

La route en présence de verglas phénomènes, adhérence, prévisions

par

Jean LIVET

Assistant au laboratoire régional des Ponts et Chaussées
de Nancy

Sommaire

Introduction

1. Définitions
 2. Typologie des verglas routiers
 3. Conséquences des verglas routier sur l'adhérence des véhicules
 4. Localisation des zones propices à la formation du verglas
 5. Un système de détection prévisionnel du verglas. Dispositif d'aide à la décision, exemple d'organisation
- Conclusions

Introduction

Quel est l'automobiliste qui n'a pas eu, un jour cette sensation très désagréable de ne plus contrôler son véhicule ; il croyait la chaussée humide, elle était en fait verglacée. Le véhicule glisse, il cherche à l'arrêter, à éviter le véhicule qui le précède ou le fossé qui s'approche dangereusement, rien n'y fait. Le phénomène est lent, presque esthétique et pendant qu'il cherche désespérément à freiner, à rattraper son véhicule, son cœur commence à battre la chamade... et c'est l'arrêt en extremis, l'accident ou la sortie de route.

Il est d'autres cas où le verglas vous surprend aussi brutalement, c'est la plaque brillante à la sortie d'un virage, c'est le givre blanc dans un petit bois, etc.

Ce phénomène climatique est d'autant plus dangereux qu'il est sournois, imprévisible et rarement perceptible par l'usager de la route. Dans le cas de la pluie, de la neige, du brouillard, le conducteur a la possibilité d'adapter son allure et sa conduite aux difficultés dues aux phénomènes climatiques observés.

Certains verglas ont marqué la mémoire des usagers de la route, souvenez-vous :

- les pluies verglaçantes du 31 décembre 1978 dans l'est de la France ;
- les pluies verglaçantes du mois de janvier 1982 qui ont affecté la partie nord et nord-est de la France en entraînant la chute de nombreux arbres et câbles électriques ;
- le verglas généralisé du 21 novembre 1985 qui a affecté les régions Poitou-Charente, Centre, Champagne-Ardenne par suite de chutes de neige et pluie sur sol gelé.

Mais au fait, qu'appelle-t-on verglas routier ? Que connaît-on de ce phénomène ? Y a-t-il un ou plusieurs types de verglas, sont-ils tous aussi dangereux ?

Quelles sont les conséquences du point de vue de l'adhérence sur chaussées ? Peut-on espérer, un jour, prévoir de façon fiable ces divers types de verglas ?

Cet article a pour objet de faire un rapide tour d'horizon sur le sujet, en balisant les diverses démarches en cours.

1. Définitions

La littérature présente différentes définitions du verglas, suivant qu'il s'agit de météorologues, de spécialistes des réseaux électriques aériens, des réseaux routiers, ferroviaires ou autres.

Ces définitions qui diffèrent, du fait de leur domaine d'application, ont toutes un point en commun : elles traitent d'un même phénomène, le changement d'état de l'eau (ou d'une phase aqueuse) de la phase liquide à sa phase solide, dans le même environnement atmosphérique en permanente évolution et dont les lois physiques sont bien connues des météorologues.

Le vocabulaire des uns et des autres ne revêt pas forcément la même signification, de plus il évolue avec la connaissance qu'en ont les utilisateurs d'un domaine d'application. Nous rappelons ci-après quelques définitions du verglas.

— **Pour le météorologiste**, le terme « verglas » désigne un phénomène précis. Le verglas est un dépôt de glace, généralement homogène et transparent, qui provient de la congélation de gouttelettes d'eau (pluie ou brouillard) qui peuvent être soit déjà à une température négative et qui sont dites alors en surfusion, soit à une température faiblement positive. Ces gouttelettes se déposent sur le sol, les obstacles tels que la végétation et les constructions dont la température est généralement négative.

Phénomène de surfusion : l'examen des nuages montre que ceux-ci sont très souvent constitués de gouttelettes d'eau liquide même lorsque leur température est négative. L'eau est dite « surfondue ». Ce phénomène, considéré en physique comme une anomalie, est en fait très fréquent dans l'atmosphère.

— **Pour le gestionnaire routier**, le terme verglas désigne toute présence de glace, homogène ou non, plus ou moins continue sur le revêtement routier, qui s'accompagne d'une variation d'adhérence et ceci quelles qu'en soient les conditions d'apparition sur la chaussée.

Le verglas météorologique n'est donc qu'un sous-ensemble des verglas routiers susceptibles de se former.

Ces derniers, qui présentent des caractères souvent fort différents, que ce soit sur le plan de leur formation et donc de leur prévision, ou sur le plan de leur traitement aux fondants chimiques en vue de leur élimination préventive ou curative, ont conduit les gestionnaires à établir une typologie météorologique des verglas.

Cette typologie ne tient pas compte des caractéristiques de surface de la chaussée qui ne lui sont pas étrangères. La surface de roulement d'une chaussée n'est pas lisse. En première approximation, elle peut être caractérisée :

- par sa macrotexture qui est liée principalement à la formulation (taille des granulats) du revêtement et qui correspond à une gamme approximative de longueur d'onde de 0,5 mm à 5 cm ;
- par sa microtexture principalement liée à la nature du granulat et qui correspond à une longueur d'onde inférieure à 0,5 mm.

2. Typologie des verglas routiers

2.1. Congélation de l'humidité préexistante sur la chaussée

L'eau résiduelle (pluie antérieure, reliquat de fonte de la neige, fonte de bourrelet, humidité due au fondant chimique, végétation, etc.) séjournant sur le revêtement routier se congèle sous l'effet d'un abaissement de température.

Ce refroidissement est observé principalement durant la période nocturne alors que le ciel est totalement dégagé de sa couverture nuageuse, ce qui a pour effet d'accroître les phénomènes d'échanges radiatifs entre la chaussée et la voûte céleste.

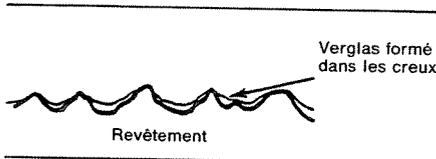
La présence de vent ou de circulation importante peut provoquer dans certains cas un refroidissement de la surface de la chaussée en accentuant le phénomène de convection et provoquant l'évaporation partielle de l'eau présente sur la chaussée (le processus de vaporisation est endothermique).

Ce type de verglas est prévisible dès lors que l'on possède une bonne connaissance de l'état de la couverture nuageuse et des risques d'éclaircies nocturnes après précipitations, ce qui peut être

obtenu dans certains cas par l'imagerie radar ou satellitaire fournie par Météotél.

Ce verglas est également localisé aux zones naturellement humides du réseau, ce qui le rend d'autant plus dangereux pour l'utilisateur.

Les épaisseurs de glace formées sont faibles, du fait du drainage naturel de la surface avant congélation. Elles sont plus importantes dans les creux alors qu'il ne subsiste qu'une fine pellicule sur le sommet des granulats. Seule la microrugosité de la surface est affectée par ce verglas.



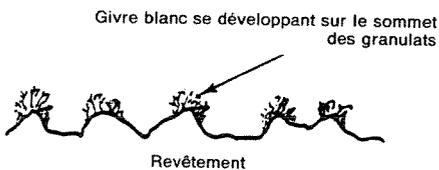
2.2. Givre blanc

Lorsqu'une masse d'air humide est mise en présence d'un corps plus froid qu'elle, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense sur sa surface en y formant de fines gouttelettes.

Dans le cas des chaussées, si le phénomène se développe alors que la surface de celles-ci est à une température négative, il y a formation de givre par condensation - sublimation. Le givre, qui est un revêtement de glace sous forme de granules plus ou moins séparées par des inclusions d'air, se développe sur le sommet des granulats.

Ce type de verglas s'observe généralement à la fin d'une période de froid intense, à l'avant d'une masse d'air plus douce et plus humide. Il est relativement facile à prévoir mais sa localisation est purement liée aux données microclimatiques locales.

