



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales**

**Anwendbarkeit von offenporigen Asphalt-deckschichten auf Kunstbauten des nationalen Strassennetzes**

**Applicability of porous asphalt on bridges of the national road network**

**École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)  
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)**

**Margarita Rodríguez, ing. civil dipl. EPF  
Patrick Rychen, ing. civil dipl. EPF  
André-Gilles Dumont, professeur EPF**

**Mandat de recherche AGB 2004/002 sur demande de l'Office Fédéral de Routes (ASTRA)**

**Janvier 2008**



## RESUME

Certaines réserves sont apparues concernant la mise en place de revêtements en enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales suisses. La susceptibilité supposée accrue de ces ouvrages aux variations de température a été l'élément principal entravant l'application de l'enrobé drainant en surface des ponts. Néanmoins, l'emploi d'un revêtement drainant sur un pont peut se justifier pour maintenir la sécurité du trafic lorsque la chaussée est mouillée ou pour des raisons de réduction du bruit.

L'objectif de la présente étude a été d'évaluer l'applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art en analysant le comportement hivernal du pont sur l'Arnon situé sur le km 10.050 de l'autoroute A5. Plusieurs sondes de mesure de température ont été installées à diverses profondeurs sur et dans le pont ainsi que dans la partie hors pont. Un appareil de mesure du rayonnement solaire et infrarouge a été installé sur un portique à proximité du pont en plus des sondes actives de surface induisant le déclenchement des alarmes lors d'un risque de gel. Les données ont été récoltées pendant deux hivers et utilisées dans un outil de modélisation prédisant l'évolution des températures de surface dans des situations extrêmes à partir des événements réels observés. L'emploi de cet outil a permis d'analyser un éventail de situations particulières.

## ZUSAMMENFASSUNG

Gewisse Vorbehalte sind aufgetreten, was die Anwendung von offenporigen Asphaltdeckschichten auf Kunstbauten des schweizerischen Nationalstrassennetzes betrifft. Die mutmasslich erhöhte Empfindlichkeit dieser Bauten gegenüber Temperaturschwankungen war das Hauptmerkmal, welches die Anwendung von offenporigen Asphaltdeckschichten auf Brückenoberflächen verhindert hat. Dennoch kann sich die Verwendung von solchen Asphaltdeckschichten auf Brücken rechtfertigen, um die Sicherheit des Verkehrs aufrechtzuerhalten, wenn die Fahrbahn nass ist, oder wenn die lärmabsorbierenden Eigenschaften erforderlich sind.

Die Zielsetzung dieser Studie bestand darin, die Anwendbarkeit von offenporigen Asphaltdeckschichten auf Kunstbauten abzuschätzen, indem man das Winterverhalten der Brücke über der Arnon analysiert hat, welche sich auf der Autobahn A5 bei km 10.050 befindet. Mehrere Sonden für Temperaturmessungen wurden an verschiedenen Tiefen auf und in der Brücke sowie im Abschnitt ausserhalb der Brücke installiert. Ein Messgerät der Sonnen- und Infrarotstrahlung wurde auf einer Signalbrücke in Brückennähe installiert, zusätzlich zu den aktiven Oberflächensonden, welche Frostrisikoalarm auslösen. Die Daten wurden während zwei Wintern gesammelt und in einem Simulationsprogramm benutzt, welches die Veränderung der Oberflächentemperaturen in Extremsituationen anhand beobachteter Ereignisse vorhersagen kann. Die Nutzung dieses Programms erlaubte es, mehrere Sonderfälle zu analysieren.

## SUMMARY

Certain reserves appeared concerning the use of porous asphalt pavements on the bridges of the Swiss national roads network. The presumed increased susceptibility of these structures to temperature variations was the principal element blocking the application of porous bituminous mixes on bridges surface. Nevertheless, the use of a porous asphalt pavement on a bridge can be justified to maintain the traffic safety in case of a wet pavement or for noise reduction reasons.

The objective of this study was to evaluate the applicability of a porous asphalt pavement on bridges by analysing the winter behaviour of the Arnon bridge located on the km 10.050 of the A5 motorway. Several temperature gauges were installed at different depths on and in the bridge as well as in the part outside the bridge. A solar and infrared radiation measuring apparatus was installed on a gantry near the bridge. Active surface gauges inducing the alarms release in case of a freezing risk were also installed. The data were collected during two winters and were used in a modeling tool predicting the surface temperatures evolution in case of extreme situations starting from the real observed events. The use of this tool made it possible to analyse a range of particular situations.



**TABLE DES MATIERES**

<b>RESUME</b> .....	<b>i</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>i</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>iii</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 PROBLÉMATIQUE</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3 PROGRAMME DE LA RECHERCHE</b> .....	<b>1</b>
1.3.1 Etape 1.....	1
1.3.2 Etape 2.....	2
1.3.3 Etape 3.....	2
1.3.4 Etape 4.....	2
<b>1.4 IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 EFFET SUR LA NORMALISATION</b> .....	<b>3</b>
<b>2 ETAT DES CONNAISSANCES ET EXPERIENCES RECENTES</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 ENQUÊTE AUPRÈS DES ADMINISTRATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 INFORMATIONS AU NIVEAU NATIONAL</b> .....	<b>6</b>
2.2.1 Canton de Vaud .....	6
2.2.2 Canton de Neuchâtel .....	8
2.2.3 Canton de Lucerne.....	8
2.2.4 Autres cantons .....	8
<b>2.3 INFORMATIONS AU NIVEAU INTERNATIONAL</b> .....	<b>9</b>
2.3.1 Autriche.....	10
2.3.2 Belgique .....	10
2.3.3 France .....	12
2.3.4 Pays-Bas.....	16
2.3.5 Japon .....	16
2.3.6 Suède.....	20
<b>2.4 SITUATION ACTUELLE EN SUISSE, ALLEMAGNE ET AUTRICHE</b> .....	<b>20</b>
<b>2.5 ACCIDENTOLOGIE SUR DES PONTS EN ENROBÉ DRAINANT</b> .....	<b>21</b>
2.5.1 Données relatives au trafic.....	21
2.5.2 Données relatives aux accidents.....	23
2.5.3 Taux d'accidents .....	26
2.5.4 Conclusions .....	28
<b>2.6 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES</b> .....	<b>28</b>

<b>3</b>	<b>ÉCOULEMENT DES EAUX DE SURFACE SUR UN OUVRAGE D'ART EN ENROBE DRAINANT</b>	<b>29</b>
3.1	<b>PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ARROSAGE SUR LE PONT</b>	<b>33</b>
3.1.1	Arrosage initial sur le pont	33
3.1.2	Arrosage au droit du joint	35
3.1.3	Arrosage sur le pont avec variation de l'intensité de pluie	36
3.1.4	Conclusions	36
3.2	<b>PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ARROSAGE HORS DU PONT</b>	<b>37</b>
3.2.1	Essai de percolation	37
3.2.2	Arrosage à différentes intensités de pluie	38
3.2.3	Conclusions	40
3.3	<b>PERMÉABILITÉ IN SITU</b>	<b>41</b>
3.4	<b>CONCLUSION DE L'ÉTUDE SUR L'ÉCOULEMENT DE L'EAU</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>COMPORTEMENT HIVERNAL D'UN OUVRAGE D'ART EN ENROBE DRAINANT</b>	<b>43</b>
4.1	<b>SITUATION DE LA PLANCHE D'ESSAI</b>	<b>43</b>
4.2	<b>INSTRUMENTATION</b>	<b>44</b>
4.2.1	Instrumentation sur pont et sur remblai	45
4.2.2	Instrumentation sur le portique	49
4.2.3	Station météorologique de Method	50
4.3	<b>ANALYSE D'UN ENROBÉ DRAINANT SUR PONT ET SUR REMBLAI</b>	<b>51</b>
4.3.1	Comparaison entre le comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai	51
4.3.2	Analyse des situations d'alarmes observées sur le site d'étude	55
4.3.3	Analyse détaillée de certains événements	62
4.3.4	Mesures thermographiques effectuées par l'EMPA	70
4.3.5	Conclusion de l'analyse du comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai	71
4.4	<b>ANALYSE D'UN ENROBÉ DRAINANT ET TRADITIONNEL SUR REMBLAI</b>	<b>72</b>
4.4.1	Période de froid extrême	75
4.4.2	Période de froid prolongé	76
4.4.3	Période de variation rapide de température	78
4.4.4	Conclusion de l'analyse d'un enrobé drainant et traditionnel sur remblai	79
4.5	<b>ANALYSE ET PRÉVISION À L'AIDE D'UN OUTIL DE SIMULATION</b>	<b>80</b>
4.5.1	Récolte et mise en forme des mesures	80
4.5.2	Approche de calibration	81
4.5.3	Construction des modèles en éléments finis et leur utilisation	85
4.5.4	Phase I: calibration du modèle sans prise en compte du vent	90
4.5.5	Phase II: calibration du modèle avec prise en compte de la convection	92
4.5.6	Phase III: simulation de journées avec risque de verglas	93

4.5.7	Conclusion de l'analyse de simulation .....	103
<b>4.6</b>	<b>CONCLUSION DE L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT HIVERNAL .....</b>	<b>104</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS GENERALES.....</b>	<b>107</b>
5.1	PROPOSITIONS PRATIQUES POUR L'APPLICATION D'UN ENROBÉ DRAINANT SUR OUVRAGE D'ART .....	108
5.2	PROPOSITIONS POUR L'ADAPTATION DES NORMES.....	108
5.3	PROPOSITIONS POUR DES RECHERCHES ULTÉRIEURES.....	109
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>111</b>
6.1	PRAKTISCHE EMPFEHLUNGEN FÜR DEN EINBAU EINES OFFENPORIGEN ASPHALTS AUF EINER BRÜCKE...	112
6.2	VORSCHLÄGE FÜR DIE NORMENANPASSUNG .....	112
6.3	VORSCHLÄGE FÜR SPÄTERE FORSCHUNGSARBEITEN.....	113
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>123</b>
9.1	STATISTIQUES D'ACCIDENTS .....	123
9.1.1	Autoroute A1 – Vaud.....	123
9.1.2	Autoroute A5 – Vaud.....	133
9.1.3	Autoroute A9 – Vaud.....	144
<b>9.2</b>	<b>REPRÉSENTATIONS DES DIVERSES SITUATIONS D'ALARME.....</b>	<b>165</b>
9.2.1	Janvier 2006 .....	165
9.2.2	Février 2006.....	168
9.2.3	Mars 2006.....	171
9.2.4	Avril 2006.....	174
9.2.5	Novembre 2006.....	177
9.2.6	Décembre 2006.....	180
9.2.7	Janvier 2007 .....	183
9.2.8	Février 2007 .....	186
9.2.9	Mars 2007 .....	189
9.2.10	Avril 2007 .....	192
<b>9.3</b>	<b>RAPPORT DE L'EMPA SUR LES MESURES THERMOGRAPHIQUES.....</b>	<b>195</b>
<b>9.4</b>	<b>RÉSULTATS DE LA SIMULATION .....</b>	<b>211</b>
9.4.1	Résultat de la simulation avec la conduction seule .....	211
9.4.2	Résultat de la simulation avec conduction + rayonnement .....	214
9.4.3	Résultat de la simulation avec conduction + rayonnement + convection .....	214
9.4.4	Résultat de la simulation avec conduction + rayonnement + convection avec vent fort.....	216



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 PROBLEMATIQUE

Les réticences relatives à l'emploi de l'enrobé drainant en regard de l'entretien hivernal et la susceptibilité supposée accrue des ouvrages aux variations de température ont généralement empêché l'application de l'enrobé drainant en surface des ouvrages d'art.

Cependant, son emploi sur ouvrage se justifie dans l'optique de la sécurité des usagers, lorsque la chaussée avant et après l'ouvrage se trouve revêtue d'enrobé drainant. L'application du même produit sur le pont garantit une continuité de la texture de surface et donc de la visibilité par temps de pluie. Un autre type de revêtement n'atténue en effet pas autant la projection d'eau derrière les véhicules, donc tout changement de revêtement passant d'un enrobé drainant à autre chose crée par temps de pluie un écran d'eau plus ou moins important sous l'action de la projection d'eau généré par le trafic.

De même, en cas d'emploi de l'enrobé drainant à des fins de réduction du bruit, le changement de revêtement en surface d'ouvrage réduit voire annule en cet endroit l'effet désiré.

En dehors de l'applicabilité, l'emploi de l'enrobé drainant sur ouvrages d'art nécessite l'étude de détails constructifs, comme par exemple l'évacuation des eaux de ruissellement aux points bas et aux droit des joints de dilatation.

Le canton de Vaud possède sur son réseau de routes nationales une douzaine d'ouvrages au total qui sont déjà revêtus d'enrobé drainant. Il semble qu'à ce jour il n'y ait pas d'augmentation significative du taux d'accidents à ces endroits.

## 1.2 OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE

Le but de cette étude est d'évaluer l'applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art vis-à-vis de la sécurité hivernale et des risques d'aquaplaning. Il s'agit d'en définir les domaines et les modalités d'application, les mesures et les précautions à prendre. Il convient également de fournir les détails d'exécution et les mesures à prendre lors de l'entretien hivernal.

Cette recherche se compose de quatre étapes décrites dans le chapitre ci-dessous.

## 1.3 PROGRAMME DE LA RECHERCHE

### 1.3.1 Etape 1

#### a) Etat de l'art

Le programme prévu pour la totalité de la recherche a commencé par une recherche de la bibliographie existante traitant des études effectuées en matière de sécurité et d'entretien hivernal sur les ouvrages d'art revêtus d'enrobé drainant.

#### b) Analyse du comportement des ouvrages d'art en enrobé drainant

Après la recherche bibliographique, une récolte et analyse du comportement des ouvrages d'art déjà en service et comportant un revêtement en enrobé drainant a été effectuée dans le but de quantifier le risque sur ces ouvrages et de le comparer d'une part avec les sections adjacentes (hors ouvrage) et d'autre part d'évaluer la différence entre une situation climatique sèche et des conditions hivernales et de fortes pluies.

Pour ce faire, les statistiques d'accidents ainsi que les données des responsables de l'exploitation ont été utiles pour quantifier ce risque. Pour les ponts où les données étaient disponibles, des comparaisons avant et après la mise en place du drainant ont été faites.

L'analyse de ces données devait mettre en évidence l'augmentation éventuelle du risque au niveau de la sécurité des usagers et les spécificités de l'entretien de ces ouvrages. Elle devait aussi permettre de souligner les problèmes éventuels au droit des joints de chaussées (remontée d'eau), et les dangers qui en résultent (aquaplaning, formation de verglas).

Ce recensement a fourni la base pour les simulations des effets du changement de la température et les analyses décrites dans les étapes suivantes.

### 1.3.2 Etape 2

#### c) Instrumentation

Un ouvrage situé sur l'A5 dans le canton de Vaud à proximité de Champagne a été sélectionné comme planche d'essai. Il s'agit du pont sur l'Arnon. Pour cet ouvrage, une instrumentation spécifique a été installée, permettant de recueillir les données nécessaires à l'évaluation de sa viabilité hivernale d'une part, et d'autre part d'évaluer par simulation le comportement hivernal d'autres types d'ouvrages d'art. Un revêtement monocouche en enrobé drainant de type DRA 11 a été mis en œuvre sur ce pont.

L'instrumentation prévue pour cette planche d'essai s'est faite sur l'ouvrage d'une part, et une instrumentation similaire a été installée sur la chaussée au voisinage de l'ouvrage afin de servir de base de comparaison.

L'instrumentation sur le pont est composée d'une station météo complète, de sondes de mesure de température de l'air et de la chaussée:

- en surface du revêtement
- à l'interface entre l'enrobé drainant et le SAMI
- à l'interface entre le tablier du pont et la chaussée
- sur la partie inférieure du pont (sous l'ouvrage)

Pour capter les radiations du ciel ainsi que celles venant du sol, un double capteur a été posé sur un portique à 500m du pont.

Le choix et l'implantation de la station météo et de l'instrumentation, de même que l'acquisition, la transmission et le traitement des données s'est fait en collaboration avec l'entreprise Boschung Mechatronic AG. Il faut noter que, en dehors de l'installation nécessaire pour la présente recherche, le pont sur l'Arnon était déjà équipé de certains capteurs, en particulier de détecteurs de verglas qu'il s'agissait d'intégrer dans le système d'acquisition pour les besoins de l'étude en question.

### 1.3.3 Etape 3

#### d) Collecte des données

Les instruments implantés sur la planche d'essai, ainsi que ceux mis en place dans la chaussée au voisinage des ouvrages ont permis de collecter les données nécessaires pour évaluer les conditions de la superstructure durant l'hiver.

#### e) Scannage thermographique de la surface de l'ouvrage

Le scannage thermographique de l'ouvrage d'art instrumenté s'est fait dans des conditions météorologiques jugées défavorables pour la sécurité des usagers, à savoir lors de l'annonce d'un risque significatif et imminent de gel et/ou de précipitations abondantes de neige.

Il a été mis en évidence, à l'aide d'un équipement pour la thermographie, l'évolution des conditions de température dans la couche de surface drainante mise en place sur les ouvrages instrumentés. L'étude thermographique a servi d'une part à la saisie du régime de température en surface du pont et aux abords des points particuliers comme les bordures, les regards, etc. et, d'autre part, à l'estimation du mode de la gestion des eaux, comme le drainage ou la formation de glace.

### 1.3.4 Etape 4

#### f) Simulation du comportement hivernal

Une simulation du comportement hivernal de l'ouvrage étudié a été réalisée à l'aide d'un logiciel spécifique, sur la base des données climatiques recueillies durant l'hiver 2005/2006 et 2006/2007 à l'aide des instruments

implantés. Cette simulation a permis d'évaluer les risques potentiels auxquels sont soumis les ouvrages d'art lorsque ceux-ci sont revêtus d'une couche de roulement en enrobé drainant, par rapport aux risques qui menacent les chaussées et les ouvrages d'art revêtus de mélange bitumineux traditionnel.

#### g) Analyse des résultats

Après avoir effectué toutes les campagnes de mesures établies dans cette étude et récolté les données issues de l'instrumentation de la planche d'essai, tous les résultats obtenus ont été analysés de manière plus approfondie.

#### h) Rapport

L'analyse et l'interprétation des résultats ont servi de base à l'établissement d'un rapport final contenant la partie théorique de la recherche ainsi que des dispositions constructives à respecter et les limites d'application de ce type de revêtement sur les ouvrages d'art. D'autre part, les résultats peuvent également servir de base à l'élaboration de prescriptions, de recommandations ou de normes.

### 1.4 IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE

L'implication de ce projet dans la pratique consiste en la définition des conditions à respecter pour être en mesure de mettre en place un revêtement bitumineux en enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales.

L'application de l'enrobé drainant aux ouvrages d'art permet de garder un système cohérent et continu du type de revêtement mis en place tout au long d'un même tronçon de route. Ceci assure également un accroissement de l'efficacité des mesures antibruit de l'ensemble du système et augmente la sécurité des usagers de la route en présence de pluie.

La recherche, par l'évaluation du comportement hivernal d'ouvrages revêtus d'enrobé drainant a permis de définir les risques en cas de gel ou de neige et d'établir des prescriptions et recommandations pour l'entretien hivernal de ces ouvrages.

