

# Actions microclimatique et environnementale des ouvrages d'art routiers

David Conciatori, Eugen Brühwiler et André-Gilles Dumont

**Résumé :** Les différentes zones d'un ouvrage d'art routier sont étudiées en fonction de leur degré d'exposition au microclimat environnant. Les conditions climatiques provenant de stations météorologiques et la cinétique des véhicules permettent de définir des zones d'exposition aux produits salants et au climat. Une division judicieuse d'un ouvrage en éléments structuraux en fonction de son exposition permet de prendre en considération l'importante variabilité spatiale et de définir des zones de sensibilité équivalente face aux détériorations. Sur la base de stations météorologiques suisses, d'un monitoring d'un ouvrage d'art routier, d'enquêtes auprès des autorités publiques, de mesures ponctuelles in situ et de recherches bibliographiques, cet article met en exergue le microclimat des structures de manière précise. Cette approche permet de définir les différentes zones d'exposition des ouvrages, à savoir les zones de brouillard salin, d'éclaboussures et de stagnation d'eau et de définir l'importance du microclimat en vue de prédire l'évolution des détériorations des structures.

*Mots-clés :* climat, microclimat, chlore, ouvrages d'art, exposition, éclaboussures, brouillard salin, eau stagnante.

**Abstract:** Various areas of a highway structure are studied regarding their level of exposure to the surrounding microclimate. Climate conditions from meteorological stations and vehicle kinetics are used to determine zones that are exposed to salt products and climate. Dividing a highway into structural elements based on exposure takes into account the significant spatial variation and helps define zones of equivalent sensitivity to deteriorations. Based on Swiss meteorological stations, highway structure monitoring, inquiries with public authorities, in situ spot measuring and literature surveys, this article precisely highlights the microclimate of these structures. This approach can help define the various exposure areas of the structures, namely salt mist, splash and water stagnation areas as well as determine the significance of the microclimate in order to predict the evolution of structural deteriorations.

*Key words:* climate, microclimate, chlorine, highway structures, exposure, splash, salt mist, stagnant water.

## 1. Contexte

L'évolution des détériorations des ouvrages d'art routiers en béton armé dépend de l'exposition des éléments d'ouvrage à l'eau liquide ou sous forme de vapeur et à d'autres agents agressifs comme le chlore. Ainsi un grand nombre de détériorations observées sur les structures, comme la réaction alcali-granulat, corrosion par présence de chlore, corrosion par carbonatation, etc. présentent une grande variabilité spatiale sur la globalité d'un ouvrage. Par exemple, les bordures, la face supérieure de la dalle de roulement et les joints de dilatation des ponts sont les zones les plus exposées aux agents agressifs, aux stagnations d'eau et aux détériorations précoces par corrosion (Brühwiler et al. 2001; Conciatori et al. 2002; Marchand et al. 2002; Paulsson-

Tralla et Silfwerbrand 2002; Denarie' et al. 2003; Conciatori 2005). Il a également été démontré que l'évolution des détériorations est plus rapide sur des zones en contact direct avec l'eau et les agents agressifs que sur des zones exposées uniquement au brouillard (Castro et al. 2001; Lindvall 2001; Masuda 2002; Conciatori 2005; Conciatori et al. 2008, 2009).

Depuis quelques années seulement, les normes incluent un dimensionnement du béton armé à partir de l'exposition d'un élément d'ouvrage face à ces sollicitations microclimatiques et à la présence de produits salants. Cependant, ces normes ne fournissent d'indication sur une délimitation précise de ces différentes zones d'exposition.

Cet article propose ainsi un raffinement dans la gestion complexe du microclimat et de la présence de produits salants en vue de prédire les détériorations des ouvrages. Aussi le thème est abordé, au chapitre 2, sur une classification de plusieurs types de climats en fonction de l'étendue territoriale à l'échelle d'un pays, la Suisse. La petitesse du territoire suisse renferme pas moins de six zones climatiques différentes, le climat étant principalement influencé par la présence des Alpes. La présence de produits salants sur la chaussée et les structures est analysée, au chapitre 3, au travers des expériences des exploitants routiers pour l'épandage manuel et de mesures in situ pour l'épandage avec des systèmes automatiques. Une modélisation est proposée afin de connaître l'évolution spatiale et temporelle de la concentration en produits salants sur la chaussée en fonction des épandages annuels et des données climatiques. L'action du

**D. Conciatori,<sup>1,2</sup> E. Brühwiler et A.-G. Dumont.** EPFL-MCS, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18 (bâtiment GC), CH-1015 Lausanne, Suisse.

1. Auteur correspondant (courriel : david.conciatori@gci.ulaval.ca).

2. Adresse actuelle : École polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines, CP 6079, Station Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada.

climat pour chaque zone d'exposition est visualisée, au chapitre 4, par l'intermédiaire d'un monitoring et de synthèse de différents domaines de recherche. Aussi, un découpage précis de chaque zone d'exposition est proposé avec leur sollicitation climatique correspondante. La division en zone d'exposition équivalente est appliquée pour des ouvrages réels au chapitre 5. Finalement, un aperçu de l'influence climatique sur la détérioration des structures est abordé au chapitre 6. Cette brève incursion dans le domaine des dégradations permet de se rendre compte de la répercussion du facteur climatique et de la présence de produits salants sur l'évolution temporelle des dégradations des structures.

## 2. Zones climatiques suisses

Les chaînes montagneuses et la situation géographique de la Suisse rendent difficile une généralisation du climat sur tout le territoire. Cependant, l'étude climatique des différentes stations météorologiques sur le territoire suisse permet de diviser le territoire suisse en zones territoriales climatiques similaires. Il en ressort six zones climatiques distinctes, soit : les Alpes, les Préalpes, la région du Tessin, le plateau suisse, la région lémanique et la plaine du Rhône. Les climats des Préalpes, du Jura et des Grisons ont été identifiés comme des climats similaires et sont définis par la suite par le terme « Grisons ». Cette similitude provient du fait que ces zones se trouvent régulièrement au-dessus des brouillards hivernaux persistant sur le plateau suisse (fig. 1a). Ce découpage tient compte des critères d'altitude, de situation géographique, de possibilité d'existence d'un réseau routier et de disponibilité des données météorologiques fiables de longues durées (environ 30 ans).

La sévérité des périodes hivernales se définit par le nombre de jours entiers par année où la température n'a pas dépassé le 0 °C. Ce nombre de jours est ensuite moyenné sur le nombre d'années de mesures et est appelé « nombre de jours hivernaux » (MétéoSuisse 2007). La comparaison de la hauteur des précipitations cumulées avec ce dernier paramètre montre une grande disparité entre les stations météorologiques de montagnes et de plaine (fig. 1b).

