée dans la condition de précipitation de 25 g/dm<sup>2</sup>h, on peut avancer l'hypothèse suivante basée sur la température des plaques. Les plaques sont réfrigérées par un système qui tend à les maintenir à -3 °C. Au fur et à mesure que la glace se forme sur la plaque, la chaleur latente dégagée par la glace lors de sa formation doit être

compensée par le système de réfrigération. Dans le cas d'une intensité élevée, 40 g/dm<sup>2</sup>h, ce système n'est pas capable de maintenir la température à -3 °C. Certains produits, dont le SF1, semblent plus sensibles à ce phénomène que d'autres comme l'urée.

De plus, on a remarqué que plus la quantité d'urée ou de SF1 utilisée est grande, plus tôt la glace peut être enlevée.

◆ **Produits liquides**

Pour le glycol-urée, il faut utiliser une plus petite quantité pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h que pour 40 g/dm<sup>2</sup>h. Dans le premier cas, 40 mL/m<sup>2</sup> donnent une période d'anti-adhésion de 10 à 30 minutes. Dans le deuxième cas, 80 mL/m<sup>2</sup> donnent 10 à 30 minutes.

Pour le KA1, il faut utiliser la même quantité pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h que pour 40 g/dm<sup>2</sup>h. Dans le premier cas, 160 mL/m<sup>2</sup> donnent une période d'anti-adhésion de 10 minutes. Dans le deuxième cas, 160 mL/m<sup>2</sup> donnent 30 à 60 minutes.

Pour le KA2, c'est l'inverse : il faut utiliser une plus grande quantité pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h que pour 40 g/dm<sup>2</sup>h. Dans le premier cas, 120 mL/m<sup>2</sup> donnent une période d'anti-adhésion de 10 minutes. Dans le deuxième cas, 40 mL/m<sup>2</sup>, trois fois moins que dans le cas d'intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h, donnent 20 à 50 minutes. Le produit KA2, tout comme le SF1, semble donc particulièrement sensible à la température des plaques.

On peut aussi remarquer qu'il faut utiliser beaucoup plus de KA1 ou de KA2 que du glycol-urée pour une intensité de 25 g/dm<sup>2</sup>h. Par contre, pour 40 g/dm<sup>2</sup>h, la quantité de KA2 nécessaire est moindre que celle du glycol-urée et du KA1.

Les produits solides, urée et formiate de sodium, atteignent leur seuil d'efficacité plus tard que les produits liquides, à cause du délai causé par la dissolution des grains d'urée ou de formiate de sodium dans l'eau. Par contre, ils sont performants pour des temps de précipitation plus longs que les produits liquides.

Les quantités de produit déverglaçant nécessaires pour enlever la glace telles que définies par les essais précédents sont beaucoup plus grandes que les quantités suggérées par les fabricants. Ceci est probablement dû au refroidissement des plaques pendant les essais. L'analyse des résultats des essais a déjà montré que certains produits sont très sensibles au changement de température de la plaque.

Pour déterminer l'effet de la température des plaques sur la quantité de produit nécessaire à la performance d'anti-adhésion du produit, des essais ont été effectués sur la plaque d'aluminium enduite de PFS non réfrigérée. Les plaques sont refroidies à -5 °C et le refroidissement est interrompu quand la précipitation commence. L'intensité de précipitation est 40 g/dm<sup>2</sup>h. Pour les trois produits testés, SF1, KA1 et le produit à base de glycol-urée, on a remarqué une diminution très significative de la quantité de produit nécessaire pour obtenir une performance

similaire selon que les plaques sont réfrigérées ou non pendant l'essai. Cette diminution est de 33 % pour SF1 et 25 % pour le glycol-urée et le KA1.

On recommande fortement de poursuivre l'investigation afin de déterminer le profil de température optimal durant l'essai et de l'intégrer à la procédure d'essais standardisée.