### 1.5 EFFET SUR LA NORMALISATION

L'étude donne les bases à l'Office Fédéral des Routes (OFROU) pour mettre en place des directives ou des recommandations définissant les conditions de mise en place d'un enrobé drainant à la surface des ouvrages d'art présents dans le réseau des routes nationales et définir les règles en matière de maintenance hivernale.



## 2 ETAT DES CONNAISSANCES ET EXPERIENCES RECENTES

Au début du projet, une recherche de la bibliographie existante traitant des études effectuées en matière de sécurité et d'entretien hivernal sur les ouvrages d'art revêtus d'enrobé drainant a été faite. Certains documents traitant du comportement des enrobés drainants comparé au comportement des enrobés fermés, ou encore de leur maintenance hivernale ont été publiés et sont plus amplement décrits dans la suite de ce chapitre. Par contre, aucune analyse n'a été trouvée concernant le cas spécifique des ponts revêtus d'enrobé drainant.

### 2.1 ENQUETE AUPRES DES ADMINISTRATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

La récolte d'expériences existantes a été effectuée par le biais d'un questionnaire envoyé le 11 juillet 2005 en plusieurs langues à diverses administrations nationales et internationales. Afin d'être efficace et dans l'optique de récolter le maximum de réponses possibles, le questionnaire a été rédigé de manière à ce qu'il puisse être traité relativement rapidement (Figure 1). Il était composé de deux pages et contenait deux questions visant à connaître l'existence et l'emplacement d'éventuels ponts revêtus d'enrobé drainant sur le réseau routier et autoroutier et pouvoir ainsi récolter des informations sur d'éventuelles situations particulières ou d'éventuels problèmes rencontrés sur ces ponts en cas de:

- températures atmosphériques basses ou très basses (formation plus rapide de verglas, entretien hivernal plus délicat, etc.)
- précipitations de neige (dénégement plus difficile, entretien hivernal plus délicat, etc.)
- précipitations de pluie (stagnation d'eau au droit des joints, risque d'aquaplaning, etc.)

<p><b>QUESTIONNAIRE RELATIF AUX ENROBES DRAINANTS</b></p> <p>Ce questionnaire est rempli par: .....</p> <p>Personne de contact pour informations complémentaires: .....</p> <p><u>Question 1</u></p> <p>Disposez-vous de ponts revêtus d'enrobé drainant sur votre réseau routier ou autoroutier?  <input type="checkbox"/> oui    <input type="checkbox"/> non</p> <p>Si oui, pourriez-vous nous donner quelques informations en remplissant le tableau ci-dessous?</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>N°</th> <th>Nom du pont</th> <th>Situation sur l'axe routier</th> <th>Au km</th> <th>Route ou autoroute</th> <th>Type de drainant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ex.</td> <td>Pont sur l'Arnon</td> <td>A5 - Yverdon-Neuchâtel</td> <td>10'080</td> <td>autoroute</td> <td>DRA 11 monocouche</td> </tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	N°	Nom du pont	Situation sur l'axe routier	Au km	Route ou autoroute	Type de drainant	ex.	Pont sur l'Arnon	A5 - Yverdon-Neuchâtel	10'080	autoroute	DRA 11 monocouche	1						2						3						4						5						6						7						8						9						10						11						12						13						14						15						<p><u>Question 2</u></p> <p>Par rapport aux ponts revêtus d'enrobé traditionnel, avez-vous observé des situations ou des problèmes particuliers sur les ponts revêtus d'enrobé drainant lors de:</p> <p>températures atmosphériques basses ou très basses (formation plus rapide de verglas, entretien hivernal plus délicat, etc.)    <input type="checkbox"/> oui    <input type="checkbox"/> non</p> <p>Si oui, lesquels?                  .....                  .....                  .....                  .....                  .....</p> <p>précipitations de neige (dénégement plus difficile, entretien hivernal plus délicat, etc.)    <input type="checkbox"/> oui    <input type="checkbox"/> non</p> <p>Si oui, lesquels?                  .....                  .....                  .....                  .....                  .....</p> <p>précipitations de pluie (stagnation d'eau au droit des joints, risque d'aquaplaning, etc.)    <input type="checkbox"/> oui    <input type="checkbox"/> non</p> <p>Si oui, lesquels?                  .....                  .....                  .....                  .....                  .....</p> <p style="font-size: small;">Vous pouvez répondre par mail à l'adresse <a href="mailto:margarita.rodriguez@epfl.ch">margarita.rodriguez@epfl.ch</a> ou par fax au +41 21 693 63 49</p>
N°	Nom du pont	Situation sur l'axe routier	Au km	Route ou autoroute	Type de drainant																																																																																																		
ex.	Pont sur l'Arnon	A5 - Yverdon-Neuchâtel	10'080	autoroute	DRA 11 monocouche																																																																																																		
1																																																																																																							
2																																																																																																							
3																																																																																																							
4																																																																																																							
5																																																																																																							
6																																																																																																							
7																																																																																																							
8																																																																																																							
9																																																																																																							
10																																																																																																							
11																																																																																																							
12																																																																																																							
13																																																																																																							
14																																																																																																							
15																																																																																																							

Figure 1: Questionnaire envoyé aux administrations nationales et internationales.

## 2.2 INFORMATIONS AU NIVEAU NATIONAL

Comme aucune analyse n'a été trouvée concernant les cas spécifiques de ponts revêtus d'enrobé drainant, la recherche d'informations s'est centrée sur l'analyse des expériences fournies par les divers responsables du réseau.

Au niveau national, 22 questionnaires sur les 26 transmis ont été remplis et renvoyés par les cantons, l'administration routière de la Principauté du Liechtenstein ayant également donné une réponse (Tableau 1). Il en ressort qu'actuellement, seuls les cantons de Vaud et de Neuchâtel disposent de ponts revêtus d'enrobé drainant. Dans un futur proche, le canton de Lucerne prévoit également un revêtement drainant sur certains ponts.

Canton	Existe-t-il des ponts revêtus d'enrobé drainant?	Date de réponse
TG	Non	17.08.05
JU	pas de réponse	
VD	Oui	05.08.05
NE	Oui	19.08.05
GR	Non	11.07.05
AI	pas de réponse	
BE	Non	20.07.05
ZG	Non	05.09.05
VS	Non	05.09.05
SZ	pas de réponse	
GL	pas de réponse	
NW	Non	12.07.05
GE	Non	21.07.05
BL	Non	19.07.05
SG	Non	13.07.05
AR	Non	13.07.05
SH	Non	05.09.05
FR	Non	11.07.05
TI	Non	14.07.05
BS	Non	14.07.05
ZH	Non	12.07.05
UR	Non	25.07.05
LU	Oui en 2006	18.08.05
AG	Non	14.07.05
OW	Non	28.07.05
SO	Non	15.07.05
FL	Non	11.07.05

Tableau 1: Liste et dates de réponse des cantons.

### 2.2.1 Canton de Vaud

Pour ce qui est du canton de Vaud, il possède au total 17 ponts revêtus d'enrobé drainant du type DRA 11 monocouche sur le réseau autoroutier, aucun sur ses routes cantonales (Tableau 2):

- 9 sur l'axe autoroutier A9, dont une bretelle d'accès
- 3 sur l'axe autoroutier A1
- 5 sur l'axe autoroutier A5

Les dates de pose varient de 1993 pour l'A1 à 2004 pour l'A5, et les longueurs des ponts varient de 36 à 436m. A part pour trois des ponts recensés sur l'A9 et sur l'A5, l'enrobé drainant a été posé dans les deux sens de circulation.

Le canton de Vaud a répondu par la négative aux deux questions posées dans le questionnaire. En effet, aucune observation particulière n'a été faite lors de basses températures, de chutes de neige ou de fortes pluies.

Route	Nom du pont	Droite/ Gauche	Type de drainant	Date pose	km début	Longueur Pont [m]
A1	Pont sur Boiron St. Prex	D&G	DRA 11	1993	56.33	210
	Pont de la Gare	D&G	DRA 11	1993	58.76	109
	Pont sur la Venoge	D&G	DRA 11	1996	64.04	219
A5	Pont sur le Grandsonnet	D	DRA 11	2004	06.74	292
	Pont de la jonction de Grandson	D	DRA 11	2004	09.72	60
	Pont sur l'Arnon	D&G	DRA 11	2004	10.00	83
	Pont de Corcelles	D&G	DRA 11	2004	14.67	237
	Pont de la Raisse	D&G	DRA 11	2004	18.47	106
A9	Pont sur la Sorge	D&G	DRA 11	1997	00.89	178
	Pont sur la Mèbre	D&G	DRA 11	1997	02.13	155
	Pont sur la Pétause	D&G	DRA 11	1997	02.72	130
	Pont Lutrive (bretelle)	D	DRA 11	1996	02.96	436
	Ponts Baye de Clarens	D&G	DRA 11	2000	30.92	180
	Ponts des Vuarenes	D&G	DRA 11	2000	32.63	129
	Pont sur la Grande Eau	D&G	DRA 11	1995	47.07	63
	Pont des Raffineries	D&G	DRA 11	1998	50.19	36
Pont sur l'Avançon	D&G	DRA 11	1998	56.96	50	

**Tableau 2:** Ponts revêtus en enrobé drainant – Vaud.

Le canton de Vaud relate le cas de l'échangeur de Villars-Ste-Croix de la manière suivante:

Dans le cadre de l'élargissement de l'autoroute de contournement de Lausanne à trois voies (1995-1997), la couche de roulement des branches R (Simplon-Lausanne), M (Yverdon-Simplon) et Q (Simplon-Yverdon) de l'échangeur de Villars-Ste-Croix a été renouvelée en posant de l'enrobé drainant. Comme cela se faisait dans le canton de Vaud, le drainant a été posé hors ouvrages et sur ouvrages. Ce drainant a été posé essentiellement pour des questions de protection contre le bruit.

En 2000, l'OFROU a mené une campagne de mesures de la glissance sur l'ensemble du réseau des routes nationales. Ces résultats ont montré que les mesures effectuées sur certaines branches de l'échangeur de Villars-Ste-Croix étaient inférieures à la limite de la norme SN 640 511b (note I4<0).

D'autre part, il a été observé que le taux d'accidents calculé sur ces mêmes branches était, comparativement à celui calculé sur d'autres échangeurs, très élevé.

Un complément d'étude a été réalisé en 2001 afin de comparer les mesures de glissance mesurée et les taux d'accidents. Cette analyse a montré:

- une très bonne corrélation entre une glissance élevée et le taux d'accidents
- que le coefficient de frottement n'était inférieur aux valeurs limites que dans les zones en courbes alors qu'il était bon (note I4 > 4) dans les alignements
- que l'effet de "ripage" du trafic dans les courbes provoque une usure accélérée des granulats de la couche de surface. En effet, le coefficient de frottement mesuré dans les courbes est en moyenne deux fois plus faible que celui mesuré dans les alignements alors que le revêtement est identique.

Dans les zones en courbe, le revêtement drainant a été remplacé en 2002 par un MR 8. La couche de roulement a été fraisée sur 2.5 cm et 2.5 cm de MR 8 ont été posés. Afin de ralentir l'usure accélérée dans les

courbes (~2 fois plus rapide en courbe que dans un alignement), il a été imposé d'utiliser un granulat ayant un CPA  $\geq 55$ .

La configuration de l'échangeur fait que les zones incriminées correspondaient principalement à des poses sur ouvrage. Mais il est à relever que ce problème n'est pas lié à la pose de drainant sur les ponts mais bien à un problème de polissage accéléré des granulats utilisés. En effet, la traversée de Rivaz (route cantonale hors ouvrage) posée à la même époque avec les mêmes granulats présente les mêmes problèmes de polissage accéléré du granulat.

Suite à cette expérience et pour des questions évidentes de sécurité, le canton de Vaud a arrêté de poser des enrobés drainants dans les échangeurs. En effet, de par ses caractéristiques intrinsèques; l'enrobé à fort pourcentage de gravillons et "mise à plat" de ces gravillons lors du cylindrage, le drainant présente un risque accru, par rapport aux enrobés traditionnels et macro-rugueux, au polissage accéléré dans les zones où les efforts tangentiels sont très importants.

Ce problème n'est nullement lié au fait que le drainant ait été posé sur un ouvrage mais au fait qu'il a été posé dans une zone à forte sollicitation tangentielle avec un granulat sensible au polissage.

### 2.2.2 Canton de Neuchâtel

Le canton de Neuchâtel possède sur son réseau routier un seul pont revêtu d'enrobé drainant du type DRA 11 monocouche sur son réseau autoroutier (Tableau 2).

Le Service des Ponts et Chaussées a observé des situations particulières lors de températures atmosphériques basses ou très basses, à savoir que le salage préventif est moins efficace sur un enrobé drainant que sur un enrobé traditionnel. En cas de chutes de neige, cas qui ne sont rencontrés que quelques jours par an, l'entretien hivernal semble être plus délicat. Par contre, aucune observation n'a été faite lors de précipitations de pluie.

Route	Nom du pont	Droite/ Gauche	Type de drainant	Date pose	km début	Longueur pont [m]	Altitude [msm]
A5	Pont sur le Pontet	D&G	DRA 11	2002	22.15	53	500

Tableau 3: Ponts revêtus en enrobé drainant – Neuchâtel.

### 2.2.3 Canton de Lucerne

Le canton de Lucerne prévoit de poser un revêtement drainant monocouche de type DRA 8 sur trois ponts à proximité d'Emmen (Tableau 4) pour réduire l'impact du bruit engendré par l'autoroute aux alentours de la ville. Actuellement, aucune remarque ne peut être faite à ce sujet.

Route	Nom du pont	Droite/ Gauche	Type de drainant	Date pose	km début	Longueur pont [m]
A2	Überführung SBB Gersag	D&G	DRA 8	2006?	89.405	-
A2	Rüeggisingerbrücke	D&G	DRA 8	2006?	89.860	-
A2	Seetalbrücke	D&G	DRA 8	2006?	90.972	-

Tableau 4: Ponts revêtus en enrobé drainant – Lucerne.

### 2.2.4 Autres cantons

Le Service des routes du canton du Valais a répondu au questionnaire, malgré le fait qu'il ne possédait pas d'ouvrage d'art revêtu d'enrobé drainant. Il a donné des considérations générales concernant leurs

observations du comportement hivernal du drainant par rapport à l'enrobé traditionnel, à savoir que, lors de précipitations de neige:

- la neige tient plus rapidement sur une chaussée revêtue d'un enrobé drainant, ce qui implique que l'épandage de sel doit se faire plus rapidement
- le déneigement ne pose cependant aucun problème pour autant que la route soit revêtue d'enrobé drainant sur des tronçons homogènes suffisamment longs
- sur la bande d'arrêt d'urgence, la neige a tendance à rester, même après le déneigement

Par contre, aucune observation particulière n'a été faite lors de températures atmosphériques basses ou très basses (formation plus rapide de verglas, entretien hivernal plus délicat, etc.), ni lors de précipitations de pluie (stagnation d'eau au droit des joints, risque d'aquaplaning, etc.)

### 2.3 INFORMATIONS AU NIVEAU INTERNATIONAL

Plusieurs questionnaires ont également été envoyés aux administrations étrangères via les contacts que possède le Lavoc avec les pays actifs au sein de l'Association Mondiale de la Route (AIPCR) comme indiqué au Tableau 5. Sur les 30 questionnaires envoyés, 8 réponses ont été reçues en retour (en gras dans le Tableau 5).

Algérie	Belgique	<b>Danemark</b>	Hongrie	Mexique	<b>Roumanie</b>
Allemagne	Burkina Faso	Espagne	Inde	Norvège	Royaume Uni
Argentine	Cameroun	<b>Finlande</b>	Italie	<b>Pays-Bas</b>	Slovaquie
Australie	Canada	France	<b>Japon</b>	<b>Portugal</b>	<b>Slovénie</b>
<b>Autriche</b>	Canada-Québec	Grèce	Maroc	Rép.Tchèque	<b>Suède</b>

**Tableau 5:** Envoi du questionnaire au niveau international.

Parmi les 8 pays ayant répondu au questionnaire, tous possèdent ou ont possédé des ouvrages d'art revêtus d'enrobé drainant (Tableau 6).

<b>Pays</b>	<b>Ponts revêtus d'enrobé drainant</b>
Autriche	3 ponts sur l'A9 près de Graz
Belgique	Section expérimentale (2002 à 2005)
France	Plusieurs sections expérimentales (à partir de 1980)
Pays-Bas	Certains ponts (objectif : réduction du bruit)
Japon	Nombreux ponts
Suède	Peu de sections en enrobé drainant

**Tableau 6:** Ponts revêtus en enrobé drainant au niveau international.

Les principaux phénomènes observés avec ce type d'enrobé dans les différents pays mentionnés sont les suivants:

- lors de périodes pluvieuses: risque d'aquaplaning fortement réduit; meilleure adhérence; absence de projections d'eau; visibilité accrue; diminution de ces phénomènes avec l'âge du revêtement
- lors de périodes hivernales, en règle générale: sensibilité thermique accrue; températures extrêmes inférieures à celles d'un enrobé traditionnel; apparition précoce de verglas; apparition plus fréquente de givre

- lors de chutes neigeuses: enneigement plus marqué au début des précipitations et, lors de la fonte; adhérence supérieure tant que les vides à la surface de l'enrobé drainant ne sont pas colmatés par la neige; difficulté à dégager la neige présente dans les vides
- rôle de la couverture nuageuse: refroidissement plus marqué et réchauffement plus lent par temps dégagé; peu de différences constatées par temps couvert
- rôle de la forte macrotecture: réduction de l'efficacité du sel/solution et de sa durée de présence en surface; évacuation plus difficile de la neige; absence de projections latérales du sel par le trafic; stockage d'énergie qui modifie le comportement thermique de la surface
- adaptation du traitement hivernal de la chaussée nécessaire: traitement préventif; accroissement des interventions; multiplication du dosage en sel/solution; interventions sur une plus longue durée; traitement plus difficile avec l'augmentation de l'âge du revêtement; recours à des outils d'aide à la décision adaptés

La suite de ce chapitre reprend toutes les expériences au niveau international utiles pour la présente recherche. Elle comprend certaines analyses faites dans la littérature ainsi que les réponses données aux questionnaires.

### 2.3.1 Autriche

Le Service des Autoroutes de Graz a transmis des informations au Lavoc par le biais du questionnaire qui a été envoyé à l'administration autrichienne. Il existe trois ponts recouverts d'enrobé drainant sur l'autoroute A9 (Pyhrnautobahn) dont le drainant a été posé en 1986 dans les trois cas.

Route	Nom du pont	Droite/ Gauche	Type de drainant	Date pose	km début	Longueur pont [m]
A9	L204/RFB Graz	D&G	DA 11	1986	133.183	-
A9	L205/RFB Graz	D&G	DA 11	1986	133.982	-
A9	L210/RFB Graz	D&G	DA 11	1986	138.725	-

Tableau 7: Ponts revêtus en enrobé drainant – Autriche.