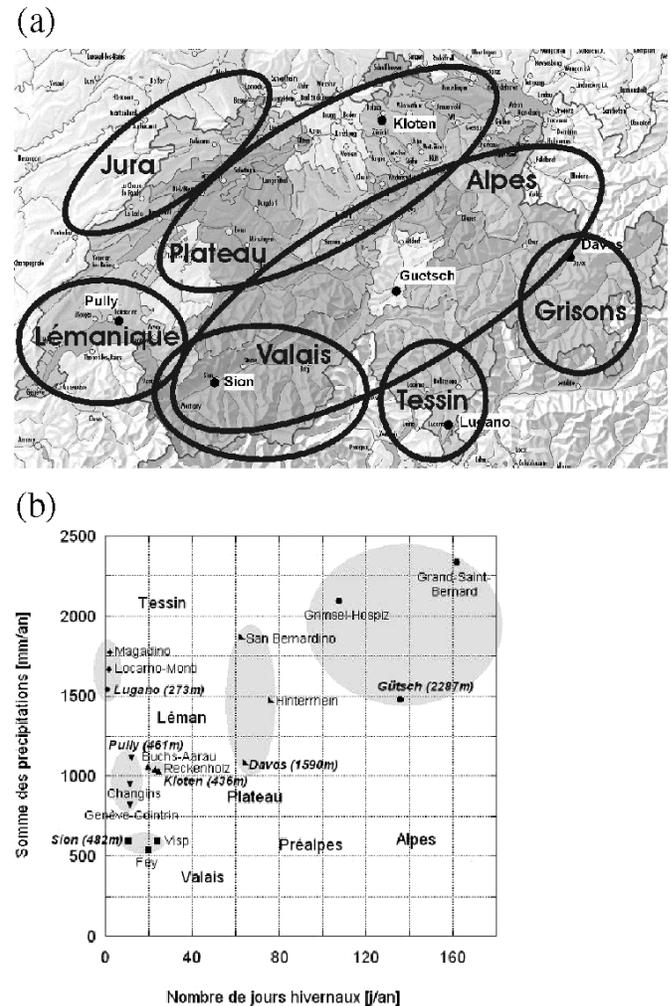
## 3. Sollicitation environnementale

### 3.1. Paramètres déterminants

Les sollicitations environnementales sont représentées par les produits salants épandus sur la chaussée lors de la formation du verglas en période hivernale. La formation du verglas sur une chaussée dépend de la température de l'air, de l'humidité relative de l'air, de la température de l'eau de précipitations, de la température et de la capacité thermique de l'infrastructure, de la vitesse du vent et finalement de la concentration en produits salants sur la chaussée. Elle peut subvenir avec un brouillard givrant, des précipitations, des pluies verglaçantes et finalement avec l'eau de fonte de la neige accumulée sur le bord des chaussées (Dysli 1991).

Les produits salants couramment utilisés sont le chlorure de sodium, le chlorure de calcium pour des climats plus sévères ou un mélange des deux (Anita 1998; McElroy et al. 1998). Ces produits présentent un avantage économique et curatif appréciable et aucun autre produit ne saurait les remplacer aujourd'hui.

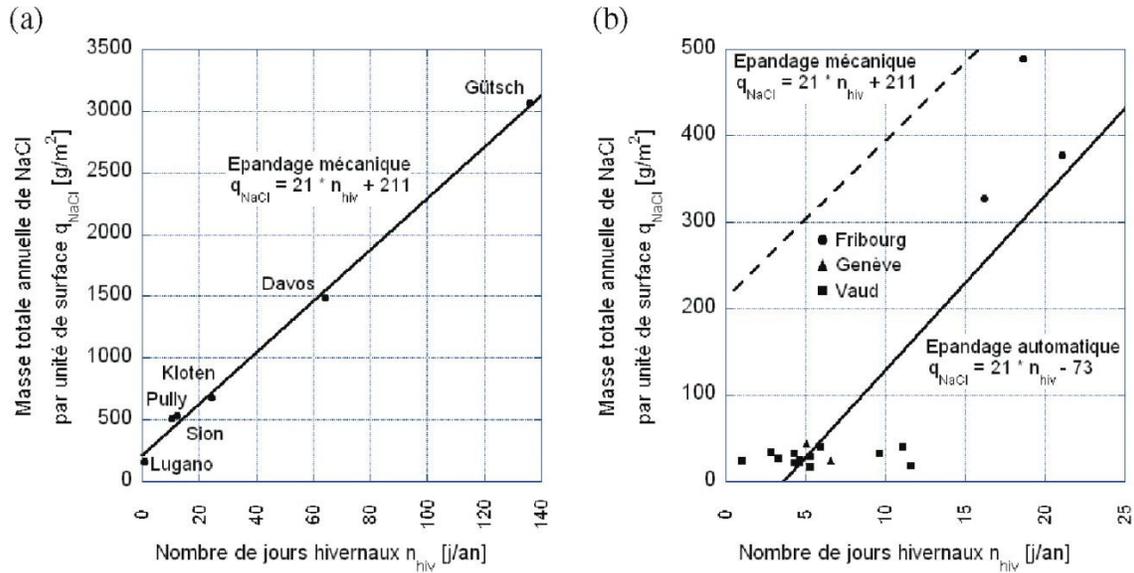
**Fig. 1.** Différentes régions suisses de climat similaire, (a) plan de la Suisse, (b) caractéristiques climatiques de quelques stations météorologiques ANETZ. Les stations écrites en gras et en italiques sont les stations choisies comme représentatives d'une région (elles sont représentées avec leur altitude).



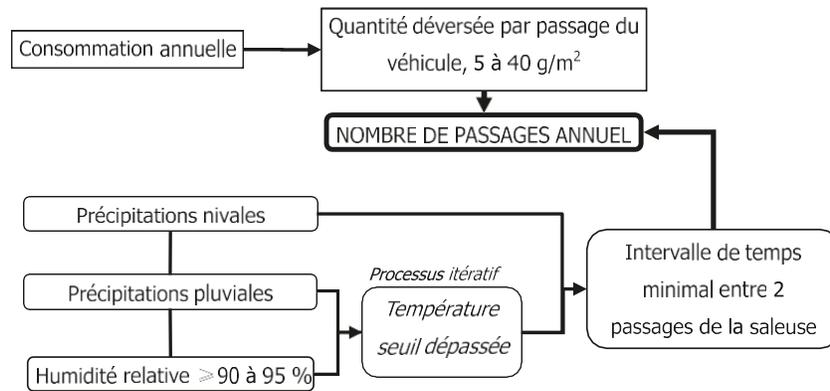
Évaluer les sollicitations environnementales revient à connaître l'évolution temporelle de produits salants, soit le moment de son épandage sur la chaussée, la quantité épandue et sa dissolution en fonction des conditions météorologiques. Les interventions d'une saleuse sont reliées à des critères humains (sécurité, moyen à disposition), géographiques (altitude, zone de forêt), typologiques (pont, type de revêtements) et climatiques (passage de vent) très divers (Moritz 1998). En revanche, les concentrations épandues sont mieux connues en examinant l'évolution des stocks de produits salants et la surface traitée. Il existe cependant une certaine variabilité liée aux décisions reliées à la fréquence d'interventions sur un tronçon, au type de machines d'épandage et (ou) à la présence d'installations automatiques de salage (Zambelli 1998; Dumont et Baumann 2005).

Une possibilité pour évaluer les nombres d'interventions d'une saleuse pendant une saison hivernale est de connaître la quantité épandue lors d'une intervention. Notre enquête a permis de déterminer une plage de ces quantités, soit entre 5 à 40 g/m<sup>2</sup>. La quantité de produits salants, fréquemment épandue par les véhicules, s'élève à 10 g/m<sup>2</sup>.

**Fig. 2.** Corrélation entre l'épandage de chlorure de sodium et la sévérité de l'hiver, (a) par des moyens mécaniques d'épandage, (b) par des moyens automatiques d'épandage.



**Fig. 3.** Modèle environnemental.



Les produits salants s'évacuent plus ou moins rapidement selon les conditions microclimatiques et selon les dispositifs d'évacuation des eaux. Des essais en Suède (Blomqvist 2001) montrent qu'environ 10 % des produits salants persistent sur la chaussée après environ 1 semaine depuis l'instant d'épandage. Une autre possibilité de différer l'évacuation des produits salants se situe dans les cas où les produits salants sont emprisonnés dans les amas de neige se situant en bordure de chaussées, après déneigement (Brod 1993; Laurinavicius et Cygas 1998).

### 3.2. Consommations de produits salants

Les consommations annuelles moyennes provenant de notre enquête auprès des responsables d'exploitation sont directement reliées avec une bonne corrélation ( $R = 0,998$ ) à la sévérité hivernale (fig. 2a). Pour l'épandage automatique de chlorure de sodium, une bonne corrélation ( $R = 0,815$ ), mais plus modeste que précédemment, existe également (fig. 2b). Cette corrélation plus basse peut s'expliquer par un échantillonnage ou un nombre existant faible de ce type de station. De ce fait, la droite de régression, pour les installations automatiques de salage, a été choisie avec une pente identique à celle des interventions par moyens mécaniques.

