

## **Viabilité hivernale**

Fiches pratiques « aide-mémoire »

# Phénomène de perte d'adhérence sur des chaussées sèches et traitées au chlorure de sodium

*Le contenu de ces fiches est volontairement synthétique ; leur vocation n'étant pas de se substituer à la documentation technique et réglementaire mais d'en porter les éléments essentiels dans un format accessible et facilement exploitable.*

### **1. Introduction**

Diverses investigations ont été réalisées par le Cerema, avec l'appui de services d'exploitation, afin d'identifier les mécanismes physico-chimique conduisant aux variations d'adhérence et les conditions favorisant l'apparition de ce phénomène.

Cette note d'information présente ces investigations et propose des mesures d'exploitation hivernale destinées à réduire les risques liés à ce phénomène.

Le périmètre de cette note n'inclut que les cas de perte d'adhérence constatés sur des chaussées traitées avec du chlorure de sodium.



Série 3 - Fiche n° 10 - Août 2020

## 2. Contexte d'apparition du phénomène

### 2.1. Éléments identifiés par les gestionnaires

Les phénomènes de perte d'adhérence sont observés sur des chaussées sèches salées et se produisent sur des itinéraires sinueux situés généralement dans les zones montagneuses. La diminution de l'adhérence s'observe plutôt dans les zones de sollicitations transversales, ce qui peut entraîner des sorties de route.

Les similitudes suivantes sont constatées par les exploitants routiers :

- des itinéraires présentant une alternance de zones sèches et humides pouvant être liée à une exposition solaire différentielle ;
- des conditions anticycloniques présentes depuis au moins 3 jours ;
- une absence de précipitation et un ciel dégagé provoquant un rayonnement nocturne très important avec des températures de l'air et de chaussées fortement négatives pendant plusieurs heures consécutives (voire plusieurs jours) ;
- un salage répété avec du chlorure de sodium sans que la chaussée ne soit lessivée par les eaux de pluie ;
- une surface de chaussée blanche, recouverte par de la poussière de sel (« talcage ») ;
- une présence de dômes cristallins au sommet des granulats et, dans certains cas, de dépôts gélifiés dans les zones humides.

Il a aussi été constaté :

- une augmentation de la glissance avec le trafic, notamment dans les bandes de roulement ;
- la disparition du phénomène par simple lavage de la surface.

### 2.2. Investigations en laboratoire

#### Étude de la variation d'adhérence induite par la présence d'un fondant liquide

Les résultats montrent que la viscosité d'une saumure de chlorure de sodium croît avec sa concentration et l'abaissement de sa température. Des épandages répétés ou une évaporation de l'eau de la saumure entraînent une augmentation de la concentration de cette dernière, notamment lorsque la chaussée est très froide. Dans ce cas, l'augmentation de la viscosité peut engendrer une diminution de l'adhérence.

#### Étude du gradient de température et d'humidité relative au niveau de la chaussée

L'analyse de la relation entre la température de surface et la température du point de rosée de la pellicule d'air en contact avec la chaussée montre que la pellicule d'air en contact avec le revêtement a un contenu en vapeur d'eau supérieur à celui observé à 1,50 m. Cela peut entraîner une formation de gelée blanche ou une dilution des saumures présentes sur le revêtement avec un risque de congélation par des températures très basses.

#### Étude de la variation d'adhérence en présence de dihydrate de sodium ( $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Selon une étude danoise, la formation de dihydrate de sodium ( $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) entraînerait l'apparition d'un dépôt gélifié sur la surface du revêtement durant la phase de refroidissement et de concentration de la saumure. En découlerait une diminution de l'adhérence.

Les essais réalisés en caisson climatique sur diverses surfaces n'ont pas permis de reproduire la formation d'un dépôt gélifié. Ils ont néanmoins montré une réduction notable de l'adhérence en présence d'un dosage important de fondants obtenu par dépôts successifs sur les revêtements (gommage de la microtexture par le NaCl cristallisé) et lors de l'application de saumure sur une surface sèche et fortement salée.

#### Étude de la variation d'adhérence d'une surface routière contaminée par des fines de particules de NaCl

L'analyse des variations d'adhérence de surfaces routières contaminées par du NaCl en poudre très fine (apparence talc), a confirmé une réduction importante de l'adhérence des surfaces due à ce contaminant.

### 2.3. Investigations en conditions réelles

Des investigations ont été menées *in situ* lors de situations météo-routières hivernales à risque.