Les constatations qui ont été faites lors de basses ou de très basses températures sont l'apparition de givre par endroits. Lors de précipitations neigeuses, l'âge du revêtement semble jouer un rôle non négligeable puisque, pour les revêtements mis en place depuis plus de 5 ans, les brouillards givrants semblent affecter davantage le revêtement drainant. Lors de précipitations de pluie, la gouttière mise en place pour l'écoulement longitudinal requiert un entretien constant du fait de la croissance de végétaux plus marquée durant les périodes de pluie. A partir de là, il peut y avoir des rétentions d'eau qui créent des dommages aux abords des accotements. Après 10 ou 15 ans de mise en place du revêtement drainant, les problèmes de maintenance ont fortement augmenté. L'administration conclut à la fin du questionnaire que les drainants ne sont pas appropriés sur les ponts.

### 2.3.2 Belgique

Une étude belge [1] a suivi, au cours des hivers 2002 à 2005, le comportement hivernal d'une section expérimentale en enrobé drainant bicouche dont les caractéristiques étaient les suivantes:

- Couche inférieure: épaisseur 4.5cm, granulométrie 0/14, discontinuité 2/10, bitume élastomère
- Couche supérieure: épaisseur 2.5cm, granulométrie 0/7, discontinuité 2/4, bitume élastomère

L'analyse du comportement s'est faite dans des conditions hivernales belges, c'est-à-dire un climat maritime humide avec gel et neige et à une altitude de 250msm. Une étude comparative a également été menée avec un enrobé bitumineux traditionnel défini comme référence. L'étude du comportement hivernal s'est basée sur

la collecte de données de mesures de stations météorologiques, de données concernant les paramètres d'épandage, ainsi que des observations in situ.

Les caractéristiques moyennes observées durant ces hivers ont été les suivantes:

- TJM: 5000véh/jour
- 61 jours de gel; 80 jours de gel au sol
- 33 jours durant lesquels il a neigé; 25 jours avec un enneigement d'une hauteur maximale de 18cm
- Températures absolues minimales de l'air: -11.6°C
- Températures absolues minimales au sol (surface du revêtement, dans le 1<sup>er</sup> cm): -12.9°C

Durant l'étude, 20% des interventions au droit de la section expérimentale ont consisté en des traitements localisés qui ont rarement été commandés uniquement par la section en enrobé drainant. Ce chiffre constitue un maximum par rapport au reste du réseau. Les épandages sur cette section ont été faits avec du NaCl (sel de mine 0/3mm) ou humidifié à l'aide d'une saumure de NaCl -23% (proportion 70/30).

L'allure générale des courbes de température qui a été observée a été qu'il existait un cycle journalier pour les températures de l'air et pour celles de la surface de la route. En effet, le refroidissement de la surface s'effectue dès l'après-midi pour se poursuivre jusqu'en soirée ou le lendemain matin. Il a été montré que la couverture nuageuse est un paramètre essentiel en ce qui concerne l'évolution des températures de surface des deux revêtements (traditionnel et drainant). Par temps couvert, peu de différences ont été observées entre les deux revêtements. Par temps dégagé, les différences les plus frappantes ont été observées lors de périodes où le ciel est bien dégagé. Lors d'un refroidissement, l'enrobé drainant passe plus rapidement sous la barre du 0°C et plus lentement ce seuil lors du réchauffement que l'enrobé traditionnel. En ce qui concerne l'amplitude thermique, il a été constaté qu'elle est inférieure en surface du drainant et que la comparaison des températures extrêmes au sein des deux revêtements montre que la température de l'enrobé traditionnel est égale à la température du drainant moins 0.7°C

$$T_{\text{enrobé traditionnel}} = T_{\text{enrobé drainant}} - 0.7^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

En moyenne, lors du refroidissement, la température des sondes à la surface du drainant passaient en négatif environ 34 à 40 minutes avant celles du revêtement traditionnel. Lors du réchauffement, la température du drainant passait en positif 15 à 20 minutes après l'enrobé traditionnel.

Les observations hivernales sur site ont été les suivantes:

- Les pluies verglaçantes n'ont pas posé de problèmes de perte d'adhérence grâce un traitement préventif adéquat sauf durant un épisode de bruine matinale succédant à une période de plusieurs jours de gel qui a causé une apparition de verglas en certains endroits des deux revêtements. Des épandages curatifs de NaCl sec 0/3mm combiné à l'action du trafic (la majorité des véhicules belges sont équipés de pneus toutes saisons) ont contribué à maintenir non glissant le passage des roues.
- La formation du givre a été observée dans le drainant sans poser de problème de perte d'adhérence. Aucune différence significative des températures de surface entre l'enrobé traditionnel et le drainant n'a été observée en ces occasions.
- Lors de chutes de neige, au début et lors de la fonte, il a été observé un enneigement plus marqué sur l'enrobé drainant, sans que la différence des températures entre les deux planches ne soit significative:
  - o S'il tombe de la neige fraîche en faible quantité, il y a une différence d'enneigement entre les deux planches due au caractère isolant du drainant (faible conductivité thermique) et au caractère grenu du revêtement (la neige s'introduit dans la macrotexture)
  - o S'il tombe de la neige fraîche en grande quantité, l'état de surface est assez homogène sur les deux planches mais en fonction de la quantité de neige et de son état d'humidité, le drainant peut présenter un avantage en termes de résistance au glissement

- S'il y a de la neige fondante, la structure poreuse du drainant empêche que la saumure et aussi la neige ne soient projetées latéralement par le trafic. Il a été constaté lors de certains épisodes que la neige fondait moins rapidement sur le drainant. Cependant, en présence de neige humide, il a été constaté que lors du freinage d'une voiture sans ABS, l'adhérence était supérieure sur le drainant. En présence de neige fondue et glacée, il a été constaté une meilleure adhérence sur le drainant, du fait de la disparition de la neige dans la macrotexture.
- En présence de neige compactée, les deux revêtements ont été glissants

### 2.3.3 France

#### 2.3.3.1 *Expérience générale*

En France, plusieurs études ont été menées pour améliorer l'exploitation hivernale des enrobés drainants [32].

Une enquête nationale effectuée en 1985 faite à la suite de diverses difficultés hivernales a montré que seul un pourcentage de 27% des sections de chaussées revêtues d'enrobé drainant présentaient des problèmes d'exploitation hivernale. Les longueurs de ces sections étaient relativement faibles (de 50 à 3200m) pour un âge moyen de 4 ans. Les phénomènes observés ont été essentiellement:

- Une apparition précoce de verglas
- Une apparition plus fréquente de givre

Comme les traitements traditionnels étaient inefficaces sur les sections rencontrant des difficultés hivernales, la stratégie qui a été adoptée fut le surdosage systématique, soit en multipliant le dosage de sel soit en multipliant les interventions de salage.

Il a été constaté en décembre 1987 que, les pluies verglaçantes qui affectaient les enrobés drainants étaient extrêmement difficiles à traiter. Il fallait en moyenne deux heures pour permettre à un enrobé traditionnel de retrouver une situation normale avec un traitement de NaCl en grains, alors qu'il en fallait entre six et huit pour traiter un drainant. Quelques observations ont été faites sur les enrobés drainants:

- L'efficacité du traitement semble être réduite par l'absence de projections latérales de saumure
- La saumure disparaît dans la porosité interne du drainant et la surface des granulats reste recouverte de glace

Quelques sites ont été suivis par les centres d'études techniques de l'équipement entre 1989 et 1991, qui ont conduit à l'observation de certains phénomènes:

- Apparition plus fréquente du givre
- Congélation précoce de l'humidité préexistante sur le revêtement
- Difficultés d'élimination de la neige
- Efficacité réduite des traitements traditionnels (fondants en grains,...)
- Retour à une situation normale plus longue à obtenir

En avril 1994 et à la demande du service de contrôle des autoroutes de la Direction des routes, une enquête a été menée concernant le comportement hivernal des drainants, vu par les sociétés d'autoroutes concédées. Cette enquête rassemble leur expérience acquise depuis plusieurs années. Cette enquête:

- Confirme les difficultés d'exploitation rencontrées sur les drainants qui diffèrent de celles des enrobés traditionnels
- Montre l'émergence progressive d'un savoir-faire se traduisant par la mise en œuvre de stratégies spécifiques d'intervention
  - Accroissement des interventions de salage
  - Accroissement des interventions de déneigement

- Recours à des produits de type bouillie (NaCl en grains + CaCl<sub>2</sub> en saumure) pour certaines conditions hivernales difficiles
  - Ne permet pas de dégager une stratégie structurée pour le suivi, l'analyse et la prise de décisions spécifiques aux enrobés drainants
  - Montre les difficultés rencontrées par l'exploitant pour garantir le même niveau de service
  - Attribue aux enrobés drainants une accidentologie hivernale spécifique

En ce qui concerne les échanges thermiques par conduction, il a été montré que, pour des porosités allant de 18% à 30%, la conductivité thermique est plus faible que celle d'un enrobé traditionnel, qu'elle est liée aux propriétés physiques des granulats (densité, porosité, nature minéralogique,...) et qu'elle varie de façon importante avec le teneur en eau/glace.

En ce qui concerne les échanges thermiques par convection, il a été montré que, sous précipitations, l'enrobé drainant se comporte comme de bons échangeurs thermiques, l'eau qui y circule étant un vecteur d'énergie efficace.

En ce qui concerne les échanges thermiques par rayonnement, les facteurs importants dans ce type d'échange sont la surface spécifique et son facteur d'émissivité. Le drainant est généralement plus sensible au refroidissement par rayonnement car le film de bitume le rend plus noir. Ce dernier subsiste plus longtemps car la technique recourt souvent à des bitumes élastomères.

Pour ce qui de la fonction d'échangeur thermique, il a été constaté que les drainants sont de bons échangeurs thermiques du fait des différents fluides qui y circulent (eau, air, saumure plus ou moins concentrée). En période hivernale, la température en surface et au cœur des drainants fluctue plus ou moins rapidement au gré des événements (précipitations, chutes de neige, pluies verglaçantes,...). Pour les enrobés traditionnels, ces échanges ne se font que par leur surface, ce qui amortit l'effet de ces variations thermiques. Il a été constaté que, sous précipitations, la température de surface des enrobés traditionnels est égale à celle de l'interface de ruissellement (-4cm) dans les drainants en particulier pour:

- Neige et pluie mêlées T ~ 0°C
- Pluie en surfusion T < 0°C
- Saumure (eau de fusion de glace+fondants) T << 0°C

L'eau contenue dans les drainants peut, en changeant d'état, constituer un stock important d'énergie en chaleur latente, qui modifie totalement le régime thermique de la surface de la chaussée (enrobé traditionnel = 3'344kJ/m<sup>3</sup>, enrobé drainant = 66'880kJ/m<sup>3</sup>). Cette situation exceptionnelle se rencontre lors de certaines précipitations neigeuses humides suivies de gel ou de certaines pluies en surfusion sur sol gelé. Les conséquences de ce phénomène pour l'exploitation hivernale sont les suivantes:

- Rétablissement plus lent de la fonction drainante
- Usage de fondants quasi inopérant, la fusion de la glace s'accompagnant d'un abaissement de la température du milieu et d'une recristallisation inévitable par suite d'une dilution rapide de la saumure
- Impossibilité de traiter efficacement cette situation sans apport d'énergie atmosphérique
- Maintient à 0°C durant la période de fusion de la glace avec un risque associé de recongélation atmosphérique

Les caractéristiques physiques des enrobés drainants permettent de comprendre les phénomènes hivernaux observés et de donner des indications pour une bonne viabilité hivernale:

- La modification importante du cycle de l'eau durant l'hiver, période de l'année où le séchage des surfaces routières est allongé, entraîne des occurrences de verglas différentes de celles observées sur les enrobés traditionnels et l'emploi de sel (naturellement hygroscopique) en quantité accrue accentue ce phénomène

- L'effet combiné du rayonnement nocturne de la surface, de la faible conductivité et de l'inertie thermique de la couche accroît la sensibilité thermique de la surface. Sa température évolue plus rapidement présentant des valeurs fréquemment inférieures à celles des enrobés traditionnels, ce qui entraîne l'apparition du givre quand le point de rosée est atteint ou du verglas quand la surface est humide et non traitée
- La disparition de la saumure à travers le revêtement drainant réduit l'efficacité du sel et sa durée de présence en surface
- La forte macrotecture du revêtement rend l'évacuation de la neige difficile et l'absence de projections latérales de saumure par le trafic réduit l'efficacité de ce phénomène

Trois sites expérimentaux sur autoroute ont été suivis au cours des hivers 1988 à 1991. Ils étaient équipés de stations de mesure automatique des données atmosphériques et routières relevant les paramètres suivants:

- Température et humidité relative de l'air
- Vitesse et direction du vent
- Occurrence et hauteur des précipitations
- Températures de surface et à différentes profondeurs dans la chaussée
- Etats de surface de la chaussée
- Température de congélation de la saumure présente sur le capteur

L'exploitant a également complété l'installation automatique en recueillant:

- Les informations et observations météorologiques et routières
- La nature et le type d'interventions hivernales réalisées sur le réseau

Les résultats obtenus sont les suivants:

- La température de surface des drainants est en moyenne inférieure à 1.6°C à celle des enrobés traditionnels avec des écarts instantanés de l'ordre de 5.5°C lors de découvertes nuageuses rapides. Les relevés de température en continu par infrarouge confirment ces écarts
- Les index d'exposition hivernale des surfaces routières (condensation, givre, mouillage, fondants) (durée de l'état observé/durée totale de l'observation) confirment une plus grande sensibilité des drainants au phénomène de condensation, une disparition plus rapide des fondants routiers sur les drainants, un traitement très délicat de la pluie en surfusion et des difficultés d'évacuation de la neige

L'auteur propose également une stratégie d'exploitation hivernale des sections revêtues en drainant en trois points:

- Adaptation de l'organisation, du suivi et de la surveillance
  - Suivi plus précis et de tous les instants
  - Interventions rapides et délai de réduction réduit
  - Interventions de salage/déneigement plus nombreuses
  - Dosages en fondants plus élevés
  - Matériel d'épandage de sel humidifié
- Adaptation des outils de suivi
  - Recourir aux outils d'aide à la décision les plus modernes comme les capteurs de chaussée des stations automatiques, les bulletins météorologiques routiers et l'imagerie radar permettant le suivi précis des zones de précipitation

– Adaptation des sels routiers

- Modifier la granularité et la forme des grains pour les adapter aux capacités d'interception des surfaces drainantes ou accroître la viscosité de la saumure afin d'assurer un meilleur mouillage de la surface et réduire la disparition de la saumure dans les pores du drainant à l'aide de:
  - bouillies dont la saumure contient du  $MgCl_2$  ou du  $CaCl_2$  ou des additifs viscosifiants
  - mélanges solides de NaCl en grains et  $CaCl_2$  en paillettes

Les coûts d'exploitation hivernale montrent l'existence d'un surcoût des sections revêtues de drainant qui provient de:

- l'accroissement de 25% des quantités de fondants répandues
- l'augmentation de 30% à 100% du nombre d'interventions de salage et de déneigement qui se traduit par un accroissement de 10% à 25% des heures supplémentaires faites par le personnel

### 2.3.3.2 *Expérience sur l'A31*

Des observations en période hivernale ont été faites sur un tronçon en enrobé drainant de l'A31 en France [29].

Des expériences avaient été faites entre 1980 et 1985 qui ont révélé pour les drainants une chute de l'émission de bruit d'environ 3dBA par rapport aux enrobés traditionnels.

Les échanges thermiques par conduction sont, pour un enrobé drainant sec, significativement inférieurs que pour un enrobé traditionnel. Pour des pourcentages de vides compris entre 18% et 24%, la conductivité thermique peut varier entre 40% et 70% de celle d'un enrobé dense. Elle dépend fortement de la nature des granulats, de la densité, du taux de compactage et du contenu en eau. Lorsque le drainant est sec, sa conductivité thermique augmente avec la quantité d'eau retenue dans ses pores.

Les échanges thermiques par convection sont liés à la surface spécifique en contact avec l'atmosphère et augmente avec la rugosité générale. Durant l'hiver, la température de la surface est inférieure à celle d'un enrobé dense. La pressurisation et dépressurisation de l'air par les pneus accentue les échanges thermiques par convection dans les couches. Pendant les précipitations, la surface de drainant se comporte comme un bon échangeur thermique car l'eau devient un bon transporteur d'énergie.

Les échanges thermiques par radiation dépendent fortement de la surface spécifique et du facteur de transmission de la couche. Une couche récente, donc plus foncée, est plus sensible au refroidissement par radiation et plus sensible à la formation de givre durant l'hiver. Les surfaces drainantes sont plus sensibles à ce phénomène car leur macrotexture négative retarde le nivellement du film de bitume.

Les surfaces drainantes peuvent temporairement retenir une certaine quantité d'eau qui peut se transformer en glace et constituer un emportant stock d'énergie qui modifie le comportement thermique de la surface de la route.

Les conditions spéciales relatives à la praticabilité des couches drainantes sont essentiellement dues:

- au cycle de l'eau particulier sur et à l'intérieur de ces couches qui est, de plus, modifié par l'utilisation d'agents de déverglage
- à la sensibilité thermique accrue de la surface et en particulier les pertes de température par radiation
- au peu de maintien des agents de déverglage en surface avec le temps
- aux conditions particulières d'accrochage et de maintien de la neige sur ces surfaces
- à l'absence de projections latérales par le trafic qui normalement contribue à l'homogénéisation du traitement de salage de la couche de surface

Il a été observé que, durant le mois de janvier, le drainant contient de 16.5% d'humidité contre 0.5% dans un enrobé dense. Lors de températures en-dessous de 0°C les dépôts d'humidité se font sous forme du givre.

La période durant laquelle le revêtement est humide en hiver est beaucoup plus longue pour un drainant que pour un enrobé dense et correspond à une proportion de 27.6% par rapport à 10.4% pour un enrobé dense. Inversement, la période durant laquelle la surface est sèche est plus courte pour un drainant.

L'analyse de la concentration de sel à différentes profondeurs de la couche de drainant montre que la concentration de sel tient plus longtemps au bas de la couche de drainant.

Après des chutes de neige, la couche de drainant est recouverte de paquets de neige dus au trafic malgré le passage régulier des véhicules de l'entretien hivernal. Si, après des chutes de neige, les conditions atmosphériques froides prévalent ou il y a un front froid, il sera très difficile d'éliminer la neige de la surface drainante sans l'utilisation d'agents de déverglaçage puissants.

### 2.3.4 Pays-Bas

Aux Pays-Bas, la majeure partie des revêtements sur les ponts sont des enrobés denses. Dans certains cas, si une réduction du bruit est vraiment nécessaire, l'enrobé drainant peut être posé sur des ponts en béton ou en métal. Dans ces cas, seul l'enrobé 0/11 est posé avec une épaisseur de 40mm, comme par exemple le pont Van Brieneoord sur l'A16 à Rotterdam.

Les constatations qui ont été faites en cas de basses températures ne sont pas spécifiques aux ponts mais à l'enrobé drainant en général, en particulier que l'enrobé drainant refroidit plus vite lors de la chute de température et prend plus de temps qu'un enrobé dense pour passer au-dessus de zéro. Sur les ponts, l'humidité de l'air est plus élevée et il n'y a pas de capacité thermique sous le revêtement, ou moins que sur les tronçons hors pont. Les ponts sont plus sensibles à la perte d'adhérence. En Hollande, les ponts sont plus souvent traités préventivement avec du sel mouillé que les enrobés denses. La solution saline disparaît dans l'enrobé drainant par les vides, ce qui fait que le sel n'est plus disponible en surface. L'enrobé drainant est traité de manière préventive 2 fois avec 7g/m<sup>2</sup>, alors qu'un enrobé traditionnel n'est traité qu'une fois.

