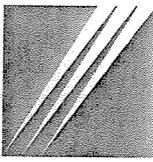
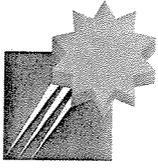


L. H<sub>7</sub> K<sub>0</sub> C<sub>2</sub> D<sub>2</sub>



Ministère  
de l'Aménagement  
du Territoire,  
de l'Équipement  
et des Transports



Centre d'Études  
Techniques de  
l'Équipement de  
l'Est

Laboratoire  
Régional  
de Nancy

accrédité COFRAC n° 1.0031

# THEME

## EXPLOITATION HIVERNALE DES CHAUSSEES

### SUJET 1      1 6 6 0 1 6 Physique de l'interface atmosphère / chaussée

**Choc thermique produit par un traitement  
curatif du verglas ou de la neige à l'aide d'un  
fondant solide**

- **synthèse des connaissances**
- **simulation numérique à l'aide du modèle  
GEL1D**

**JUIN 1996**

# FICHE DE RESULTAT

---

## IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Titre : Choc thermique produit par un traitement curatif du verglas ou de la neige - synthèse des connaissances - simulation numérique à l'aide du modèle GEL1D

Auteurs : Sandrine VAUTRIN  
Jean LIVET

Date : juin 1996  
Unité productrice : LR NANCY

Code du document : 1.6.6.0.1./6.

Statut : 8

---

## OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

(Décrire les motivations techniques ou économiques qui ont conduit à entreprendre la recherche et expliciter ses objectifs)

### Contexte:

Les travaux du thème « Exploitation hivernale des chaussées » concourent à la modélisation de l'état de surface de la chaussée, en conditions météorologiques dégradées, en particulier durant l'hiver.

Les travaux de modélisation déjà engagés utilisent un couplage entre le modèle GEL1D et divers modèles atmosphériques (COBEL - couche limite- et CROCUS - évolution du manteau neigeux).

Le sujet 1 qui traite de l'interface atmosphère / chaussée, se préoccupe d'analyser les divers facteurs d'influence agissant sur le bilan énergétique de la surface de chaussée.

### Sujet étudié:

En période hivernale, les traitements curatifs du verglas ou de la neige à l'aide de fondants, mobilisent la chaleur latente de fusion. Cette énergie est prise au milieu (atmosphère / chaussée), ce qui provoque un abaissement local de la température et peut dans certains cas entraîner une recristallisation du milieu aqueux présent sur le revêtement.

Diverses expérimentations « in situ », en laboratoire, ou calculs semi théoriques ont été rassemblés. L'étude a consisté à simuler à l'aide du modèle GEL1D le mécanisme de fusion du verglas par un fondant.

---

## DESCRIPTION DES TRAVAUX EFFECTUES

(Décrire la démarche adoptée, les outils utilisés, les expérimentations effectuées, etc.)

Diverses simulations de la fusion d'une pellicule de verglas ou d'une couche de neige sont effectuées. Les fondants NaCl et CaCl<sub>2</sub> sont comparés (hydratation endo et exothermique). Différentes hypothèses ont été prises pour décrire le phénomène et l'appliquer à diverses structures de chaussées et revêtements (poreux ou fermés).

- densité de flux
- durée d'application
- variation temporelle
- échanges avec l'atmosphère
- traitements cycliques
- etc.

---

## RESULTATS DE LA RECHERCHE

(Décrire les résultats obtenus, les questions qui n'ont pu être résolues, etc)

La simulation du phénomène étudié, à l'aide d'une condition de flux imposée à la surface de la chaussée, permet de décrire, à l'aide de GEL1D, le processus de fusion d'un verglas ou d'une neige par un fondant routier.

Les valeurs absolues des températures de surface obtenues par simulation numérique sont discutables. Une analyse critique des diverses expériences déjà réalisées, montre que celles-ci présentent également diverses insuffisances météorologiques ou méthodologiques. De ce fait, il a été pris le parti de ne pas caler le modèle GEL1D sur ces résultats, attendu que les phénomènes pelliculaires et physico-chimiques de l'interface semblaient insuffisamment décrits.

Afin de poursuivre sur cette voie, il serait nécessaire de faire évoluer les conditions aux limites à la surface du modèle GEL1D. La description « macrothermique » actuelle, ne prend pas en compte

- la présence de la couche de verglas ou de neige présente sur le revêtement, qui possède des propriétés physiques différentes variables durant le temps où s'effectue la fusion
- la macrotexture du revêtement (hydraulique, rugosité, ...)
- les autres facteurs d'influence (trafic, pente transversale, écoulement, ..).

Le mécanisme de fusion s'effectue, par ailleurs, de façon hétérogène et différente (surfacique ou massique) suivant qu'il s'agit de verglas ou de neige.

---

## PERSPECTIVES - APPLICATIONS

(Décrire les utilisations envisagées ou déjà réalisées des résultats de la recherche, les types d'utilisateurs possibles, etc.)

### **Pour la recherche:**

- Application du modèle GEL1D aux différentes structures de chaussées françaises (catalogue) afin de les caractériser sur le plan de leur comportement thermique de surface par rapport à la problématique de leur exploitation hivernale.

Des hivers types, décrits par des densités de flux thermique, appliqués aux différentes structures, permettraient de construire une statistique de leurs températures de surface. Il serait ainsi possible de « hiérarchiser » leur sensibilité hivernale.

- La prise en compte des effets du traitement aux fondants routiers d'un verglas par un flux thermique est envisageable dans la modélisation et la prévision de l'état de surface.

### **Pour l'exploitation hivernale opérationnelle:**

Les résultats confirment les nombreuses constatations des exploitants.

- Difficultés de traitement curatif des revêtements poreux/isolants pour lesquels il est nécessaire de recourir à des surdosages en fondants afin de conserver un niveau de protection suffisant à l'issue de la fusion du verglas (phénomènes plus fréquents de recristallisation).

- Refroidissement thermique cumulatif de la surface de chaussée dû aux traitements cycliques (cas de la neige et de la pluie verglaçante). Ce phénomène est d'autant plus important que le revêtement est isolant. La solution opérationnelle consisterait, dans le cas la neige, à éviter ou limiter les traitements durant les périodes de chute continues.

---

**Personne à contacter pour plus d'informations**

Jean LIVET

---

Travail effectué dans le cadre d'un stage de Maîtrise de Mécanique  
par Mademoiselle **Sandrine VAUTRIN**

UNIVERSITE DE METZ  
UFR Sciences  
Ile de Saulcy  
57000 METZ

**EFFET THERMIQUE DU TRAITEMENT AUX  
FONDANTS D'UN VERGLAS ROUTIER  
SIMULATION NUMERIQUE A L'AIDE DU MODELE  
GEL1D**

# SOMMAIRE

<b>1. PRESENTATION DE L'ETUDE</b>	<b>4</b>
1.1. Viabilité hivernale	4
1.2. Objectif de l'étude	4
<b>2. RAPPEL DES MECANISMES PHYSIQUES MIS EN JEU LORS DU TRAITEMENT D'UNE CHAUSSEE A L'AIDE D'UN FONDANT</b>	<b>6</b>
2.1. Mécanisme de fusion du verglas	6
2.2. Mécanisme d'hydratation des fondants	6
2.3. Principales caractéristiques physiques des composés en présence	8
<b>3. SIMULATION NUMERIQUE DU TRAITEMENT AUX FONDANTS D'UN VERGLAS</b>	<b>9</b>
3.1. Modèle <i>GEL1D</i> (cf. annexe)	9
3.2. Structures étudiées	10
3.3. Propriétés physiques des matériaux	12
<b>4. APPLICATION DU MODELE GEL1D AU TRAITEMENT HIVERNAL</b>	<b>13</b>
4.1. Hypothèses de calcul	13
4.2. Conditions retenues en surface pour simuler la fusion du verglas	16
<b>5. RESULTATS DES SIMULATIONS</b>	<b>22</b>
5.1. Comparaison des traitements au NaCl et CaCl <sub>2</sub>	22
5.2. Comparaison des effets du traitement au NaCl sur les structures ①, ②, ③ (structures présentant un revêtement différent)	23
5.3. Comparaison des effets du traitement au NaCl sur les structures ④ et ⑤ (structures présentant des revêtements fermés identiques mais dont l'une emprisonne un BBDr)	27
5.4. Comparaison des effets du traitement au NaCl sur les structures ① et ⑤ (structures présentant des revêtements drainants identiques)	32
<b>6. LIMITES DES DIFFERENTES APPROCHES PROPOSEES</b>	<b>37</b>
6.1. Discussion des approches expérimentales	37
6.2. Discussion de l'approche théorique « Variation de la température de la surface d'une chaussée lors de l'épandage d'un fondant ionique » (3)	38

6.3. Discussion des résultats obtenus par simulation numérique	39
<b>7. CONCLUSION</b>	<b>40</b>
7.1. Validité du modèle GEL1D	40
7.2. Enseignements pratiques et opérationnels déduits de l'approche par simulation numérique	40
7.3. Vers une nouvelle approche du problème	40

# 1. Présentation de l'étude

## 1.1. Viabilité hivernale

Les surfaces de chaussées situées à l'interface entre l'atmosphère et la structure de chaussées, reposant sur le terrain naturel, sont en période hivernale, le siège d'échanges thermiques permanents, et le lieu où se déposent de nombreux hydrométéores (pluie, neige, verglas etc.).

Afin de garantir des conditions de circulations quasi normales à l'utilisateur, l'exploitant de réseaux routiers cherche à maîtriser les effets des phénomènes météorologiques en effectuant des opérations de salage préventif ou curatif et des opérations de déneigement.

La neige est évacuée avec des moyens mécaniques à partir d'une certaine épaisseur déposée tandis que la pellicule résiduelle de neige et les films de verglas sont mis en fusion par épandage de fondants.

Il existe différents types de fondants. Pour le service hivernal on emploie en France presque exclusivement le chlorure de sodium (NaCl). Le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>) est utilisé dans certaines situations pour ses propriétés hygroscopiques.

Lors du traitement du verglas ou de la neige résiduelle à l'aide d'un fondant ionique, la quantité de chaleur<sup>1</sup> nécessaire pour assurer leur fusion entraîne un abaissement de la température du milieu. Cette énergie est empruntée à la chaussée et à l'atmosphère, ce qui entraîne l'abaissement de la température de surface du revêtement.

## 1.2. Objectif de l'étude

L'objectif est d'étudier l'effet thermique du traitement aux fondants routiers de différents revêtements et structures routières verglacés.

Différentes approches ont été proposées:

### **expérimentale:**

- étude du LRPC de Nancy «Action des sels de déverglage sur les revêtements, étude du choc thermique», M. Boutonnet (1)
- étude du CETE de Lyon «Expérimentation neige» (2)
- expérience à caractère pédagogique du laboratoire du Centre de formation à la Viabilité Hivernale des Salles «Choc thermique produit par le salage d'une couche de neige» (4)

### **semi théorique:**

- étude de la CSME (Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est) «Variation de la température de la surface d'une chaussée lors de l'épandage d'un fondant ionique» (3)

L'approche proposée repose sur une modélisation du comportement thermique des structures de chaussées à l'aide du modèle GELID.

Dans la modélisation proposée, deux types d'application ont été étudiés, la fusion d'une pellicule de verglas de 2 mm, la fusion d'une pellicule de neige de 20 mm.

---

<sup>1</sup> La chaleur est l'une des formes de l'énergie. Un corps peut contenir plus ou moins de chaleur, en céder ou en recevoir. De cette constatation, on dégage la notion de quantité de chaleur. L'unité de la quantité de chaleur dans le système international est le joule (J).

La modélisation s'appuiera principalement sur les résultats de l'étude (1). La comparaison des résultats expérimentaux à ceux obtenus par simulation numérique à l'aide du modèle GELID permettra d'apprécier la validité d'une telle approche.