L'instrumentation d'un itinéraire et de véhicules de patrouilles a permis de relever différentes données et d'identifier les facteurs d'influence suivants :

- une alternance importante et permanente d'états secs et humides de la surface de la chaussée, liée notamment à la sinuosité de l'itinéraire et susceptible de favoriser le transport des fondants ;
- des variations importantes de température de surface (de plus de 10 °C) en quelques dizaines de mètres correspondant en grande partie aux alternances sèche / humide – exposé / non exposé au soleil ;
- des températures de surface (Ts) de l'itinéraire globalement inférieures aux températures de l'air (Ta) ;
- des températures moyennes de surface très basses, proches de -10 °C sur la totalité de l'itinéraire ausculté, avec des températures de l'air ambiant voisines de -3 à -4 °C ;
- une proportion importante du linéaire de ce réseau avec des températures de surface (Ts) inférieures aux températures de rosée (Td), ce qui implique une forte probabilité de condensation solide (gelée blanche dans ces zones). Ces gelées ont été partiellement observées par l'opérateur ;

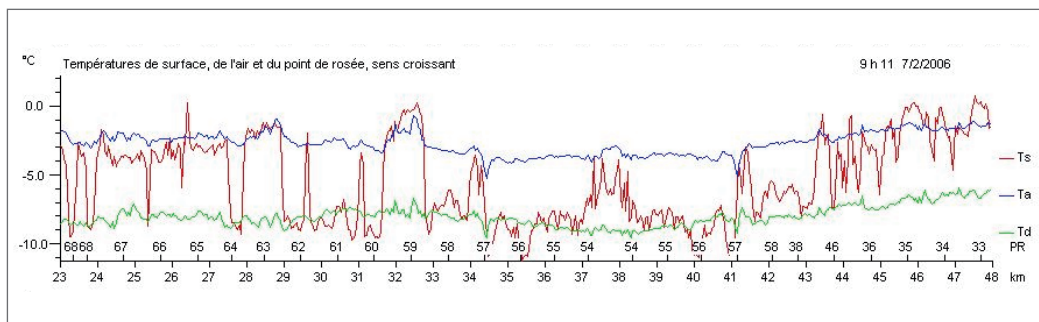


Figure 1 : Exemple de signature thermohydrigue d'un itinéraire mesuré avec Thermoroute : la température de l'air (Ta) est relativement constante (bleu) pour des variations importantes de température de surface Ts (rouge), variant de 0°C à -12°C et pouvant localement croiser la température du point de rosée Td.

- des humidités relatives faibles, comprises entre 60 et 75 %, favorables au séchage naturel d'une saumure de NaCl.

### 2.4. Synthèses des observations et investigations

Les observations et investigations vues ci-dessus mènent aux conclusions suivantes :

- un traitement répété de la chaussée et/ou une forte concentration de saumure à température fortement négative engendrent une augmentation de la viscosité et une diminution de l'adhérence ;
- l'apport de saumure sur une surface sèche et fortement salée réduit notablement l'adhérence ;
- à des températures de chaussée négatives et à faible humidité de l'air (HR < 75 %) :
  - une saumure de NaCl se concentre et peut se recristalliser sous forme de dihydrate de sodium (NaCl·2H<sub>2</sub>O),
  - un dépôt d'humidité peut apparaître si la température de surface est inférieure à la température du point de rosée ;
- une augmentation du trafic induit une diminution de l'adhérence.

La perte d'adhérence se produit principalement dans les bandes de roulement.

## 3. Compréhension du phénomène

### 3.1. Le phénomène de perte d'adhérence

#### Notion d'adhérence et de texture superficielle

L'accidentologie hivernale est en partie due à la **diminution de l'adhérence**, c'est-à-dire de la capacité à mobiliser les forces de frottement entre le pneumatique et le revêtement de la chaussée. Cette diminution peut être due à la présence d'un élément qui va combler la texture superficielle (microtexture – macrotexture) du revêtement et/ou qui va se situer à l'interface pneumatique – revêtement.

En période hivernale, ces éléments peuvent être :

- les phénomènes météorologiques (eau, neige ou verglas) ;
- la présence ou la formation d'un « corps étranger » (ex : le dihydrate de sodium).

La **macrotexture** est liée à la taille des granulats et des interstices. Elle influe sur la capacité de **drainage superficiel**, c'est-à-dire l'évacuation de l'eau ou de la saumure entre le revêtement et le pneumatique afin de réduire l'aquaplanage.