En cas de chutes de neige, il y a un risque que la neige soit poussée dans l'enrobé drainant et bloque ainsi la capacité drainante tout en augmentant le risque de perte d'adhérence. Dans un tel cas, il est difficile de nettoyer la chaussée.

En cas de précipitations, il est essentiel que la fonction drainante soit assurée pour maintenir les caractéristiques de réduction du bruit et celles de limiter les projections d'eau. Le risque d'aquaplaning est nul sur un revêtement drainant comparé à celui d'un enrobé dense.

### 2.3.5 Japon

#### 2.3.5.1 *Expérience générale*

Le plan national des autoroutes du Japon prévoit l'aménagement de 11'520km d'autoroutes dont 6'850km sont actuellement en service. Environ 50% de ce réseau autoroutier traverse des zones froides dont la hauteur moyenne maximale de neige par décennie est de 30cm. Les autoroutes des autres régions subissent également des chutes de neige plusieurs fois par an. En avril 2001, 33% des autoroutes en service au Japon étaient revêtues d'enrobé drainant dont le pourcentage de vides moyen est de 20% et l'exigence de perméabilité est l'infiltration de 400ml d'eau en moins de 10 secondes.

Il a été constaté par temps de pluie une réduction des accidents de 80% par rapport à un enrobé dense traditionnel et une réduction du niveau de bruit de 3dBA par rapport à un enrobé dense traditionnel [24].

L'auteur a également mené une étude sur l'état de surface des drainants en hiver dans 14 régions du Japon sur des secteurs d'une longueur de 50m.

Les observations faites concernant la variation des températures à la surface de la chaussée ont été que, durant la journée, la température de la surface drainante est inférieure à celle observée sur la surface d'un

enrobé dense. Par contre, la nuit, lorsque la température de l'air a baissé, la température de la surface du drainant ne descend pas aussi bas que celle de l'enrobé dense.

Les observations faites pendant les chutes de neige ont montré que la température de la surface du drainant est en moyenne inférieure de 0.2°C à celle de la surface de l'enrobé dense dans la gamme des températures supérieures à 1°C. Comme cette légère différence apparaît dans la gamme des températures positives, l'auteur considère que ce phénomène n'est pas problématique. L'analyse visuelle de l'état de surface pendant les chutes de neige a montré que dans 80-90% des cas l'état de la surface de la route sur revêtement drainant ou sur revêtement dense était identique.

Concernant les agents de déverglaçage, il a été constaté qu'ils s'écoulent plus facilement dans le revêtement drainant que dans l'enrobé dense. Par contre, quel que soit le moyen de déverglaçage utilisé (solution, sel solide, sel mouillé) la concentration de sel résiduel diminue plus faiblement avec le temps dans un drainant que dans un enrobé dense. Juste après l'épandage et lors de l'emploi de sel solide ou de sel mouillé, la concentration de sel est moindre pour le drainant que pour la surface dense. Lors de l'emploi de la solution, la concentration initiale est similaire. Une heure après l'épandage, les concentrations de sel en ayant employé du sel solide et du sel mouillé sont similaires dans le drainant et dans l'enrobé dense. Par contre, la concentration de sel est supérieure dans le drainant que dans l'enrobé dense en ayant utilisé une solution.

Des essais de résistance au dérapage ont été faits avec un véhicule équipé de pneus neige non cloutés à une vitesse de 50km/h et un freinage de 100%. Il a été constaté que le coefficient de résistance au dérapage était plus élevé pour sur le revêtement drainant que sur l'enrobé dense, sauf pour les surfaces couvertes de neige tassée où ce coefficient était identique quel que soit le revêtement considéré puisqu'il n'était déterminé que la le frottement entre le pneu et la neige.

Des observations ont également été faites concernant les accidents de la circulation sur route enneigée/verglacée sur des sections où un revêtement dense traditionnel a été remplacé par un revêtement drainant, sur une longueur totale de 1043km et dans les années 1997 et 1998. L'accidentologie considérée a été celle survenue un an avant et un an après la pose du nouveau revêtement. L'analyse a montré que les accidents sur route enneigée/verglacée ont diminué de 34% lors du passage d'un enrobé dense à un enrobé drainant.

### 2.3.5.2 *Expérience d'Ishikawa*

Le département d'Ishikawa pose depuis 1996 des revêtements drainants dans des zones très habitées. En 2000, il en existait 50km [26]. L'auteur relève une série de points positifs comme l'absence aquaplaning, d'absence de projections d'eau durant les jours de pluie, de visibilité accrue due à l'absence de reflets sur la chaussée mouillée et de la réduction du bruit de roulement des véhicules. L'auteur relève également une série de points négatifs, spécialement en cas de chutes de neige, en particulier la difficulté pour retirer la neige qui s'est introduite et tassée dans la structure poreuse du drainant.

L'auteur a d'abord étudié en laboratoire l'effet de la taille des grains et des pourcentages de vides sur la perméabilité de l'enrobé drainant et sa performance durant l'hiver, puis a mis au point un enrobé spécial à base de filler contenant du chlorure pour jouer le rôle d'agent de déverglaçage, des granulats durs et des copeaux de caoutchouc ainsi que des résines jouant le rôle de mortier. Après les essais en laboratoire, des planches d'essais ont été construites avec des drainants traditionnels et des drainants spéciaux.

Les essais en laboratoire sur les drainants traditionnels ont été faits sur des enrobés ayant les caractéristiques suivantes:

- Taille maximale des grains et pourcentage de vides: 13mm/20%
- Taille maximale des grains et pourcentage de vides: 13mm/17%
- Taille maximale des grains et pourcentage de vides: 10mm/20%
- Taille maximale des grains et pourcentage de vides: 5mm/20%

Plusieurs essais ont été effectués comme l'essai Marshall, l'essai de perméabilité, l'essai Cantabro, l'essai de stabilité dynamique, l'essai d'absorption du bruit, l'essai d'abrasion, l'essai de cisaillement et l'essai d'accumulation d'eau.

Les résultats ont été que:

- Tous les échantillons satisfaisaient les spécifications japonaises
- L'effet de réduction du bruit semble être supérieur avec le mélange 13mm/20% qu'avec le mélange 13mm/17%
- Les caractéristiques du mélange 10mm/20% sont similaires à celles de l'enrobé 13mm/20%
- Bien que la perméabilité et l'évacuation de la neige compressée soient inférieures pour le mélange 5mm/20% que pour le mélange 13mm/20%, les effets de réduction de bruit dû au trafic et l'effet de fonte de la neige sont accrus.

Les essais en laboratoire sur les drainants spéciaux (chlorures dans le filler, caoutchouc, résines) ont montré que:

- Tous les échantillons satisfaisaient les spécifications japonaises
- Le mélange contenant des chlorures dans le filler semble être plus avantageux lors de basses températures, l'auteur appelant ce phénomène l'effet du déverglaçage chimique des chlorures
- Les résistances à l'abrasion et au cisaillement sont supérieures à celles des drainants conventionnels et l'adjonction de résine semble augmenter la résistance à la friction causée par les chaînes à neige
- Le chargement causé par le trafic peut fracturer la glace en surface de l'enrobé contenant de la résine et des copeaux de caoutchouc, l'auteur appelle ce phénomène l'effet décongelant des copeaux de caoutchouc

Une première planche a été construite en utilisant un enrobé drainant avec une taille minimale des grains de 5mm, un pourcentage de vides de 20% et une épaisseur de revêtement de 20mm. Des granulats grossiers d'une taille maximale de 20mm ont été posés sous la couche de drainant et sur une épaisseur de 70mm. La longueur de la planche était de 60m et sa largeur de 7m. Les conclusions faites pour cette planche d'essai sont issues d'observations visuelles uniquement et indiquent qu'en cas de pluie le drainant 5mm retient davantage d'eau en surface que le drainant dont la taille maximale des grains fait 13mm.

Une seconde planche a été construite en utilisant un drainant avec du filler contenant des chlorures avec une épaisseur de 40mm et, sous le drainant, une épaisseur de 20mm de granulats grossiers. La longueur de la planche était de 60m pour une largeur de 6m. Les conclusions faites pour cette planche d'essai sont également issues d'observations uniquement visuelles et ne montrent pas de différences substantielles entre le drainant contenant des chlorures et le drainant traditionnel (13mm/20%). Toutefois, la neige semble être moins compressée dans le drainant contenant des chlorures que dans le drainant traditionnel.

### 2.3.5.3 *Expérience d'Hokkaido*

Sur l'île d'Hokkaido au Nord du Japon, les chutes de neige moyennes atteignent en général 5m par année. Son réseau autoroutier atteint actuellement 547km de longueur et 182km sont en cours de construction. La maintenance se fait sur un total de 1'700km et le pourcentage de chaussées revêtues en enrobé drainant est passé de 5% à 50% entre 1999 et 2004. Certains tronçons ont été revêtus d'enrobé drainant, en particulier les principaux axes interurbains pour améliorer la sécurité du trafic et prévenir l'aquaplaning, et les routes urbaines pour protéger le milieu environnant en réduisant le bruit dû au trafic.

Les principaux problèmes constatés sur les enrobés drainants ont été l'orniérage et l'arrachage des grains, dû aux passages répétés des véhicules d'entretien hivernal qui peuvent être très agressifs si les conditions atmosphériques l'exigent. En général, ils sont équipés de pneus à clous et il n'est pas rare que les centres d'entretien doivent utiliser des fraiseuses à neige à grande performance qui sont agressives pour l'enrobé drainant pour l'évacuation de celle-ci (Figure 2).



Figure 2: Véhicules d'entretien hivernal.

C'est pourquoi un nouveau type de revêtement drainant a été développé et mis en place (Figure 3). Il s'agit d'un revêtement composé d'une couche rigide en béton de ciment d'une épaisseur d'environ 3cm recouvert d'une couche de drainant d'une épaisseur d'environ 1cm. Ce revêtement, désigné hybride, est mis en place en deux phases. Ce nouveau revêtement montre de bonnes propriétés par temps de pluie (réduction des projections d'eau) et durant les chutes de neige (meilleure résistance aux dommages créés par les lames des chasse-neiges). L'administration conclut qu'il est le plus approprié pour les autoroutes d'Hokkaido et qu'il devrait être posé aux endroits à problèmes, par exemple lors d'accidents fréquents. Elle suggère aussi d'améliorer les méthodes de déneigement, afin de faire en sorte qu'elles ne soient pas aussi agressives qu'elles ne le sont actuellement.



Figure 3: Enrobé drainant de type hybride.

Le CERI (Civil Engineering Research Institute for Cold Region) a mené à bien une série de mesures de bruit et de drainabilité sur ces revêtements drainants possédant 17% de vides et exposés aux conditions hivernales, dont la charge de trafic était de 20'000 à 25'000 véhicules par jour et le taux de poids lourds d'environ 19%. Concernant le bruit, les résultats ont donné une différence de 5 à 6dB en faveur de l'enrobé drainant (moins bruyant) juste après la mise en place. Après 5 ans, les valeurs des mesures de bruit de l'enrobé drainant rejoignent celles de l'enrobé fermé traditionnel. Concernant les mesures de drainabilité, les résultats montrent, pour les six premiers mois, une drainabilité moyenne (mesurée en ml sur une durée de 15s) allant de 800 à 1200ml/15s. Après la deuxième année déjà, les valeurs montrent une drainabilité nulle.

Une comparaison entre un revêtement drainant exposé à la neige et non exposé à la neige a montré que celui qui était exposé aux conditions hivernales avait ses vides bouchés par de la poussière minérale après deux ans de mise en place. Cette poussière semble être créée par les chasse-neiges qui font des passages fréquents et qui raclent et agressent le revêtement.

### 2.3.6 Suède

L'enrobé drainant n'est pas couramment utilisé en Suède [23]. Sur le peu de sections où il a été mis en place, la raison principale a été la réduction du bruit.

Il n'y a pas de dispositions spéciales pour la maintenance hivernale pour les enrobés drainants mais il a été observé que ces revêtements nécessitent des épandages de sel plus fréquents et/ou des quantités plus grandes de sel à chaque aspersion.

Pour ce qui est des ponts, le sel qui auparavant pouvait constituer un problème, n'est plus aussi néfaste du fait de la qualité des bétons qui s'est améliorée et des parties métalliques qui sont mieux protégées.

## 2.4 SITUATION ACTUELLE EN SUISSE, ALLEMAGNE ET AUTRICHE

Une récente étude à l'heure actuelle encore non publiée, a été réalisée par le Laboratoire des Voies de Circulation de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, l'institut de la construction et de la maintenance routière de l'Université Technique de Vienne (Autriche, leader du projet) et l'Institut pour l'Ingénierie autoroutière de l'Université Technique de Brunswick (Allemagne).

En effet, la réalisation de couches de surface en enrobé poreux est particulièrement motivée par le fort potentiel de réduction du bruit de ce type de surface en plus de sa capacité drainante. Des expériences en Autriche, en Allemagne et en Suisse ont aussi montré les effets négatifs de l'utilisation des couches de surface en enrobé drainant, comme par exemple des problèmes dans les procédures de maintenance hivernale (maintenance hivernale modifiée, consommation accrue de sel, déverglaçage, etc.) ou le comportement à long terme moins bon que celui d'un revêtement en enrobé conventionnel.

Dans le contexte de ce travail de recherche les couches de surface en enrobé drainant ont été examinées en Autriche, en Allemagne et en Suisse par rapport à leur durabilité structurelle et fonctionnelle, c'est-à-dire la durabilité de l'effet de réduction du bruit et de la capacité drainante. Avec l'aide d'un questionnaire, les expériences vécues dans ces trois pays ont été collectées, mises à jour et analysées.

En général, les réponses au questionnaire montrent des expériences similaires avec ce type de couche de surface dans les trois pays. Les effets positifs qui ont été mentionnés par les personnes ayant répondu au questionnaire sont le potentiel de réduction du bruit et les progrès possibles dans la sécurité du trafic grâce à la capacité drainante accrue. Les effets les plus négatifs concernent les techniques modifiées de maintenance hivernale, le risque de colmatage des vides et, en conséquence, un effet de réduction du bruit minimisé et une plus courte durée de vie structurelle par rapport aux couches de surface en enrobé traditionnel.

En guise de conclusion sur l'analyse du questionnaire, le consortium de projet conseille d'approfondir les recherches en résolvant les problèmes principaux concernant les surfaces en enrobé drainant comme:

- La sécurité routière
- La durée de vie structurelle
- La durée de vie acoustique

En particulier, il serait nécessaire et utile de faire davantage de mesures et d'observations concernant les conditions de surface et les émissions de bruit pendant un certain laps de temps pour améliorer nos connaissances sur les performances à long terme des couches de surface en enrobé drainant.

## 2.5 ACCIDENTOLOGIE SUR DES PONTS EN ENROBE DRAINANT

La situation du canton de Vaud qui comporte 13 ponts revêtu d'un enrobé drainant permet une analyse de l'évolution du nombre d'accident en comparant les statistiques avant la pose, soit avec un revêtement traditionnel fermé, et après la pose, avec un enrobé drainant.

### 2.5.1 Données relatives au trafic

Les données relatives au trafic ont été déterminées en vue de l'analyse des accidents effectuée par la suite. Les postes de comptage situés sur les tronçons où sont situés les ponts permettant la comparaison entre un enrobé fermé et un enrobé drainant ont été considérés (Tableau 8). Il s'agit du poste 43 (Préverenges) pour l'A1 et des postes 64 (contournement de Lausanne), 83 (Villeneuve) et 250 (Aigle) pour l'A9. Aucun compteur n'existe encore sur l'A5, mais ces données ne sont pour l'instant pas nécessaires puisque aucune statistique d'accident n'existe encore sur ce tronçon.

Route	Nom du pont	km début	Compteur de trafic
A1	Pont sur Boiron St. Prex	56.33	43
	Pont de la Gare	58.76	
	Pont sur la Venoge	64.04	
A5	Pont sur le Grandsonnet	06.74	-
	Pont de la jonction de Grandson	09.72	
	Pont sur l'Arnon	10.00	
	Pont de Corcelles	14.67	
	Pont de la Raisse	18.47	
A9	Pont sur la Sorge	00.89	64
	Pont sur la Mèbre	02.13	
	Pont sur la Pétause	02.72	
	Pont Lutrive (bretelle)	02.96	83
	Ponts Baye de Clarens	30.92	
	Ponts des Vuarenes	32.63	
	Pont sur la Grande Eau	47.07	250
	Pont des Raffineries	50.19	
	Pont sur l'Avançon	56.96	

**Tableau 8:** Compteurs de trafic pour chaque pont – Vaud.

Les données issues des comptages automatiques mentionnés dans le Tableau 8 sont répertoriées dans le Tableau 9. Le trafic journalier moyen (TJM) a été considéré sur 10 ans, de 1995 à 2004, afin de disposer de données nécessaires pour effectuer l'analyse des accidents.

Certains postes de comptage n'ont pas fourni de données pendant certaines périodes, en particulier les années 1997, 1998 et 2001, lacunaires pour tous les postes considérés ici. Le poste situé sur le contournement de Lausanne (64) ne dispose pas non plus de données en 1996.

Les données du Tableau 9 ont été représentées graphiquement sur la Figure 4 et, pour pouvoir inclure les données manquantes dans l'analyse des accidents, celles-ci ont été déterminées par interpolation sur le graphique de la Figure 4 et apparaissent dans le Tableau 10 en italique et accompagnées d'un astérisque (\*).

Année	TJM(43)	TJM(64)	TJM(83)	TJM(250)
1995	63000	68000	36400	24600
1996	63800	-	37200	25000
1997	-	-	-	-
1998	-	-	-	-
1999	70500	75600	40800	27600
2000	73500	78600	43100	28800
2001	-	-	-	-
2002	78500	74500	42200	30200
2003	77500	76000	43100	30900
2004	76900	78000	37800	31300

Tableau 9: TJM des différents postes de comptage.