Ce verglas est par ailleurs perceptible par l'utilisateur en raison du dépôt blanc brillant, pour autant que la chaussée soit sèche à l'origine.



Il évolue, sous l'effet du damage de la circulation et se transforme progressivement en un verglas compact et transparent. Seule la microrugosité du sommet des granulats semble affectée.

2.3. Pluie sur sol gelé

Pour qu'il y ait formation de verglas à l'occasion de précipitations sur sol gelé, il faut, d'une part, que la chaussée soit très froide et que sa surface soit à une température inférieure à -4°C et d'autre part que l'eau précipitée soit en quantité limitée et sa température proche de 0°C sans être en surfusion.

En effet, il convient de rappeler que la fusion de la glace absorbe de la chaleur, alors que sa congélation en libère. L'énergie mise en œuvre lors de ce changement d'état, appelée latente de fusion de l'eau est :

$$L_f = 333 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}$$

(dans le système CGS, 79,7 calories par gramme).

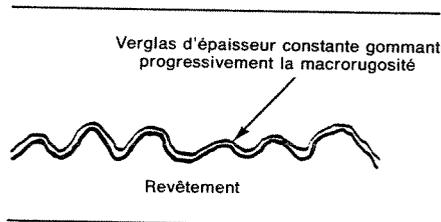
La chaleur (sensible) spécifique d'un revêtement routier est voisine de :

$$C = 0,8 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

(dans le système CGS, 0,21 calories par gramme et $^{\circ}\text{C}$).

A la différence de densité près (eau-chaussée) on comprend aisément que les énergies mises en œuvre limitent, dans ces conditions, le risque de verglas, très faibles précipitations sur sol très froid. Dans tous les autres cas, cela conduit au dégel de la chaussée.

Ce phénomène de verglas s'observe en général à l'arrivée d'une perturbation pluvieuse balayant une masse d'air froid continental installée depuis plusieurs jours. Les zones de verglas résultent d'averses sporadiques sur les zones les plus froides du réseau, elles sont de ce fait difficilement détectables par l'utilisateur.



L'épaisseur de glace déposée est constante, gomme la microrugosité de la surface et peut affecter la microrugosité de certains revêtements.

2.4. Pluie en surfusion dit verglas météorologique

L'eau en surfusion est une eau qui est restée à l'état liquide bien que sa température soit inférieure à 0°C . Le moindre choc provoque sa cristallisation instantanée.

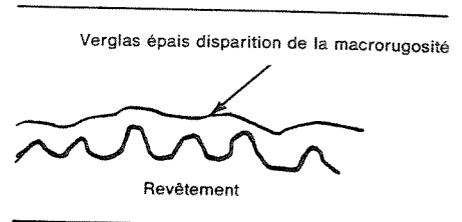
Ce phénomène assez rare se rencontre dans les zones de conflit entre l'air chaud et l'air froid : qu'il s'agisse d'une perturbation d'origine océanique (arrivée d'une masse d'air sur un continent dont les basses couches de l'air et le sol sont à température négative) ou qu'il s'agisse d'une descente d'air continental très froid qui repousse en altitude l'air plus chaud présent.

Ces précipitations, qui peuvent être importantes, provoquent des verglas épais, compacts, homogènes et lisses dont la durée de maintien au sol peut être longue.

Leur prévision est assez bonne dès lors qu'on connaît le profil thermique de l'atmosphère. Leur localisation précise semble plus délicate car le système est instable et peut conduire à de la pluie ou de la neige.

Le phénomène est directement percep-

tible par l'utilisateur quand celui-ci est dans la précipitation, car les gouttes d'eau opacifient rapidement le pare-brise du véhicule.



L'épaisseur de la glace peut atteindre plusieurs centimètres, ce qui supprime la microrugosité du revêtement routier, transformant les chaussées en patinoire où rien n'adhère.

2.5. Brouillard givrant

Ce phénomène est observé dans des brouillards d'advection avec forte condensation ; la température de l'air est généralement comprise entre 0 et -3°C et son humidité relative supérieure à 95 %.

Les fines gouttelettes d'eau surfondues se déposent sur la surface de la chaussée et y forment un fin verglas quand celle-ci est à température négative.

Les mauvaises conditions de visibilité ne permettent pas une bonne perception du phénomène par l'utilisateur.

Ce cas est assez rare, il entraîne des dépôts de glace d'épaisseur faible et constante gommant la microrugosité du revêtement.

2.6. Neige tassée, bouillie de neige gelée, saumure gelée

Cette catégorie de verglas regroupe l'ensemble des autres cas de verglas.

— **La neige tassée** sous l'effet du compactage de la circulation mais aussi des phénomènes de dégel diurne et du regel nocturne, se transforme progressivement en une dalle de glace. L'adhérence offerte initialement par la neige se trouve dégradée de façon importante.

La perception du phénomène par l'utilisateur est très bonne et lui permet d'adapter sa conduite.

— **La bouillie de neige gelée** est due à des précipitations de neige humide ou au répandage de fondants chimiques sur une neige fraîche. Le trafic malaxe la neige et la transforme en une bouillie qui peut geler durant la période nocturne et se transformer en une plaque de glace dont la surface plus ou moins accidentée rend toute circulation dangereuse.

— **La saumure gelée** (ou solution aqueuse de fondant chimique).

Les fondants chimiques solubles dans l'eau utilisés en visibilité hivernale ont la propriété d'abaisser la température du point de congélation de la phase aqueuse présente sur le revêtement routier.

Dans certaines conditions climatiques, il peut se produire un phénomène de dilution de la solution qui réduit la tempé-

rature de congélation au point de geler et donner un verglas.

De même en l'absence de dilution de la saumure, un abaissement de la température du revêtement en deçà de la température de congélation provoque le même effet.

Les phénomènes de dilution sont dus à l'apport d'eau, soit par précipitations, soit par déséquilibre de tension de vapeur d'eau entre la saumure et l'atmosphère, dans certaines conditions thermohydriques de cette dernière.

3. Conséquences du verglas routier sur l'adhérence des véhicules

L'adhérence d'un véhicule est liée étroitement à la qualité du contact entre le pneumatique et la chaussée. L'interposition d'une lame de glace (ou verglas) qui dans certains cas peut se trouver revêtue d'une fine pellicule d'eau ou de saumure modifie totalement le contact.

La glace (ou verglas) est un matériau qui présente la particularité d'être plus ou moins ductile en fonction de sa température, de son épaisseur, de la charge exercée par le pneumatique, du type de support routier, etc. Ce matériau évolue par ailleurs sous l'effet du trafic, bien que son adhésion à la surface routière soit importante, ce qui rend extrêmement difficile voire impossible son décollement.

Le verglas qui se forme comme la micro-rugosité de la surface routière et progressivement la macrorugosité suivant l'ampleur du phénomène.

L'approche faite à ce jour sur le sujet l'a été essentiellement en laboratoire, à l'exception de quelques mesures d'adhérence sur chaussée durant l'hiver. Il s'agit essentiellement de déterminer les variations d'adhérence dues à trois types de verglas sur quelques revêtements de chaussées. Cette analyse a été faite à partir d'outils développés et mis en œuvre spécialement pour cette expérimentation.

Compte tenu de la lourdeur des essais et des conditions difficiles de prélèvement des échantillons, nous avons effectué une première approche du sujet qui n'avait pas pour objet de hiérarchiser les revêtements entre eux.