### 3.3. Modélisation

Le moment de passage et la concentration épandue sont les paramètres clés de la modélisation. Pour connaître le moment de passage d'une saleuse, il est important de connaître le nombre moyen de passages annuels, en divisant la consommation annuelle de produits salants (fig. 3) par la quantité déversée. Pour les installations automatiques de salage, les mesures in situ montrent que les quantités déversées s'élèvent à environ 0,04 à 0,5 g/m<sup>2</sup>. Des conditions microclimatiques particulières et un temps latent entre deux interventions permettent de fixer le moment d'épandage. Les conditions microclimatiques amenant à une intervention sont une présence de précipitation nivale et une précipitation pluviale ou un haut taux d'humidité relative dans l'air reliées à une température de l'air. Cette température de l'air doit demeurer toutefois inférieure à une température seuil (tableau 1) obtenue par itération sur le nombre moyen de passages annuels (fig. 3). Le temps latent sans interventions dépend des moyens à disposition et est de l'ordre de quelques heures pour les épandages avec des moyens mécaniques et de plusieurs minutes pour les épandages par des moyens automatiques. Compte tenu que dans cette analyse le modèle utilise des données horaires, une hypothèse supplémentaire a été faite

**Tableau 1.** Résultats principaux du modèle simulant le microclimat et l’instant d’intervention de l’épandeuse ou par des moyens automatiques dans différentes régions suisses.

Régions	Station	Épandage moyen annuel de NaCl (g/m <sup>2</sup> )		Nombre d’épandages moyens annuels		Température seuil (8C)	
		M	A	M	A	M	A
Alpes	Guetsch	3001	2717	300	453	1,8	2,7
	Gd-St-Bernard	3499	3215	350	536	0,8	-0,3
Grisons	Davos	1497	1213	150	202	0,8	1,0
Tessin	Lugano	231	0	23	-	3,7	-
	Locarno	237	0	24	-	2,4	-
Léman	Pully	415	131	42	22	3,5	1,3
Valais	Sion	372	87	37	14	1,6	0,3
Plateau	Zürich	692	407	69	68	1,4	3,1
Pont local	Vaud	440	156	44	26	-0,5	-4,3

**Note:** M (épandage mécanique) : intervalle minimal entre deux interventions, 8 h; humidité relative minimale, 95 %; épaisseur du film d’eau en cas de pluie, 2 mm; concentration de chlorure de sodium dans l’eau lors de l’épandage, 36 %; quantité déversée lors du passage de la saleuse, 10 g/m<sup>2</sup>. A (épandage automatique) : nombre moyen de giclages en 1 h, 12; humidité relative minimale, 95 %; épaisseur du film d’eau en cas de pluie, 2 mm; concentration de chlorure de sodium dans l’eau lors de l’épandage, 21 %; quantité de chlorure de sodium épandue par giclage, 0,5 g/m<sup>2</sup>.

pour les épandages automatiques de salage; le nombre moyen de giclages s’élève à environ 12 giclages par heure.

Pour le canton du Tessin (Lugano et Locarno), les consommations annuelles de chlorure de sodium sont négatives (fig. 2b). Le climat doux du Tessin démontre bien l’inutilité de planifier des installations automatiques de salage dans cette région.

## 4. Sollicitation microclimatique

### 4.1. Paramètres déterminants

Le microclimat considère l’environnement climatique localisé à l’échelle de l’élément d’un ouvrage. On y distingue les zones ombrées, les zones ensoleillées, les zones exposées aux eaux des précipitations, les zones protégées, les zones de séchage rapide et les zones de stagnation d’eau. Les paramètres composant le microclimat sont la température de l’air, l’humidité relative de l’air, les précipitations et les stagnations d’eau.

L’exposition de l’ouvrage à l’humidité relative de l’air et aux précipitations a été classée en trois catégories, à savoir, exposition (i) aux eaux stagnantes, (ii) aux éclaboussures et (iii) au brouillard. L’important dans le modèle est de différencier la présence d’eau liquide de la présence de vapeur d’eau.

Les données météorologiques de l’intensité et de la direction du vent ne sont pas prises en considération dans ce modèle. La prise en compte de l’effet du vent se fait de manière indirecte à partir du modèle proposé avec le monitoring d’un ouvrage au chapitre 4,5. La comparaison du monitoring de la station météorologique, située au-dessus du pont (fig. 10), et du monitoring dans les caissons (fig. 11) permet de considérer l’effet du vent. La station météorologique sur le pont est directement exposée au vent, alors que les capteurs dans les caissons sont protégés du vent. Une atténuation des pics extrêmes des données météorologiques de température et d’humidité relative est enregistrée à l’intérieur des caissons (fig. 11). Des mesures sous la dalle de roulement et au-dessus d’un plan d’eau proche des piles

(fig. 12 et fig. 13) présentent des atténuations de signal intermédiaire.

### 4.2. Expositions à l’ensoleillement

Les mesures de la température par les stations météorologiques se font dans un abri aéré, protégé des radiations solaires et surélevé par rapport au sol. La surface du béton réfléchit et absorbe les radiations du rayonnement solaire. Cette partie absorbée se transforme en énergie thermique en augmentant la température dans la masse du béton, équations [1] et [2] (DuraCrete 1999).

$$[1] \quad T_{\text{surf}} = T_{\text{air}} + \frac{a \cdot I}{h_y}$$

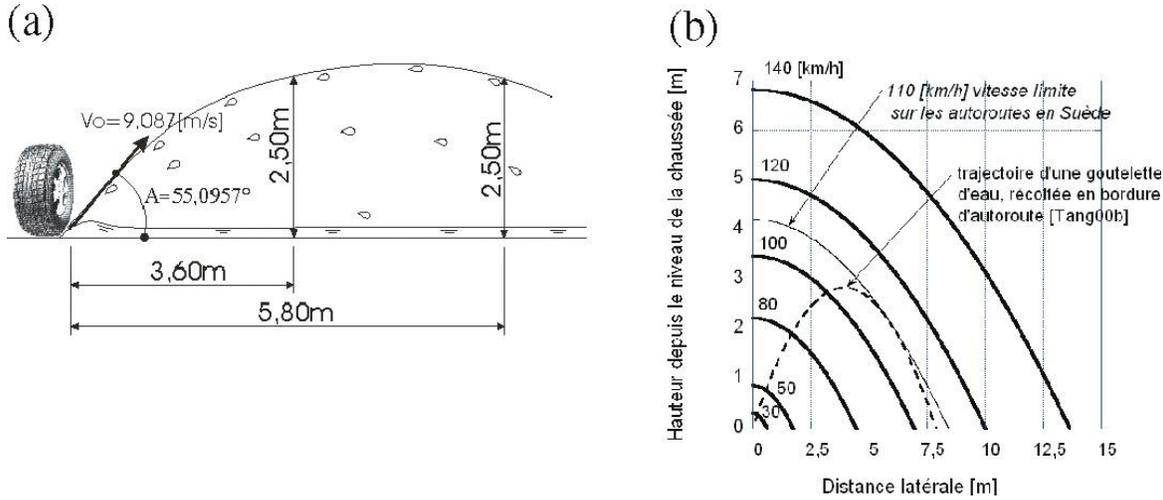
$$[2] \quad I = \frac{E_{\text{sol}}}{t}$$

$T_{\text{surf}}$  (8C), température à l’interface air-béton;  $T_{\text{air}}$  (8C), température de l’air mesurée par une station météorologique;  $a$  (-), facteur d’émissivité, pour le béton sa valeur est de 0,7;  $I$  (W/m<sup>2</sup>), rayonnement global;  $h_y$  (W/m<sup>2</sup> 8K), coefficient de transmission thermique de surface, béton, 20;  $E_{\text{sol}}$  (W h/m<sup>2</sup>), puissance horaire par unité de surface fournie par le soleil;  $t$  (h), intervalle de temps, dans notre analyse (1 h).