## 2. Rappel des mécanismes physiques mis en jeu lors du traitement d'une chaussée à l'aide d'un fondant

### 2.1. Mécanisme de fusion du verglas

Chaque fois qu'une substance se présente sous deux phases, en contact l'une avec l'autre, comme par exemple de l'eau (état liquide) et du verglas (état solide), il y a échange constant de molécules entre les deux phases du fait de la différence de pression de vapeur entre ces milieux, qui tend à s'annuler.

Le point de congélation d'une solution est défini par la température à laquelle la tension de vapeur de la solution est en équilibre avec celle de la phase solide.

Il est donc possible de modifier cet état d'équilibre par addition d'un produit soluble dans l'eau.

Un fondant routier est un produit solide ou liquide. Il possède des caractéristiques physiques lui permettant de déplacer l'équilibre des pressions de vapeur des deux phases en présence et ainsi abaisser le point de congélation du milieu. Il permet ainsi la fusion de la neige ou du verglas à des températures négatives.

### 2.2. Mécanisme d'hydratation des fondants

#### 2.2.1. Equilibre avec le milieu

Un fondant ionique n'agit que sous forme de solution.

Lors des traitements effectués en viabilité hivernale, l'eau nécessaire à la formation de cette solution (saumure) est prise par le fondant dans:

- l'air ambiant, si son humidité relative est supérieure à l'humidité relative d'équilibre<sup>2</sup> (HRE  $\cong$  75 % à 0°C pour le NaCl, et  $\cong$  45 % pour le CaCl<sub>2</sub>)
- le milieu si sa teneur en eau libre est suffisante

Dans le cas contraire, le fondant reste sous forme cristallisée.

La solution technique consiste alors à apporter de l'eau ou une saumure pour que le fondant s'hydrate. Ce processus est appelé la technique « bouillie » ou sel humidifié.

#### 2.2.2. Processus physique d'hydratation

Le processus physique d'hydratation d'un sel mobilise ou libère une quantité d'énergie.

Les deux principaux sels routiers utilisés en France s'opposent sur ce point.

1. Pour se dissoudre le NaCl en grains mobilise de l'énergie, la réaction est dite endothermique.

2. Pour se dissoudre les paillettes de CaCl<sub>2</sub> libèrent de l'énergie, la réaction est dite exothermique.

---

<sup>2</sup> L'humidité relative d'équilibre (HRE) est le seuil d'humidité relative de l'air au delà duquel le fondant ionique s'hydrate naturellement, et en deçà duquel il reste à l'état anhydre.

Dans le cas du  $\text{CaCl}_2$  la chaleur dégagée, compense pour une infime partie la quantité de chaleur nécessaire à la fusion du verglas.

Ces mécanismes d'hydratation ne sont pas mis en oeuvre lors de l'utilisation de fondants liquides.

### 2.3. Les fondants routiers

Les fondants mis en oeuvre sur le réseau routier peuvent être rassemblés en quatre familles:

- Les fondants ioniques solides

Ces produits n'agissent que sous forme de solution dès lors que l'humidité relative du milieu est supérieure à la valeur d'équilibre. La durée d'hydratation dépend en partie de leur granulométrie

- plus ils sont fins plus leur surface spécifique est élevée, et leur vitesse d'hydratation importante

- plus ils sont gros, plus leur surface spécifique est faible, et leur vitesse d'hydratation réduite

L'efficacité de ces fondants est étroitement liée au délai nécessaire à leur hydratation.

- Les fondants ioniques sous forme de saumure

Ces saumures sont obtenues par dissolution du produit solide

L'efficacité d'une saumure est immédiate, la contrepartie est sa dilution rapide qui réduit rapidement la température de protection correspondante (température de congélation)

- Les fondants liquides miscibles dans l'eau

Ces produits, d'usage moins courant parce que d'un coût élevé (3 à 20 fois celui de  $\text{NaCl}$ ), sont réservés à des applications particulières (aéroports, ouvrages d'art,...)

Des essais de laboratoire montrent un accroissement substantiel de leur efficacité par rapport à  $\text{NaCl}$  en saumure (temps de retour à une adhérence normale et vitesse de mise en fusion du verglas dans un rapport de 1 à 3)

- Les fondants aux fonctionnalités nouvelles

Des produits nouveaux, aux propriétés multiples et variées, sont mis chaque année sur le marché (non corrosifs, non polluant, etc.). Il n'existe pas, parmi ceux-ci, de produit miracle.

## 2.3. Principales caractéristiques physiques des composés en présence

TABLEAU 1

Données thermiques NaCl, CaCl<sub>2</sub>, eau, glace, air

Composés en présence	NaCl solide	CaCl <sub>2</sub> solide	NaCl saumure saturée	Eau	Glace	Air
Caractéristiques thermiques						
* Chaleur d'hydratation J/g	-32,6	+242,4				
* Chaleur massique latente de fusion <sup>3</sup> J/g	405,5				-332,4	
* Capacité thermique massique <sup>4</sup> J/g°C			3,26	4,223	2,048	1,923
* Conductivité thermique <sup>5</sup> W/m°C	9,90		0,547 à 0,569 (varie peu avec le degré de saturation de la saumure)	0,557	2,21	

Source: Tables et diagrammes thermodynamiques de Kuzman Raznjevic Eyrolles 1970

<sup>3</sup> La chaleur massique latente de fusion c'est la quantité de chaleur rapportée à la masse unité nécessaire pour provoquer la fusion à température constante.

<sup>4</sup> La quantité de chaleur que l'on peut céder à un corps, ou en retirer, dépend de la masse du corps, de la différence de température à faire subir à ce corps, de la nature du corps. Celle ci se traduit par une caractéristique physique du corps que l'on appelle capacité thermique massique.

<sup>5</sup> La conductivité thermique d'un corps est la quantité d'énergie traversant un mètre carré de ce corps pour un mètre d'épaisseur, par seconde et pour une différence de température de 1K entre les deux faces.

### 3. Simulation numérique du traitement aux fondants d'un verglas

#### 3.1. Modèle *GELID* (cf. annexe)

##### 3.1.1. Description

Une structure poreuse contenant de l'eau gèle lorsqu'elle est soumise à l'action du froid. A tout instant coexistent une zone gelée, où la température est inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$  et une zone non gelée. Ces deux zones sont séparées par la surface isotherme  $\theta = 0^{\circ}\text{C}$ , appelée front de gel. Ce front de gel est une surface a priori inconnue, et dont la position évolue en général en fonction du temps.

Le programme *GELID* permet d'étudier l'évolution du champ de température dans un massif unidimensionnel multicouche et de déterminer à différents instants la position du front de gel et les indices de gel à différentes profondeurs. Il détermine les transferts résultants de l'action conjuguée d'un flux variable imposé en surface, de l'état thermique initial du sol ainsi que de ses caractéristiques physiques, et du régime de changement de phase eau  $\leftrightarrow$  glace.

Les données nécessaires à son fonctionnement sont les suivantes:

- nombre de couches de la structure  $\leq 30$
- nombre de points nécessaire à la discrétisation de la structure  $\leq 500$
- nombre de front de gel  $\leq 10$
- nombre de points où sera calculé l'indice de gel  $\leq 12$
- pour chaque couche : teneur en eau, masse volumique sèche, conductivités thermiques à l'état non gelé et gelé, et éventuellement la capacité calorifique et chaleur latente
- cotes des interfaces entre couches
- le champ de température initial du massif
- l'évolution thermique imposée en surface et à l'extrémité inférieure du massif
- durée de l'expérimentation, avec pas de discrétisation en temps (toujours exprimé en secondes) et l'espacement minimum entre les points

Afin de prendre en compte l'effet de cycle thermique de longue durée (saison, année etc.), la structure modélisée repose sur un massif de 40 mètres d'épaisseur (cote 0 m à la base du massif).

##### 3.1.2. Conditions aux limites

Le choix de conditions aux limites, respectivement en surface et à l'extrémité inférieure du massif peut être de trois types:

- le massif est soumis à une condition de température imposée
- le massif est soumis à une condition de flux<sup>6</sup> imposée
- le massif est soumis à une condition d'échange linéaire

---

<sup>6</sup> Le flux thermique est le quotient de la quantité de chaleur traversant une surface par le temps. L'unité SI est le Watt (W).

La température ou le flux de surface est éventuellement variable dans le temps.

Dans ce cas, trois types de régimes thermiques peuvent être décrits:

- régime quelconque : variation en fonction du temps comme une fonction linéaire par morceaux.
- régime hyperbolique : variation en fonction du temps comme une fonction homographique.
- régime exponentiel : variation en fonction du temps comme une fonction exponentielle.

### 3.1.3. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses principales sont les suivantes:

- la surface de la chaussée est plane
- chaque couche est séparée par des plans parallèles à la surface du sol
- chaque couche est homogène et isotrope, c'est-à-dire qu'on peut lui assigner une masse volumique, une conductivité thermique, une teneur en eau indépendantes des axes x, y, z
- les couches possédant une faible teneur en eau (< 1%) ne sont pas affectées de façon sensible par les effets du gel

Afin de limiter le nombre de noeuds nécessaires à la représentation de la structure, et afin de raffiner la discrétisation dans la zone effectivement affectée par le gel, il est nécessaire de prévoir une couche fictive à 39 mètres.

## 3.2. Structures étudiées

Le modèle GEL1D est appliqué aux structures suivantes. Celles-ci ne sont pas mécaniquement équivalentes.

### 3.2.1. Structures présentant des revêtements différents

Les structures ①, ②, ③ correspondent à des chaussées identiques revêtues de couches de roulement différentes: fermées (BBSG<sup>7</sup>) ou poreuses (BBD<sup>8</sup> à 20 % ou 30% de vide).

---

<sup>7</sup> BBSG: béton bitumineux semi grenus

<sup>8</sup> BBD: béton bitumineux drainant

4 cm BBDr 30 %
4 cm BBSG
36 cm GB <sup>9</sup>
36 cm de couche de forme (GNT <sup>10</sup> )
Terrain naturel

Structure ①

4 cm BBDr 20 %
4 cm BBSG
36 cm GB
36 cm de couche de forme (GNT)
Terrain naturel

Structure ②

4 cm BBSG
4 cm BBSG
36 cm GB
36 cm de couche de forme (GNT)
Terrain naturel

Structure ③

### 3.2.2. Structures complexes ou poreuses

La structure ④ correspond à une chaussée revêtue d'un BBDr recevant un BBSG d'entretien (On prend pour hypothèse que le BBDr a conservé ses propriétés physiques d'origine).

La structure ⑤ correspond à une chaussée de type chaussée poreuse urbaine (CPU).

4 cm BBSG
4 cm BBDr 30 %
36 cm GB
36 cm de couche de forme (GNT)
Terrain naturel

Structure ④

4 cm BBDr 30 %
40 cm GB poreuse
36 cm de couche de forme (GNT)
Terrain naturel

Structure ⑤

<sup>9</sup> GB: grave bitume

<sup>10</sup> GNT: grave non traitée

### 3.3. Propriétés physiques des matériaux

Dans le tableau ci-dessous, sont indiquées les principales caractéristiques thermiques des couches utilisées dans les différentes structures testées .