3.1. Les outils utilisés

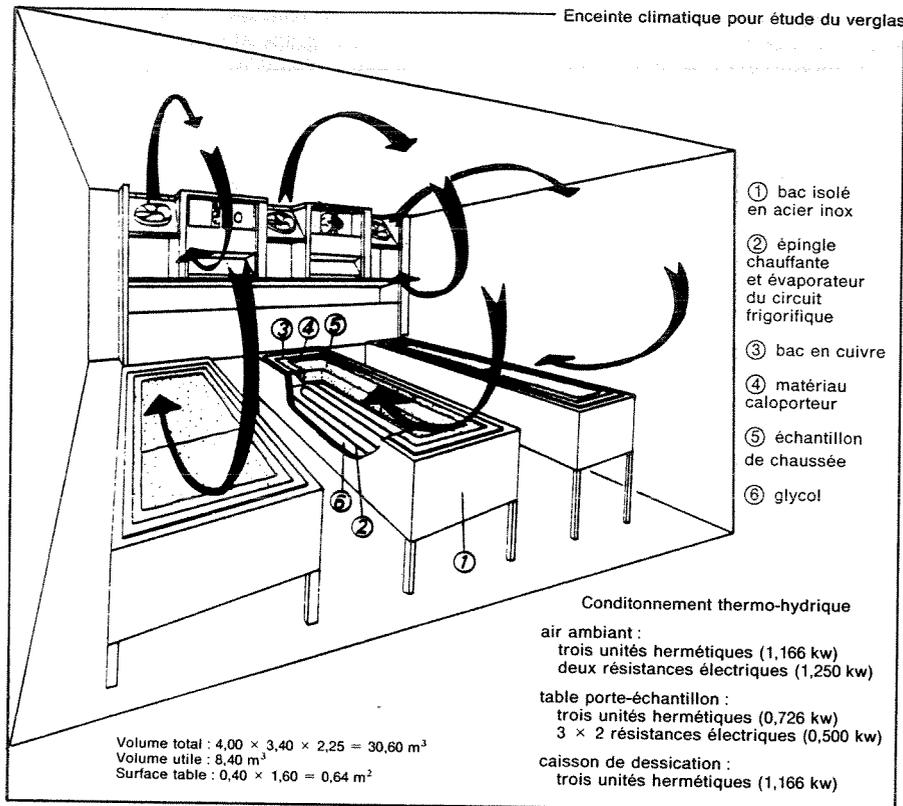
3.1.1. Une enceinte climatique

Cette enceinte se compose :

- d'un caisson d'une longueur de 4 m, d'une largeur de 3,40 m et d'une hauteur de 2,25 m dont le volume d'air peut être réglé entre -20°C et $+20^{\circ}\text{C}$. L'homogénéité thermique est obtenue par un brassage interne de l'air à raison de $4\,500\text{ m}^3/\text{h}$;

- d'un système de dessiccation du volume d'air par piégeage de l'humidité sur deux batteries froides et balayage du caisson, ce qui permet d'abaisser de façon importante l'hygrométrie de l'air ;

Enceinte climatique pour étude du verglas



- de trois tables porte-échantillons réglées indépendamment de l'air ambiant dans la plage -15°C $+15^{\circ}\text{C}$ et qui permettent d'imposer les conditions de température de surface aux échantillons testés.

3.2. Les revêtements routiers testés

Ces revêtements sont prélevés sur chaussées et conditionnés de façon à être utilisables ; ils ont une épaisseur d'environ 8 cm et offrent une surface d'essai de $0,80 \times 0,40\text{ m}$.

Ces échantillons présentent une gamme

de hauteur au sable (HS) compris entre 0,77 et 2,24 et des degrés d'usure variables.

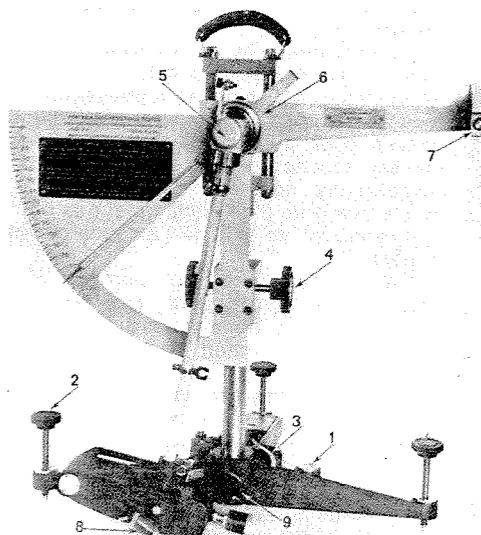
Les conditions de prélèvement, relativement lourdes, n'ont pas permis, à ce jour, de constituer un échantillon représentatif des diverses familles de revêtements français, qui en compte plusieurs dizaines.

Pour schématiser, ceux-ci peuvent être regroupés dans les trois grandes familles suivantes : les enduits superficiels, les bétons bitumineux et les bétons de ciment.

3.2.1. Appareil de mesure de l'adhérence

Deux appareils sont utilisés :

- d'une part le **pendule SRT** (Skid Resistance Tester) qui permet de mesurer le coefficient de frottement d'un revêtement routier. Un patin de caoutchouc monté à l'extrémité du pendule est lâché d'une certaine hauteur, il vient frotter la surface à tester et y est plus ou moins ralenti, une échelle graduée permet de déterminer l'importance de l'énergie absorbée par le frottement. Ce matériel qui s'est imposé au niveau international est d'usage courant ;



L'appareil pendule SRT (Skid Resistance Tester)

- 1 - niveau à bulle
- 2 - vis de calage « nivellement »
- 3 - cale de pré-réglage
- 4 - bouton de réglage « altitude et longueur de frottement »
- 5 - bouton de blocage
- 6 - anneaux de frottement
- 7 - bouton de déclenchement
- 8 - patin de caoutchouc
- 9 - levier de relèvement du patin

- d'autre part, l'analyseur de frottement à petite vitesse dit AFPV. Un patin de caoutchouc, est appliqué avec une charge donnée sur la surface à tester, et tracté à une vitesse constante de 3 km/h. Une mesure électrique (pont de jauges) permet de mesurer pendant la durée de l'essai la variation de l'effort de traction. Le coefficient de frottement est ensuite déterminé par calcul.

Ces deux appareils sont équipés de patins de caoutchouc de dimensions voisines et de caractéristiques de gomme identiques.

Les conditions spécifiques de chaque appareil conduisent cependant à des coefficients qui lui sont propres. De ce fait, les résultats donnés dans la suite de cet article ne doivent pas être comparés brutalement.

Les conditions d'essai prévues par le mode opératoire étant strictes (chaussées humide, température de 20 °C ou corrigée pour tenir compte de la variation de résilience en fonction de la température) les essais sur chaussée sèche et verglacée sont effectués en dehors des conditions normalisées (absence de mouillage du revêtement sec ou verglacé, aucune correction de température n'étant apportée).

3.3. Les divers types de verglas reproduits en laboratoire

La variation de résilience du caoutchouc en fonction de la température se traduit par des niveaux d'adhérence différents ; un exemple est donné sur la figure 1 entre les mesures faites à +20 °C et -3 °C. C'est aussi la raison des pneus hivernaux dits « thermogommes » offerts sur la marché.

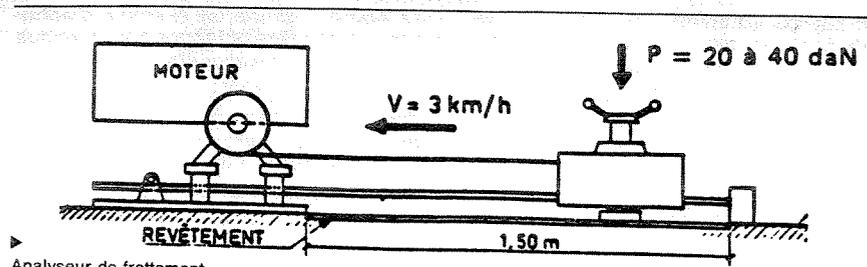
Trois types principaux de verglas ont pu être reproduits :

- la congélation de l'humidité préexistante sur la chaussée ; le revêtement est humidifié, puis sa surface portée à température négative ;
- le givre blanc ; la surface du revêtement est portée à température négative alors que l'ambiance est maintenue à température positive, l'humidité de l'air vient se condenser sur la chaussée en fins cristaux blancs et ramifiés ;
- la pluie froide sur sol gelé ; celle-ci est obtenue par pulvérisation de quantité déterminée d'eau à température voisine de zéro degré sur une surface d'échantillon à température négative. En faisant varier la quantité d'eau pulvérisée, on peut obtenir différentes épaisseurs de verglas.