### 4.3. Exposition aux eaux stagnantes

Dans le cas d’exposition aux eaux stagnantes, l’eau de précipitations se trouve directement en contact avec les éléments d’ouvrage, lorsqu’elle est précipitée. Le temps d’humectation est la période où il se forme sur la surface du béton des gouttelettes d’eau liquide. Le temps d’humectation est très court, dépendant de l’intensité de la précipitation; souvent quelques minutes suffisent. La surface de l’ouvrage est totalement mouillée, alimentée par la précipitation. À la fin de l’averse, le séchage de la surface de l’ouvrage s’effectue par évacuation par gravité grâce au système d’évacuation d’eau et au drainage, par évaporation et par absorption de l’eau dans le béton armé ou bitumineux. La durée de cette phase dépend de la quantité du rayonnement

**Fig. 4.** (a) Modélisation des projections des éclaboussures dues au passage des roues sur la chaussée, schéma de la trajectoire d'une goutte d'eau. (b) Gabarit de projection de gouttelettes en fonction de la vitesse moyenne des véhicules, avec, traits discontinus, la trajectoire de base du modèle, provenant de la récolte des eaux dans des gouttières à différents niveaux du sol et à différentes distances en bordure de route (Tang et Utgenannt 2000).



solaire, de la température de l'air, de la vitesse du vent, des possibilités de stagnation de l'eau sur la surface, du débit de véhicule et du type de revêtement; cette phase peut durer d'une demi-heure à plusieurs heures.

Les conditions d'exposition du modèle sont égales à l'humidité relative de l'air en période sèche. Le contact avec l'eau sous forme liquide s'établit dès qu'une précipitation s'initie. Si la précipitation se termine durant la nuit (entre 18h00 et 06h00), la surface demeure en contact avec l'eau jusqu'au matin (06h00). Cette hypothèse tient compte d'une possible stagnation d'eau et d'un séchage lent durant la nuit. En dehors de ces heures, le contact avec l'eau sous forme liquide s'interrompt dès la fin de la précipitation (Roelfstra 2000).

#### 4.4. Exposition aux éclaboussures

L'eau de précipitations présente sur la chaussée forme un film d'eau atteignant environ 1 à 2 mm selon le dispositif d'évacuation des eaux de chaussées. Ce film d'eau s'évacue essentiellement par gravité en fonction du dévers et de la pente longitudinale de la chaussée. Une partie de ce film d'eau est brassée par le passage des véhicules et des gouttelettes sont projetées latéralement. Cette projection dépend essentiellement de la vitesse des véhicules ainsi que de l'épaisseur du film d'eau présente sur la chaussée. Les zones d'exposition aux éclaboussures dépendent de la position géographique de l'élément par rapport à la chaussée, soit sa distance transversale horizontale et verticale par rapport aux pneus des véhicules.

Des échantillons de saumure, recueillis en bordure d'autoroute en Suède (Tang et Utgenannt 2000) par un système de chenaux disposés à différentes hauteurs, montrent que ces éclaboussures peuvent atteindre une hauteur de 2,5 m pour deux positions transversales différentes des chenaux depuis le bord de la chaussée, soit 3,6 m et 5,8 m (fig. 4a). Les résultats de ces investigations montrent également que la teneur en ions de chlore diminue en fonction de la hauteur, environ de 5 % à 10 % à 2,5 m par rapport aux mesures au niveau du sol.

Le temps d'humectage de la surface du béton armé ou bitumineux lors d'une initiation d'une précipitation soumise aux éclaboussures devient plus important que pour l'exposition aux eaux stagnantes. La surface du béton s'humidifie progressivement et l'état de saturation dépend de l'intensité et de la durée de la pluie, de la quantité de trafic et de la position de l'ouvrage par rapport au bord de la chaussée. Le séchage a les mêmes caractéristiques que les expositions aux eaux stagnantes.

Dans la modélisation, les conditions d'exposition sont égales à l'humidité relative de l'air en période sèche. La surface est supposée être en contact avec l'eau, sous forme liquide, 1 h après le début d'une précipitation. Ce délai permet de considérer un film d'eau suffisant sur la chaussée pour qu'il y ait des éclaboussures importantes. Le contact avec l'eau sous forme liquide s'interrompt à la fin de la précipitation.

La frontière entre deux zones d'exposition est difficile à établir sur un ouvrage (Tang et Utgenannt 2000). Les zones d'éclaboussures se situent à environ 2,5 à 3 m au-dessus de la chaussée (Kropp et al. 1995). En partant de l'hypothèse qu'une gouttelette d'eau suit une trajectoire passant par deux points (Tang et Utgenannt 2000), il est possible de déterminer son énergie cinétique, soit la vitesse initiale de la goutte  $v_0$  et l'angle initial  $\alpha$  au moment de la projection (fig. 4a). Cette énergie cinétique transversale de la gouttelette est mise en relation linéaire avec l'énergie cinétique longitudinale du véhicule (110 km/h), équation [3]. Cette relation linéaire est une simplification importante, car l'énergie cinétique de la gouttelette, provoquée par le mouvement des véhicules et les turbulences de l'air, n'est pas transversale mais certainement inclinée dans la même direction de marche des véhicules, variant selon la vitesse du véhicule, le type du véhicule, le type de roues et les caractéristiques de la chaussée.

À partir de ces données, il est possible de prédire le gabarit admissible de projection en fonction de la vitesse moyenne du véhicule et en fonction de l'angle de projection initial  $\alpha$ , et

ainsi de visualiser les zones d'impact des gouttelettes élaboussées sur les structures (fig. 4b), équation [4], au moyen d'un modèle se basant sur les équations utilisées dans la balistique (Gruber 1988).

$$[3] \quad v_0 = 0,0826v_v$$

$$[4] \quad y = \frac{1}{2} \left( \frac{v_0^2}{g} - \frac{x_t^2 \cdot g}{v_0^2} \right)$$

$v_0$  (m/s), vitesse initiale d'une gouttelette d'eau projetée latéralement par le passage d'un véhicule sur une chaussée humide;  $v_v$  (km/h), vitesse moyenne des véhicules sur un tronçon de route;  $a$  (°), angle initial par rapport à l'horizon de la direction prise par une gouttelette projetée lors du passage d'un véhicule sur une chaussée humide;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , force d'attraction terrestre;  $x_t$  (m), distance transversale à une voie de circulation depuis le bord de la chaussée;  $y$  (m), distance verticale correspondant au gabarit de projection de gouttelettes.

#### 4.5. Exposition au brouillard

Des zones d'ouvrage peuvent être totalement protégées des eaux de précipitations et sont simplement exposées à l'humidité de l'air ou à une exposition d'embruns composés d'humidité et de produit salant. Cette humidité croît quelque peu, avec le passage des véhicules sur les chaussées. L'énergie cinétique des véhicules met en suspension de fines gouttelettes d'eau, ces dernières sont transportées par le mouvement des masses d'air sur l'ouvrage.

Les observations de la réduction de la visibilité sur des routes de Suède, faites à l'aide de caméras et effectuées sur la base des passages des poids lourds, montrent l'importance de la génération d'un brouillard par le passage de véhicules. La diminution de la visibilité dépend essentiellement des caractéristiques des roues, de la présence ou non de bavettes, de la vitesse des véhicules et également de l'épaisseur du film d'eau sur la chaussée. Cette réduction se produit non seulement à l'arrière du véhicule, mais également transversalement sur environ 50 m (Sandberg 1978, 1980a, 1980b). Cette réduction de visibilité est directement corrélée aux quantités d'éclaboussures projetées par les véhicules.

D'autres observations furent effectuées sur des tronçons de route, à trafic réel, au Canada. Les vitesses étudiées furent 50, 60, 80 et 100 km/h. Des échantillons de neige ont été prélevés à plusieurs endroits sur une ligne transversale par rapport au sens de la circulation et ont été analysés. Les résultats indiquent une diminution de la concentration des ions de chlore avec l'éloignement de la chaussée (MacBean et Al-Nassri 1987). D'autres études montrent également que 90 % des chlorures de sodium, contenus dans le brouillard, se déposent sur une distance de 20 m, lorsqu'aucun vent n'est relevé (Blomqvist 2001). Le vent est également un paramètre important pour le transport de ces gouttelettes sous forme de brouillard sur de grandes distances. Cette distance peut s'élever à plusieurs kilomètres (Blomqvist 2001).