La **microtexture** dépend de la nature et de l'angularité des granulats ainsi que du pourcentage d'éléments fins. Elle permet de rompre le film d'eau résiduel et d'ainsi recréer un contact sec entre la gomme des pneumatiques et les granulats du revêtement.

#### Contexte de chaussée sèche et salée

Un des phénomènes de perte d'adhérence spécifique aux chaussées sèches et salées est lié au comblement de la microtexture par des cristaux de dihydrate de sodium qui se brisent sous l'effet du trafic avec pour conséquence une diminution de la qualité du contact revêtement / pneumatiques.

Ceci est cohérent avec le fait que les glissances les plus fortes sont observées dans les bandes de roulement et sur les sections accueillant le plus de trafic.



*Photo 1 : Phénomène de glissance observé, notamment dans les bandes de roulement (Source : CD 04)*

#### Présentation du dihydrate de sodium

Le dihydrate de sodium est un cristal de chlorure de sodium, de formule  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , qui se forme par un refroidissement intense (très froid et très rapide) d'une saumure (mélange de sel et d'eau).

La figure 2 illustre ce phénomène.

Ces cristaux sont présents uniquement à température négative et peuvent se trouver dans une saumure(1) (solution liquide) ou dans la glace(2) (verglas) ou se présenter sous forme solide(3) (poudre).



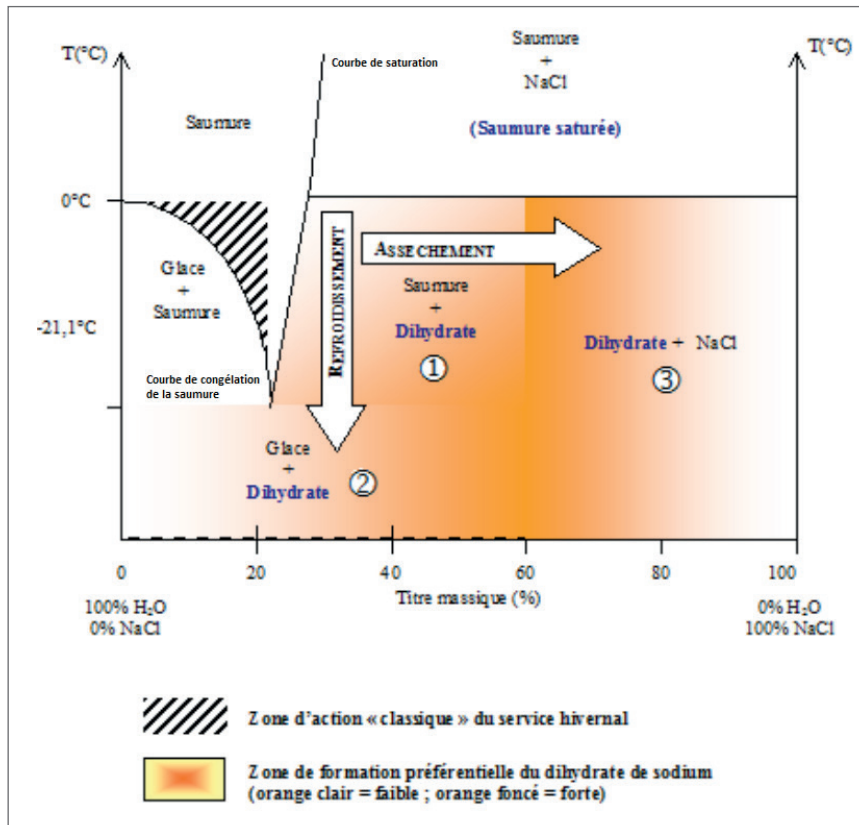


Figure 2 : Diagramme de phase d'une solution de chlorure de sodium

Les cristaux de dihydrate de sodium (photo 2) sont de forme allongée, fine ou en aiguilles et présentent une dureté importante.

Sous l'effet du trafic, les cristaux se cassent et viennent combler la microtexture de la chaussée.