3.4. Résultats de ce type d'approche

3.4.1. Modification de l'adhérence due au givre blanc

Le givre blanc affecte le plus souvent la forme d'écaillés, d'aiguilles, de plumes ou d'éventails qui se développent principale-



► Analyseur de frottement à petite vitesse

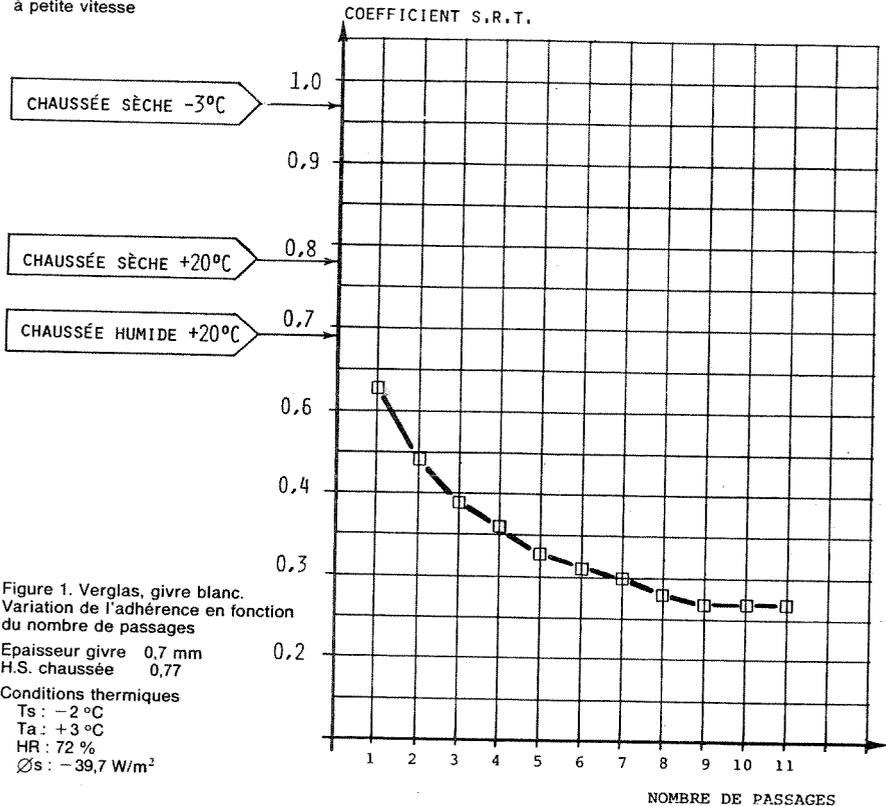


Figure 1. Verglas, givre blanc. Variation de l'adhérence en fonction du nombre de passages
 Epaisseur givre 0,7 mm
 H.S. chaussée 0,77
 Conditions thermiques
 Ts : -2 °C
 Ta : +3 °C
 HR : 72 %
 Øs : -39,7 W/m²

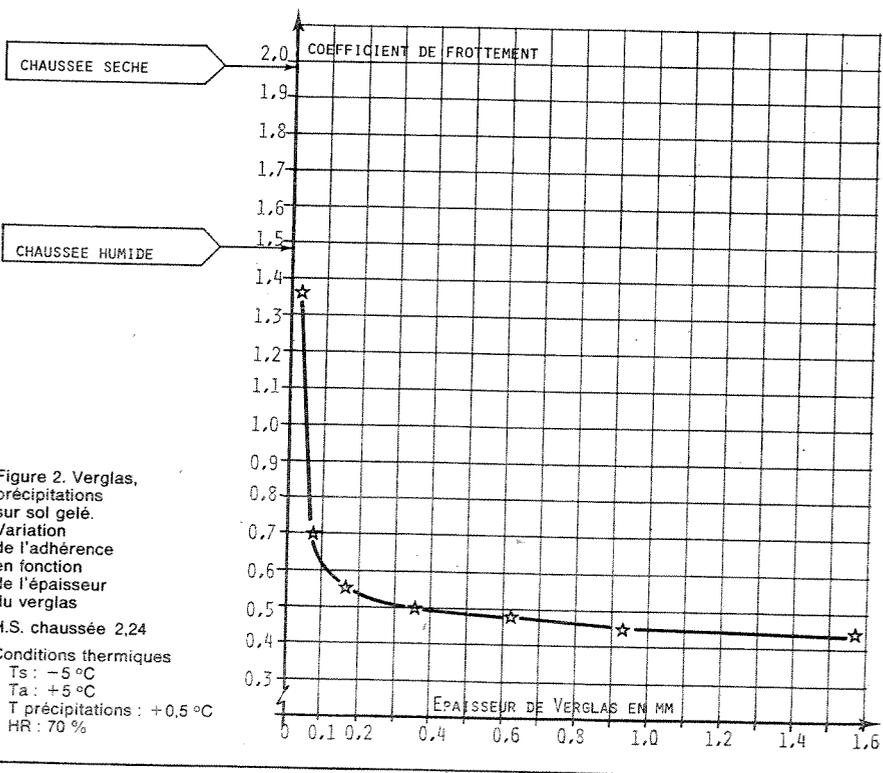


Figure 2. Verglas, précipitations sur sol gelé. Variation de l'adhérence en fonction de l'épaisseur du verglas
 H.S. chaussée 2,24
 Conditions thermiques
 Ts : -5 °C
 Ta : +5 °C
 T précipitations : +0,5 °C
 HR : 70 %

- d'autre part, l'analyseur de frottement à petite vitesse dit AFPV. Un patin de caoutchouc, est appliqué avec une charge donnée sur la surface à tester, et tracté à une vitesse constante de 3 km/h. Une mesure électrique (pont de jauges) permet de mesurer pendant la durée de l'essai la variation de l'effort de traction. Le coefficient de frottement est ensuite déterminé par calcul.

Ces deux appareils sont équipés de patins de caoutchouc de dimensions voisines et de caractéristiques de gomme identiques.

Les conditions spécifiques de chaque appareil conduisent cependant à des coefficients qui lui sont propres. De ce fait, les résultats donnés dans la suite de cet article ne doivent pas être comparés brutalement.

Les conditions d'essai prévues par le mode opératoire étant strictes (chaussées humide, température de 20 °C ou corrigée pour tenir compte de la variation de résilience en fonction de la température) les essais sur chaussée sèche et verglacée sont effectués en dehors des conditions normalisées (absence de mouillage du revêtement sec ou verglacé, aucune correction de température n'étant apportée).

3.3. Les divers types de verglas reproduits en laboratoire

La variation de résilience du caoutchouc en fonction de la température se traduit par des niveaux d'adhérence différents ; un exemple est donné sur la figure 1 entre les mesures faites à +20 °C et -3 °C. C'est aussi la raison des pneus hivernaux dits « thermogommes » offerts sur la marché.

Trois types principaux de verglas ont pu être reproduits :

- la congélation de l'humidité préexistante sur la chaussée ; le revêtement est humidifié, puis sa surface portée à température négative ;

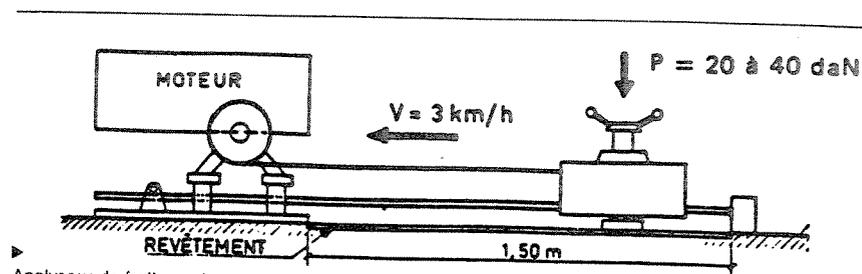
- le givre blanc ; la surface du revêtement est portée à température négative alors que l'ambiance est maintenue à température positive, l'humidité de l'air vient se condenser sur la chaussée en fins cristaux blancs et ramifiés ;

- la pluie froide sur sol gelé ; celle-ci est obtenue par pulvérisation de quantité déterminée d'eau à température voisine de zéro degré sur une surface d'échantillon à température négative. En faisant varier la quantité d'eau pulvérisée, on peut obtenir différentes épaisseurs de verglas.