Le contact avec l'humidité relative de l'air sur l'ouvrage peut conduire à de la condensation. Cette condensation se

produit lorsque la surface du béton, gardant une inertie thermique froide, reste en contact avec l'air environnant plus chaud. La couche limite, fine couche d'air sur la surface du béton, se trouve à une température équivalente à celle de la surface du béton et varie très rapidement pour atteindre la température de l'air. Si la différence de température est suffisante, l'air se trouve en sursaturation et il apparaît sur la surface du béton de fines gouttelettes d'eau liquide. Cette condensation peut se produire en période hivernale lorsque l'humidité relative dans l'air est importante due au passage des véhicules sur une chaussée humide et lorsque l'ouvrage

est suffisamment froid. Une condensation peut apparaître sur les ouvrages également en période estivale, lorsque l'ouvrage garde une bonne inertie thermique, comme pour les tranchées couvertes ou les murs de soutènement non exposés à un ensoleillement direct. L'air chaud emmagasine plus d'humidité et lorsqu'il se trouve en contact avec l'ouvrage, l'eau contenue dans l'air se précipite.

Dans le modèle, les conditions d'exposition prennent en compte l'humidité relative de l'air. Aucun contact avec l'eau sous forme liquide n'est considéré. Ceci correspond aux zones d'ouvrages protégées des intempéries. Cependant selon le niveau de protection aux intempéries, les fluctuations de l'humidité relative et de la température de l'air peuvent être prises en compte.

Selon le niveau de protection contre les intempéries, la fluctuation du signal des mesures d'humidité relative et de température peut varier, ce qui a été mis en évidence par un monitoring d'un pont routier. Une atténuation est d'autant plus marquée, lorsqu'elle est protégée des influences extérieures. Ainsi l'atténuation a été plus importante, dans l'ordre décroissant, dans les caissons, sous la dalle de roulement et au-dessus d'un plan d'eau (chapitre 6).

Les paramètres du modèle suivant sont valides seulement pour des données météorologiques mesurées avec un intervalle de temps d'1 h. En faisant le rapport des différences de température ou d'humidité relative de chaque intervalle mesurées par le capteur avec celles mesurées par la station météorologique sur le pont, et en comparant avec les différences de température ou d'humidité relative de chaque intervalle mesurées par la station météorologique, un nuage de points s'organise de manière ordonnée (fig. 5).

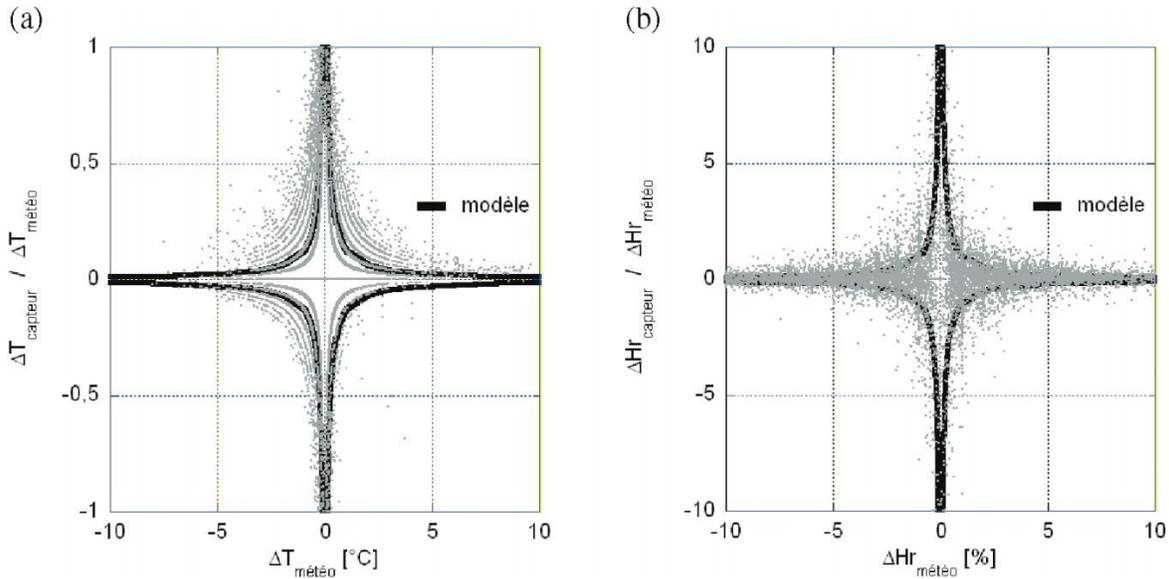
À ce nuage de points, une fonction homographique a été calée, pour les températures et pour l'humidité relative, équation [5].

$$[5] \quad \frac{\Delta T_{\text{capteur}}}{\Delta T_{\text{météo}}} = \pm \frac{\gamma}{\Delta T_{\text{météo}}} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta Hr_{\text{capteur}}}{\Delta Hr_{\text{météo}}} = \pm \frac{\gamma}{\Delta Hr_{\text{météo}}}$$

$\Delta T_{\text{capteur}}$  (°C), différence de température de l'air mesurée avec un capteur;  $\Delta T_{\text{météo}}$  (°C), différence de température de l'air mesurée avec une station météorologique;  $\Delta Hr_{\text{capteur}}$  (%), différence d'humidité relative dans l'air mesurée avec un capteur;  $\Delta Hr_{\text{météo}}$  (%), différence d'humidité relative dans l'air mesurée avec une station météorologique;  $\gamma$  (°C ou %), paramètre de la fonction homographique.

À chaque intervalle de temps, un incrément de température ou d'humidité relative est ajouté à la valeur de température ou d'humidité relative de l'intervalle précédent, équation [6].

**Fig. 5.** Nuage de points et modèle pour le traitement des données météorologiques dans les caissons, (a) données de température, (b) données d'humidité relative.



$$[6] \quad T_i \approx T_{i-1} \pm \frac{g}{DT_{\text{météo}}} \cdot DT_{\text{météo}} \quad \text{ou} \quad Hr_i \approx Hr_{i-1} \pm \frac{g}{DHr_{\text{météo}}} \cdot DHr_{\text{météo}}$$

$T_i, T_{i-1}$  (°C), température de l'air à l'instant  $i$ , respectivement à l'instant  $i-1$ ;  $Hr_i, Hr_{i-1}$  (%), humidité relative de l'air à l'instant  $i$ , respectivement à l'instant  $i-1$ .

Les points  $z_{\text{max}}$  et  $z_{\text{min}}$  représentent deux points d'extremum provenant des données météorologiques évoluant dans le temps  $t$ . La différence entre ces deux points fournit un intervalle entre ces deux extrema, appelé  $Dz$ . Le point  $z_p$  se situe entre ces deux extrema à une distance du paramètre  $a$  multiplié par l'intervalle entre les deux extrema (fig. 6). La position, par rapport à  $z_p$ , détermine le signe des équations [5] et [6]. Si la position de  $T_i$  ou  $Hr_i$  est supérieure à  $T_{i-1}$  ou  $Hr_{i-1}$ , le signe est négatif, alors que si elle est inférieure, le signe est positif. La position relative de  $z_p$  s'obtient en multipliant un facteur  $a$  par la différence entre deux extrema, puis additionné par le minimum de ces deux extrema.

Les paramètres  $a$  et  $g$  sont identiques pour les mesures effectuées au-dessus du plan d'eau et sous la dalle de roulement. Ces paramètres montrent une amplification plus importante pour les caissons. Pour les mesures effectuées au-dessus d'un plan d'eau, il faut toutefois ajouter 5 à 10 h de séchage après une averse, c'est-à-dire garder la même humidité relative pendant les 5 à 10 h suivant une précipitation (tableau 2).