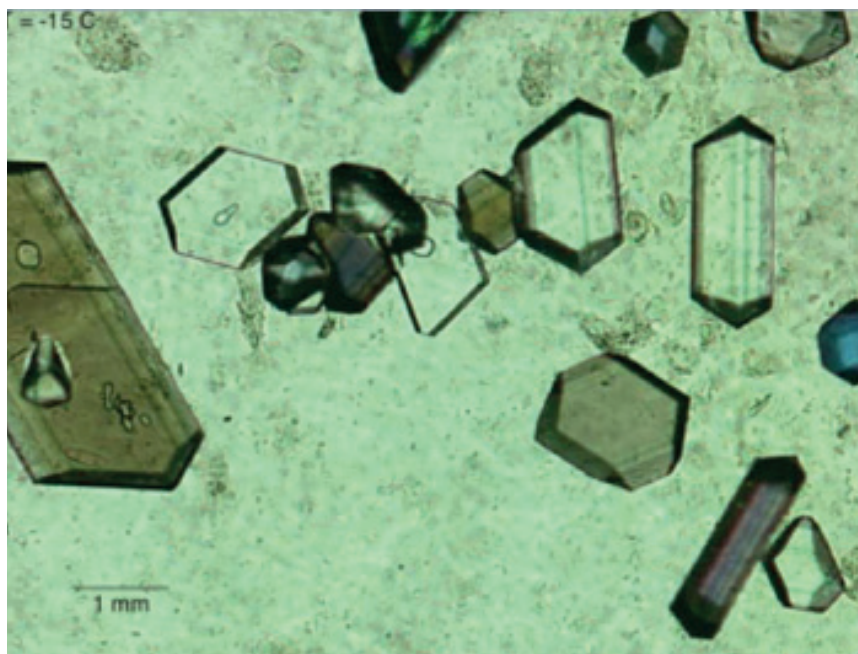


Photo 2 : Photomicrographie de cristaux de dihydrate de sodium dans de la saumure à  $-15^{\circ}\text{C}$ . La différence de couleur des cristaux est due à la diffraction. Source : Laboratory-grown sea ice used to investigate the optical properties of cold sea ice © Bonnie Light / Applied Physics Laboratory U of Washington

## Conditions de formation préférentielles du dihydrate de sodium

La transformation de la saumure en dihydrate de sodium nécessite :

- un milieu saturé en chlorure de sodium :
  - par épandages successifs,
  - par déshydratation naturelle (humidité relative de l'air (U) inférieure à 75 %),
  - par apport de chlorure de sodium transporté par les pneumatiques. Ces derniers se remplissent de NaCl dans les zones humides de la chaussée. Le fondant est ensuite transporté par le trafic dans les zones sèches qui succèdent (quelques centaines de mètres) ;
- une baisse de la température de surface (Ts) en raison :
  - des conditions météorologiques du moment (température de l'air très froide due à un refroidissement nocturne important lié à la faible nébulosité, sans apport énergétique diurne, sur plusieurs jours consécutifs),
  - de la structure de la chaussée (macrotexture ouverte) et de son environnement (ouvrages d'art, ombre, exposition au vent, etc.).

Le dihydrate de sodium se forme préférentiellement dans des conditions anticycloniques et à faible humidité (température de surface < -10 °C, humidité relative < 75 %).

Les zones de formation préférentielles du dihydrate de sodium sont donc celles où la salinité résiduelle est importante et où la température de surface est basse.

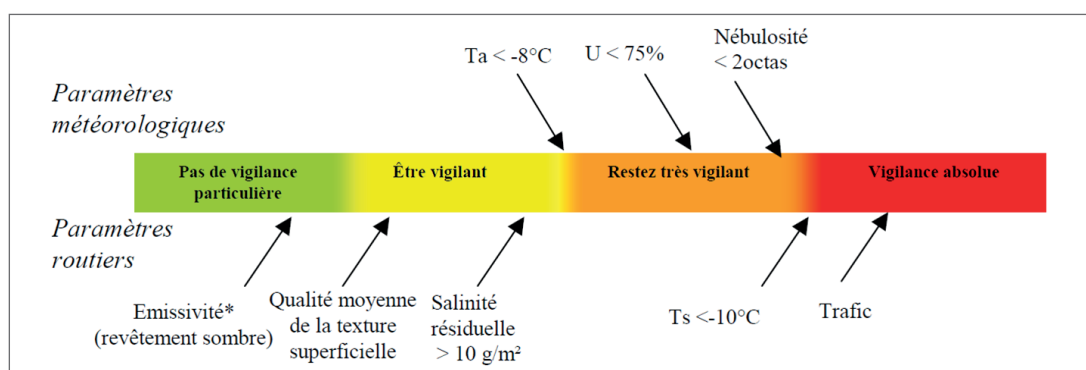


Figure 3 : Échelle de risque de glissance sur chaussée salée en fonction des paramètres météo-routiers

## Conséquences sur les chaussées

Le comblement de la microtexture par le dihydrate de sodium a été observé (photo 3) :

- sur chaussée sèche, lui conférant un aspect poudré. Dans certains cas, des « dômes cristallins » apparaissent au sommet des granulats, lieu refroidissant en priorité ;
- sur chaussée humide (le dihydrate de sodium débute sa formation dans la saumure saturée), avec apparition d'un dépôt gélifié.