3.4. Résultats de ce type d'approche

3.4.1. Modification de l'adhérence due au givre blanc

Le givre blanc affecte le plus souvent la forme d'écaillés, d'aiguilles, de plumes ou d'éventails qui se développent principale-



► Analyseur de frottement à petite vitesse

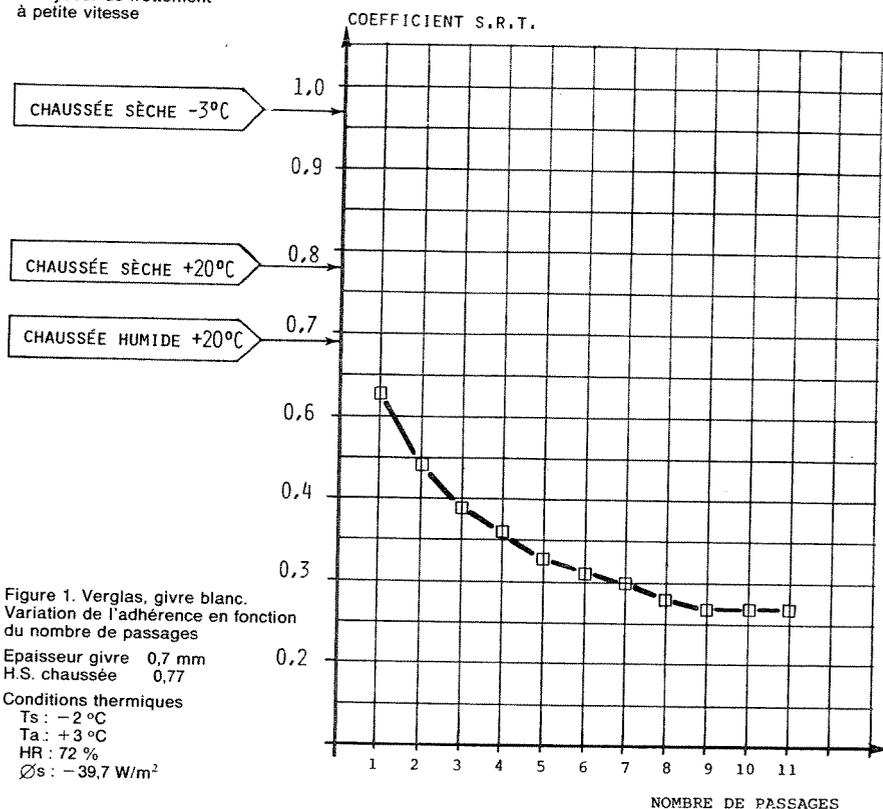


Figure 1. Verglas, givre blanc. Variation de l'adhérence en fonction du nombre de passages

Epaisseur givre 0,7 mm
H.S. chaussée 0,77

Conditions thermiques
Ts : -2 °C
Ta : +3 °C
HR : 72 %
Øs : -39,7 W/m²

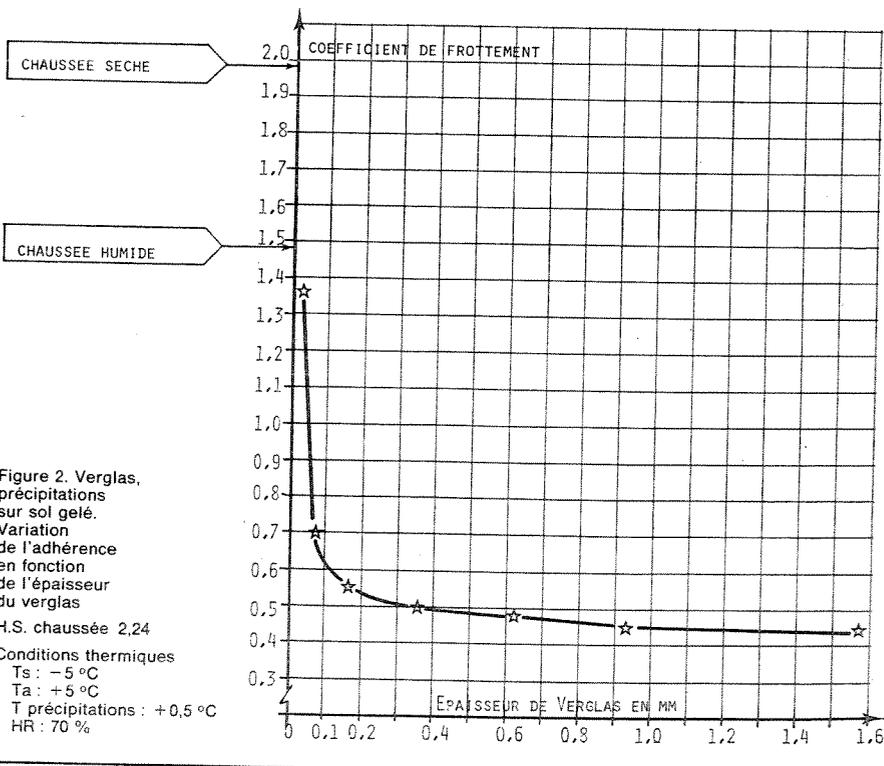


Figure 2. Verglas, précipitations sur sol gelé. Variation de l'adhérence en fonction de l'épaisseur du verglas

H.S. chaussée 2,24

Conditions thermiques
Ts : -5 °C
Ta : +5 °C
T précipitations : +0,5 °C
HR : 70 %

ment sur les sommets des granulats du revêtement routier, lesquels sont en contact avec le pneumatique.

En l'absence de circulation antérieure, ce qui est le cas de l'expérience de la figure 1, l'effet du trafic, simulé par des passages répétés du patin de caoutchouc entraîne une réduction progressive du coefficient de frottement SRT. Le givre, d'une épaisseur de 0,7 mm, est compacté progressivement et offre au bout de dix passages une surface lisse et brillante ; le coefficient de frottement présente dans le cas de cette expérience une valeur limite.

Les essais répétés sur d'autres types de revêtement conduisent à la même allure du phénomène ; les valeurs limites étant variables suivant l'épaisseur du givre blanc déposé et les caractéristiques de la surface.

3.4.2. Modification de l'adhérence due au verglas produit par précipitations sur sol gelé

Ce verglas transparent et homogène est obtenu par pulvérisation de très fines gouttelettes. Suivant l'importance des quantités d'eau pulvérisées on fait varier l'épaisseur de verglas déposé. Au-delà de 0,4 à 0,6 mm d'épaisseur, le verglas formé s'apparente à celui de type météorologique (pluie en surfusion).

Un exemple de variation d'adhérence produite par le verglas dans ces conditions expérimentales est donné en figure 2. La courbe de variation présente deux zones principales :

- l'une qui correspond aux faibles épaisseurs de verglas (inférieures à 0,2 mm) où la variation d'adhérence est brutale et correspond au gommage de la microrugosité du revêtement ;

- l'autre qui correspond aux épaisseurs de verglas supérieures à 0,2 mm où la variation d'adhérence est lente et asymptotique, alors que la macrorugosité est gommée progressivement.

Les multiples essais réalisés dans ces conditions opératoires ont montré que nous obtenions une parfaite reproductibilité de ceux-ci et que l'allure générale des courbes de variation d'adhérence était semblable tout en présentant des valeurs asymptotiques fort différentes.

3.4.3. Modification de l'adhérence due au verglas d'humidité préexistante

Les épaisseurs de verglas qui se forment dans ces conditions sont relativement constantes par suite du drainage latéral naturel du revêtement et de l'accumulation gravitaire de l'eau dans les creux qui réduit la quantité d'eau congelable à une fine pellicule d'eau sur le sommet des granulats.