## 5. Exposition des ouvrages d'art

### 5.1. Généralités

La variabilité des sollicitations microclimatique et environnementale est prise en compte en fonction de l'exposition de l'ouvrage d'art à ces sollicitations. Les ouvrages d'art comportent les ponts, viaducs, murs de soutènement, encorbellements, galeries de protection ouvertes, tranchées

couvertes et tunnels. Les exemples proposés sont principalement développés pour les ouvrages d'art intégrant les routes à grand débit. La terminologie adoptée dans les exemples se rapporte aux différentes zones d'exposition (S, exposition aux eaux stagnantes; E, exposition aux éclaboussures; B, exposition au brouillard; CL, exposition aux ions de chlore en périodes hivernales).

### 5.2. Zones d'exposition des ponts et viaducs

Les dalles de roulement des ponts et viaducs, si elles sont réalisées sans étanchéité sous le revêtement bitumineux ou si l'étanchéité de la dalle de roulement est défectueuse, présentent une exposition aux eaux stagnantes et à des risques de présence d'ions de chlore. Les bordures sont généralement soumises aux éclaboussures, y compris sur les faces verticales des bordures qui peuvent être atteintes par des éclaboussures ou des coulures s'écoulant sur une face verticale par gravité. Les zones, où les joints sont défectueux, où un système de drainage des eaux de surface est défectueux, peuvent également avoir une exposition aux eaux stagnantes avec présence d'ions de chlore. Les zones protégées des intempéries, comme les piles de pont, la partie sous la dalle de roulement, sont des zones d'exposition au brouillard salin. Dans les caissons, la zone d'exposition peut être assimilée à une zone d'exposition au brouillard mais sans présence d'ions chlore si aucune infiltration n'est relevée (fig. 7).

### 5.3. Zones d'exposition des murs de soutènement, des encorbellements, des galeries de protection ouvertes et ouvrages souterrains

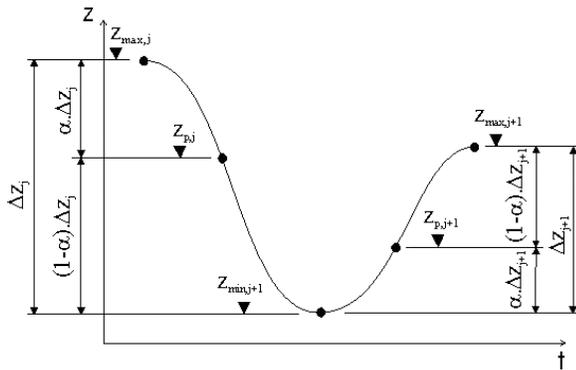
Une grande partie des surfaces du béton de ces ouvrages sont en contact avec le terrain naturel. La présence d'eau

**Tableau 2.** Valeurs des paramètres du modèle pour différentes situations, avec la variation D de l'écart entre les résultats du modèle et des capteurs, moyenne et écart type de cet écart.

Situation	Température de l'air			Humidité relative de l'air		
	a	g (8C)	DT (8C)	a	g (%)	DHr (%)
Dans les caissons	1/3	8	1,26±1,01	2/3	1	7,46±6,21
Sous la dalle de roulement	1/3	2	3,18±1,94	2/3	4	7,12±5,14
Au-dessus d'un plan d'eau	1/3	2	4,48±2,75	2/3	4	13,6±13,1

Note: a, paramètre de fonction homographique; DT, différence de température de l'air; g, paramètre de la fonction homographique; DHr, différence d'humidité relative dans l'air.

**Fig. 6.** Schéma d'un tronçon provenant de données météorologiques de température ou d'humidité relative, avec trois extrema, définition de la position  $z_p$ .



dans les terrains est importante, même si ces surfaces sont drainées, on peut admettre que ces faces sont toujours saturées d'eau (Buchwald 2000). Si les infiltrations d'eau de la chaussée sont possibles, il peut se développer un contact avec de l'eau sous forme saturée en présence d'ions de chlore. Cette présence reste négligeable, car elle est diluée dans un terrain gorgé d'eau (Siemes et al. 1998), pour autant que le terrain lui-même ne contienne pas d'agents agressifs.

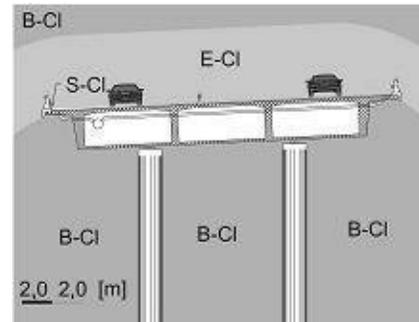
Pour les surfaces des murs s'élevant au-dessus de la chaussée, il y a lieu de définir une zone d'éclaboussures avec les gabarits proposés (fig. 8).

Pour les surfaces en galeries ou tunnels, hors contact avec le terrain naturel, les considérations longitudinales de l'ouvrage doivent être prises en considération. Plus on s'éloigne des portails de tunnel ou de galerie, plus la zone d'éclaboussures diminue. En cas de circulation unidirectionnelle dans les tunnels ou galeries, le portail d'entrée est la plus touchée par les éclaboussures. Le solde des surfaces se trouve en zone d'exposition au brouillard salin. Cependant selon les conditions de ventilation du tunnel ou de la tranchée couverte et de température, il se peut qu'une concentration importante d'humidité se produise à l'intérieur de ces ouvrages (fig. 9).

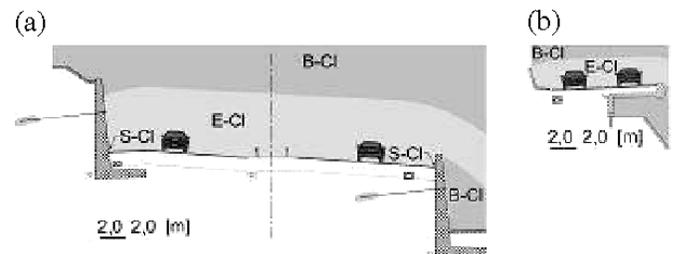
## 6. Comparaison du modèle climatique au monitoring d'un pont

Le modèle, présenté au chapitre 4,5, fonctionne avec une très bonne représentativité pour les données météorologiques de température de l'air (fig. 10 à 13). Le modèle transforme les données de la station météorologique (fig. 10) en données applicables à différentes zones d'exposition. Ces zones

**Fig. 7.** Profil type d'un pont ou viaduc autoroutier avec les différentes zones d'exposition (vitesse des véhicules à 120 km/h).



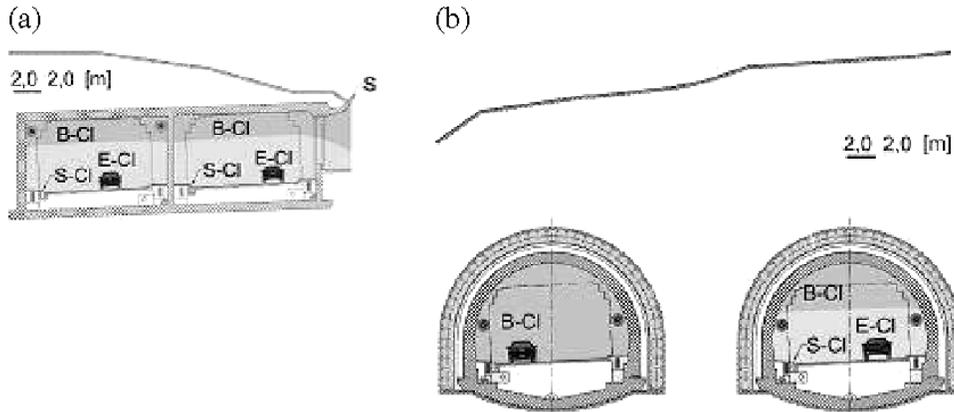
**Fig. 8.** Profil type avec les différentes zones d'exposition (a) d'une chaussée autoroutière dans un terrain en pente avec deux murs de soutènement en amont et en aval pour une vitesse des véhicules à 120 km/h, (b) d'un encorbellement sur une route cantonale dans un terrain en pente pour une vitesse des véhicules à 80 km/h.