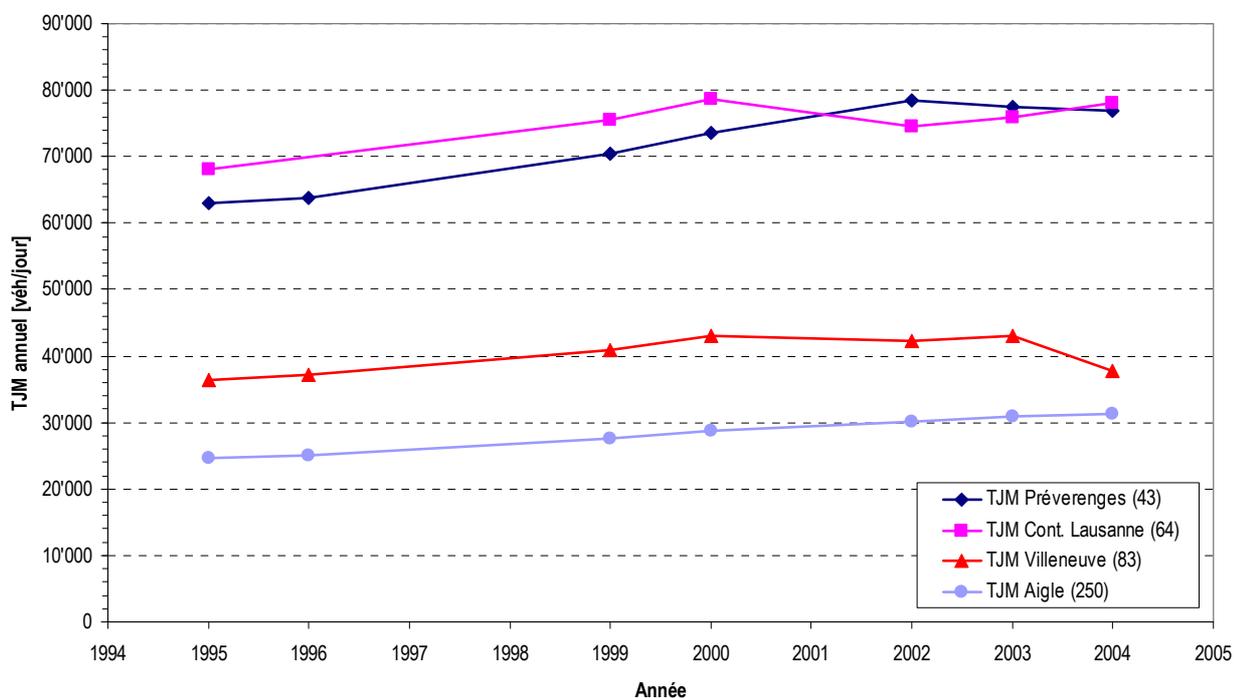


Figure 4: Evolution du TJM de 1995 à 2004.

Année	TJM(43)	TJM(64)	TJM(83)	TJM(250)
1995	63000	68000	36400	24600
1996	63800	*70000	37200	25000
1997	*65000	*72000	*38000	*26000
1998	*68000	*74000	*40000	*27000
1999	70500	75600	40800	27600
2000	73500	78600	43100	28800
2001	*76000	*76000	*43000	*30000
2002	78500	74500	42200	30200
2003	77500	76000	43100	30900
2004	76900	78000	37800	31300

Tableau 10: TJM mesurés et TJM interpolés graphiquement.

### 2.5.2 Données relatives aux accidents

Pour quantifier et pouvoir évaluer l'évolution des accidents en fonction du type d'enrobé mis en place sur les ponts, une récolte des statistiques d'accidents sur les tronçons considérés a été faite. Tous les accidents ayant eu lieu durant 10 hivers ont été récoltés. La période pour laquelle on dispose de statistiques va du 1<sup>er</sup> janvier 1995 au 31 décembre 2004. Pour l'analyse des accidents, la période hivernale qui a été considérée va du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril. Plusieurs états de chaussée ont été considérés:

- route sèche
- route humide
- route mouillée
- route enneigée
- route verglacée
- route recouverte de neige fondante

Les graphiques en annexe (Annexe 9.1) montrent les statistiques d'accidents par tronçon autoroutier complet (A1, A5 et A9) puis leur évolution d'année en année de 1995 à 2004.

On peut observer sur les figures ci-dessous (Figure 5, Figure 6, Figure 7, Figure 8, Figure 9) les données des accidents sur les ponts recouverts en enrobé drainant et représentés par une ligne noire. La date qui apparaît au-dessus du pont est l'année de pose de l'enrobé drainant le pont. Les situations hivernales qui peuvent être problématiques avec un enrobé drainant sont les cas de verglas et de chutes de neige. C'est pourquoi les accidents les plus déterminants pour cette étude sont donc ceux qui se produisent sur route verglacée, sur route enneigée ou sur une route recouverte de neige fondante. Les cas d'accidents sur ces différents états de chaussée ont été isolés et les dates de ces événements indiquées sous les ponts.

Pour les ponts revêtus en drainant de l'autoroute A1 (Figure 5), seul le pont de la Venoge peut faire l'objet d'une comparaison avant/après la pose du drainant, puisque le pont du Boiron et le pont de la Gare ont été recouverts de drainant une année avant les premières données d'accidents disponibles. On remarque qu'en valeur absolue, le nombre d'accidents sur les ponts, sous conditions typiquement hivernales, n'est pas plus élevé que hors des ponts.

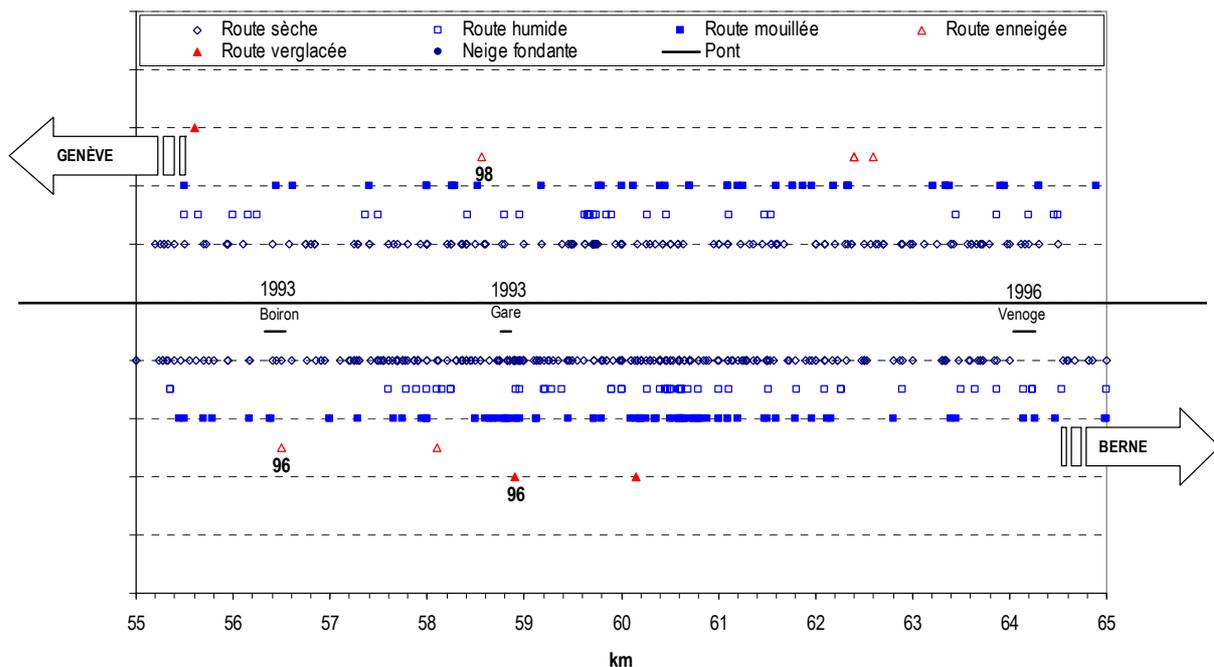


Figure 5: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A1.

En ce qui concerne le tronçon d'autoroute A5 situé sur territoire vaudois (Figure 6), aucune considération objective ne peut être faite sur le comportement des ouvrages d'art avant et après la pose de la couche d'enrobé drainant, puisque les revêtements ont tous été posés en 2004, dernière année pour laquelle on dispose de statistiques d'accidents. De plus, les ponts de Grandson, de l'Arnon, de Corcelles et de la Raisse ont été mis en circulation le 31 mai 2005. Seul le pont du Grandsonnet montre qu'il n'y a pas eu d'accident sur ou aux abords de celui-ci entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 30 avril 2004.

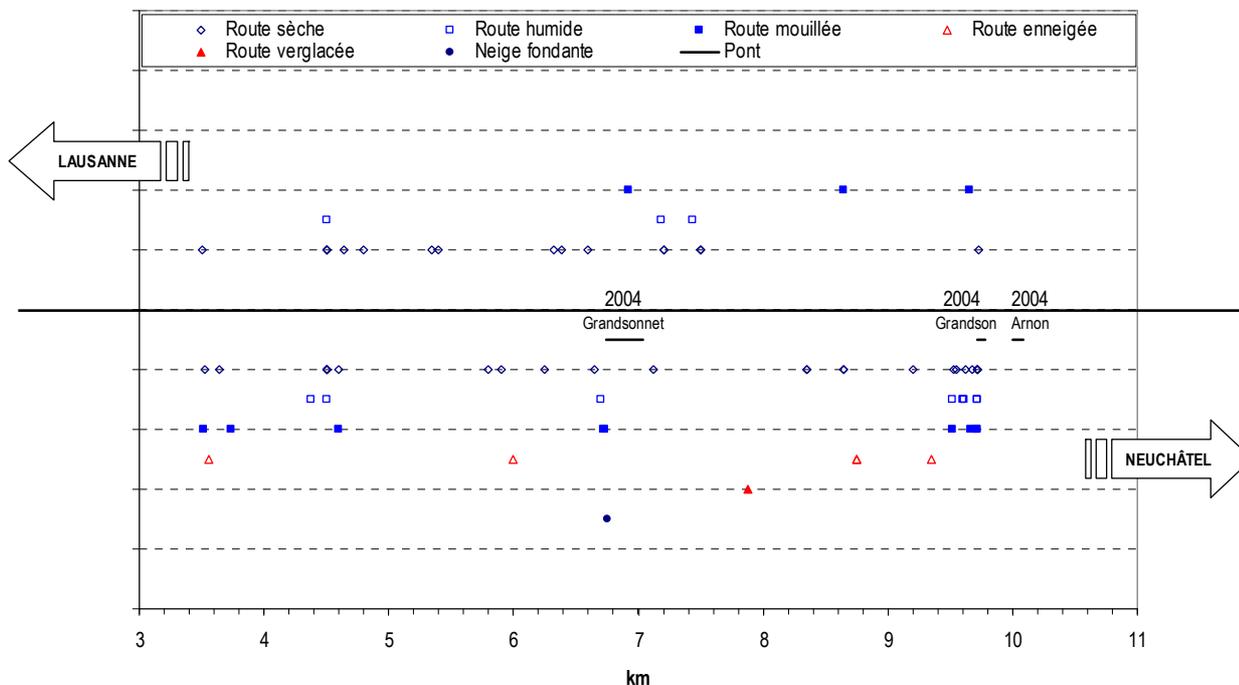


Figure 6: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A5.

Le tronçon de l'autoroute A9 sur territoire vaudois a été partagé en trois parties pour mieux pouvoir observer les accidents au droit des neuf ponts revêtus en drainant:

- partie 1 (km 0 à 4): ponts de la Sorge, de la Mèbre, de la Pétause, de la Lutrive
- partie 2 (km 30 à 33): ponts de la Baye de Clarens, des Vuarennas
- partie 3 (km 46 à 58): ponts sur la Grande-Eau, des Raffineries, sur l'Avançon

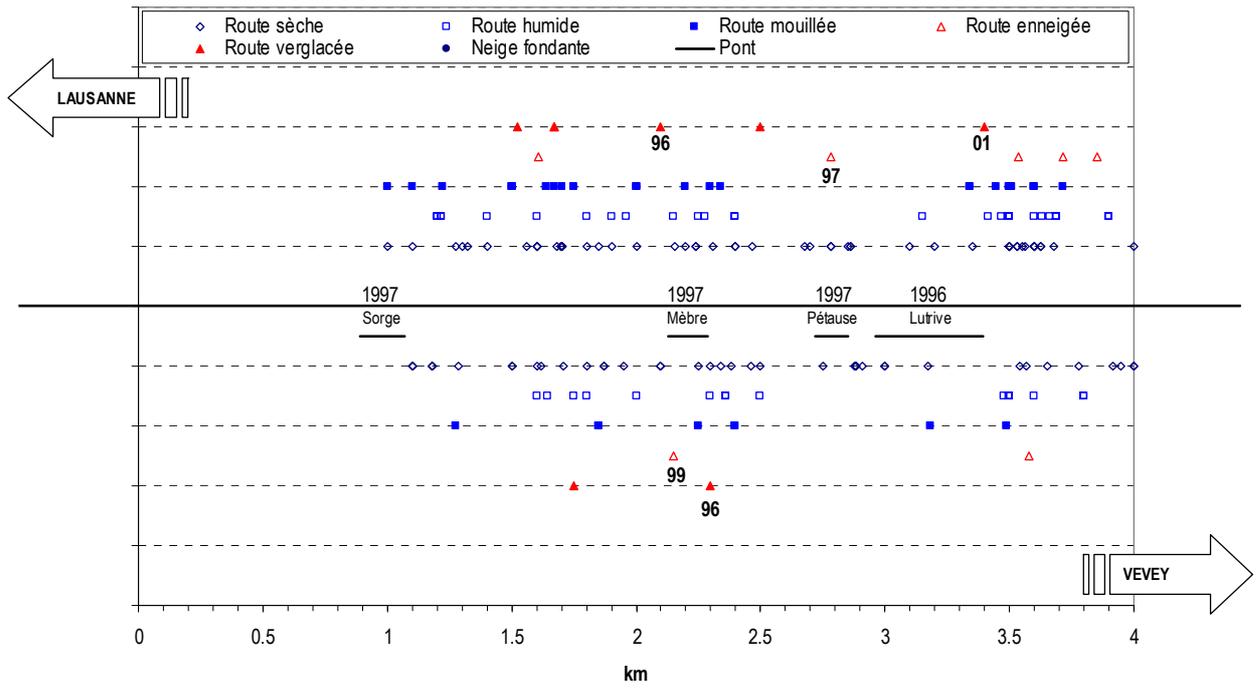


Figure 7: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A9 (km 0 à 4).

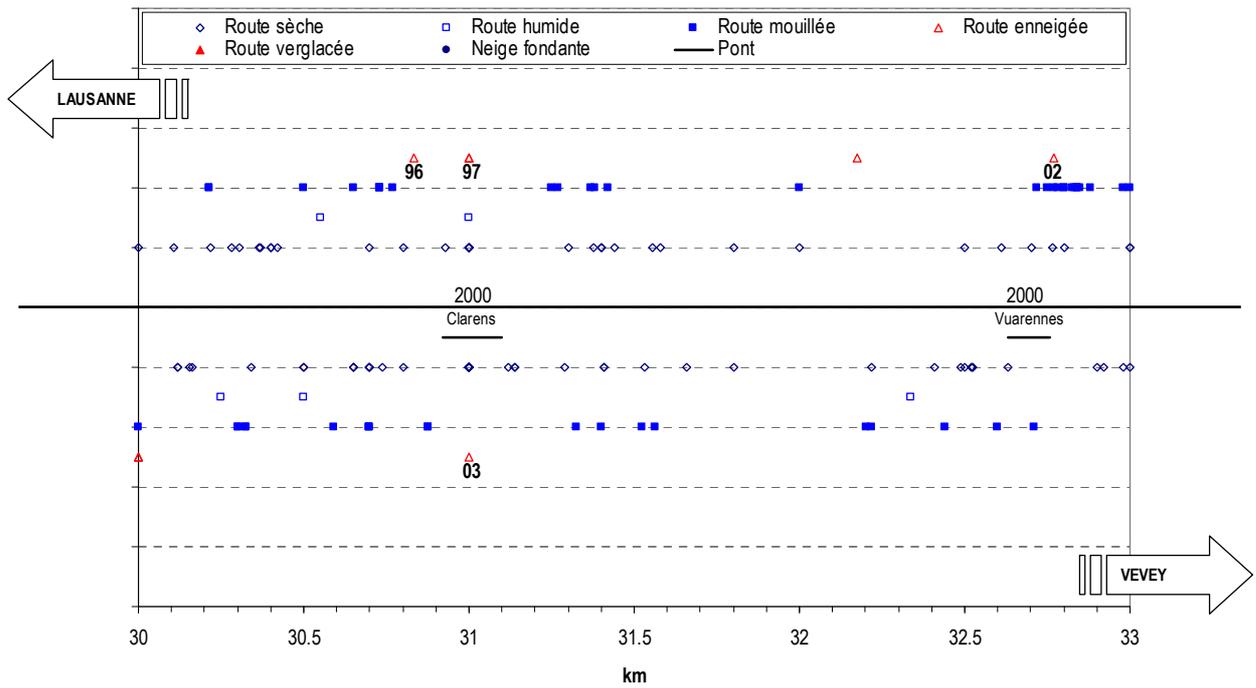


Figure 8: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A9 (km 30 à 33).

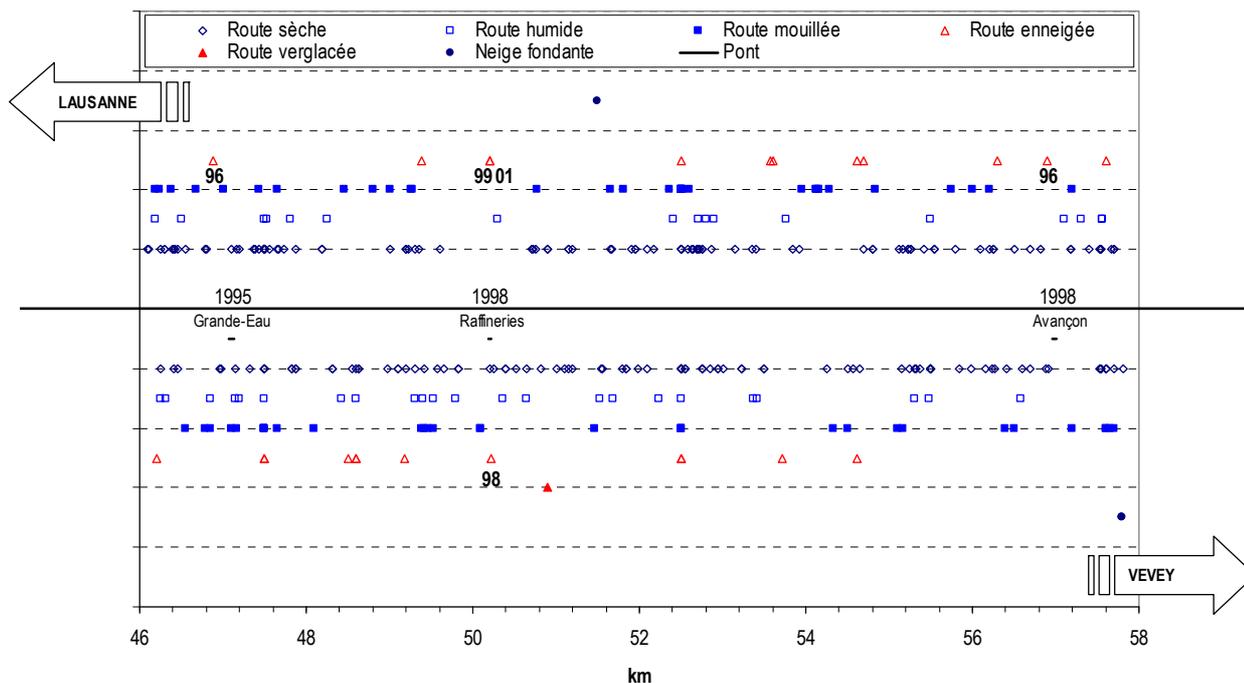


Figure 9: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A9 (km 46 à 58).