Du fait d'une épaisseur généralement réduite de ce verglas, le niveau d'adhérence offert est meilleur que celui observé pour les autres types de verglas.

La figure 3 donne un exemple d'adhérences comparées obtenues sur un enduit superficiel. On remarque que :

- le coefficient SRI sur le verglas d'humidité préexistante est voisin de celui obtenu pour un verglas de précipitation sur sol gelé ayant 0,05 mm d'épaisseur ;
- le coefficient SRT sur le givre blanc est voisin de celui obtenu pour un verglas de précipitation sur sol gelé ayant 0,4 mm d'épaisseur.

3.4.4. Variation de l'adhérence suivant l'état de surface de la chaussée

A partir de l'échantillon réduit de revêtements routiers, la figure 4 donne une échelle des coefficients SRT obtenus en laboratoire sur les divers échantillons.

Cette hiérarchie confirme d'une part la

réduction d'adhérence due à la présence d'eau sur les revêtements, d'autre part le risque de dérapage dans tous les cas de verglas, les valeurs du coefficient SRT étant toutes inférieures au seuil de 0,45.

4. Localisation des zones propices à la formation du verglas

Il n'est pas d'usager de la route qui n'ait constaté d'apparition du verglas de façon répétée au cours de l'hiver sur certains points d'un réseau. Cette fragilité hivernale du réseau en des points bien précis peut être attribuée soit au réseau lui-même, soit à son environnement immédiat.

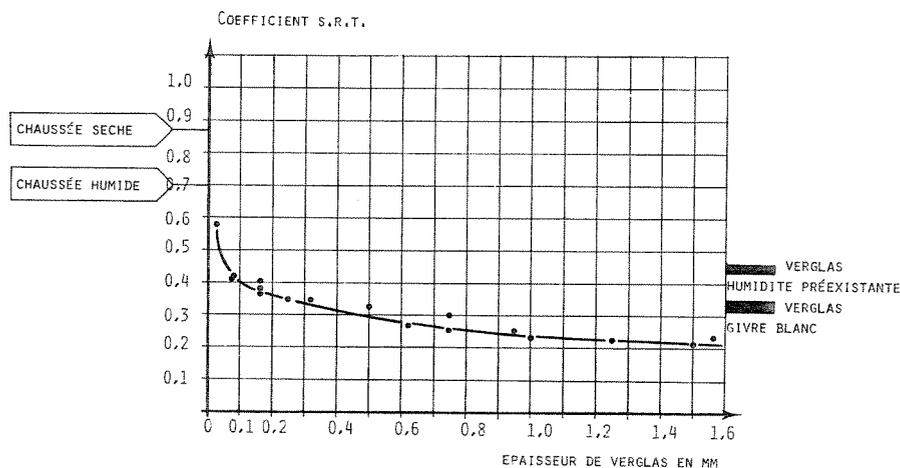
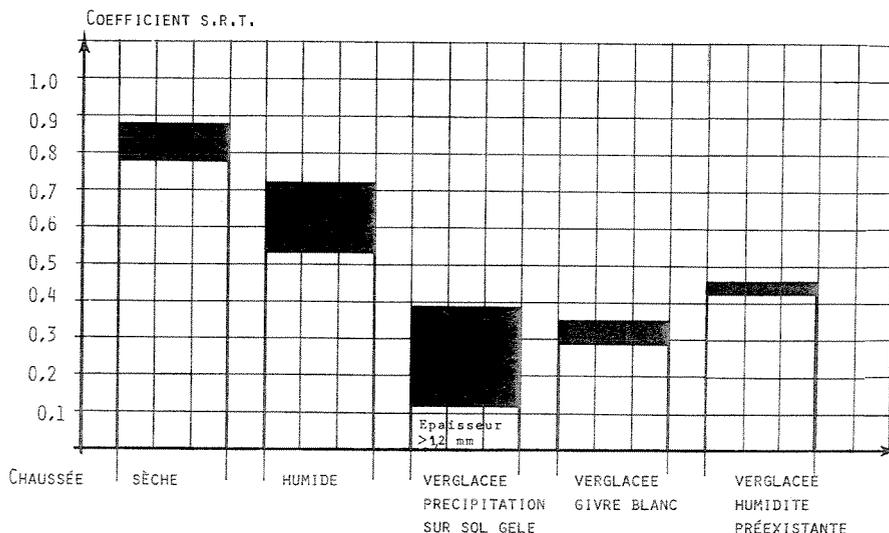


Figure 3. Variation de l'adhérence pour trois types de verglas sur enduit superficiel

H.S. 1,35

Figure 4. Variation de l'adhérence suivant l'état de surface de la chaussée



POUR DES H.S. COMPRIS ENTRE 0,77 ET 2,24

4.1. Influences dues au réseau routier

— **Les ouvrages d'art** : ceux-ci sont autant de points singuliers sur le réseau. Leur inertie thermique est liée à leur masse qui dépend de la nature des matériaux utilisés et de la dimension de l'ouvrage. La température de la surface de celui-ci varie de ce fait de façon très différente de celle des chaussées qui bénéficient de l'apport calorifique géothermique naturel.

— **Les revêtements routiers** : leur couleur ou propriétés radiatives entraînent dans certaines conditions climatiques des écarts de température avoisinant 3 à 4 °C. Cela se traduit par exemple, pour l'utilisateur, par l'apparition de givre blanc d'une planche d'enrobé à une autre. La texture de la surface du revêtement, la nature des granulats ne sont pas étrangers à la vitesse de séchage du revêtement et par là au risque de formation du verglas.

— **Le corps de chaussée** : la nature des matériaux, teneur en eau, densité, diffusivité thermique, conditionnent la température de surface de la structure. L'interposition, par exemple, d'un isolant thermique dans la structure de la chaussée ou l'emploi de granulats plus ou moins poreux donc isolants modifient totalement le régime thermique de la surface de chaussée et le risque de formation du verglas.

4.2. Influences dues à l'environnement direct de la chaussée

— **Les zones à l'ombre** : en montagne suivant que l'itinéraire serpente sur le versant exposé ou non au soleil ; pour tous les itinéraires lorsqu'ils sont bordés de végétation ou d'habitations hautes maintenant une ombre portée quasi permanente sur la surface de la chaussée.

— **Les zones humides** : la proximité de végétation, de cours d'eau, ou de lacs entretiennent une humidité de l'atmosphère.

Dans les zones boisées le couvert végétal réduit également le phénomène de séchage des revêtements routiers. Ces différents éléments combinés sont cause de certains verglas. La présence de grandes masses d'eau peut dans certains cas jouer le rôle de régulateur thermique et limiter le risque.

— **Les zones exposées aux vents froids** : tous les grands ouvrages sont par nature exposés ; si, de plus, ceux-ci sont orientés favorablement aux vents de secteur nord nord-est, leur vitesse de refroidissement peut être importante et les écarts de température de surface entre partie courante et ouvrage avoisiner 6 à 8 °C.

Les zones de plateau dégagées, les trouées dans la végétation sont autant de points sensibles lorsqu'ils sont exposés au vent.

— **Le tracé de l'itinéraire topographique** n'est pas étranger au risque d'apparition du verglas, le régime thermique d'un remblai ou d'un déblai n'est pas le même

que celui d'une partie courante.

Son orientation suivant qu'il s'agit de l'axe nord-sud ou est-ouest et qu'il est combiné à la présence de masque solaire a une grande importance en période hivernale du fait de la faible hauteur angulaire du soleil.

4.3. La recherche des zones propices à l'apparition du verglas

Plusieurs approches, plus ou moins élaborées, sont actuellement testées. Le but est de rechercher les zones à risque élevé de formation de verglas afin, soit de les utiliser comme indicateur d'alerte, soit de traiter préventivement ces zones (cas de nombreux ouvrages), soit encore de les équiper d'outils spécifiques (stations microclimatiques, détecteurs prévisionnels, etc.).