Ces structures sont recouvertes de différents revêtements pour lesquels la conductivité thermique décroît selon cet ordre :

- BBSG
- BBDr 20 %
- BBDr 30 %

La conductivité thermique de la matrice solide du BBDr 20 % et 30 % et du BBSG est de 2.6 W/m K.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (%)	$\lambda_{ng}$ (W/mK)	$\lambda_g$ (W/mK)
BBSG	2350	1	2	2,1
BBDR 30%	1850	3	1,15	1,2
BBDR 20%	2010	3	1,45	1,55
GB	2350	1	1,9	1,9
GB poreuse	1800	7	1,25	1,85
GNT	2200	4	1,8	2
TN	1299	32	1,1	1,8
BBDR 30%	1850	1	1,1	1,14
BBDR 20% saturé	2010	10	1,9	2,5
BBDR 30% saturé	1850	16,2	1,72	2,5

$\rho$  : masse volumique

W : teneur en eau

$\lambda_{ng}$  : conductivité thermique non gelée

$\lambda$  : conductivité thermique gelée

## 4. Application du modèle GEL1D au traitement hivernal

### 4.1. Hypothèses de calcul

Les hypothèses de calcul retenues sont les suivantes:

- la chaussée est recouverte de 2 mm de verglas, ce qui correspond environ à 1800 g d'eau /m<sup>2</sup>
- une température initiale de la surface de chaussée de -1°C
- un temps de fusion du verglas de 15 minutes (déduit de l'expérimentation (1) )
- une surface de chaussée soumise à une condition de flux variable dans le temps et correspondant à la quantité d'énergie nécessaire pour assurer la fusion du verglas
- l'air est considéré comme un isolant thermique parfait pendant la fusion du verglas, ce qui traduit une absence d'échanges thermiques avec l'atmosphère
- l'air à une humidité relative suffisante pour assurer l'hydratation du fondant épandu sous forme solide sec (grains ou paillettes)

Les quantités de chaleur mises en jeu lors de la fusion du verglas ont donc deux origines:

- celle mise en jeu pour hydrater le fondant, appelée chaleur d'hydratation du fondant,
- celle mise en jeu pour assurer la fusion du verglas, appelée chaleur latente de fusion.

Le tableau 2 indique les quantités de fondants exprimées en sel anhydre à mettre en oeuvre pour obtenir la fusion des 1800 g de glace. Ce tableau indique également les quantités de chaleur mises en jeu lors de l'hydratation du NaCl et du CaCl<sub>2</sub>.

Le tableau 3 donne, pour l'un et l'autre fondant, le bilan thermique et la densité de flux nécessaires pour assurer la fusion de 1800 g de glace en fonction de la température de protection recherchée (-1°C à -5°C).

TABLEAU 2

Masse de fondant anhydre pour faire fondre 1800 g d'eau par m<sup>2</sup>  
de chaussée en fonction de sa température.

Quantité de chaleur mise en jeu lors de son hydratation.

NaCl

Traitement avec le chlorure Température surface de chaussée	Masse (kg) de glace fondue par kg de fondant anhydre	Masse (g) de fondant anhydre à épandre par m <sup>2</sup> de chaussée pour faire fondre 1800 g	Quantité de chaleur en Joules nécessaire à l'hydratation du fondant NaCl (-32,6 J/g)
- 1°C	60,6	29,8	- 971,48
- 2°C	29,0	62,1	- 2024,46
- 3°C	19,0	94,7	- 3087,22
- 4°C	15,0	120,0	- 3912,00
- 5°C	12,0	150,0	- 4890,00

TABLEAU 2 bis

CaCl<sub>2</sub>

Traitement avec le chlorure Température surface de chaussée	Masse (kg) de glace fondue par kg de fondant anhydre	Masse (g) de fondant anhydre à épandre par m <sup>2</sup> de chaussée pour faire fondre 1800 g	Quantité de chaleur en Joules dégagée par l'hydratation du fondant CaCl <sub>2</sub> (+ 242,4 J/g)
- 1°C	47,5	37,9 (48*)	+ 9184,54
- 2°C	25,0	72,0 (92*)	+ 17452,80
- 3°C	16,8	107,1 (136*)	+ 25970,74
- 4°C	13,0	138,5 (176*)	+ 33562,70
- 5°C	11,0	163,6 (208*)	+ 39666,34

(\*) : équivalent en paillettes, car le produit commercial est dihydraté CaCl<sub>2</sub>-2H<sub>2</sub>O

TABLEAU 3

Bilan thermique pour assurer la fusion de 1800 g d'eau solide par mètre carré de chaussée en fonction de la température

Température et fondant	- 1°C		- 2°C		- 3°C		- 4°C		- 5°C	
	NaCl	CaCl <sub>2</sub>								
Quantité d'énergie mise en jeu pour 1800 g d'eau										
Chaleur latente de fusion de 1800 g d'eau en J/g	-598320,00		-598320,00		-598320,00		-598320,00		-598320,00	
Chaleur d'hydratation en J	-971,48	+9184,54	-	+17452,80	-3087,22	+25970,74	-3912,00	+33562,70	-4890,00	+39666,34
Bilan en J	-597348,52	-589135,46	2024,46	-600344,46	-601407,22	-572349,26	-602232,00	-564757,30	-603210,00	-558653,66
Ecart en % entre les deux fondants	1,4 %		3,3 %		5,1 %		6,6 %		7,9 %	
Densité de flux <sup>11</sup> en W/m <sup>2</sup>	-663,72	-654,59	-667,04	-645,41	-668,23	-635,94	-669,15	-627,51	-670,23	-620,73

<sup>11</sup> La densité de flux c'est le quotient de la puissance transmise W par la surface de la section qu'elle traverse :  $\Phi = \frac{W}{S} = \frac{\lambda \Delta T}{e}$

Dans notre cas, la densité de flux est obtenue par le rapport de la quantité d'énergie nécessaire à la fusion du verglas sur le temps de fusion de la glace

## 4.2. Conditions retenues en surface pour simuler la fusion du verglas

L'énergie nécessaire pour assurer la fusion du verglas sera schématisée par une condition de flux imposée à la surface.

### 4.2.1. Conditions thermiques schématisant le traitement unique d'un verglas

#### 4.2.1.1. Scénarios possibles

La densité de flux imposée à la surface de la chaussée peut être schématisée de la façon suivante.

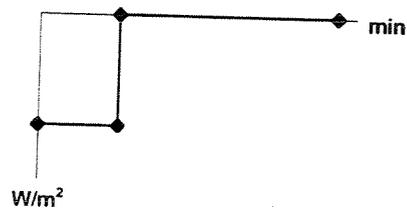


Figure 1: Evolution de la densité de flux en fonction du temps, lors du traitement unique d'un verglas à l'aide d'un fondant

Cette représentation de la densité de flux s'éloigne un peu trop de la réalité physique. En effet, le processus de fusion du verglas ne s'effectue pas de façon brutale, le transfert de l'énergie étant progressif. Le schéma suivant approche d'avantage la réalité physique.

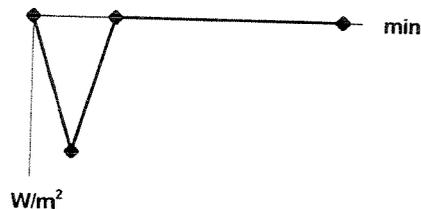


Figure 2: Evolution de la densité de flux en fonction du temps lors d'un traitement unique d'un verglas à l'aide d'un fondant

#### 4.2.1.2. Scénarios retenus

##### 4.2.1.2.1. Gradient de température dans les structures

La température est initialisée dans les différentes structures de la manière suivante:

- de 0 m à 30 m, la température est constante et égale à +14°C
- de 30 m à la surface de la chaussée la température initiale varie linéairement de +14 °C à -1°C, valeur initiale de la température de chaussée

Le gradient de température ( $dT/dx$ ) de la surface de chaussée est donc de  $0,14^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ . Les valeurs suivantes  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ,  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ,  $0,18^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  sont des gradients de température observés lors de différentes expériences.

#### 4.2.1.2.2 Valeur de la densité de flux

Lors de l'application du modèle GEL1D, la température initiale de surface est de  $-1^{\circ}\text{C}$ .

L'énergie nécessaire pour assurer la fusion de 1800 g de glace à l'aide de NaCl est de  $-597348,52\text{ J}$ . Cette valeur est obtenue à partir du tableau 3.

Le temps de fusion du verglas étant de 15 minutes, la densité de flux nécessaire pour assurer la fusion du verglas à l'aide de NaCl sera de  $-663,72\text{ W}/\text{m}^2$ .

La quantité de chaleur nécessaire à l'hydratation du  $\text{CaCl}_2$  étant différente de celle du NaCl, la densité de flux correspondante est de  $-654,59\text{ W}/\text{m}^2$ .

#### 4.2.1.2.3. Rappel de l'évolution de la température de surface obtenue expérimentalement (1)

La figure 3 représente l'évolution de la température observée durant l'expérimentation.

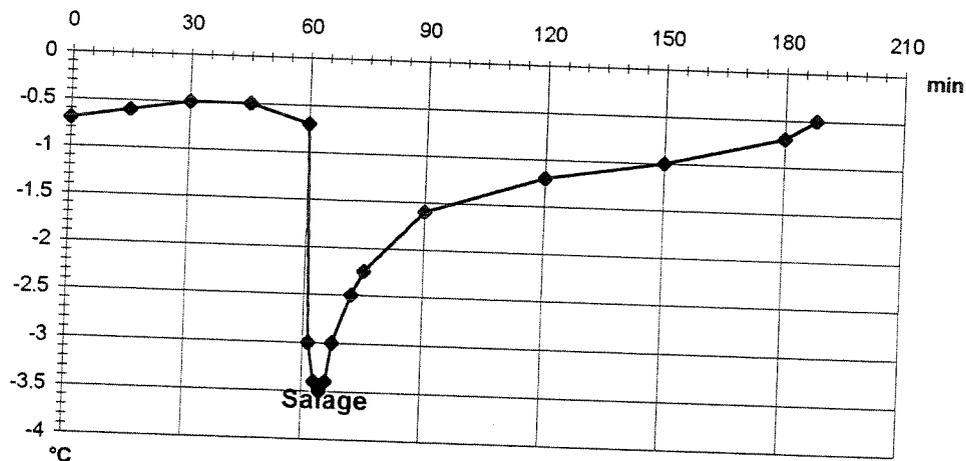


Figure 3: Variation de la température de surface en fonction du temps sur le revêtement salé

#### 4.2.1.2.4 Cas étudiés

L'objectif est d'essayer de caler les résultats de la modélisation au plus près de la physique du phénomène étudié, dans les contraintes du modèle GEL1D.

Plusieurs scénarios d'application du flux ont été étudiés. Les différents cas étudiés schématisent la même quantité d'énergie nécessaire à la fusion du verglas

### 1<sup>er</sup> cas

Il n'y a pas d'échange entre la chaussée et l'atmosphère après la fusion du verglas.

Compte tenu des observations du paragraphe précédant et des écarts de température de surface obtenus en fonction du temps constaté lors de l'expérimentation, la condition de flux imposée à la surface est la suivante.

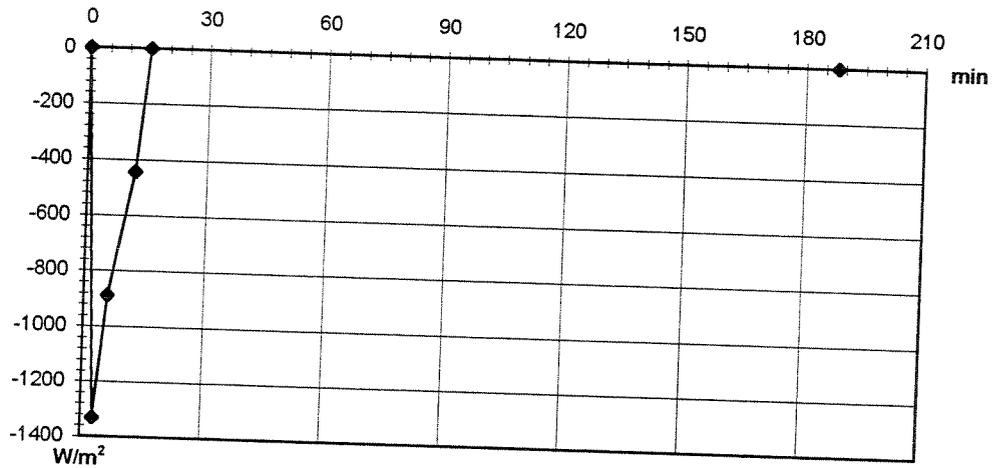


Figure 4: Evolution de la densité de flux ① en fonction du temps, lors d'un traitement unique du verglas à l'aide NaCl

### 2<sup>ème</sup> cas

L'allure de la courbe  $T_s=f(t)$ , obtenue expérimentalement, permet d'imaginer une autre représentation de l'évolution de la densité flux présentant un palier.