### 2.5.3 Taux d'accidents

Selon la norme suisse SN 640 009 [45], il est possible de déterminer le taux d'accidents  $U_{r(i)}$  sur l'intervalle  $i$  en fonction du nombre d'accidents  $Z_i$  survenus sur cet intervalle, du TJM, de la longueur de l'intervalle  $L_i$  et de la période considérée  $T$  (2).

$$U_{r(i)} = \frac{Z_i \cdot 10^6}{TJM \cdot 365 \cdot T \cdot L_i} \quad [\text{accidents} \cdot 10^6 / \text{véh} \cdot \text{km} \cdot \text{an}] \quad (2)$$

Pour chaque pont revêtu d'enrobé drainant de l'autoroute A1 (Tableau 11) et de l'autoroute A9 (Tableau 12, Tableau 13 et Tableau 14), le taux d'accidents a été déterminé. Comme mentionné au chapitre traitant du trafic, les valeurs de TJM munies d'un astérisque (\*) ont été interpolées en utilisant le graphique de la Figure 4. Le cadre bleu foncé indique les années durant lesquelles le pont a été revêtu d'un enrobé drainant.

Année	TJM	Ponts A1 (poste de comptage 43)					
		Boiron (1993)		Gare (1993)		Venoge (1996)	
		Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)
1995	63'000	0	0	0	0	0	0
1996	63'800	1	0.39	1	0.39	0	0
1997	*65'000	0	0	0	0	0	0
1998	*68'000	0	0	1	0.37	0	0
1999	70'500	0	0	0	0	0	0
2000	73'500	0	0	0	0	0	0
2001	*76'000	0	0	0	0	0	0
2002	78'500	0	0	0	0	0	0
2003	77'500	0	0	0	0	0	0
2004	76'900	0	0	0	0	0	0

Tableau 11: Taux d'accidents sur ponts – A1.

Année	TJM	Ponts A9 (poste de comptage 64)							
		Sorge (1997)		Mèbre (1997)		Pétause (1997)		Lutrive (1996)	
		Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)
1995	68'000	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	*70'000	0	0	2	0.44	0	0	0	0
1997	*72'000	0	0	0	0	1	0.21	0	0
1998	*74'000	0	0	0	0	0	0	0	0
1999	75'600	0	0	1	0.20	0	0	0	0
2000	78'600	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	*76'000	0	0	0	0	0	0	1	0.20
2002	74'500	0	0	0	0	0	0	0	0
2003	76'000	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	78'000	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 12: Taux d'accidents sur ponts – A9 (poste de comptage 64).

Année	TJM	Ponts A9 (poste de comptage 83)					
		Clarens (2000)		Vuarennnes (2000)		Grande-Eau (1995)	
		Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)
1995	36'400	0	0	0	0	0	0
1996	37'200	1	0.41	0	0	1	0.41
1997	*38'000	1	0.41	0	0	0	0
1998	*40'000	0	0	0	0	0	0
1999	40'800	0	0	0	0	0	0
2000	43'100	0	0	0	0	0	0
2001	*43'000	0	0	0	0	0	0
2002	42'200	0	0	1	0.36	0	0
2003	43'100	1	0.36	0	0	0	0
2004	37'800	0	0	0	0	0	0

Tableau 13: Taux d'accidents sur ponts – A9 (poste de comptage 83).

Année	TJM	Ponts A9 (poste de comptage 250)			
		Raffineries (1998)		Avançon (1998)	
		Zi	Ur(i)	Zi	Ur(i)
1995	24'600	0	0	0	0
1996	25'000	0	0	1	0.62
1997	*26'000	0	0	0	0
1998	*27'000	1	0.57	0	0
1999	27'600	1	0.56	0	0
2000	28'800	0	0	0	0
2001	*30'000	1	0.51	0	0
2002	30'200	0	0	0	0
2003	30'900	0	0	0	0
2004	31'300	0	0	0	0

Tableau 14: Taux d'accidents sur ponts – A9 (poste de comptage 250).

Les données statistiques sont trop peu nombreuses pour une évaluation objective du risque. On constate cependant que sur l'enrobé drainant ont lieu des accidents en période hivernale, mais qu'il n'y a pas d'accroissement visible par rapport à l'enrobé fermé précédemment en place.

#### 2.5.4 Conclusions

Comme déjà mentionné auparavant il est difficile d'aboutir à des conclusions objectives concernant l'accidentologie des ponts analysés. Les données statistiques couvrent une période trop restreinte pour comparer concrètement le risque d'accident d'un pont en enrobé drainant avec celui d'un enrobé traditionnel. Seule, l'autoroute A9 présente des périodes avant et après la mise en place du revêtement drainant possédant des durées plus ou moins semblables.

Le nombre d'accident très faible sur les différents ponts (avant ou après la pose de l'enrobé drainant) ne permet pas d'aboutir à une évaluation objective. En effet, sur les dix ans de données accessibles, il n'y a pas un seul pont présentant plus que trois accidents sur cette période. Ceci rend l'utilisation du taux d'accidents selon les normes très délicate.

De manière générale et sous conditions hivernales, aucun accroissement visible des accidents sur enrobé drainant par rapport à l'enrobé fermé ne peut être constaté. Des accidents se sont produits sur les deux types de revêtements. Des données statistiques plus vastes seraient utiles pour une analyse plus poussée.

En ce qui concerne les accidents qui ont eu lieu sur route mouillée, le même problème de manque de données se pose. Néanmoins, en analysant de plus près les quatre ponts sur l'autoroute A9 qui sont passés d'un enrobé traditionnel à un enrobé drainant entre 1998 et 2000, les constatations suivantes peuvent être faites:

- sur enrobé traditionnel, 23 accidents sont répertoriés sur chaussée mouillée
- sur enrobé drainant, 12 accidents seulement sont répertoriés sur chaussée mouillée

Même si les données sont peu nombreuses, une diminution marquée du nombre d'accidents se dégage en cas de route mouillée. Cette constatation concorde avec les conclusions d'une étude menée au Japon (chapitre 2.3.5) qui indique une diminution de 80% du nombre d'accidents sur enrobé drainant.

## 2.6 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

Comme mentionné au début de ce chapitre, aucune recherche concernant l'analyse du comportement des enrobés drainants posés sur des ouvrages d'art n'a été trouvée. Par contre certaines conclusions ont pu être tirées par rapport aux réponses au questionnaire retournées par les administrations de plusieurs pays.

Il ressort que la mise en place d'un enrobé drainant sur les ponts n'est en général pas pratique courante. Souvent le comportement d'un pont revêtu en drainant est jugé similaire à celui d'un enrobé drainant hors pont. Au niveau national, les cantons concernés n'ont pas détecté de particularités frappantes concernant le comportement de la surface du pont en drainant lors de fortes précipitations. Par contre pendant les périodes hivernales, il a été constaté qu'une adaptation du service hivernal est nécessaire pour gérer notamment l'enneigement plus marqué lors de chutes de neige. Avec cette adaptation, les administrations cantonales ne semblent pas rencontrer de difficultés particulières.

Au niveau international, l'application d'un tel revêtement sur les ponts est assez rare, à l'exception du Japon et, en ce qui concerne les sections expérimentales, de la France. Les principaux phénomènes observés dans ces cas ont été décrits dans ce chapitre où il ressort que les avantages d'un enrobé drainant lors des périodes pluvieuses prédominent sur les inconvénients durant les périodes hivernales. De plus, ces inconvénients peuvent être limités, voir annulés, avec une adaptation des interventions du service hivernal.

En ce qui concerne l'analyse de l'accidentologie, les données statistiques étudiées ne sont pas assez nombreuses pour aboutir à des conclusions concrètes. Au niveau du comportement hivernal, aucune différence particulière n'a été détectée sur les ponts ayant subi un changement de revêtement. Par contre, au niveau du risque d'aquaplaning, les données montrent une diminution marquée des accidents sur certains ponts depuis la mise en place du revêtement drainant.

### 3 ECOULEMENT DES EAUX DE SURFACE SUR UN OUVRAGE D'ART EN ENROBE DRAINANT

Afin de suivre et d'analyser le comportement d'un ouvrage d'art dont le revêtement est constitué en enrobé drainant, une expérience en vraie grandeur sur le pont sur l'Arnon de l'autoroute A5 a été menée. L'ouvrage se situe au km 10.000 de l'autoroute A5 entre Yverdon et Neuchâtel. La chaussée étudiée comporte deux voies de circulation, une voie d'accélération et une bande d'arrêt d'urgence. La couche de roulement est constituée d'un enrobé DRA11 de 50mm d'épaisseur avec 24% de vides. La déclivité et le dévers sont constants sur toute la longueur de l'ouvrage étudié.

Les détails de la structure pouvant influencer l'écoulement de l'eau, telle la rigole d'évacuation (au point bas et haut) ainsi que le joint de transition entre le corps de la chaussée et le pont apparaissent à la Figure 10 et la Figure 11.

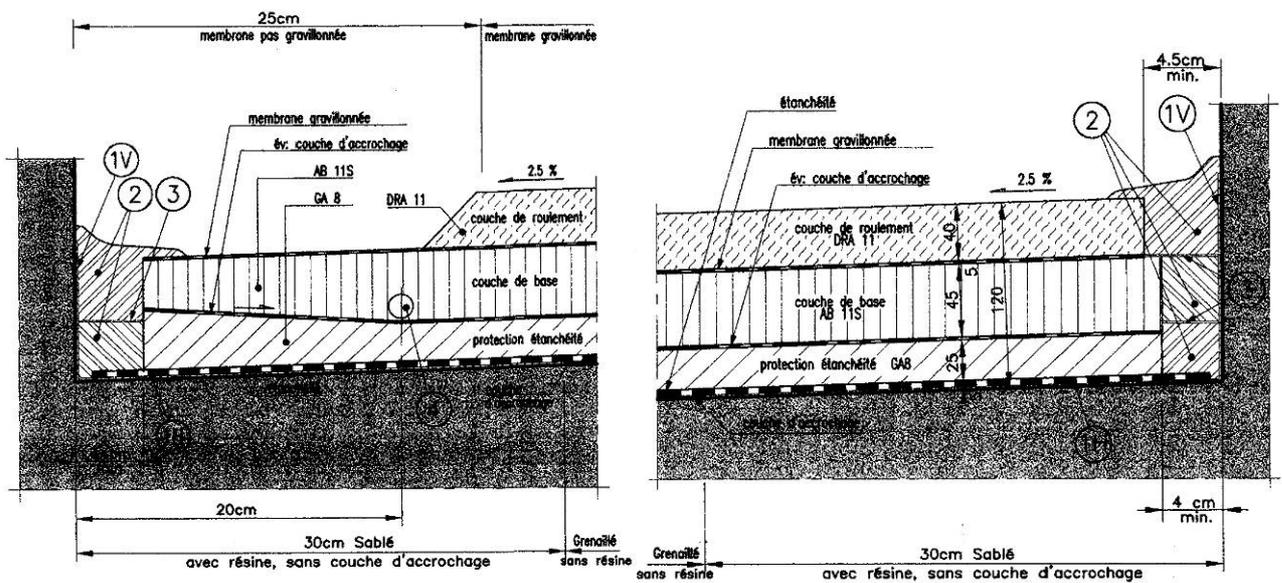


Figure 10: Détail de la rigole (point bas et point haut).

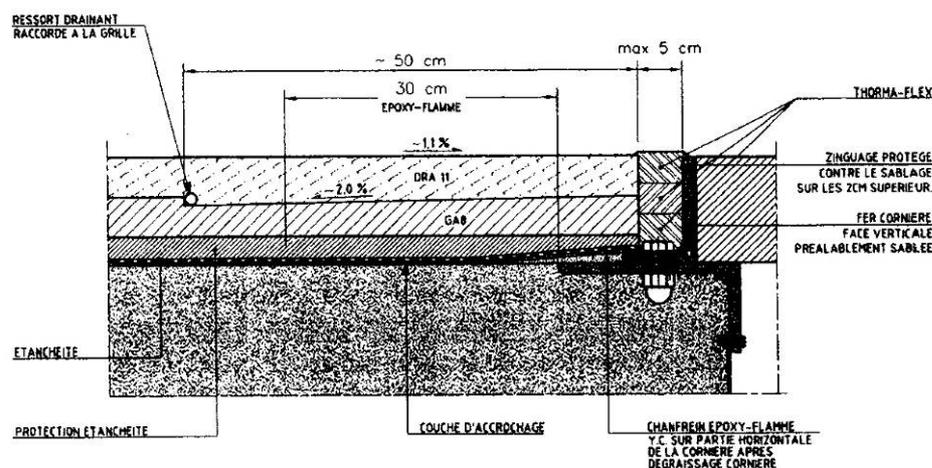


Figure 11: Détail du joint de pont.

Deux types d'expériences ont été menés, visant l'une à vérifier que l'écoulement des eaux de surface ne crée pas un risque d'aquaplaning et l'autre à récolter des informations sur le comportement hivernal du revêtement.

L'étude a consisté à quantifier, in situ, l'écoulement de l'eau de pluie dans la masse de l'enrobé drainant, d'évaluer la perméabilité et le comportement hydrique en général et de mettre en évidence:

- le type d'écoulement observé
- les stagnations au niveau des joints du pont
- l'apparition de résurgences

Outre les aspects susmentionnés, la mesure des débits entrants et sortants de la structure étudiée a été faite. Une collaboration avec le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'EPFL a été nécessaire pour la mise en place de l'instrumentation et la détermination des conditions d'essai ainsi que pour l'analyse des résultats.

Suite à une première journée d'arrosage sur le pont sur l'Arnon qui a eu lieu le 26 avril 2005, avant la mise en service de l'autoroute prévue le 12 mai 2005, l'expérience a été répétée en dehors du pont pour être en mesure d'estimer et de comparer l'intensité de pluie ou le débit maximum que pouvait évacuer la superstructure en enrobé drainant sans laisser apparaître les résurgences d'eau.

Les objectifs de cette journée étaient de:

- Vérifier le fonctionnement in situ de l'installation d'arrosage en simulant une intensité de pluie réaliste (orage typique)
- Etudier le comportement hydrique de la structure avec revêtement en enrobé drainant en mesurant le débit entrant et sortant
- Observer de manière qualitative l'écoulement de l'eau (noter les stagnations, résurgences, ruissellements et évacuation de l'eau de pluie)
- Mettre en évidence des écoulements particuliers au droit du joint de liaison du pont.

La campagne d'arrosage de la journée du 26 avril 2005 s'est déroulée sur la chaussée "lac" du pont sur l'Arnon en 3 étapes (Figure 12):

- L'arrosage d'une surface de 15x15m<sup>2</sup> (Zone 1) avec une intensité de pluie constante de 16.5mm/h et une mesure continue du débit sortant (récolté en aval de la surface arrosée)
- L'arrosage d'une surface de 15x15m<sup>2</sup> (Zone 2) avec l'intensité de pluie précédente et au droit du joint du pont. Le débit sortant n'est pas mesuré
- L'arrosage d'une surface de 15x15m<sup>2</sup> (Zone 1) avec 3 niveaux d'intensité de pluie (12.9mm/h, 21.3mm/h et de nouveau 12.9mm/h). Le débit sortant est mesuré

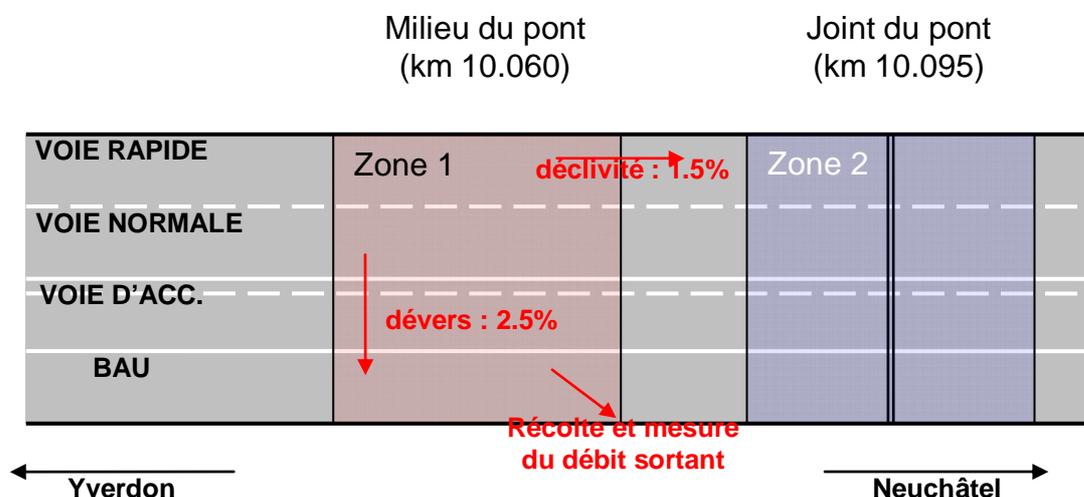


Figure 12: Situation de l'expérience.

L'équipement utilisé lors de cette journée était composé des éléments suivants:

- Une source d'approvisionnement en eau avec une pression suffisante et stable: Un camion-citerne du Service d'entretien du centre d'Yverdon a été mis à disposition pour l'expérience, d'une contenance de 7.5m<sup>3</sup>, et d'une pression pouvant atteindre 4bars.
- Un système d'arrosage destiné à l'alimentation de 4 buses à haute capacité (20l/min/buse). Les composants du système ont été dimensionnés et fournis par la société RMG Diffusion SA spécialisée dans l'arrosage agricole. Les 4 buses ont été confectionnées pour balayer une surface d'arrosage en forme de quart de disque assurant ainsi un arrosage quasi-uniforme sur de longues durées (Figure 13).
- Un système de mesure et d'enregistrement du débit sortant: formé d'un déversoir triangulaire couplé à un capteur à ultrasons qui mesure la hauteur d'eau de la surface libre et la convertit en débit. Le débit entrant est obtenu au début et à la fin de chaque essai en mesurant la masse d'eau sortant d'une buse sur une durée déterminée (Figure 14).

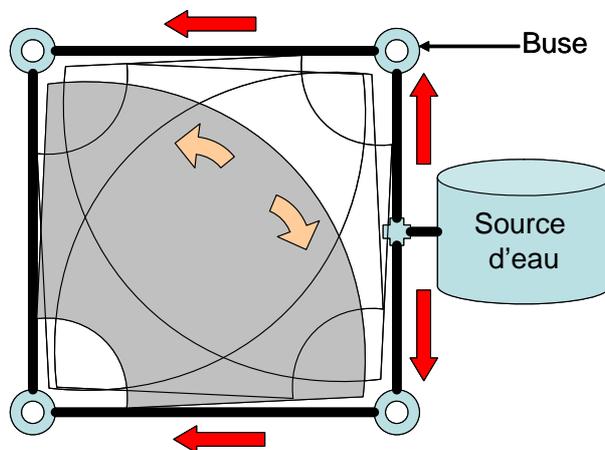


Figure 13: Système d'arrosage avec buses pivotantes sur 90°.



Figure 14: Mesure du débit sortant et entrant.

Une deuxième journée d'arrosage a été programmée le 11 mai 2005 en dehors du pont. L'expérience a été réalisée cette fois sur un site en remblai ne présentant pas de déclivité longitudinale et ne correspondant pas à une zone de démarrage du chantier de pose. Le site sélectionné se situe au km 11.200 de la chaussée "lac" et comporte deux voies de circulation et une bande d'arrêt d'urgence. La couche de roulement est constituée d'un DRA11 de 40mm avec 24% de vides.