— **L'approche du terrain** consiste à formaliser l'expérience hivernale acquise depuis de nombreuses années par les services opérationnels de viabilité hivernale. Leur connaissance détaillée du réseau, la localisation des zones de verglas et des conditions climatiques de sa formation permettent d'établir des cartes routières relativement précises des zones de verglas.

— **L'approche statistique** à partir du fichier « accidents corporels » permet de rechercher les zones à concentration d'accidents en présence de neige ou verglas.

Ce fichier qui ne contient pas les accidents matériels sur verglas, plus nombreux que les précédents, ne permet d'isoler qu'un nombre réduit de zones à risque.

— **L'approche micro-climatique directe du réseau routier.** Cette approche consiste à rechercher les zones à risque de verglas en analysant quelques paramètres tels que la température de la surface de chaussée, la température et l'hygrométrie de l'air ambiant, etc.

La méthodologie de mesure et d'analyse des paramètres qui permettent de classer le réseau routier en zones microclimatiques semblables est complexe.

Les méthodes de mesure peuvent être de deux types :

- soit la thermographie infrarouge aérienne qui se limite à une mesure de la température de la surface routière ;
- soit le relevé par véhicule spécialisé de l'empreinte thermo-hydrrique du tracé.

Ces outils, en cours de mise au point, devraient permettre dans un proche avenir d'étayer des approches plus pragmatiques.

5. Un système de détection prévisionnel du verglas Dispositif d'aide à la décision Exemple d'organisation

Chaque hiver voit se répandre de l'ordre de 700 000 à 1 000 000 de tonnes de fondants chimiques sur le réseau français.

Le coût de plus en plus élevé de ce service rendu à l'utilisateur a conduit les services de l'Équipement à une optimisation de plus en plus poussée. Cela passe par :

- l'abandon ou la réduction du traitement aux fondants chimiques de certains itinéraires doublés par ailleurs ;
- la recherche de nouvelles méthodes de travail et de traitement tels que la saumure (solution saturée de chlorure de sodium), la bouillie (épandage simultané d'une solution saturée de chlorure de sodium et de sel en cristaux) ;
- l'abandon du traitement préventif pour le précuratif plus proche du phénomène à traiter ;
- l'utilisation d'outils et de systèmes d'aide à la décision (doseur de salinité résiduelle SOBO, détecteur prévisionnel du verglas, etc.) ;
- une analyse de plus en plus fine du risque de formation du verglas ;
- une prise en compte et un suivi de plus en plus précis des phénomènes météorologiques.

Les progrès récents de l'électronique, de la micro-informatique et des transmissions de données, permettent de franchir une nouvelle étape dans l'amélioration et l'optimisation du service rendu à l'utilisateur, en mettant à disposition du gestionnaire de la route des outils performants d'aide à la décision en matière de viabilité hivernale.

Les paramètres en jeu sont multiples et liés, ils font intervenir l'un ou (et) l'autre des milieux en présence (atmosphère ou chaussée) à l'interface desquels se forme le verglas. C'est la raison pour laquelle la détection du verglas fait depuis de longues années l'objet d'études approfondies.

L'outil décrit ci-après a été conçu avant tout comme un dispositif d'aide à ces multiples applications : décision du gestionnaire, information de l'utilisateur, des media, etc. Ce matériel en est à sa première étape mais son cadre de développement au sein du Schéma d'ensemble pour une météorologie routière (SEMÉR) est tracé.

Le système est organisé autour d'un ensemble de produits existant sur le marché. Pour certaines applications précises, des matériels nouveaux ont été conçus et développés.

Il est composé :

- d'une station météorologique implantée au bord de la route comprenant des capteurs atmosphériques et de chaussée ;
- d'un système de concentration, restitution et analyse des données en termes de risque de verglas, implanté au centre décisionnel et d'exploitation de la route.

5.1. Le matériel implanté sur les sites routiers d'observation

Cette unité de terrain est organisée autour d'un microprocesseur, qui :

- gère l'ensemble des capteurs situés dans l'atmosphère et dans la chaussée,
- effectue divers tests et analyses,
- transmet les informations et les anomalies éventuelles du système.

Dans la configuration jugée comme minimale, les mesures sont les suivantes :

- dans l'atmosphère :
 - température de l'air ambiant,
 - hygrométrie de l'air ambiant,
 - début, fin et hiérarchie des précipitations ;
- dans la chaussée :
 - température de la surface de chaussée,
 - température de congélation de la phase aqueuse présente sur le revêtement,
 - état de surface (sec, humide, ou verglacé).

Cette liste de capteurs n'est pas limitative, le système est à même d'en recevoir d'autres, tels que par exemple, pour l'atmosphère :

- vitesse et direction du vent,
- pression atmosphérique,
- hauteur de neige,
- distance de visibilité dans le brouillard, etc.

L'ensemble des capteurs a été, soit développé, soit conditionné spécialement pour cette application. Deux de ceux-ci méritent d'être détaillés car ils ont donné lieu à un dépôt de brevet par le laboratoire central des Ponts et Chaussées et le laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy.

5.1.1 Capteur de congélation

Ce capteur donne deux types d'informations :

- d'une part, l'état de la surface de la chaussée en distinguant l'état sec, humide, ou verglacé ;
- d'autre part, la température à laquelle s'effectue le changement d'état du milieu aqueux présent sur le revêtement.

Il met en œuvre deux mesures, une mesure de température faite à l'aide d'une sonde thermorésistante à fil de platine (Pt 100) et une mesure résistive de l'humidité prise entre trois électrodes implantées en surface.

La recherche de la température de congélation est assurée par la réfrigération de la surface du capteur au moyen d'un thermo-élément Peltier. Ce dernier, piloté par un microprocesseur, effectue cycliquement un balayage de la gamme de température + 4 °C à - 20 °C jusqu'à la détection du changement d'état.

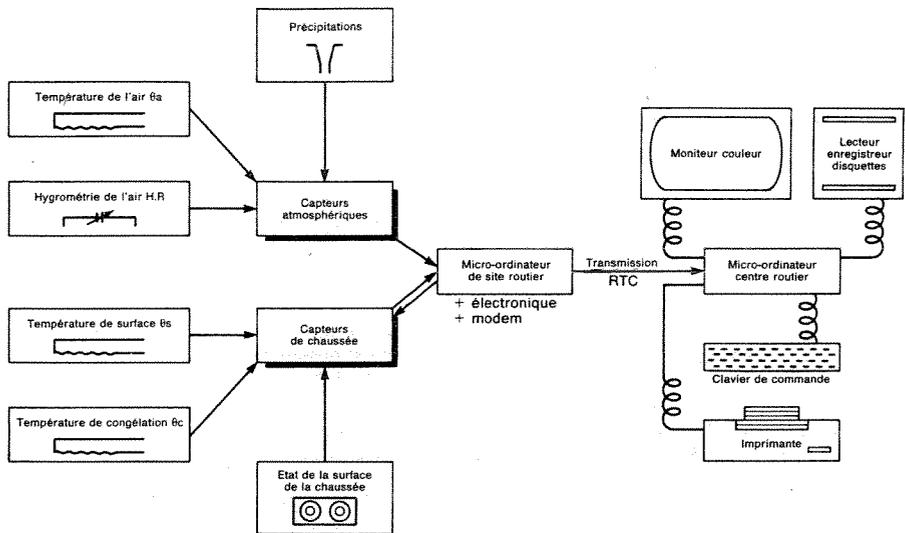
Un logiciel d'analyse en temps réel des divers paramètres en cours d'évolution permet de déterminer avec précision la température de congélation de la solution aqueuse sur le capteur durant la phase de réfrigération.

5.1.2. Capteur de précipitations

Ce capteur permet de déterminer d'une part le début et la fin des précipitations, d'autre part de hiérarchiser leur importance en trois classes : faible, moyenne et forte.

Le capteur est basé sur le recueil des précipitations dans un entonnoir dont la bague réceptrice a une surface de 220 cm² ; puis le comptage des gouttes obtenues au passage dans un ajutage au moyen d'une barrière optique constituée d'un émetteur (LED infra-rouge) et d'un récepteur (photo-diode) PIN.