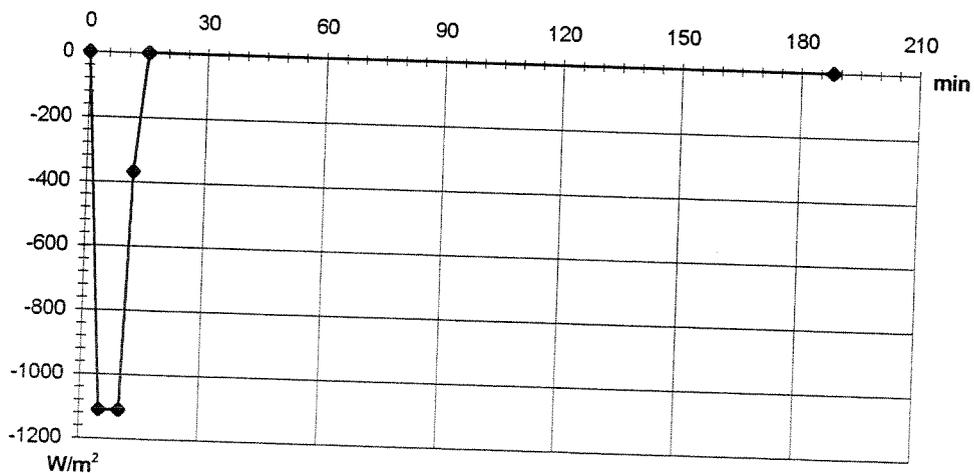


Figure 5: Evolution de la densité de flux ② en fonction du temps, lors d'un traitement unique du verglas à l'aide NaCl

### 3<sup>ème</sup> cas

Ce troisième scénario tente de prendre en compte les échanges thermiques avec l'atmosphère. Il reprend la même évolution de la densité de flux définie en ① en considérant qu'après la fusion du verglas la surface de la chaussée se réchauffe par échange avec l'atmosphère (+30 W/m<sup>2</sup>)

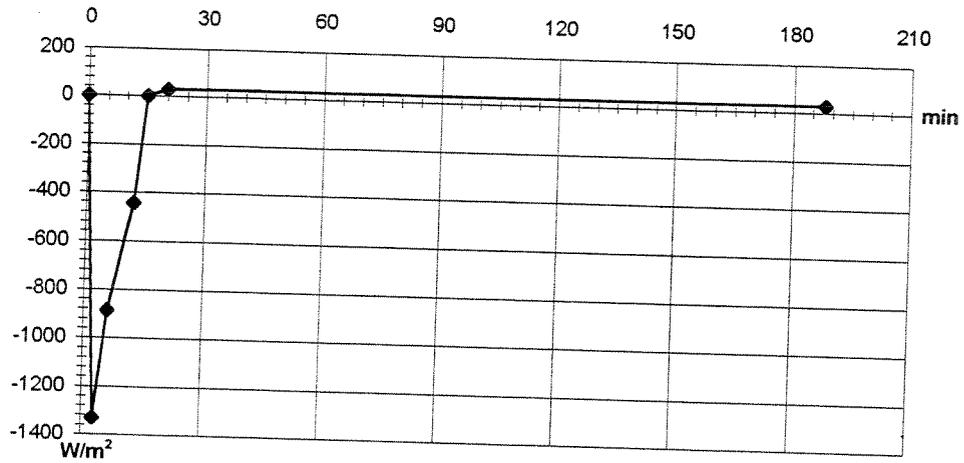


Figure 6: Evolution de la densité de flux ③ en fonction du temps, lors d'un traitement unique du verglas à l'aide de NaCl

### 4<sup>ème</sup> cas ( idem que 3<sup>ème</sup> cas appliqué à ② )

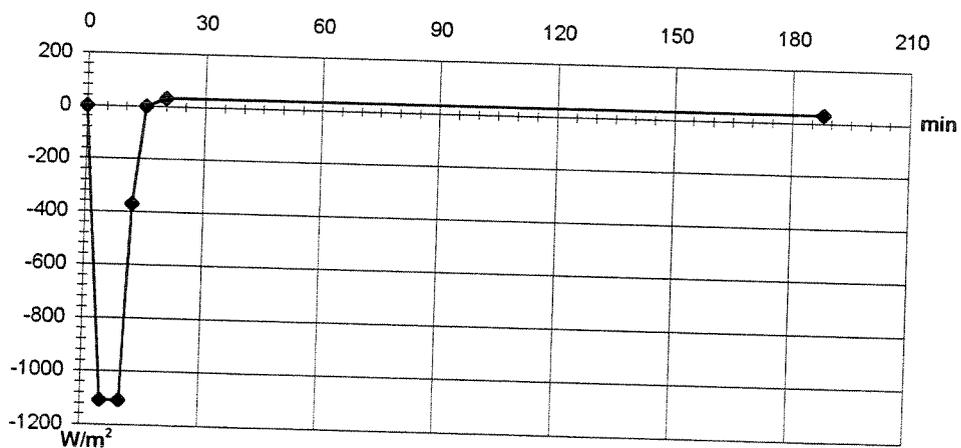


Figure 7: Evolution de la densité de flux ④ en fonction du temps, lors d'un traitement unique du verglas à l'aide de NaCl

## 5<sup>ème</sup> cas

De façon à comparer l'évolution de la température de surface obtenue avec l'épandage de NaCl à celle obtenue avec CaCl<sub>2</sub>, la figure 8 représente la densité de flux nécessaire pour faire fondre du verglas à l'aide de CaCl<sub>2</sub>.

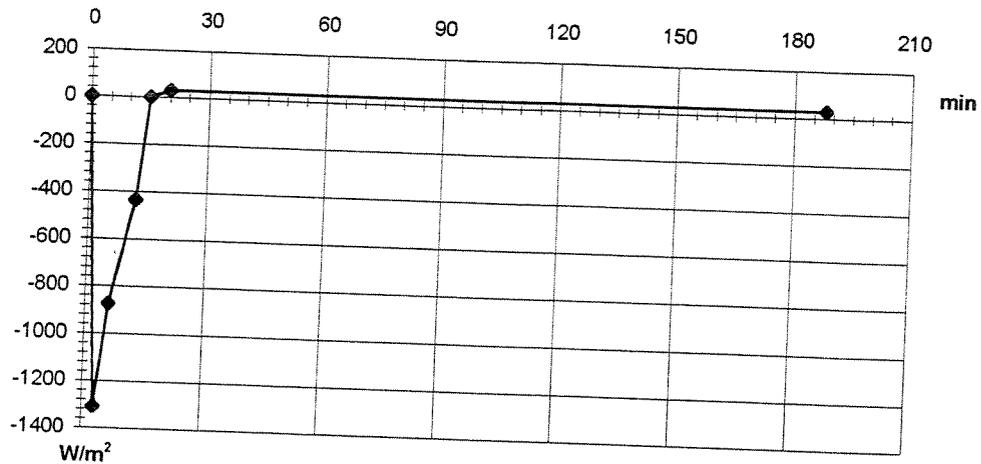


Figure 8: Evolution de la densité de flux  $\Phi$  en fonction du temps, lors d'un traitement unique du verglas à l'aide de CaCl<sub>2</sub>

Le bilan thermique pour assurer la fusion de 1800 g de glace est de -5973348,52 J à l'aide de NaCl, et de -5891135,00 J à l'aide de CaCl<sub>2</sub>.

Il est donc difficile d'apprécier sur cette figure la différence de la densité de flux entre la fusion provoqué par NaCl et CaCl<sub>2</sub>, l'écart du bilan thermique entre les deux fondant étant de 1,3 %.

### 4.2.2. Conditions thermiques schématisant le traitement cyclique d'une couche de neige

#### 4.2.2.1. Objectif de cette simulation

Cette simulation est destinée à apprécier la « mémorisation thermique » de la surface d'une chaussée suite à une série chronologique de traitement aux fondants routiers.

#### 4.2.2.2. Scénario retenu

On prend pour hypothèse que :

- l'énergie nécessaire pour faire fondre 2 mm de verglas est comparable à celle nécessaire pour faire fondre 20 mm de neige
- la précipitation neigeuse est continue
- le service d'exploitation effectue un salage cyclique de la neige résiduelle

- le délai de rotation respecté par les équipes d'intervention lors d'un traitement curatif de la neige est de deux heures (temps entre deux passages successifs d'un même engin en un même point, y compris le temps de rechargement de la saleuse).  
 On considère qu'entre chaque passage, la surface de la chaussée se réchauffe dès que la neige a fondu.

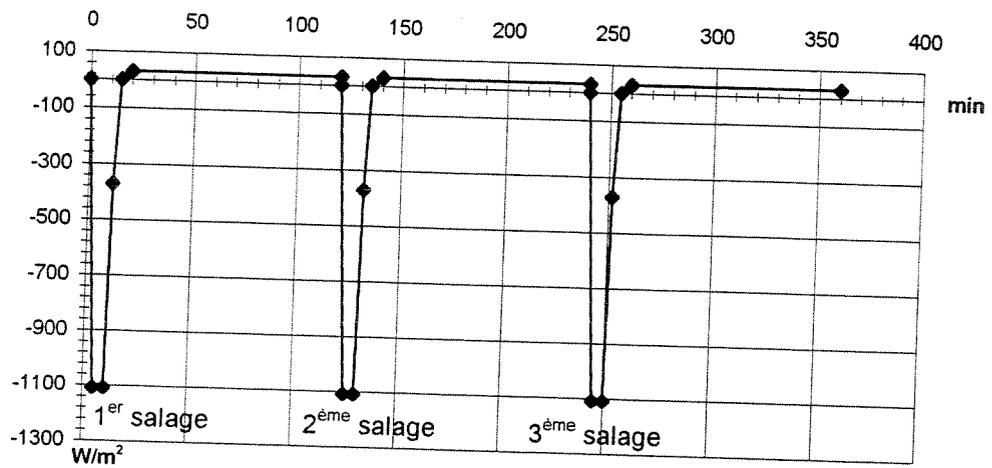


Figure 9: Evolution de la densité de flux  $\text{W/m}^2$  en fonction du temps, lors d'un traitement cyclique de la neige à l'aide de NaCl

## 5. Résultats des simulations

### 5.1. Comparaison des traitements au NaCl et CaCl<sub>2</sub>

Le tableau suivant indique l'évolution de la température de surface pour les structures BBDr à 30 % ① et BBSG ③ obtenue lors du traitement du verglas à l'aide des fondants NaCl et CaCl<sub>2</sub> (application des densités de flux ③ et ⑤ )

Couche de roulement et fondant	BBDr 30 %		BBSG	
	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	NaCl	CaCl <sub>2</sub>
Temps écoulé par rapport à l'instant de salage en min	Température en °C			
0	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
3	-11,09	-11,72	-8,16	-8,04
6	-15,98	-15,73	-10,82	-10,67
12	-16,30	-16,04	-11,07	-10,90
15	-12,79	-12,59	-8,84	-8,90
30	-6,47	-6,37	-4,99	-5,44
45	-4,43	-4,35	-3,78	-4,32
60	-3,32	-3,26	-3,07	-3,55
120	-1,35	-1,31	-1,61	-1,80
188	-0,33	-0,30	-0,74	-0,73

Ce tableau montre que la différence de densité de flux appliquée pour NaCl et CaCl<sub>2</sub> entraîne peu de différence de température de surface.

On peut en conclure que, l'exothermicité du CaCl<sub>2</sub> ne constitue pas un réel avantage.