Les objectifs de cette journée étaient de:

- Faire l'expérience de percolation transversale en arrosant la bande en amont du dévers
- Etudier l'écoulement de l'eau dans un revêtement drainant posé dans des conditions classiques. Il s'agit essentiellement de s'affranchir des particularités dues au démarrage du chantier (longueur d'exécution), et au compactage de l'enrobé sur un support particulier (tablier du pont)
- Estimer la capacité drainante de la structure en déterminant le débit de saturation
- Estimer le volume d'eau emmagasiné dans la masse de l'enrobé drainant

La campagne d'arrosage de la journée du 11 mai 2005 s'est déroulée en 2 étapes (Figure 15) :

- L'arrosage d'une bande large de 0.5m et longue de 15m sur la bordure amont de la chaussée. Le temps de percolation à travers de la masse d'enrobé drainant a été déterminé en relevant visuellement l'avancement du ruissellement ou des résurgences d'eau en surface.
- L'arrosage des voies normale et rapide (sans la BAU) avec diverses intensités de pluie et mesure du débit entrant et sortant

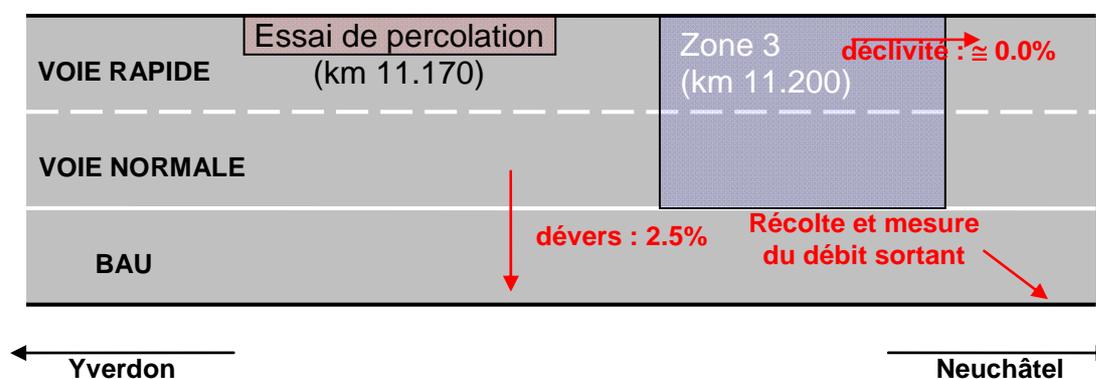


Figure 15: Schéma de situation des essais d'arrosage pour la journée du 11/05/2005.

Le site choisi correspond à une zone de déclivité longitudinale quasi-nulle au km 11.200. Le déversoir servant à mesurer en continu le débit sortant a été installé à l'intérieur d'une chambre de collecte en aval derrière la glissière de sécurité.

Le système d'arrosage était quasiment le même que celui utilisé lors de la première journée à l'exception de la largeur de la maille (réduite à 7.50m).

L'alimentation en eau a été assurée par un camion citerne mis à disposition par le centre d'entretien de la Blécherette. La puissance de la pompe intégrée était moins régulière que sur le camion précédant et a nécessité un contrôle plus régulier du débit sortant pour compenser la perte de charge due à la baisse du niveau de l'eau dans la citerne.

Le LCH a produit un rapport d'étude portant sur la description du système d'arrosage, le déroulement des différents essais d'arrosage et une estimation de certains paramètres caractérisant le comportement hydrique de la structure avec couche de roulement en enrobé drainant.

Le présent rapport est une synthèse du travail réalisé au cours de cette analyse. Il fait référence au rapport du LCH et aux mesures de perméabilité réalisées par le Laboratoire des Routes Nationales d'Yverdon. Il contient également des analyses supplémentaires qui complètent l'analyse du LCH.

### 3.1 PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ARROSAGE SUR LE PONT

#### 3.1.1 Arrosage initial sur le pont

L'épaisseur théorique de l'enrobé drainant étant de 50mm a été ramenée à 40mm pour les besoins du calcul. Cette valeur correspond à l'épaisseur observée sur le site combinée à une certaine remontée capillaire du SAMI dans l'enrobé drainant.

Les résultats et les observations peuvent se résumer comme suit:

- Une saturation locale a été observée se traduisant par l'apparition d'un film d'eau après 8 minutes d'arrosage. La zone saturée était une bande longitudinale régulière localisée sur le bord gauche de la voie d'accélération (Figure 16).
- Le débit sortant maximum de 38l/min a été atteint après 25min d'arrosage
- La saturation complète du revêtement est survenue, à peu près, au même moment que l'établissement du débit maximum (25min). Le film d'eau a recouvert pratiquement toute la surface du revêtement située au point bas.
- Après l'arrêt de l'arrosage, le film d'eau a très vite disparu, le débit passant de 42l/min à 10l/min en moins de 10min. La suite de la vidange a été par contre très lente.
- Sur la base d'un remplissage uniforme des vides totaux à la saturation (22%) rapporté à une surface de 15x15m<sup>2</sup> et une épaisseur de 40mm de drainant on obtient que:
  - le volume arrosé est de 1.55m<sup>3</sup>
  - le volume évacué est de 0.21m<sup>3</sup>
  - le volume stocké est de 1.34m<sup>3</sup>
  - le volume des vides est de 1.98m<sup>3</sup>
  - la saturation initiale (quantité d'eau présente avant l'essai dans le revêtement) est de 30%
  - l'épaisseur du film d'eau de ruissellement est de 1.3mm

– Sur la base d'un remplissage uniforme des vides communicants (15%), et toujours à la saturation (Figure 17) on a que:

- le volume arrosé est de 1.55m<sup>3</sup>
- le volume arrosé, évacué et stocké reste inchangé
- le volume des vides communicant est de 1.35m<sup>3</sup>
- la saturation initiale (quantité d'eau présente initialement dans le revêtement) est de 0.75%
- la hauteur du film d'eau de ruissellement est de 1.5mm



Figure 16: Zones saturées sur le pont.

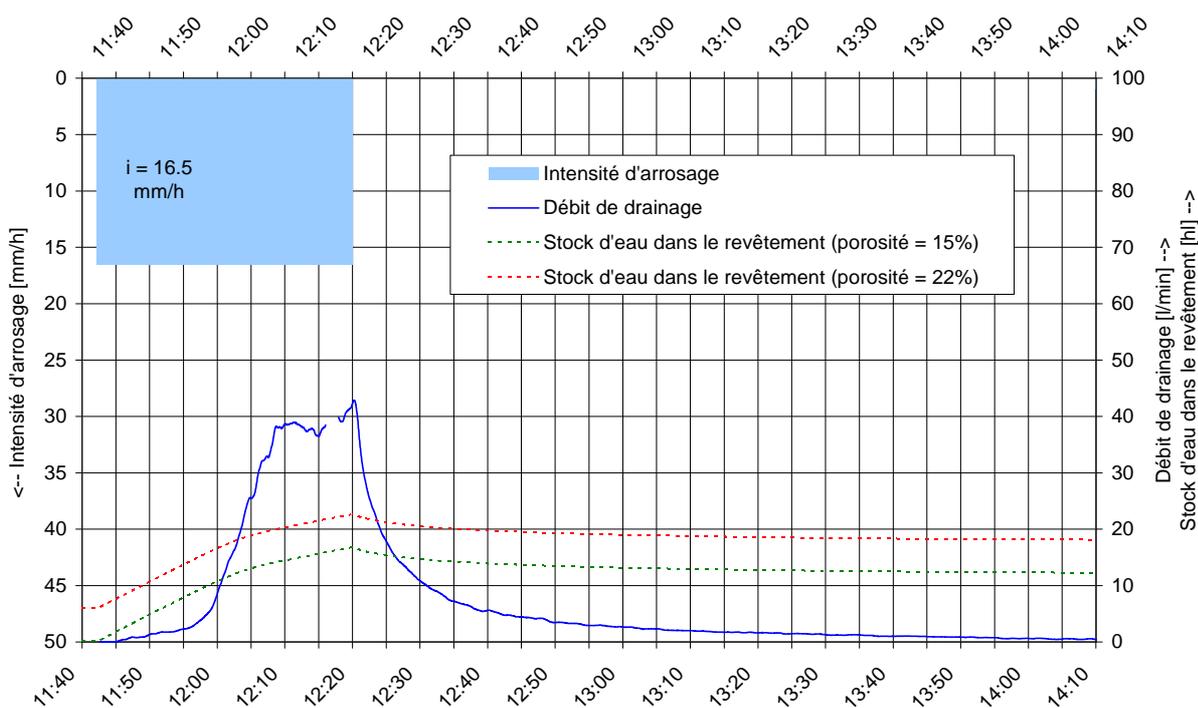


Figure 17: Evolution du stock d'eau dans le revêtement en fonction de la teneur en vide théorique retenue pour le calcul.

Le calcul considérant les vides communicants semble plus réaliste du point de vue physique, l'eau n'étant pas censée remplir les vides non communicants et la teneur en eau initiale de 30% semblant excessive.

La bonne concordance entre le stock d'eau à la saturation et le volume théorique des vides communicants, respectivement 1.34 et 1.35m<sup>3</sup>, est à relativiser et pourrait être moins bonne que ce que l'on observe. La différence serait plus importante si l'on considère qu'une partie de l'écoulement se fait dans le sens longitudinal. Ce comportement diminuerait le stock d'eau et augmenterait la teneur en eau initiale estimée (valeur supérieure à 0.75%).

Pendant la durée de mesure de deux heures, 48% du volume total d'arrosage a été drainé. Ceci indique l'importance du stock d'eau emmagasiné dans la structure arrosée. Notons qu'il s'agrandit au fur et à mesure de l'arrosage du fait de l'absence de cloisonnement du tronçon de structure étudié. L'augmentation de volume effectif dans lequel a lieu l'écoulement est plus marqué dans le cas où la saturation est maintenue pendant une plus longue période.

### 3.1.2 Arrosage au droit du joint

Les résultats et les observations faites au droit du joint sont les suivantes:

- La saturation du revêtement en enrobé drainant est uniquement survenue du côté aval (point bas) de la pente longitudinale. Cette surface saturée correspondant à la limite de démarrage du chantier de pose en dehors du pont (Figure 18 et Figure 19).
- L'écoulement en amont du joint s'est effectué normalement sans aucune résurgence à l'interface, entre la limite du pont et le joint.
- A la fin de l'arrosage, le même type de saturation a été observé, comme dans la première étape. Cette dernière n'est cependant pas aussi prononcée qu'en aval du joint d'autant plus que l'eau qui s'écoule en amont ne vient pas se cumuler avec celle en aval.



Figure 18: Zone fortement saturées en aval du joint.



Figure 19: Zones peu saturées en amont du joint.

### 3.1.3 Arrosage sur le pont avec variation de l'intensité de pluie

En variant l'intensité de pluie, il a été constaté que:

- L'arrosage avec une intensité de 12.9mm/h de la zone 1 a conduit à une saturation en surface plus rapide que lors de la première étape (après 4 minutes du début de l'arrosage). Le revêtement contenant vraisemblablement une quantité encore assez importante d'eau à l'intérieur des vides.
- Le débit de drainage semblait se stabiliser après 30min pour atteindre environ 20l/min
- Le passage à une intensité de 21.3mm/h a fait passer rapidement le débit à 60l/min
- Le retour à une intensité de 12.9mm/h a conduit à une stabilisation du débit de drainage à 30l/min. Cette valeur différente de celle mesurée lors du premier palier à 12.9mm/h indique qu'il est probablement nécessaire d'augmenter la durée des paliers pour observer une réelle stabilisation du débit. Le stock d'eau emmagasiné après le palier de 21.3mm/h a vraisemblablement une influence sur le débit du deuxième palier à 12.9mm/h.
- Un écoulement non négligeable d'eau a été observé en aval du déversoir ce qui suggère une revue à la baisse de l'estimation du volume d'eau stocké dans le revêtement à la fin de l'arrosage (stock évalué à 44% du volume arrosé). Un arrosage sur un site à faible pente longitudinale permettrait de réduire la proportion d'eau qui contourne le regard de récolte des eaux de ruissellement de la surface arrosée.

### 3.1.4 Conclusions

Les conclusions suivantes ont pu être tirées:

- Il n'existe pas de résurgences d'eau dues à une obturation de l'écoulement longitudinal au droit du joint. Les vides sont vraisemblablement plus faibles en aval du joint dans une zone de démarrage de la pose ayant probablement subi un compactage trop important.
- La saturation en surface disparaît rapidement à l'arrêt de l'arrosage. La baisse rapide du débit drainé ne suit pas une loi classique de tarissement théorique d'une source mais présente plutôt une courbe plus creusée et plus conforme à un écoulement en milieu poreux 2D.

- La perméabilité du revêtement drainant n'est pas homogène dans le sens transversal. L'apparition de résurgences sous forme de bandes régulières dans le sens longitudinal suggère un effet certain de l'atelier de compactage sur la régularité de la compacité. Cette différence de perméabilité n'est pas préjudiciable au fonctionnement de l'enrobé drainant du fait que les perméabilités mesurées ont des valeurs absolues satisfaisantes.

### 3.2 PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ARROSAGE HORS DU PONT

#### 3.2.1 Essai de percolation

Durant l'arrosage hors du pont, les éléments suivants ont été constatés:

- L'arrosage quasi-linéaire de l'ordre de 1.68l/min/m a nécessité environ 38min pour percoler transversalement. Le volume d'eau arrosé pendant cette durée est de 1.134m<sup>3</sup>.
- Des résurgences d'eau sont apparues en surface sur la voie normale à environ 0.50m à droite de la ligne de marquage la séparant de la voie rapide.
- Le front des résurgences a été repéré à différents points, sa vitesse d'avancement augmentant au fur et à mesure que celui-ci s'approche du chenal de drainage du fait que la charge d'eau en amont est de plus en plus importante (Figure 20).
- La perméabilité horizontale a été estimée grossièrement à  $2 \times 10^{-2}$  m/s. Cette valeur semble excessive en comparaison avec la valeur de perméabilité verticale et celle de la perméabilité horizontale mesurée en laboratoire. Les deux situations sont incomparables puisque, in situ, l'écoulement n'est pas forcé et la charge hydraulique est plus faible.

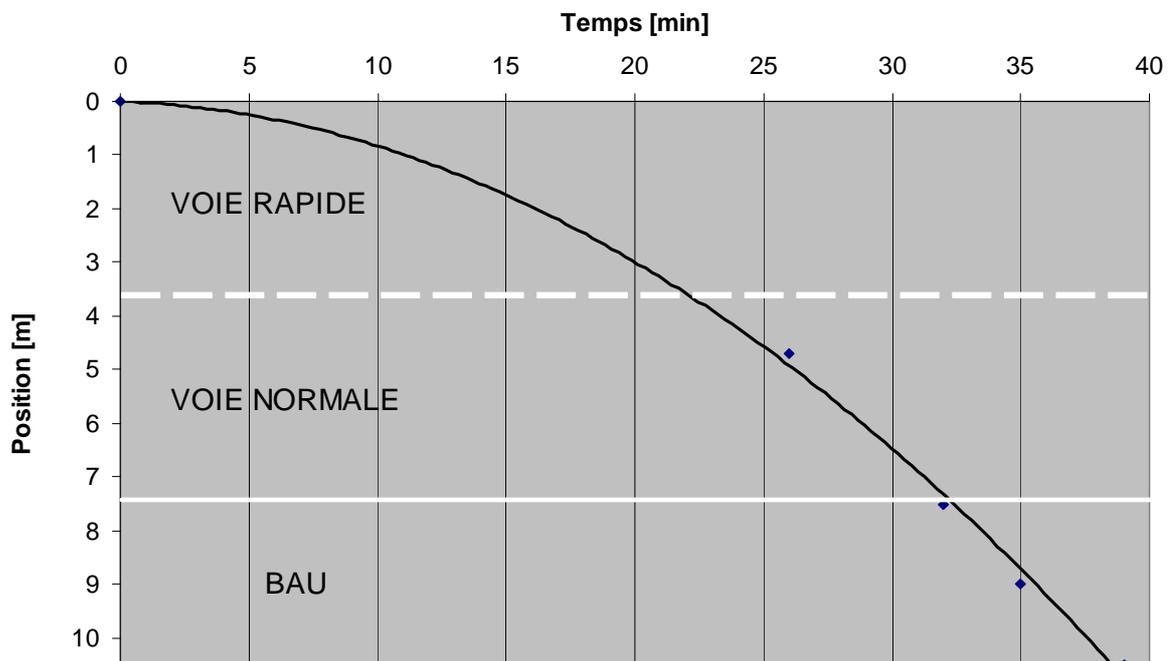


Figure 20: Avancement du front des résurgences lors de l'arrosage linéaire en amont du dévers.

### 3.2.2 Arrosage à différentes intensités de pluie

Le Tableau 15 résume les différents paliers d'intensité d'arrosage, la pression imposée, leur durée ainsi que le volume d'eau arrosé.

Les débits mesurés sont dans l'ordre d'application des paliers de 40, 27, 25 et 35l/min avec une forte variabilité pour chaque niveau.

L'estimation de la capacité drainante du revêtement est dépendante de la définition de l'état dit "saturé" de l'enrobé drainant.

Palier	Intensité [mm/h]	Pression [bars]	Durée [min]	Volume arrosé [m <sup>3</sup> ]
1	27.4	3.0	60	2.941
2	21.5	2.0	30	1.127
3	18.1	1.6	20	0.632
4	25.4	2.5	30	1.332

**Tableau 15:** Caractéristiques des différents paliers d'arrosage hors du pont.

En considérant que l'établissement d'un écoulement en surface (apparition d'un film d'eau) est la condition qui détermine un état saturé, il est clairement apparu que, même pour l'intensité la plus faible (18.1mm/h), le revêtement présente dans certaines zones un ruissellement en surface.

Les photos ci-après (Figure 21) ainsi que les observations in situ ont permis d'estimer la capacité drainante du revêtement pour une intensité comprise entre 21.5 et 25.4mm/h. Cette estimation grossière a considéré comme seuil de saturation le recouvrement de la macrotexture par le film d'eau sur plus ou moins toute la longueur de la section arrosée.

L'intensité de 18.1mm/h a induit certes un ruissellement en surface sur la BAU et essentiellement en aval de la faible déclivité longitudinale mais elle s'est caractérisée dans l'angle opposé (le point le plus haut) par une surface qui sèche sous l'effet des rafales de vent. Le vent, soufflant vers la direction amont, n'a pu être considéré comme la cause du ruissellement en aval.

Le film d'eau a rapidement disparu après l'arrêt de l'arrosage (Figure 22).



Intensité : 27.4mm/h



Intensité : 21.5mm/h



Intensité : 18.1mm/h



Intensité : 25.4mm/h

**Figure 21:** Saturation apparente du revêtement pour différents niveaux d'intensité de pluie.



Arrêt de l'arrosage



Après 9min



Après 17min

**Figure 22:** Disparition du film d'eau en surface après l'arrêt de l'arrosage.

A l'arrêt de l'enregistrement du débit sortant (une heure après l'arrêt de l'arrosage), le volume arrosé représentait  $6.032\text{m}^3$  alors que le volume drainé était de  $4.386\text{m}^3$ . Le stock d'eau restant dans la chaussée était, à ce moment là, de 27%. Il correspondait à 2.3 fois le volume des vides communicants et impliquait qu'il y eut une quantité importante de l'eau d'arrosage qui se serait écoulée dans le sens longitudinal ou qui se serait évaporée sous l'action combinée du soleil et des rafales de vent.