La présence d'humidité en surface du revêtement amplifie le phénomène de baisse d'adhérence. Cette humidification de la surface routière résulte :

- de la condensation d'eau sur la surface routière ;
- et/ou d'un épandage de saumure pure visant à faire disparaître le phénomène (traitement curatif) ;
- et/ou d'un transfert de saumure des zones humides vers les zones sèches via les pneumatiques des véhicules (figure 4).

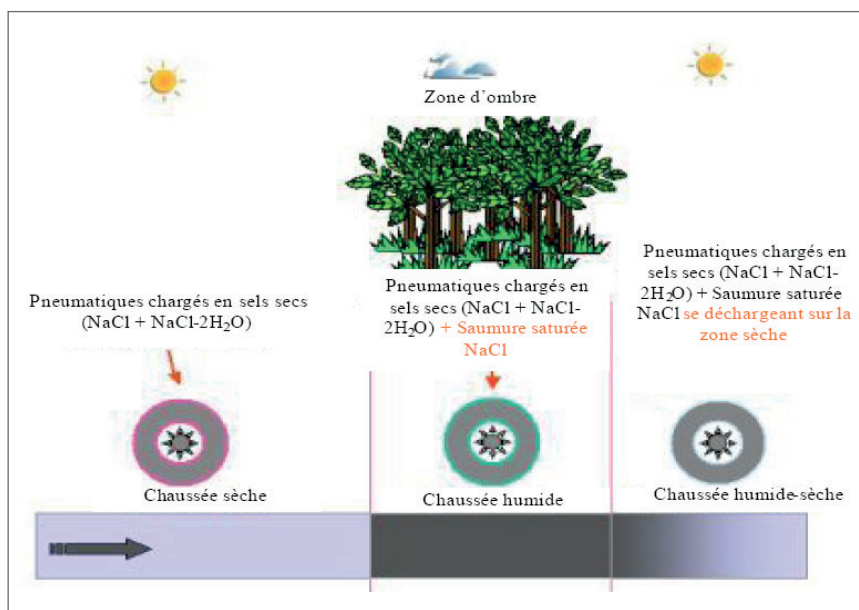


Photo 3 : Comblement de la microtexture par du dihydrate de sodium  
(source : Cerema / Laboratoire de Nancy)

#### 4. Que faire pour traiter ce phénomène

Hormis le lavage de la chaussée qui peut induire d'autres difficultés, il n'existe pas de traitement curatif réellement efficace pour ce phénomène.

Les objectifs du gestionnaire sont donc :

- d'éviter l'apparition du phénomène ;
- d'en limiter, le cas échéant, ses conséquences.

Il doit donc concentrer ses moyens sur la connaissance de son réseau, l'identification des points sensibles, la signalisation, l'information de son personnel et des usagers, la surveillance des conditions météorologiques et le patrouillage. L'adaptation des consignes de traitement en amont et le lavage de la chaussée lors du phénomène représentent les seuls moyens d'action ayant démontré leur utilité.

## 4.1. En préparation de la saison hivernale

### Identifier les zones à risque

Il est nécessaire d'identifier précisément les lieux où le phénomène risque de se produire. C'est-à-dire les zones :

- avec des revêtements à texture superficielle de faible importance, liée à son usure ou à la présence de gomme ;
- présentant des températures de surface très faibles ( $< -10\text{ °C}$ ) ;
- sans ensoleillement ou avec un faible ensoleillement diurne (chaussées à l'ubac, zones ombragées, passage supérieur d'ouvrage d'art, etc.) ;
- sinueuses présentant de fortes variations altimétriques.

L'identification de ces points froids se réalise par :

- l'étude de l'accidentologie hivernale et les retours d'expérience ;
- l'étude de la sensibilité du réseau aux variations de températures de surface.