Un cordon chauffant maintient le capteur à une température positive et met en



fusion toutes les précipitations cristallines.

5.1.3. Organisation du site d'observation routier (voir schéma ci-dessus)

Dans la version prototype du système, les capteurs atmosphériques sont configurés dans un abri météorologique standard implanté sur l'accotement ; les capteurs de chaussée, pour leur part, sont scellés dans le revêtement routier dans des logements réalisés par carottage.

L'électronique associée et le modem de transmission sont montés dans un coffret étanche.

Le fonctionnement de ce matériel nécessite son raccordement au réseau électrique et téléphonique moyennant une protection adéquate contre les surtensions électriques et la foudre.

Le logiciel du site routier d'observation dans sa version prototype occupe un volume de 10 K. Celui-ci écrit en basic et en assembleur est actuellement en cours d'évolution. Il devrait être capable d'effectuer une projection à court terme (inférieure ou égale à deux heures) des divers paramètres suivis et de transmettre ceux-ci en plus de ceux observés.

5.2. Le centre décisionnel

Les données transmises par les sites routiers d'observation parviennent par liaison RTC à la subdivision territoriale où elles sont stockées et analysées par un micro-ordinateur de type compatible PC.

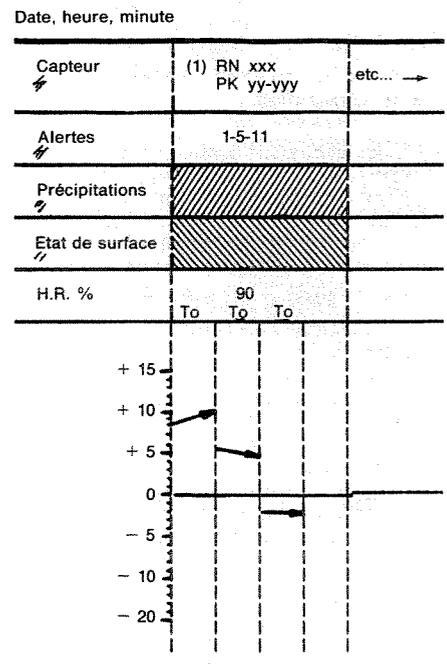
La fréquence de transmission des données est variable ; elle est fixée, soit manuellement, soit automatiquement, en fonction des conditions à risque.

Les divers logiciels d'analyse et de restitution des paramètres permettent alors de fournir au gestionnaire un nombre plus ou moins important de pages écran. La convivialité de ces diverses restitutions étant fondamentale dans la relation homme-machine, les restitutions ci-après ne sont que des exemples qui évolueront

très certainement à la demande des utilisateurs.

5.2.1. Restitution synoptique

Cette restitution donne la situation microclimatique locale des capteurs implantés dans la subdivision territoriale.



Outre l'identification de chaque capteur, on retrouve sur l'écran :

- les alertes sous forme codée (cf. 2.3.),
- l'importance des précipitations (jaune, bleu, rouge),
- l'état de surface suivant un code de couleur similaire,
- l'hygrométrie de l'air ambiant,
- les températures de l'air ambiant de la surface de chaussée et de congélation ainsi que la tendance observée entre les deux dernières mesures,

- les pannes éventuelles du système suivant une codification chiffrée.

5.2.2. Restitution graphique des divers paramètres observés sur chaque site routier d'observation

A chaque capteur est associée une page écran graphique qui présente l'évolution microclimatique locale de chaque site (voir figure en bas de page).

Ce graphe présente l'évolution des divers paramètres au cours des deux dernières heures (ou toute autre durée à la demande).

Chaque paramètre y est représenté ou hiérarchisé suivant une même codification de couleur. L'évolution probable des variables continues (T °C, HR) sur deux ou six heures sera représentée ultérieurement sur ce graphe par un tracé discontinu.

5.2.3. Alarmes - Alerte

Chaque nouvelle acquisition de données donne lieu à une analyse du risque de formation du verglas. Cela s'effectue au travers d'un logiciel qui prend en compte à chaque transmission de données le nouvel état des différents paramètres et leur évolution au cours des heures écoulées. Les diverses clefs d'analyse conduisent actuellement à environ douze cas d'alarme différents. L'observation d'un cas d'alarme se traduit pour l'utilisateur par une mise en éveil (affichage sur l'un quelconque des écrans, sonnerie, etc.).

L'utilisateur est alors convié à consulter une page écran explicative. Celle-ci comprend deux parties :

- la première décrit le phénomène observé qui conduit à l'alarme (aspect pédagogique et initiation),
- la deuxième propose une démarche destinée à confirmer ou infirmer le risque.

Dans le cas extrême de présence effective de verglas sur la chaussée due à des précipitations surfondues non prévues, il y a demande d'intervention immédiate.

• Exemples

1. Phénomène

La température de surface de la chaussée est négative et inférieure à la température de l'air ambiant. L'hygrométrie de l'air est telle qu'il y a risque de dilution de la saumure présente sur la chaussée.

Conseil

- vérifier les prévisions météorologiques,
- surveiller l'évolution de la température de congélation,
- intervenir éventuellement sur le réseau.

2. Phénomène

La température atmosphérique est inférieure à +4 °C alors qu'on observe une baisse importante de celle-ci, de 2 °C par heure. La chaussée est humide et sa température de protection proche de 0 °C.

Conseil

- vérifier les prévisions météorologiques (températures minimales),
- vérifier la température de protection de la chaussée,
- surveiller l'évolution du phénomène.

5.2.4. Main courante

L'imprimante assure cette fonction, soit de façon automatique et systématique dès qu'il existe une alerte ou un défaut sur le système, soit à la demande de l'utilisateur.

5.3. Réseau de surveillance microclimatique des chaussées en hiver

Le système décrit précédemment peut s'intégrer dans un réseau de transmission

de données plus ou moins élaboré. Un précédent article, **La météorologie routière, le cas de la Meurthe-et-Moselle** est un exemple d'architecture à plusieurs niveaux qui utilise le schéma développé au cours de cette recherche.

5.4. Transfert des résultats de la recherche au milieu industriel

La recherche menée au cours des cinq dernières années par le laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy a bénéficié de financements de la Direction des Routes (DR) et de la Direction de la Sécurité et de la Circulation routières (DSCR).

L'acquis technologique qui se concrétise en partie par le système d'aide à la décision en matière de viabilité hivernale a été transféré au milieu industriel au cours de l'année 1986.

Conclusions

Au-delà des trois thèmes présentés, un certain nombre d'études et de recherches sont menées actuellement ; celles-ci se développent selon les deux axes principaux suivants.

• Etude des conditions de formation des verglas

- Cette approche est destinée à :
- cerner plus précisément quels sont les paramètres prépondérants dans le mécanisme de formation des verglas ;
 - bâtir des modèles de prévision de la température de surface de chaussée et par ce biais apprécier le risque de formation de verglas.

Cette étude est organisée autour d'un suivi micrométéorologique très précis d'un site autoroutier.

Les multiples mesures faites dans les dix premiers mètres de l'atmosphère et à différentes profondeurs dans la chaussée vont permettre d'établir un bilan thermique précis à la surface du revêtement.

Une analyse statistique et mathématique des multiples paramètres saisis devrait permettre à terme d'établir un ensemble d'algorithmes qui améliorera considérablement la fiabilité des systèmes d'aide à la décision en matière de viabilité hivernale.

• Mise en place d'une météorologie routière à l'usage des gestionnaires du réseau

Ce travail de réflexion est organisé autour des points suivants :

- conditions de mise en place de nouveaux outils d'aide à la décision (météotél, etc.) dans les services ;
- organisation et adaptation des structures existantes pour accueillir ces outils ;
- organisation et définition de la formation des divers personnels de la chaîne décisionnelle et opérationnelle du domaine hivernal ;
- information et formation des usagers de la route.