La procédure définie dans ce travail et l'étude des produits commerciaux ont été publiées par Transport Canada (Bernardin, S. and al., April 1998) et (Bernardin, S. and al., February 1998) respectivement. De plus, une étude complémentaire, dépassant le contenu de ce travail de recherche, a été effectuée pour déterminer une procédure d'évaluation de la performance de décollement de la glace par les produits déverglaçants lorsqu'ils sont utilisés de façon curative. Cette étude a aussi été publiée par Transport Canada (Bernardin, S. and al., March 1998).

## BIBLIOGRAPHIE

**AMS Standards, (1995).** "AMS 1431 B Compound, Solid De-icing/Anti-icing Runways and Taxiways". SAE Standards, April 1995, 8 p.

**AMS Standards, (1995).** "AMS 1435 Fluid, Generic, De-icing/Anti-icing Runways and Taxiways". SAE Standards, Aircraft Ground De-icing Committee, April 1995, 9 p.

**Bernardin, S., Laforte, J.L., Louchez, P.R., (1996).** "Runway Deicer Study Determination of a Testing Procedure". AMIL Final Report to Transport Canada, TP11811E, November 1996, 58 p.

**Bernardin, S., Yang, S., Beisswenger, A., Louchez, P.R., Laforte, J.L., (1998).** "A Standard Test for the Anti-bonding Performance of Runway Chemical De-icers Used in a Preventative Way". AMIL Final Report to Transport Canada, February 1998, 58 p.

**Bernardin, S., Yang, S., Beisswenger, A., Louchez, P.R., Laforte, J.L., (1998).** "Anti-Bonding Performance of Three Runway Chemical De-icers: Preventative Use". AMIL Final Report to Transport Canada, TP13331E, April 1998, 37 p.

- Bernardin, S., Yang, S., Beisswenger, A., Louchez, P.R., Laforte, J.L., (1998).** "De-Bonding Performance of Runway Chemical De-icers: Curative Use". AMIL Final Report to Transport Canada, TP 13332, March 1998, 51 p.
- Cowper, B., Comfort, G., Gong, Y., (1995).** "The Effect of Type II Fluid Surface Contamination on Tire-Runway Friction". Presented at the 1995 SWIFT Conference held August 21-25, 1995, Winnipeg, Manitoba, Canada, 21 p.
- Comfort, G., (1993).** "Laboratory Test of The De-icing Performance of Potassium Acetate, Sodium Acetate and Urea". Presented at: The Surface, Winter Ice & Snow control and Friction testing (SWIFT) Workshop held July 4-9, 1993 in Vancouver, B.C., Canada, 17 p.
- Comfort, G., Cowper, B., Gong, Y., (1995).** "Friction increases produced By Sand Applications On Bare Ice: Laboratory tests". Presented at the 1995 SWIFT Conference held August 21-25, 1995, Winnipeg, Manitoba, Canada, 8 p.
- Dampoux, D., (1996).** Communication personnel-du Rapport Aéroports de Paris, Dossier déverglacage RM\_96\_02, février 1996.
- Hoechst Chemical, (1990).** "Safeway KA Runway de-icing fluid". Documentation de la compagnie, octobre 1990, 17 p.
- Itagaki, K., (1990).** "Highway Snow Control Research in Japan". Report to Office of the Chief of Engineers, Washington, September 1990, 65 p.
- John, R.D., (1994).** "Impact sur l'environnement de l'utilisation de l'acétate de potassium (KA) à l'aéroport international d'Halifax". ADI Nolan Davis Inc final report to Transport Canada, TP 12286F, November 1994, 214 p.

**John, R.D., (1994).** "Comparaison de l'impact environnemental de l'emploi de l'urée, de l'acétate de potassium, de l'acétate de magnésium et de calcium et du formiate de sodium pour le dégivrage des pistes à l'aéroport international d'Halifax". ADI Nolan Davis Inc final report to Transport Canada. TP 12285F, November 1994, 50 p.

**John, R.D., (1992).** "Environmental Impact from the Use of Sodium Formate (Nafo) at Halifax International Airport". ADI Nolan Davis Inc report final to Transport Canada, November 1992, 125 p.