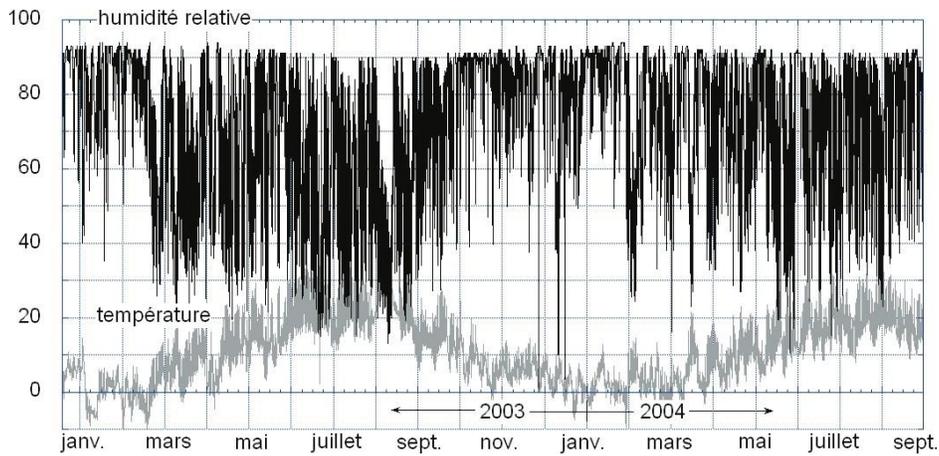
d'exposition sont protégées à différents degrés de l'effet du vent et ces zones ont été définies sur les piles au-dessus d'un plan d'eau, sous la dalle de roulement et dans les caissons. Un monitoring du pont sur ces différentes zones d'exposition permet de mettre en évidence l'effet de la variabilité spatiale due à la présence ou non du vent. Les différences entre le modèle et le monitoring peut être comparées pour la zone d'exposition à l'intérieur des caissons du pont (fig. 11), sous la dalle de roulement du pont (fig. 12) et sur une pile au-dessus d'un plan d'eau (fig. 13).

La colonne variation (tableau 2) représente la moyenne et l'écart type des écarts entre le modèle et le monitoring. Elle est légèrement moins précise pour les données météorologiques de l'humidité relative de l'air que pour les données de température. La variabilité des données de la zone d'exposition sur une pile au-dessus d'un plan d'eau est plus importante que les autres zones d'exposition. À cette position sur la pile, les capteurs n'étaient pas protégés de la pluie, ce qui explique cette variabilité plus importante (fig. 13).

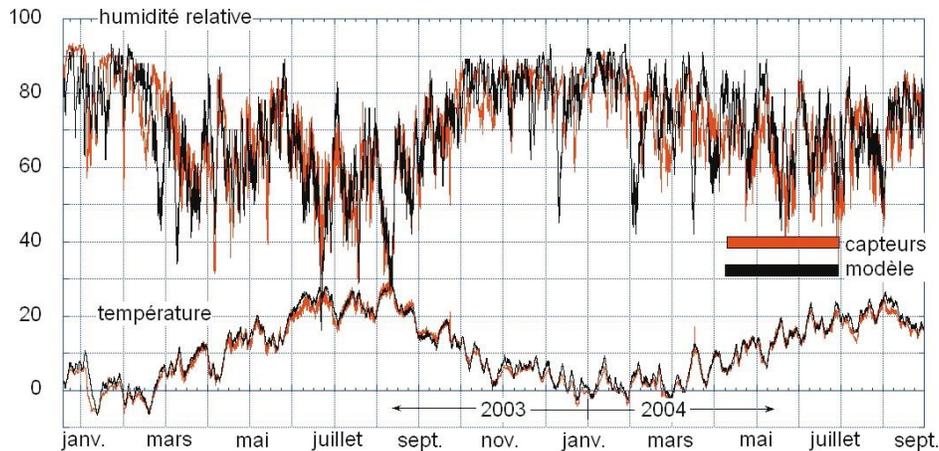
**Fig. 9.** Profil type avec les différentes zones d'exposition (a) d'une tranchée couverte et d'une galerie ouverte pour une vitesse des véhicules à 100 km/h, (b) d'un tunnel proche d'un portail avec les différentes zones d'exposition pour une vitesse des véhicules à 100 km/h.



**Fig. 10.** Données de température et d'humidité relative mesurées sur un pont dans la zone lémanique.



**Fig. 11.** Modèle climatique comparé au monitoring placé dans les caissons du pont.



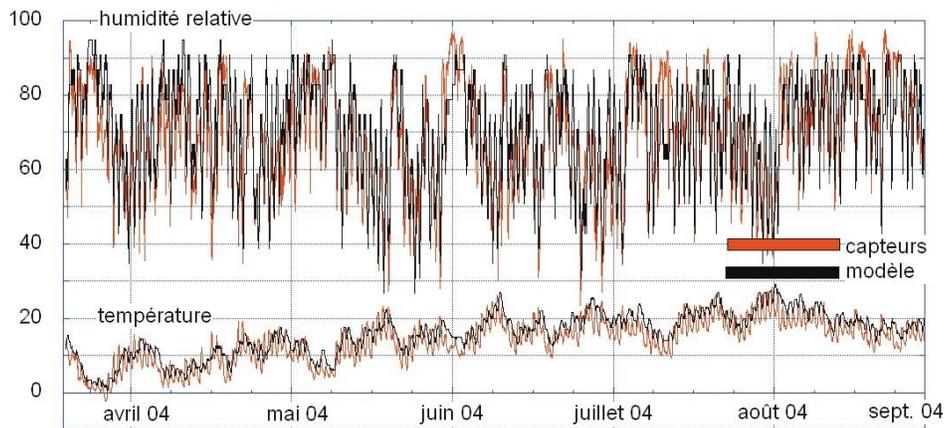
## 7. Conclusions

- Une modélisation est proposée pour déterminer des gabarits de zones d'éclaboussures en fonction de la vitesse des véhicules, afin de donner une définition précise des zones d'exposition des ouvrages au microclimat et aux produits salants (l'exposition aux eaux stagnantes, aux éclaboussures et au brouillard salin). Ainsi, la variabilité spatiale des sollicitations microclimatique et environnementale sur un ouvrage d'art dans sa globalité

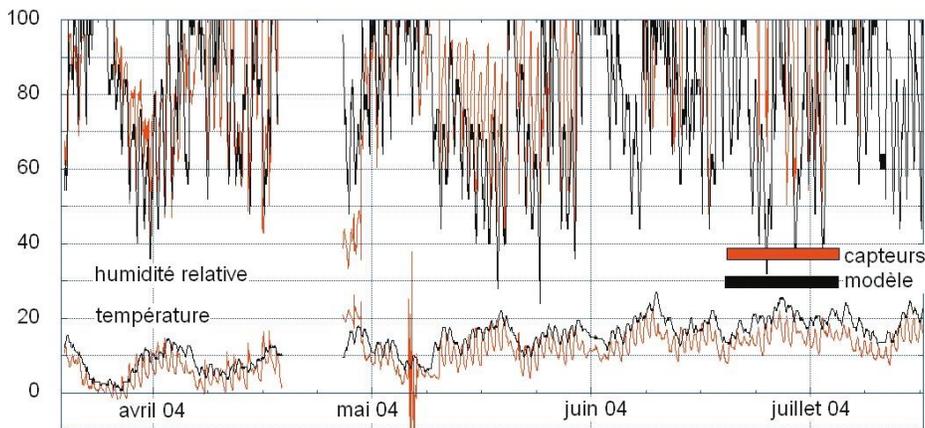
peut être étudiée en fonction de son degré d'exposition et il est possible de déterminer des zones équivalentes de sensibilité face aux détériorations.

- Les données d'une station météorologique sont transformées en données de microclimat reconstitué, représentant un élément d'ouvrage. Les effets des précipitations dépendent du degré d'exposition sous trois niveaux, soit ex-

**Fig. 12.** Modèle climatique comparé au monitoring placé sous la dalle de roulement du pont.



**Fig. 13.** Modèle climatique comparé au monitoring placé sur une pile au-dessus d'un plan d'eau.



position au brouillard, aux éclaboussures ou à l'eau stagnante. L'effet de l'exposition au vent peut être pris en considération en atténuant ou accentuant les pics maximaux et minimaux des données de température et d'humidité relative.