L'étude de la signature thermohydrigue de l'itinéraire (figure 1) et notamment des variations de la température de surface comparée à la température de rosée (la température de l'air n'est pas un critère pertinent).

### Sensibiliser les agents

Il faut alerter et sensibiliser les agents d'exploitation en insistant sur le respect des consignes de traitement. Il faut notamment rappeler qu'un surdosage en sel peut constituer un facteur propice à l'apparition du phénomène.

## 4.1. En période hivernale

### Surveillance

#### *Suivi des conditions météo-routières*

Le suivi de l'évolution des conditions météo-routières doit faire l'objet d'une attention particulière afin de permettre au gestionnaire d'anticiper le phénomène et d'être plus réactif lors de son apparition afin d'en limiter ses conséquences.

Les séquences hivernales propices à l'apparition du phénomène peuvent être identifiées par :

- des conditions anticycloniques de longues durées ( $> 3$  jours) ;
- une température de surface de la chaussée très basse ( $< -10\text{ °C}$ ) ;
- une température de l'air très basse ( $< -8\text{ °C}$ ) ;
- une humidité relative modérée ( $< 75\%$ ) ;
- une salinité résiduelle significative ( $> 30\text{ g/m}^2$ ).

Un archivage des données météorologiques (relevés météorologiques) et des traitements successifs de la chaussée (main courante) pourront aider, a posteriori, à mieux comprendre et localiser le phénomène.

#### *Suivi de la salinité résiduelle*

Le suivi des traitements antérieurs, ou des relevés de la salinité résiduelle *in situ*, permettent d'évaluer le risque de formation de dihydrate (salinité résiduelle  $> 30\text{ g/m}^2$ ).



## Mesures préventives

### Adaptation des traitements

Les conditions anticycloniques sont associées à des phénomènes météo-routiers mobilisant de faibles quantités d'eau sur la chaussée (gelée blanche, brouillard givrant, etc.). Les consignes de traitement sont à adapter strictement (dosage faible) en prenant en compte les quantités résiduelles de fondant sur la chaussée.

La projection à plus long terme (> 3 jours) permet d'ajuster la consigne initialement prévue :

- si des précipitations sont annoncées, la chaussée sera lavée dans les jours qui suivent : il n'y a pas de risque d'accumulation de fondant (surdosage) ;
- *a contrario*, si les conditions anticycloniques doivent perdurer au-delà des 3 jours, inutile de saler et resaler quotidiennement mais privilégier la mise en place d'une pré-signalisation adaptée.

Des revêtements hétérogènes le long d'un itinéraire ont des capacités de rétention d'eau différentes, sources de surdosage local. Un salage raisonné, voire localisé, permet d'adapter les quantités de fondant au phénomène attendu.

Il faut également rappeler les consignes de traitement aux agents d'exploitation et aux sous-traitants en insistant sur le risque d'apparition du phénomène en cas de surdosage.

### Signalisation du danger potentiel pour les usagers

Lorsque les conditions météorologiques sont favorables à l'apparition du phénomène, il est impératif d'informer l'utilisateur par la pose d'une signalisation adaptée. Une information par d'autres moyens de communication peut également être envisagée (radio, internet, etc).

Une signalisation verticale réglementaire doit être mise en place en amont des sections.

Des panneaux A4 ou AK4 accompagnés de panonceaux sont à activer en fonction du niveau de service.

- Niveau de service N1 voire N2 : Panneau AK4 accompagné éventuellement d'un panonceau risque de verglas à n'activer qu'en période de risque effectif.

Il peut être intéressant de pré-positionner des panneaux occultables pour faciliter les interventions des patrouilleurs.



Figure 7 : panneau AK4

- Niveau de service N3 voire N2 : Panneau A4 accompagné d'un panonceau « verglas fréquent » pouvant être mis en place pour l'ensemble de la période hivernale.



Figure 8 : Panneau A4

### **Maîtrise des écoulements**

Les itinéraires sujets aux pertes d'adhérence par formation de dihydrate sont sensibles aux ruissellements d'eaux (fossés, profils en travers, fonte des cordons de neige en période diurne). Si la mise en place de mesures correctives n'est pas évidente pour les itinéraires de faible niveau de service, elle est primordiale sur les réseaux à haut niveau de service : des travaux sur l'infrastructure s'imposent. Ces apports d'eau sont générateurs de surdosages et de sur-interventions (crainte légitime des exploitants de dilution du fondant et de lavage de la chaussée).