## 5.2. Comparaison des effets du traitement au NaCl sur les structures ①, ②, ③ (structures présentant un revêtement différent)

### 5.2.1. Application au traitement unique d'un verglas

#### 5.2.1.1. Applications des densités de flux ①, ② (absence d'apport d'énergie par l'atmosphère)

Les résultats de ces simulations montrent que:

- l'abaissement maximal de la température de surface est d'autant plus important que la couche de roulement est isolante (fig 10 et 11)
- l'abaissement maximal de la température de surface dépend du scénario de densité de flux appliqué en surface (tableau 4 et fig 10 et 11)
- après 120 min, la température de surface des différentes structures est voisine de  $-3^{\circ}\text{C}$  (cf tableau 5) soit  $2^{\circ}\text{C}$  en deçà de la valeur initiale de  $-1^{\circ}\text{C}$
- les températures de surface obtenues après 188 min, pour les différents revêtements sont peu différentes (cf tableau 4)
- après 188 min, les différentes structures ne retrouvent pas leur température initiale (cf tableau 4).

TABLEAU 4

Températures de surface minimales et finales obtenues lors de l'application des densité de flux ① et ②

Couches de roulement	Densité de flux ①		Densité de flux ②	
	Température minimale $^{\circ}\text{C}$	Température finale après 188 min $^{\circ}\text{C}$	Température minimale $^{\circ}\text{C}$	Température finale après 188 min $^{\circ}\text{C}$
BBDr 30 %	-16,30	-2,57	-19,03	-2,67
BBDr 20 %	-13,35	-2,59	-15,35	-2,69
BBSG	-11,08	-2,47	-12,87	-2,57

TABLEAU 5

Températures de surface obtenues après 120 minutes lors de l'application des densité de flux ① et ②

Couches de roulement	Densité de flux ①	Densité de flux ②
	Température après 120 min $^{\circ}\text{C}$	Température après 120 min $^{\circ}\text{C}$
BBDr 30 %	-3,15	-3,29
BBDr 20 %	-3,16	-3,31
BBSG	-2,95	-3,07

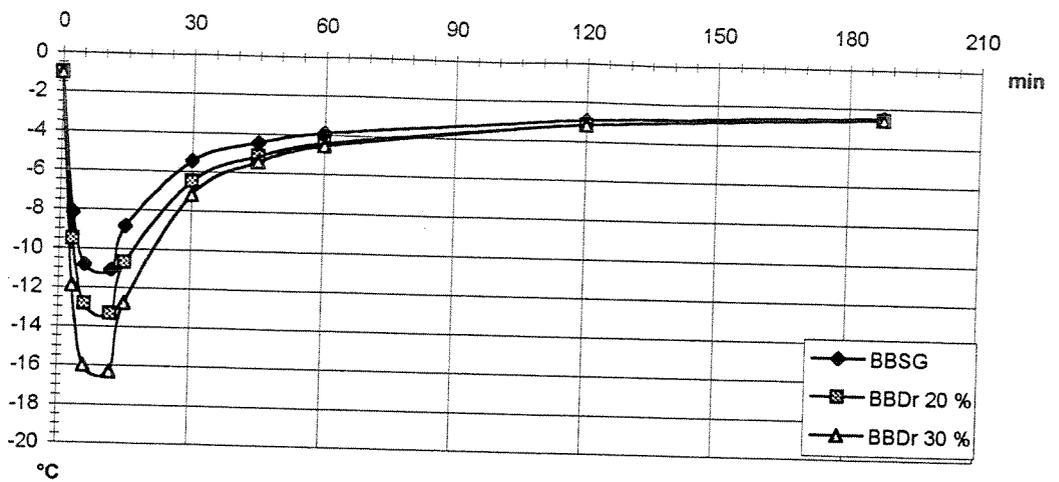


Figure 10: Variation de la température de surface des structures ①, ②, ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ①.

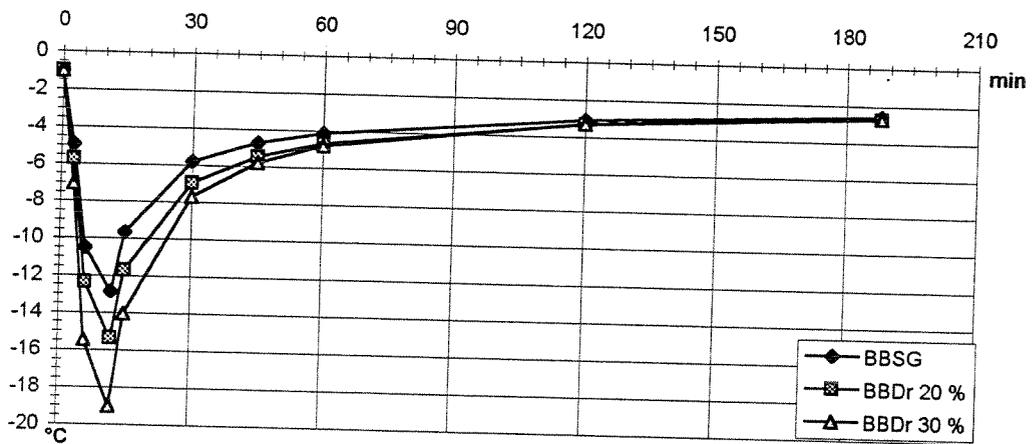


Figure 11: Variation de la température de surface des structures ①, ②, ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ②.

### 5.2.1.2. Application des densités de flux ③ et ④ (apport d'énergie par l'atmosphère)

- L'apport d'énergie par l'atmosphère après la fusion du verglas entraîne:
- un relèvement de l'ordre de 2°C de toutes les températures de surface des revêtements après 120 et 188 min par rapport au flux ① et ② (tableaux 6 et 7)
  - un retour des températures de surface à leur valeur d'origine de -1°C après 188 min (tableau 6)
  - une augmentation de la température due aux échanges avec l'atmosphère d'autant plus importante que le couche de roulement est isolante (cf tableau 6)

TABLEAU 6

Températures de surface minimales et finales obtenues lors de l'application des densité de flux ③ et ④

Couches de roulement	Densité de flux ③		Densité de flux ④	
	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C
BBDr 30 %	-16,30	-0,33	-19,03	-0,44
BBDr 20 %	-13,35	-0,55	-15,35	-0,66
BBSG	-11,08	-0,74	-12,87	-0,85

TABLEAU 7

Températures de surface obtenues après 120 minutes lors de l'application des densité de flux ③ et ④

Couches de roulement	Densité de flux ③	Densité de flux ④
	Température après 120 min °C	Température après 120 min °C
BBDr 30 %	-1,35	-1,50
BBDr 20 %	-1,57	-1,71
BBSG	-1,61	-1,73

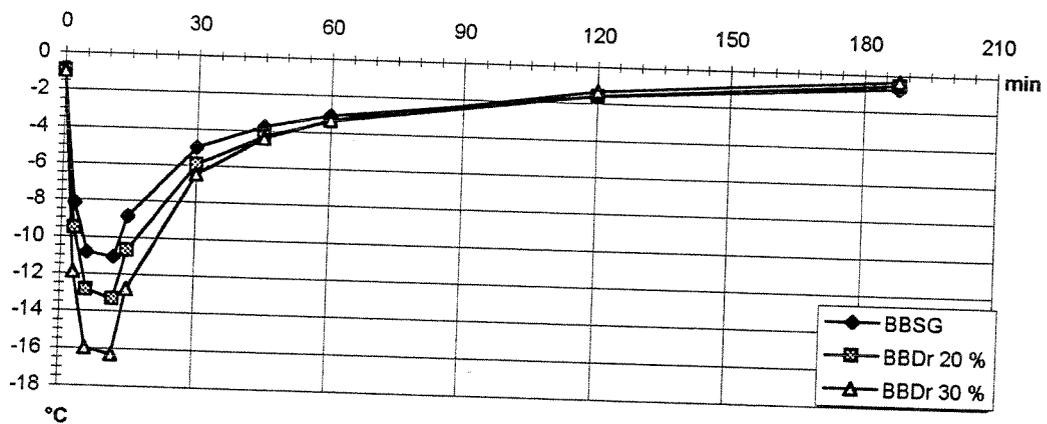


Figure 12: Variation de la température de surface des structures ①, ②, ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ③

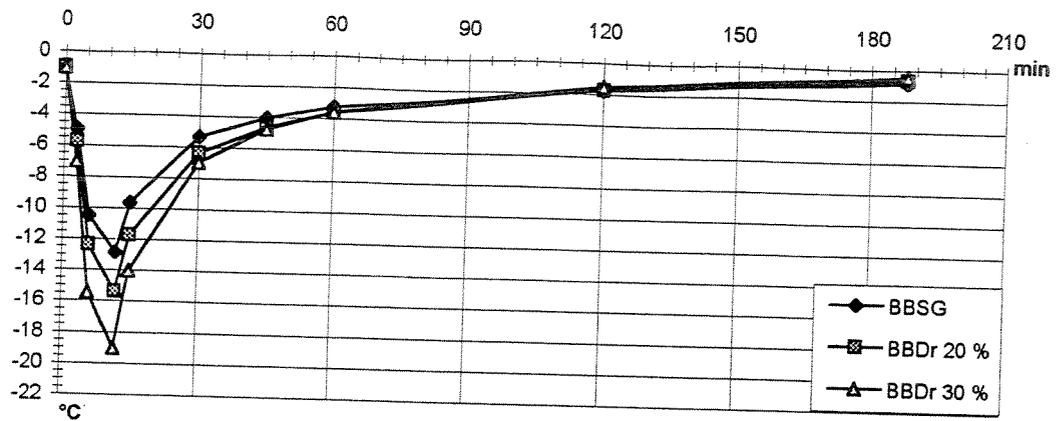


Figure 13: Variation de la température de surface des structures ①, ②, ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ④

## 5.2.2. Application au traitement cyclique d'une couche de neige

### 5.2.2.1. Application de la densité de flux ⑥

*Rappel : Le diagramme de phase de NaCl et CaCl<sub>2</sub>*

*L'eutectique est la température de congélation la plus basse que l'on puisse atteindre avec une saumure, sa valeur est pour le NaCl de -21.1°C. et de -51.6°C pour CaCl<sub>2</sub>*

Le résultat de cette simulation montre que:

- à chaque épandage, la température initiale de surface des différentes structures est inférieure à celle de l'épandage précédent (tableau 8)
- la température de surface minimale obtenue pour les différentes structures, après chaque épandage de fondants, ne cesse de décroître (tableau 8)

TABLEAU 8

Températures de surface minimale et finale obtenues à l'issue des traitements pour les structures ①, ②, ③

Couches de roulement	1 <sup>er</sup> salage		2 <sup>ème</sup> salage		3 <sup>ème</sup> salage	
	température initiale °C (t <sub>0</sub> )	température minimale °C	température initiale °C (t <sub>0</sub> + 2 h)	température minimale °C	température initiale °C (t <sub>0</sub> + 4 h)	température minimale °C
BBDr 30 %	-1,00	-19,3	-1,50	-19,98	-2,47	-20,93
BBDr 20 %	-1,00	-15,35	-1,71	-16,39	-2,70	-17,354
BBSG	-1,00	-12,87	-1,74	-13,88	-2,68	-14,80

température initiale: température au début du salage

température minimale: température issue du traitement

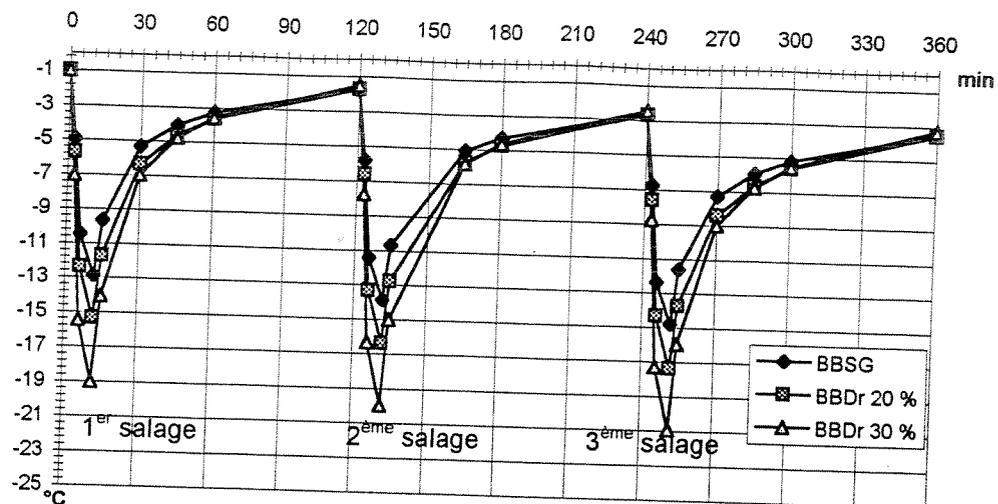


Figure 14: Variation de la température de surface des structures ①, ②, ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ⑥

*Remarque:* si nous décidions par exemple de poursuivre le traitement cyclique de la neige pour la structure ①, il apparaît que la température de surface pourrait devenir inférieure à la température de l'eutectique du NaCl, ce qui ne correspond pas à la physique du phénomène.