- L'étude permet de visualiser les économies en épandage de produits salants lorsque l'on utilise des moyens automatiques de salage. Les volumes annuels de produits salants déversés sur les chaussées s'obtiennent avec précision par l'intermédiaire du nombre de jours hivernaux, calculé à partir des données des stations météorologiques.
- L'évolution des précipitations, le volume déversé par l'épandeuse et l'instant d'épandage sont les paramètres prépondérants pour connaître l'évolution de la concentration de produits salants sur la chaussée.

## Bibliographie

Anita. 1998. Essai et évaluation d'autres méthodes et matériaux de dégivrage en Suède. *Dans X<sup>e</sup> Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR (Association mondiale de la route)*, 16 au 19 mars 1998, Luleå, Suède. AIPCR, Paris. Vol. 2, p. 289-302.

Blomqvist, G. 2001, De-icing salt and the roadside environment. Thèse de diplôme de 3<sup>e</sup> cycle, Department of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, Suède.

Brod, H.-G. 1993. Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt. Bericht zum Forschungsprojekt 9.9125 der Bundesanstalt für

Strassenwesen BAST. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Strassenwesen BAST 1993, 527 ref.; Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen: Verkehrstechnik; Heft V 2.

Brühwiler, E., Denarié, E., et Conciatori, D. 2001. Simulation of the corrosion behaviour of concrete elements reinforced with high performance steel. *Dans Proceedings, fib-Symposium « Concrete and environment »*, paper B3-3, dbv- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Kurfuerstenstrasse 129, D-10785 Berlin, Allemagne.

Buchwald, A. 2000. Ionentransportprozesse zur Verminderung von Schadsalzgehalten in porösen, feuchten Mauerwerksbaustoffen. Thèse de diplôme de 3<sup>e</sup> cycle, Bauhaus-Universität Weimar, 133, Weimar, Allemagne.

Castro, P., De Rincon, O.T., et Pazini, E.J. 2001. Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. *Cement and Concrete Research*, **31** : 529-537. doi:10.1016/S0008-8846(01)00453-7.

Conciatori, D. 2005. Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé. Thèse de diplôme de 3<sup>e</sup> cycle 3408, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

Conciatori, D., Brühwiler, E., et Denarié, E. 2002. Influence of microclimate on the probability of initiation of chloride induced corrosion in reinforced concrete. *Dans Proceedings of the 4th International Ph.D. Symposium in Civil engineering*, September 19 au 21 septembre, 2002, Munich, Allemagne.

Conciatori, D., Brühwiler, E., et Sadouki, H. 2008. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. Ce-

- ment and Concrete Research, **38** : 1401–1408. doi:10.1016/j.cemconres.2008.06.006.
- Conciatori, D., Morgenthaler, S., et Brühwiler, E. 2009. Rosenblueth method analysis to calculate reinforced concrete corrosion initiation probabilities. *International Journal of Reliability and Safety*. Sous presse.
- Denarié, E., Conciatori, D., et Brühwiler, E. 2003. Effect of microclimate on chloride penetration into reinforced concrete. *Dans SP-212 Sixth CANMET/ACI, International Conference on Durability of Concrete*, Thessaloniki, Greece, Juin 2003. *Sous la direction de V.M. Malhotra*. American Concrete Institute.
- Dumont, A.-G., et Baumann, D. 2005. Critères d'opportunité et de choix des installations automatiques de déverglaçage. *Sous la direction de l'Office fédéral des routes Suisse*, n8 1101, février 2005.
- DuraCrete. 1999. Models for environmental actions on concrete structures. The European Union- Brite EuRam III- Contract BRPR-CT95-0132- Project BE95-1347/R3, March 1999.
- Dysli, M. 1991. Le gel et son action sur les sols et fondations. *Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Complément au traité de Génie Civil*, Lausanne, Suisse.
- Gruber, C. 1988. *Mécanique générale*. Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.
- Kropp, J., Hubert, K., Hilsdorf, H., Grube, H., Andrade, C., et Nilsson, L.-O. 1995. *Dans Performance criteria for concrete durability*. *Sous la direction de J. Kropp et H.K. Hilsdorf*. E&FN SPON, Londres. p. 4–14.
- Laurinavicius, A., et Cygas, D. 1998. Problèmes d'entretien en hiver de la voirie urbaine en Lituanie. *Dans X<sup>e</sup> Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR*, 16 au 19 mars 1998, Luleå, Suède. AIPCR, Paris. Vol. 3. p. 689–700.
- Lindvall, A. 2001. Environmental actions and response, reinforced concrete structures exposed in road and marine environments. *Nordic Concrete Research*, **27** : 63–81.
- MacBean, E., et Al-Nassri, S. 1987. Migration pattern of de-icing salts from roads. *Journal of Environmental Management*, **25**(3) : 231–238.
- Marchand, J., Samson, E., Maltais, Y., et Lee, R.J. 2002. Predicting the performance of concrete structures exposed to chemically aggressive environments: fields validation. *Dans 2nd material specialty conference of the Canadian society for civil engineering*, 5 au 8 juin 2002, Montréal, Canada. Société canadienne de génie civil, AIPCR, Paris. Montréal, Que.p. 1–13.
- Masuda, M.Y. 2002. Condition survey of salt damage to reinforced concrete buildings in Japan. *Dans Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, England*, 9 au 11 septembre 2002. Concrete for Extreme Conditions. Thomas Telford Publications. p. 823–836.
- McElroy, A.D., Cooper, G., et Gall, J.A. 1998. Produits de déverglaçage chlorure de magnésium et chlorure de calcium. *Dans X<sup>e</sup> Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR*, 16 au 19 mars 1998, Luleå, Suède. Étude de la capacité de pénétration dans la glace et du volume de glace fondue. AIPCR, Paris. Vol. 2. p. 537–548.
- Météosuisse. 2007. Nombre de jours hivernaux. Disponible à [www.meteosuisse.ch](http://www.meteosuisse.ch). Institut suisse de la météorologie ISM.
- Moritz, K. 1998. Efficacité et rentabilité des installations de pulvérisation d'antigel. *Dans X<sup>e</sup> Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR*, 16 au 19 mars 1998, Luleå, Suède. Vol. 2. p. 303–313.
- Paulsson-Tralla, J., et Silfwerbrand, J. 2002. Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using surface measured concentrations. *ACI Materials Journal*, **99**(1) : 27–36.
- Roelfstra, G. 2000. Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton. Ph.D. n° 2310, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Sandberg, U. 1978. Spray protectors testing of efficiency. Rapport NR171A. Road and Traffic Research Institute, Linköping, Suède.
- Sandberg, U. 1980a. Efficiency of spray protectors. Rapport NR199A. Road and Traffic Research Institute, Linköping, Suède.
- Sandberg, U. 1980b. Improved spray protectors for commercial vehicles. An approach to increase traffic safety. *Dans Proceedings of the International Conference on Ergonomics and Transport*, 8 au 12 septembre 1980, Swansea. Academic Press Ltd., Londres. p. 194–202.
- Siemes, T., Polder, R., et Vries, H. 1998. Design of concrete structures for durability- Example: Chloride penetration in the lining of a bored tunnel. *HERON*, **43**(4) : 227–244.
- Tang, L., et Utgenannt, P. 2000. Characterization of chloride environment along a highway. *Dans 5th CanMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, 4 au 9 juin 2000, Barcelone, Espagne. *Sous la direction de V.M. Malhotra*. p. 213–223.
- Zambelli, M. 1998. Implantation d'une installation fixe d'aspersion automatique de fondant chimique sur l'autoroute de contournement de Lausanne. *Dans X<sup>e</sup> Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR*, 16 au 19 mars 1998, Luleå, Suède. American Concrete Institute, San Jose, Calif. Vol. 2. p. 463–475.