#### **4.1. Interventions curatives**

##### **Signalisation du danger**

Dès constat du phénomène, ces points singuliers sont à signaler à l'utilisateur par tout moyen adapté :

- mise en place d'un panneau AK4 mobile (s'assurer que le véhicule de patrouille en contient) ;
- relevage ou ouverture des panneaux pré-positionnés.

##### **Réduction du taux de salinité résiduelle par lavage**

Cette opération consiste à solubiliser le chlorure de sodium présent sur le revêtement et à réduire au minimum la salinité résiduelle. Ce traitement peut être naturel (précipitations) ou artificiel. Certains services opérationnels pratiquent le lavage par des moyens traditionnels (laveuse-balayeuse).

Cette opération est délicate : il faut tenir compte des températures et de leur évolution ( $T_a$ ,  $T_s$ ) afin d'éviter une recongélation de la saumure.

Cette démarche, complexe à mettre en œuvre notamment sur les hauts niveaux de service, implique une fermeture provisoire de l'axe et un nouvel épandage de fondant routier pour reconstituer une salinité de protection.

## 5. Aspects juridiques

La responsabilité administrative vis-à-vis de l'utilisateur, pour défaut d'entretien normal, est un régime dit de faute simple présumée. Pour se dégager, le gestionnaire routier doit apporter la preuve qu'il n'y a pas eu faute. Tous les éléments factuels de l'organisation du service hivernal et de sa mise en œuvre sont des éléments de preuves.

Le gestionnaire doit donc apporter la preuve de l'existence d'une organisation adaptée aux conditions hivernales prévisibles. Cela inclut notamment l'établissement d'un DOVH et de PEVH ainsi que la formation et l'information des agents et sous-traitants.

Autre éléments de preuve, la traçabilité de l'ensemble des décisions se concrétise par des éléments de type :

- historiques des prévisions météorologiques et des observations ;
- main-courante des patrouilleurs, des responsables d'intervention et des différents intervenants (cadres d'astreinte, etc.) ;
- historique des consignes de traitement ;
- suivi des interventions (heure de départ et de retour, circuit effectué, traitement appliqué) ;
- tout document susceptible d'apporter la preuve que le maître d'ouvrage a pris des mesures au regard de l'état de ses connaissances, de ses moyens et de son organisation.

**Le choix de ne pas intervenir, tout comme celui d'intervenir, est une décision qui doit être justifiée au regard des différents éléments en possession du responsable d'intervention.**

De façon générale, le défaut d'entretien normal est constitué lorsque le gestionnaire, compte tenu des moyens dont il dispose, n'a pas supprimé ou signalé un danger excédant ceux auxquels les usagers doivent s'attendre, et contre lesquels il leur appartient de se prémunir par des précautions adéquates. Ainsi, quand il n'est pas possible de supprimer un danger, une action d'information pour le faire connaître constitue l'un des cas d'exonération du défaut d'entretien normal. On ne saurait donc que très fortement conseiller aux maîtres d'ouvrage de mettre en place une signalisation adaptée.

## Référence externe

Site internet de la viabilité hivernale : [www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr](http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr)

---

Comité de pilotage et rédaction : Le Réseau Technique Viabilité Hivernale (RTVH) du Cerema a participé à la conception et à la rédaction de ces fiches

Rédacteurs : **Alice BAZILE** - Cerema Méditerranée  
**Stéphanie GAUDÉ** - Cerema Est  
**Didier GILOPPÉ** - Cerema Normandie-Centre  
**Ethel JACQUOT** - Cerema Est  
**Heidi KAUFFMANN** - Cerema Est  
**Olivier RICHARD** - Cerema Est  
**Damien VAILLANT** - Cerema Est  
**Jean-François VARGAS** - Cerema Centre-Est

Contact : **Cerema Est - Laboratoire de Nancy - Pôle Viabilité Hivernale**  
Mail : [viabilite-hivernale@cerema.fr](mailto:viabilite-hivernale@cerema.fr)

Source photo 1<sup>re</sup> page :  
Cerema

Collection  
**Connaissances**  
ISSN 2417-9701

© 2020 - Cerema  
*La reproduction totale ou partielle du document doit être soumise à l'accord préalable du Cerema.*

---

### La collection Connaissances du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Référence : 2013w  
ISRN : CEREMA-DteclTM-2020-013-1-FR