### 5.3. Comparaison des effets du traitement au NaCl sur les structures ④ et ③ (structures présentant des revêtements fermés identiques mais dont l'une emprisonne un BBDr)

#### 5.3.1. Application au traitement unique d'un verglas

##### 5.3.1.1. Applications des densités de flux ①, ② (absence d'apport d'énergie par l'atmosphère)

Ces nouvelles simulations montrent que:

- pendant la fusion du verglas, l'évolution de la température de surface de chaussées de structures différentes mais recouvertes du même revêtement, est pratiquement identique (figures 15 et 16)
- après la fusion du verglas, l'augmentation de la température de surface est d'autant plus importante que la couche située en dessous du revêtement permet l'écoulement de la chaleur. L'interposition d'un BBDr dans la structure (renouvellement d'un revêtement ancien) constitue un frein à ce mécanisme (figures 15 et 16)

TABLEAU 9

Températures de surface minimales et finales obtenues lors de l'application des densités de flux ① et ②

Couches de roulement	Densité de flux ①		Densité de flux ②	
	Température minimale C	Température finale après 188 min °C	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C
BBSG + BBDr 30 %	-11,17	-2,72	-12,93	-2,83
BBSG + BBSG	-11,08	-2,48	-12,87	-2,57

TABLEAU 10

Températures de surface obtenues après 120 minutes lors de l'application des densités de flux ① et ②

Couches de roulement	Densité de flux ①	Densité de flux ②
	Température obtenue après 120 min °C	Température obtenue après 120 min °C
BBSG + BBDr 30 %	-3,33	-3,48
BBSG + BBSG	-2,95	-3,07

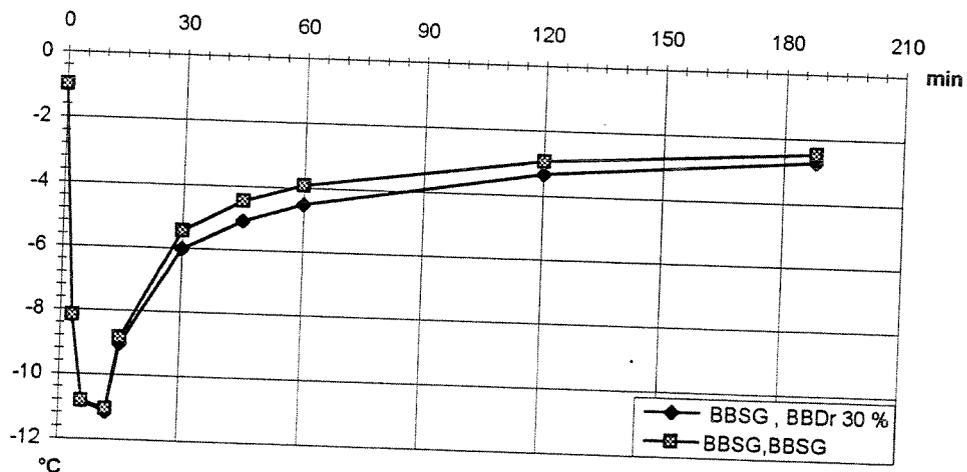


Figure 15: Variation de la température de surface des structures ④ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ①

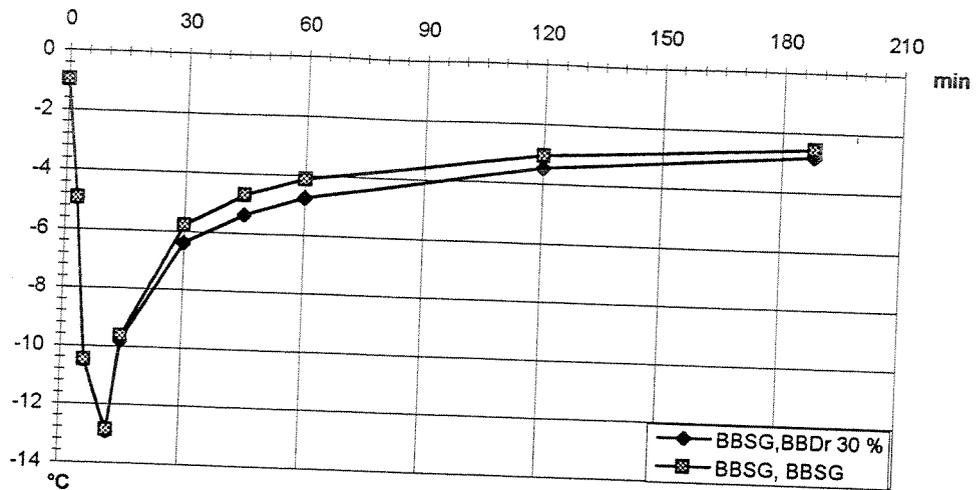


Figure 16: Variation de la température de surface des structures ④ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ②

### 5.3.1.2. Applications des densités de flux ③ et ④ (apport d'énergie par l'atmosphère)

L'apport d'énergie par l'atmosphère après la fusion de la glace permet de réduire les écarts de température de surface entre les chaussées recouvertes d'un même revêtement mais comportant une deuxième couche différente (figures 15 et 16 et tableau 11)

Si nous décidions de prolonger la durée de la simulation, il apparaît que la température de surface de la chaussée comportant une couche isolante en dessous de son revêtement deviendrait supérieure à celle comportant une couche fermée

TABLEAU 11

Températures de surface minimales et finales obtenues lors de l'application des densité de flux ③ et ④

Couches de roulement	Densité de flux ③		Densité de flux ④	
	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C
BBSG + BBDr 30 %	-11,17	-0,76	-12,93	-0,88
BBSG + BBSG	-11,08	-0,74	-12,87	-0,84

TABLEAU 12

Températures de surface obtenues après 120 minutes lors de l'application des densité de flux ③ et ④

Couches de roulement	Densité de flux ③	Densité de flux ④
	Température après 120 min °C	Température après 120 min °C
BBSG + BBDr 30 %	-1,84	-1,99
BBSG + BBSG	-1,61	-1,74

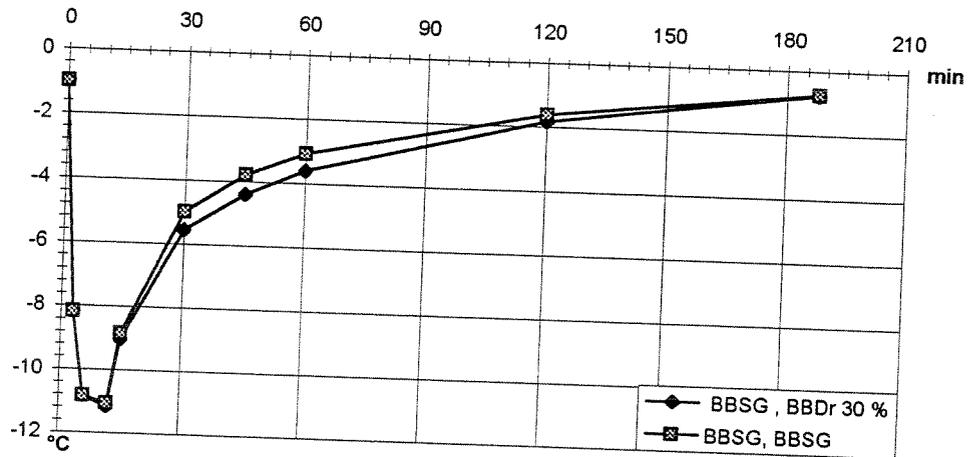


Figure 17: Variation de la température de surface des structures ④ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ③

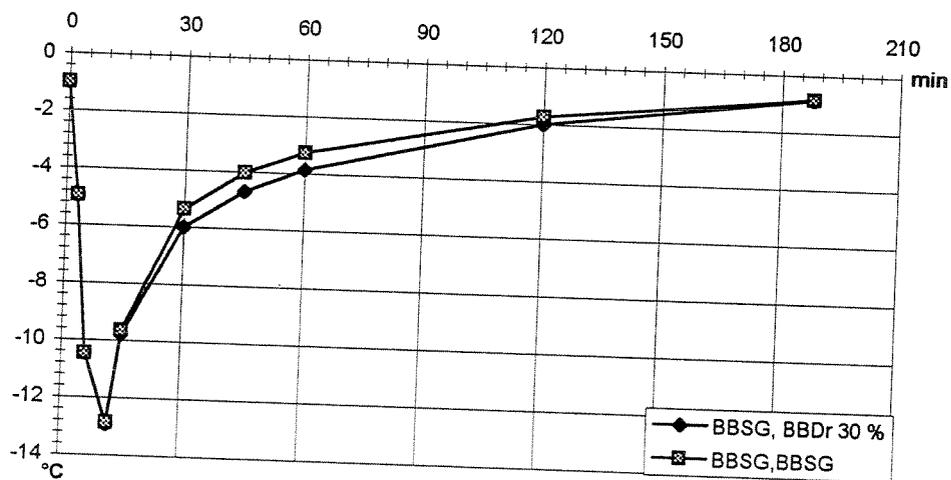


Figure 18: Variation de la température de surface des structures ④ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ④

## 5.3.2. Application au traitement cyclique d'une couche de neige

### 5.3.2.1. Application de la densité de flux ⑥

Le résultat de cette simulation montre que:

- lors du premier traitement, les évolutions de température de surface des deux structures sont identiques durant la fusion de la neige
- Un abaissement de température plus important pour la structure comportant une couche isolante en dessous de son revêtement apparaît dès lors du deuxième traitement.

TABLEAU 13

Températures de surface minimale et finale obtenues après chaque épandage pour les structures ③, ④

couches de roulement	1 <sup>er</sup> salage		2 <sup>ème</sup> salage		3 <sup>ème</sup> salage	
	température initiale °C (t <sub>0</sub> )	température minimale °C	température initiale °C (t <sub>0</sub> + 2 h)	température minimale °C	température initiale °C (t <sub>0</sub> + 4 h)	température minimale °C
BSG + BBDr 30 %	-1,00	-12,93	-2,00	-14,15	-3,03	-15,17
BBSG + BBSG	-1,00	-12,87	-1,74	-13,88	-2,68	-14,80

température initiale: température au début du salage  
température minimale: température issue du traitement

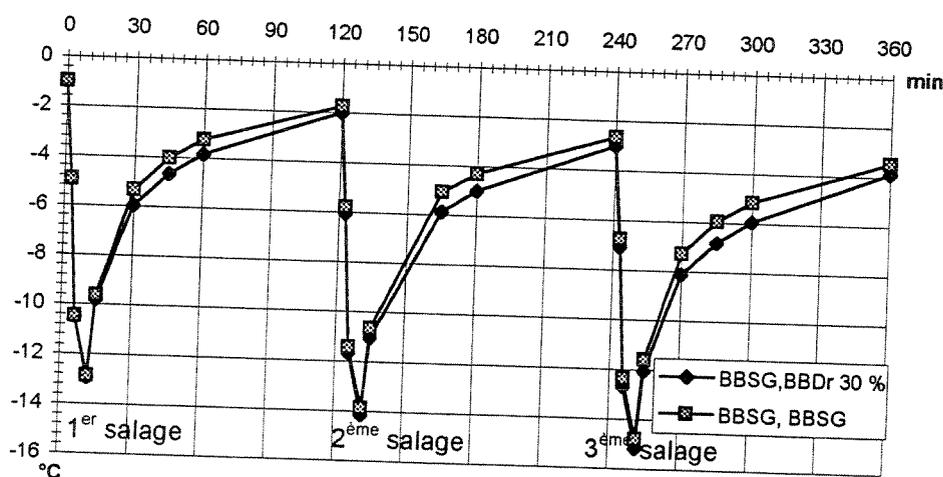


Figure 19: Variation de la température de surface des structures ④ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ⑥

## 5.4. Comparaison des effets du traitement au NaCl sur les structures ① et ② (structures présentant des revêtements drainants identiques)

### 5.4.1. Application au traitement unique d'un verglas

#### 5.4.1.1. Applications des densités de flux ①, ② (absence d'apport d'énergie par l'atmosphère)

Ces nouvelles simulations montrent que::

- pendant la fusion de la glace, l'abaissement de la température de surface est d'autant plus important que la couche située en dessous du revêtement est non isolante (tableau 14 et figures 21 et 22)
- après la fusion du verglas, l'augmentation de la température de surface est d'autant plus importante que la couche située en dessous du revêtement est non isolante (tableau 14 et figures 21 et 22)

TABLEAU 14

Températures de surface minimales et finales obtenues lors de l'application des densité de flux ① et ②

Couches de roulement	Densité de flux ①		Densité de flux ②	
	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C	Température minimale °C	Température finale après 188 min °C
BBDr 30 %+ GB poreuse	-15,50	-2,66	-18,12	-2,78
BBDr 30 %+ GB	-16,30	-2,57	-19,05	-2,67

TABLEAU 15

Températures de surface obtenues après 120 minutes lors de l'application des densité de flux ① et ②

Couches de roulement	Densité de flux ①	Densité de flux ②
	Température après 120 min °C	Température après 120 min °C
BBDr 30 %+ GB poreuse	-3,25	-3,42
BBDr 30 %+ GB	-3,15	-3,30

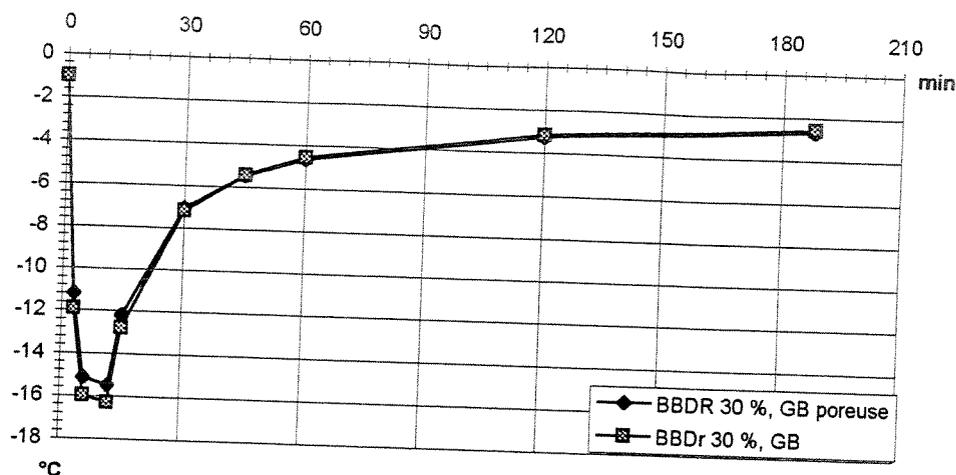


Figure 20: Variation de la température de surface des structures ⑤ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ①

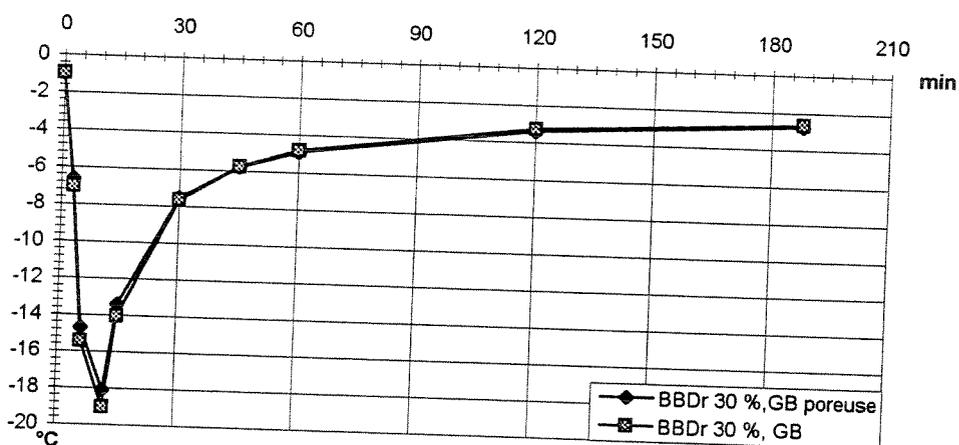


Figure 21: Variation de la température de surface des structure ④ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ②

#### 5.4.1.2. Application des densités de flux ③ et ④ (apport d'énergie par l'atmosphère)

L'apport d'énergie par l'atmosphère après la fusion du verglas n'entraînent pas de nouvelles modifications de la température de surface des deux structures hormis un relèvement de l'ordre de 2°C après 120 et 188 min par rapport au densités de flux ① et ② (tableaux 15 et 16, figures 22 et 23).

TABLEAU 16

Températures de surface minimales et finales obtenues lors de l'application des densité de flux ③ et ④

Couches de roulement	Densité de flux ③		Densité de flux ④	
	Température minimale °C	Température finale °C	Température minimale °C	Température finale °C
BBDr 30 %+ GB poreuse	-15,50	-0,41	-18,12	-0,66
BBDr 30 % + GB	-16,30	-0,33	-19,05	-0,40

TABLEAU 17

Températures de surface obtenues après 120 minutes lors de l'application des densité de flux ③ et ④

Couches de roulement	Densité de flux ③	Densité de flux ④
	Température en °C obtenue après 120 min	Température en °C obtenue après 120 min
BBDr 30 %+ GB poreuse	-1,47	-1,63
BBDr 30 % + GB	-1,35	-1,70

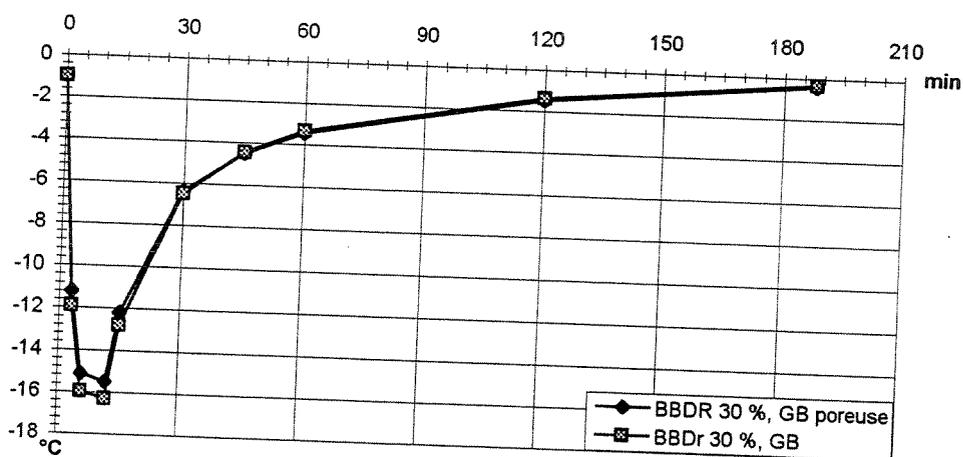


Figure 22: Variation de la température de surface des structures ⑤ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ③

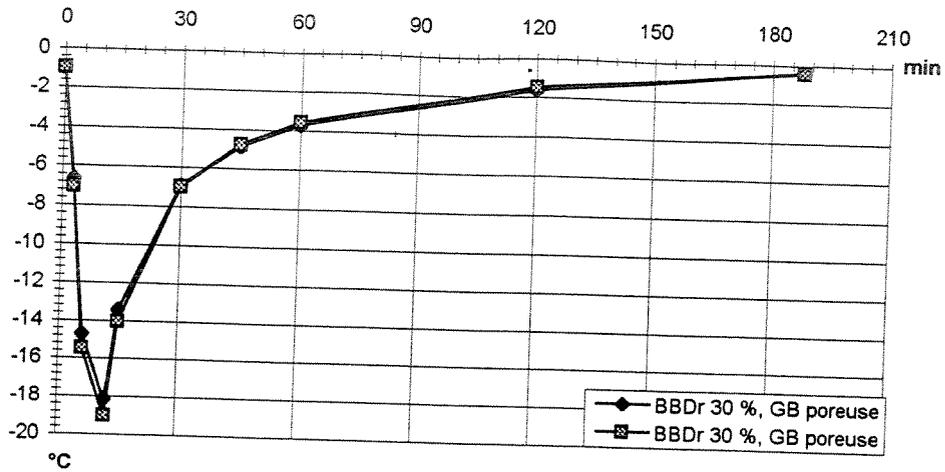


Figure 23: Variation de la température de surface des structures ⑤ et ③ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ④

## 5.4.2. Application au traitement cyclique d'une couche de neige

### 5.4.2.1. Application de la densité de flux ⑥

Cette simulation n'apporte pas de nouveaux résultats mais permet de confirmer ceux obtenus précédemment.

TABLEAU 19

Températures de surface minimale et finale obtenues après chaque épandage pour les structures ⑤ et ①

couches de roulement	1 <sup>er</sup> salage		2 <sup>ème</sup> salage		3 <sup>ème</sup> salage	
	température initiale °C (t <sub>0</sub> )	température minimale °C	température initiale °C (t <sub>0</sub> + 2 h)	température minimale °C	température initiale °C (t <sub>0</sub> + 4 h)	température minimale °C
BBDr 30 %, GB	-1,00	-19,03	-1,50	-19,98	-2,47	-20,93
BBDr 30 %, GB poreuse	-1,00	-18,12	-1,63	-19,22	-2,68	-20,24

température initiale: température au début du salage  
température minimale: température issue du traitement

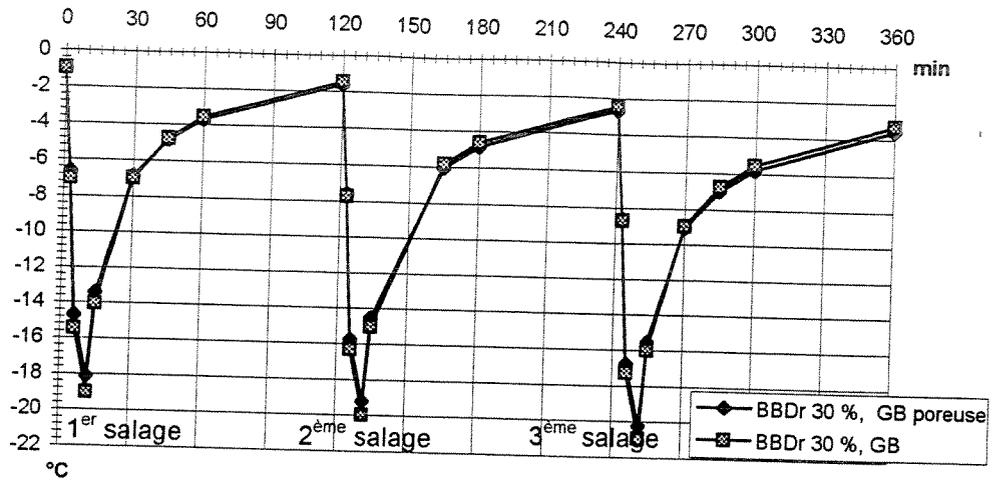


Figure 24: Variation de la température de surface des structures ① et ⑤ en fonction du temps pour l'application de la densité de flux ⑥

## 6. Limites des différentes approches proposées

Lors d'un traitement curatif d'un verglas routier ou d'une couche de neige à l'aide d'un fondant, l'abaissement de température de surface de chaussée obtenue par simulation numérique est beaucoup plus important que celui observé dans les expériences (1) et (3) ou par le calcul semi théorique (2). Il s'approche de celui observé dans l'expérience (4). Ces écarts trouvent une justification dans les différences d'approche.

### 6.1. Discussion des approches expérimentales

#### 6.1.1. Limites de l'expérience « Action des sels de déverglaçage sur les revêtements, étude du choc thermique » (1)

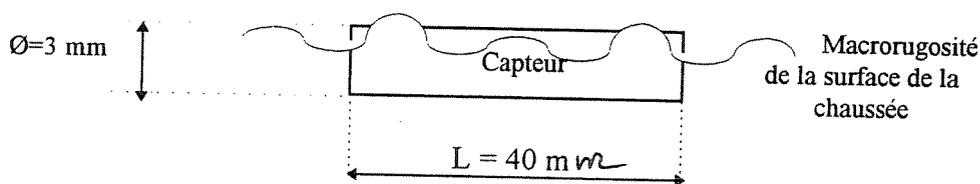
Dans l'étude expérimentale (1), l'abaissement de la température de surface mesuré lors d'un traitement curatif avec  $40 \text{ g/m}^2$  de fondant, à 95 % de NaCl, d'une couche de verglas de 2 mm ( $1800 \text{ g d'eau/m}^2$ ) est de  $2.9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le brassage par la circulation était faible. L'abaissement de la température de surface relevé lors du traitement unique d'une couche de neige de 2 cm est de  $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Les mesures de la température de surface sont effectuées à l'aide de sondes à résistance de platine inox de 3 mm de diamètre et 40 mm de long.

Ces capteurs ont un temps de réponse supérieur à 30 s. Cette dynamique semble insuffisante pour obtenir une mesure précise du phénomène rapide étudié.

Les sondes de température sont reliées à un enregistreur potentiométrique à 12 voies présentant un temps de commutation de 7 s, qui permet donc de faire une mesure toutes les 84 s. Le temps écoulé entre deux mesures est important, compte tenu des variations temporelles rapides de la température de surface.

La chaussée n'étant pas parfaitement plane (macrotecture), on peut penser que la température enregistrée est d'avantage une moyenne entre la température ambiante et celle de la chaussée.



Le scellement des capteurs à l'aide de bitume dans la structure de chaussée, modifie localement le milieu et entraîne vraisemblablement un biais dans la mesure.

On peut donc penser que le dispositif mis en oeuvre, sous estime la valeur de la température de surface que notre modélisation place à une valeur inférieure.

### 6.1.2. Limites de l'expérience «Expérimentation neige » (2)

Dans l'étude expérimentale (2), l'abaissement de la température de surface mesuré lors d'un traitement à l'aide de  $250 \text{ g/m}^2$  de sel fin de cuisine d'une couche de neige de 1 cm est de  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le mélange neige-sel a été plusieurs fois brassé à l'aide d'une fourchette, afin de simuler l'action du trafic.

Les mesures de la température de surface sont réalisées à l'aide d'un pyromètre infra rouge dont la précision absolue est de l'ordre de  $2^\circ\text{C}$  (sans réglage de l'émissivité  $\epsilon$ ).

La température indiquée par le pyromètre, correspond à une température de surface de la neige et non de la chaussée.

Le sel fin permet normalement la fusion immédiate de la neige par sa surface. La neige étant faiblement conductrice, l'énergie nécessaire à sa fusion est prise à la neige et à l'atmosphère.

Dans cette étude, le brassage du mélange neige-sel à l'aide d'une fourchette entraîne la fusion de la neige dans son épaisseur. Dans ce cas l'énergie est prise en partie à la surface de la chaussée.

L'absence de mesures de la température de surface pendant la fusion de la neige ne permet pas d'apprécier l'importance de cet échange.

Cette expérience nous renseigne uniquement sur le phénomène physique d'abaissement de la température de surface de la neige lors de l'épandage de fondant et du risque de recristallisation de la neige fondue lors d'un surdosage en fondant.

### 6.1.3. Limites de l'expérience «Choc thermique produit par le salage d'une couche de neige » (4)

Dans l'étude expérimentale (4), le salage d'une pellicule de neige provoque un abaissement de la température de surface du revêtement de l'ordre de  $9^\circ\text{C}$ .

L'expérience s'effectue sur des échantillons de béton bitumineux, réfrigérés par leur base. Le revêtement bitumineux est isotherme en début d'expérience. Le refroidissement de la surface du revêtement provoqué par la fusion de la neige, ne peut être compensé par le flux "géothermique" car les revêtements ne reposent pas sur une structure de chaussée. L'abaissement de la température de surface, obtenu dans ces conditions est donc supérieur à celui qui pourrait être observé "in situ".

## 6.2. Discussion de l'approche théorique « Variation de la température de la surface d'une chaussée lors de l'épandage d'un fondant ionique » (3)

Dans l'étude théorique (3), pour une température de surface de  $-1^\circ\text{C}$ , l'abaissement de la température de surface mesuré lors d'un traitement à l'aide de NaCl est de  $5,8^\circ\text{C}$ .

La variation en fonction du temps de la quantité de chaleur nécessaire à la fusion de la glace est considérée constante. Dans la réalité physique on peut penser que le

transfert d'énergie s'effectue suivant un processus en cloche. L'abaissement "théorique" de la température de surface serait donc minoré par rapport à celui observé à l'aide de la modélisation.

L'unité de la conductivité thermique moyenne n'étant pas indiquée, il est difficile de savoir si la valeur 0,4 indiquée correspond à la conductivité thermique moyenne de 2,2 W/m K généralement prise pour les bétons bitumineux.

L'hypothèse consistant à prendre une conductivité thermique moyenne pour une chaussée multicouche, ne permet pas un calcul précis de l'abaissement de température de sa surface.

A ce jour les valeurs obtenues par cette approche théoriques sont considérées exactes, malgré l'absence des différentes étapes de calcul qui aurait permis d'asseoir ces résultats.

### 6.3. Discussion des résultats obtenus par simulation numérique

L'abaissement de température de surface obtenu par simulation lors du traitement à l'aide du fondant NaCl, d'une couche de verglas de 2 mm, est fonction:

- de la structure de chaussée et en particulier de la nature du revêtement
- de l'évolution de la densité de flux appliquée à la surface de la chaussée

Dans les différents scénarios thermiques testés, l'abaissement de la température de surface obtenu est toujours supérieur à 10°C

Le modèle GEL1D prend en compte les transferts d'énergie par conduction, et les changements d'état de l'eau en place dans les matériaux.

Les échanges thermiques entre la chaussée et l'atmosphère par convection et par rayonnement sont ignorés.

Ils sont décrits, après la fusion du verglas, en imposant une densité de flux en surface ( dans le cas traité 30 W/m<sup>2</sup>), ce qui entraîne un retour à la température initiale de surface beaucoup plus rapide. En réalité, ces échanges existent également pendant la fusion du verglas. On peut donc penser que l'abaissement de température obtenu par simulation numérique est plus important que celui observé expérimentalement.

Le traitement d'un film de verglas ou d'une couche de neige à l'aide d'un fondant se réduit à un problème thermique d'interface chaussée-atmosphère. Le modèle GEL1D n'a pas été développé initialement pour ce type d'application.

Le film du verglas ou de la couche de neige ne sont pas modélisés comme une couche située au dessus de la surface de chaussée alors que leurs propriétés physiques diffèrent des matériaux de chaussée. La modélisation considère que l'énergie nécessaire à la fusion du verglas est prise entièrement à la surface du revêtement. Dans la réalité, l'énergie nécessaire à l'hydratation du fondant et la fusion du verglas lui parvient de l'air ambiant et de la chaussée au travers du verglas lui parvient de l'air ambiant et de la chaussée au travers du verglas et de la neige.

En résumé le modèle GEL1D permet aujourd'hui une approche "macrothermique" des échanges. Pour simuler les phénomènes d'échanges étudiés, il conviendrait de le compléter par un module "microthermique" d'interface.

## 7. Conclusion

### 7.1. Validité du modèle GEL1D

L'application du modèle GEL1D à l'étude de la fusion d'une pellicule de verglas et d'une couche de neige provoquée par l'épandage d'un fondant, permet de simuler l'abaissement de température de diverses surfaces de chaussées.

Ce modèle ne prend en compte que les transferts d'énergie par conduction et les changements d'état de l'eau en place dans les matériaux. Les phénomènes radiatifs et convectifs à la surface de la chaussée sont ignorés par souci de simplification, et considérés comme décrits par le flux imposé en surface de revêtement.

Cette simplification ne permet pas une description précise des phénomènes physico-chimiques à l'interface entre la chaussée et l'atmosphère. Les nombreux problèmes d'exploitation hivernale susceptibles d'apparaître ne peuvent être simulés ou décrits.

### 7.2. Enseignements pratiques et opérationnels déduits de l'approche par simulation numérique

Les principaux résultats obtenus par simulation numérique transposés au domaine de l'exploitation hivernale, permettent de tirer ou de confirmer un certain nombre de conseils:

- adapter le dosage des fondants lors d'un traitement curatif en fonction:
  - du revêtement de la chaussée
  - de la température initiale de la chaussée
  - des conditions météorologiques (rayonnement, vent,...)
  
- limiter les traitements cycliques dans le cas de phénomènes météorologiques qui dure (neige, pluie verglaçante, etc.), car cela a pour effet d'amplifier l'abaissement de la température de surface de la chaussée
  
- recourir au traitement préventif, chaque fois <sup>que</sup> cela est possible, pour prévenir la formation éventuelle de verglas qui permet d'abaisser la température de congélation de la phase aqueuse présente sur le revêtement sans mettre en jeu la chaleur latente de fusion du verglas.

### 7.3. Vers une nouvelle approche du problème

Les chaussées subissent en permanence l'influence des conditions atmosphériques (les différents hydrométéores, le rayonnement, le vent, etc.). Pour résoudre les nombreux problèmes liés aux conditions météorologiques, il convient donc de se doter de modèles d'interface chaussée-atmosphère permettant une description plus fine des échanges thermiques de l'interface. Il serait intéressant de pouvoir décrire les échanges thermiques imposés à la surface de la chaussée en tenant compte:

- du rayonnement solaire
- du rayonnement atmosphérique

- de la vitesse du vent
- de la macrotecture du revêtement
- des différents hydrométéores parvenant à la surface de la chaussée et de leurs éventuels changements d'états

Une nouvelle approche expérimentale pourrait être envisagée en mettant en oeuvre dans le revêtement des techniques de mesure plus fines (capteurs sans contact, capteurs miniaturisés, etc.).

Tomblaine, le 21 juin 1996

Document rédigé par Sandrine VAUTRIN  
dans le cadre du stage industriel de maîtrise de mécanique  
de l'Université de Metz

Responsable de stage  
Jean LIVET

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Recherche en matière de routes et de transports routiers  
Réduction de l'utilisation des fondants dans l'entretien hivernal  
Rapport réalisé par un groupe d'expert de l'OCDE      année 1989
- (2) Les bétons bitumineux drainants: évaluation des effets d'un  
nouveau revêtement sur l'exploitation hivernale d'un réseau routier  
Projet Météorologie Routière du LRPC de Nancy      année 1994
- (3) Le traitement des pluies verglacantes  
Dossier du LRPC de Nancy pour DR/RCA      année 1994