Il est cependant clair que l'existence du film d'eau sur la surface du drainant saturé ne pouvait pas entraîner l'apparition du phénomène d'aquaplaning semblable à celui observé pour des enrobés fermés. En effet, la pression du pneu sur la surface de roulement chasse l'eau à travers les vides communicants de l'enrobé drainant, ce qui n'est pas possible dans un enrobé fermé.

### 3.2.3 Conclusions

Les conclusions suivantes ont pu être établies:

- La compacité variable latéralement de l'enrobé drainant a été mise en évidence pour un revêtement posé sur un remblai dans des conditions classiques et optimales de compactage
- Une intensité de pluie conduisant à une saturation apparente de l'enrobé drainant a été déterminée en observant le fonctionnement hydrique de la structure pour différentes intensités d'arrosage, la capacité

de drainage d'une structure dépendant fortement de l'historique des précipitations (durée, intensité, état initial)

- La vidange du stock d'eau dans la chaussée a été très rapide après l'arrêt de l'arrosage, puis s'est fortement ralenti une fois le film d'eau en surface disparu, ce phénomène pouvant durer quelques heures

### 3.3 PERMEABILITE IN SITU

Les mesures de perméabilité ont été réalisées à l'aide du perméamètre d'Yverdon par le laboratoire du Service des routes. Un premier aperçu des valeurs moyennes confirmant la variabilité de la perméabilité en fonction de la position latérale du point de mesure (Figure 23).

Les perméabilités mesurées ont été dans l'ensemble satisfaisantes (mis à part une série sur la voie 1 sur le pont). Il serait intéressant de tenter d'expliquer cette variabilité par le protocole de compactage appliqué lors de la pose.

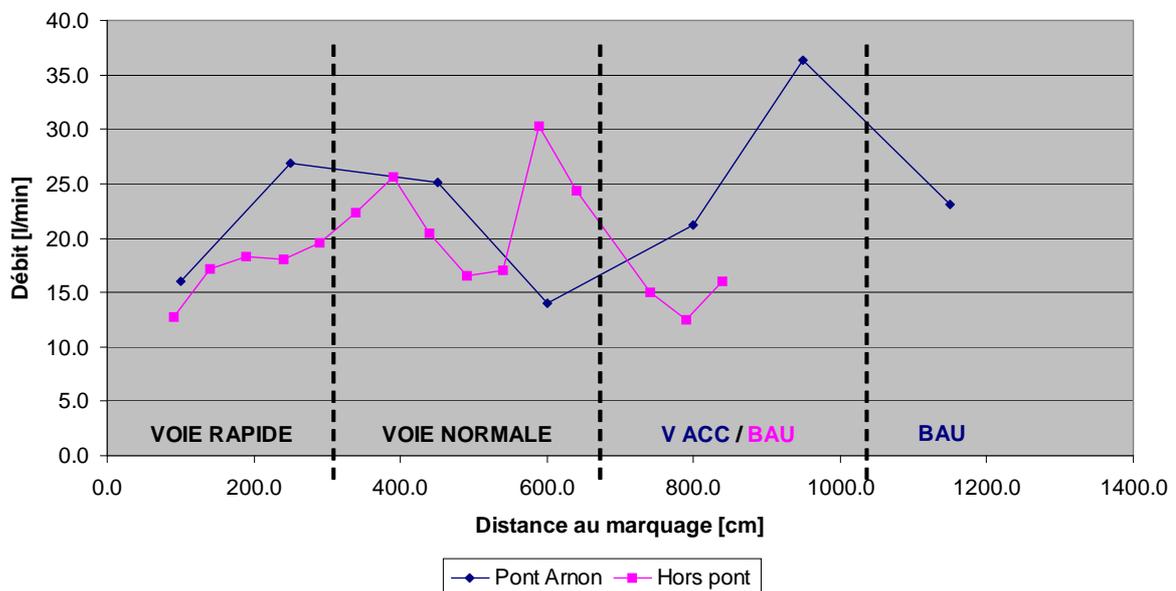


Figure 23: Perméabilité moyenne sur un profil transversal sur le pont et hors du pont.

Il a été constaté que la perméabilité moyenne mesurée sur le pont (23l/min) est meilleure que celle mesurée en dehors de celui-ci (19l/min).

Par contre, il a été intéressant de constater que la variabilité des mesures sur le pont était supérieure à celle observée en dehors (avec un coefficient de variation de respectivement 32% et 26%).

### 3.4 CONCLUSION DE L'ETUDE SUR L'ECOULEMENT DE L'EAU

L'expérience d'arrosage réalisée durant deux journées sur le pont sur l'Arnon et en dehors de celui-ci a permis de tirer les conclusions générales qui suivent.

La perméabilité du revêtement drainant varie sensiblement en fonction de la position latérale sur la chaussée. Des zones de perméabilités différentes ont été mises en évidence par un arrosage, aussi homogène que possible, de la surface du revêtement avec un débit simulant des intensités de pluie conséquentes et réalistes. Les zones à faible perméabilité apparaissent suivant les mêmes axes longitudinaux et suggèrent une mise en place différente de l'enrobé.

Les valeurs absolues de perméabilité sont satisfaisantes et n'affectent pas par leur variabilité la qualité drainante de la structure.

La capacité drainante de la structure a été estimée en déterminant l'intensité de pluie qui induit une saturation apparente du milieu poreux. Cette intensité de pluie dépend fortement de la définition de l'état "saturé".

Le film d'eau observé en surface disparaît très vite après l'arrêt de la précipitation. La vidange du stock d'eau est quant à elle plus lente, une fois ce film d'eau résorbé.

L'écoulement de l'eau n'est pas affecté par le joint de transition du pont. Les stagnations et/ou résurgences qui étaient attendues en amont du joint n'ont pas été observées.

L'évaluation du stock d'eau emmagasiné dans la chaussée n'a pas pu être déterminée avec précision du fait de la superposition de plusieurs facteurs:

- La durée du tarissement du débit sortant (plusieurs heures)
- L'accroissement de la surface saturée au fur et à mesure de l'arrosage (impossibilité de cloisonner les compartiments étudiés)
- L'évaporation due au soleil et au vent

L'étude de l'écoulement de l'eau à la surface du pont sur l'Arnon indique des perméabilités moyennes meilleures en comparaison avec celles mesurées en dehors du pont. Par contre, on observe une variabilité plus faible dans les mesures de perméabilité hors pont. Les risques d'aquaplaning sur et hors pont sont donc très semblables. De ce point de vue, la pose d'un tel enrobé sur pont ne peut être qu'avantageuse par rapport à un enrobé traditionnel. Il convient néanmoins de veiller à être très prudent lors de la mise en place du revêtement pour aboutir à une perméabilité homogène.

En ce qui concerne la sécurité hivernale et d'un point de vue perméabilité plusieurs points sont à noter. Les chaussées sur ou hors pont ayant des vides colmatés par de la neige compactée ou par des résidus de sel de déverglacage risquent d'être confrontées à des perméabilités réduites. Ceci peut poser des problèmes lors de périodes de pluie ou neige intermittentes. Dans ce genre de situation, la perméabilité peut devenir équivalente à celle d'un enrobé fermé. Des essais sur enrobés colmatés pourraient être menés pour voir l'influence de ce paramètre.

Lors de chutes de températures en période hivernale, un éventuel stock d'eau dans les vides de l'enrobé drainant peut geler et modifier l'état de surface du revêtement.

Un point non traité par cette étude sur l'écoulement de l'eau, est le comportement à moyen ou long terme d'un enrobé drainant. La réalisation périodique de campagnes d'essais pourrait apporter des résultats concernant l'évolution du comportement de ce revêtement sur plusieurs années.

## 4 COMPORTEMENT HIVERNAL D'UN OUVRAGE D'ART EN ENROBE DRAINANT

Le comportement hivernal d'un ouvrage d'art en enrobé drainant et de la partie hors pont a été étudié en analysant les résultats issus de sondes de mesure des conditions atmosphériques, des conditions thermiques de surface et en profondeur et posées sur le pont sur l'Arnon sur l'A5 à la hauteur du km 10. Des comparaisons ont été faites entre le comportement observé sur le pont et celui observé sur le remblai.

Ensuite, le comportement général d'un enrobé drainant sur pont a été comparé par rapport aux enrobés traditionnels sur remblai et sur pont à l'aide d'un outil de simulation d'une part, et d'une analyse de données de mesure provenant d'une planche d'essai située au Valais d'autre part.

### 4.1 SITUATION DE LA PLANCHE D'ESSAI

La planche d'essai qui a été instrumentée pour les besoins de l'étude se trouve sur l'autoroute A5 entre Yverdon-les-Bains et Neuchâtel, à proximité de Grandson (Figure 24). Elle a été intégrée dans les tronçons neufs de l'A5 à la hauteur du village Champagne, près du cours d'eau Arnon.

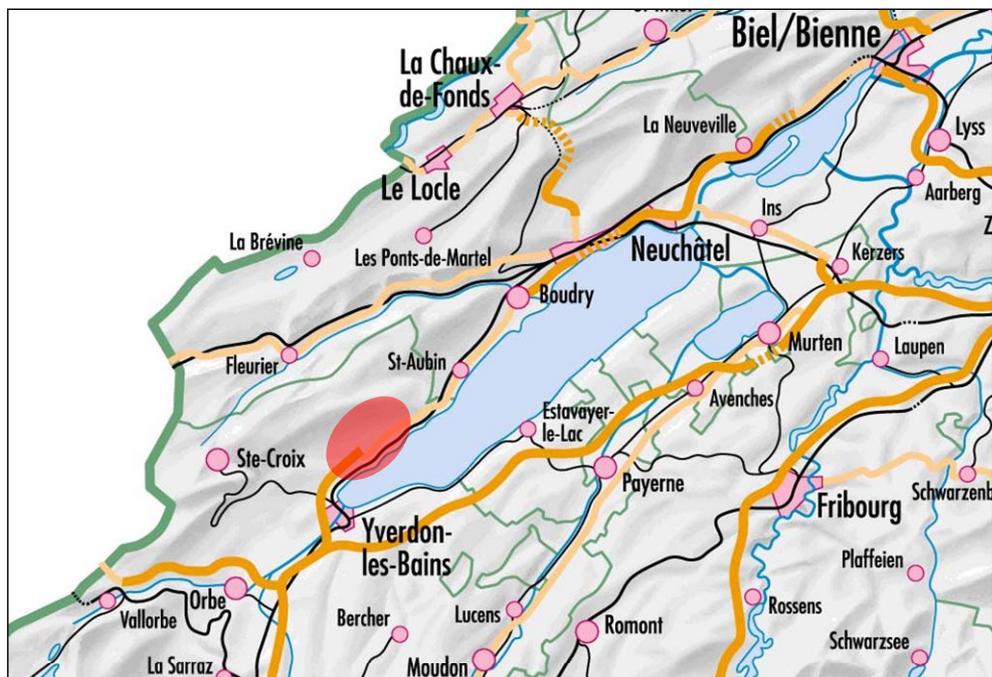


Figure 24: Situation générale de la planche d'essai.

La planche d'essai a été divisée en deux parties, l'une se trouvant sur et juste à côté du pont sur l'Arnon (km 10.000), et l'autre à environ 1km du pont, en direction de Neuchâtel (km 11.040). La première comporte deux points de mesure dont le premier se situe sur le pont et le deuxième sur le remblai et hors du pont, à quelques dizaines de mètres à l'ouest du premier. La deuxième partie de la planche d'essai se compose d'un appareil mesurant les radiations solaires et infrarouges (venant du ciel et du sol) fixé sur un portique au-dessus de la surface de l'autoroute (Figure 25). L'instrumentation mise en place pour chacun des points de mesure est décrite plus en détail dans le chapitre suivant.

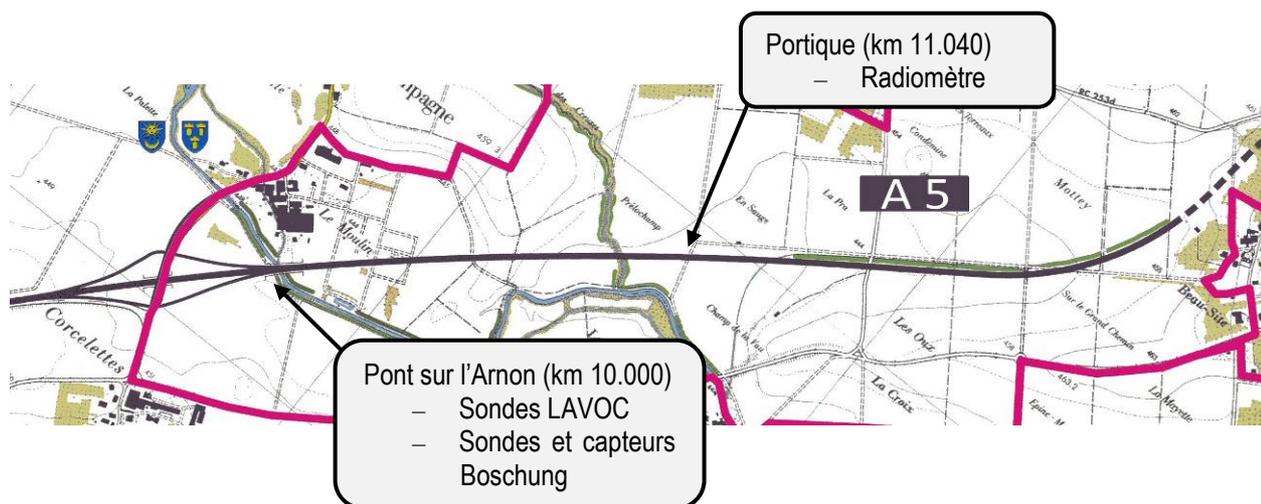


Figure 25: Situation de la planche d'essai sur l'A5.

## 4.2 INSTRUMENTATION

Comme déjà mentionné, les données provenant de trois points de mesure ont été utilisées pour analyser le comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai. Les données récoltées sont de natures diverses:

- température de la chaussée (en surface, à différentes profondeurs)
- état de la chaussée (sèche, humide, mouillée, verglacée, gelée)
- température du point de congélation, épaisseur du film d'eau
- quantité de produit décongelant
- température de l'air
- température du point de rosée
- quantité et type de précipitation
- rayonnement solaire et rayonnement infrarouge

Sur la figure ci-après est donné un aperçu des divers capteurs et sondes de mesure, ainsi que de leurs caractéristiques respectives.

Localisation	Pont					Remblai									Portique		
Type de capteur	BOSO	ARCTIS	Pt100			Pt100									BOSO	Instruments Météo	Radiomètre
Grandeur physique	(1)	(2)	Température												(1)	(3)	(4)
Profondeur [mm]	surface	90	50	10	sous pont	1300	900	560	205	40	1800	410	40	surface	sur portique		
Responsable pose	BOSCHUNG				LAVOC					BOSCHUNG				LAVOC			
Responsable récolte données	BOSCHUNG				LAVOC					BOSCHUNG				LAVOC			

(1) Température de la chaussée  
Etat de la chaussée

(2) Température du point de congélation  
Epaisseur du film d'eau  
Quantité produit décongelant

(3) Température de l'air  
Température du point de rosée  
Quantité et type de précipitation

(4) Rayonnement solaire (Haut + Bas)  
Rayonnement infrarouge (Haut + Bas)

Tableau 16: Aperçu et caractéristiques des capteurs et sondes.

En plus des capteurs de mesure à proximité du pont, des données supplémentaires concernant les mesures de vent ont été récoltées à l'aide de la station météorologique située à Method (VD) à une dizaine de kilomètres du pont. Cette dernière a fourni les données utilisées pour la modélisation.

Dans ce chapitre, les différents capteurs et sondes sont décrits brièvement, et leurs emplacements respectifs sont indiqués.

#### 4.2.1 Instrumentation sur pont et sur remblai

L'instrumentation mise en place sur et hors pont (Figure 26) se compose de sondes et capteurs mesurant les caractéristiques de la chaussée et les caractéristiques météorologiques. Trois différents types de sondes ont été utilisés:

- plusieurs Pt100 (mesure de la température de la chaussée)
- deux sondes BOSO
- une sonde ARCTIS (sondes de chaussée actives)

Ces données sont transmises à un boîtier fixé sur un mât (mât Boschung) qui est lui aussi doté de plusieurs instruments météo comme:

- mesure de la température de l'air
- mesure de la température du point de rosée
- détection des précipitations (pluie, neige)

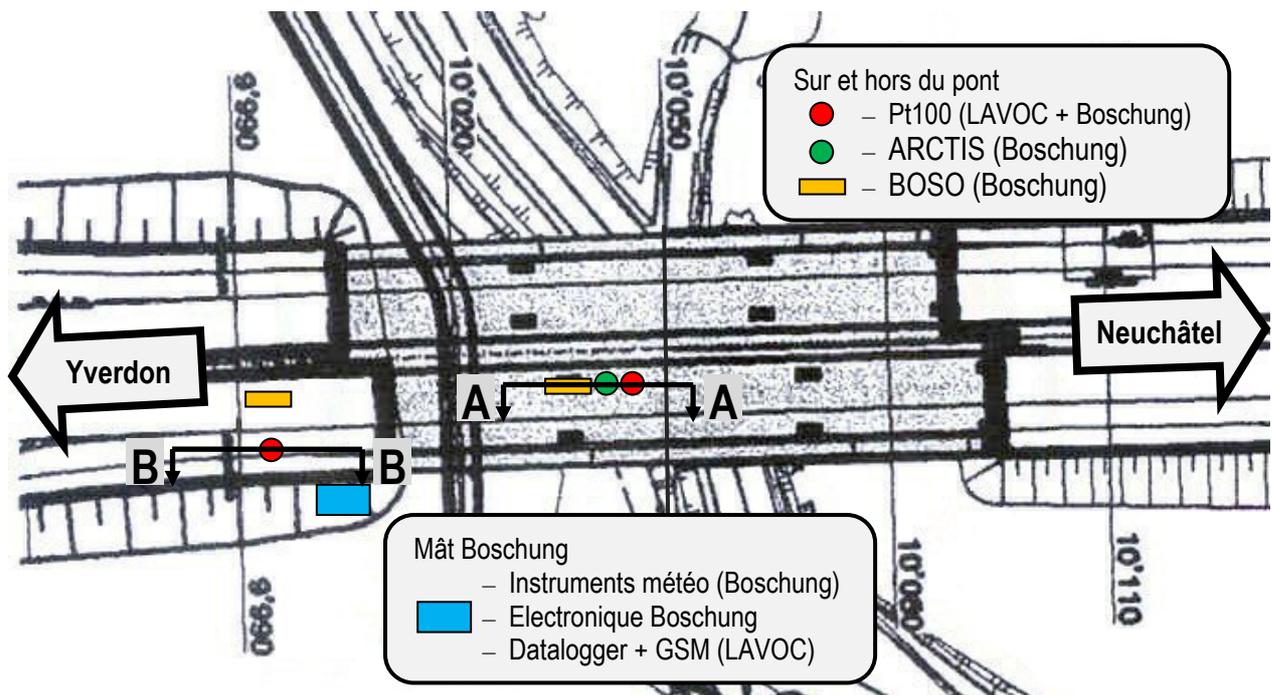


Figure 26: Vue générale de la situation des sondes de mesure sur et hors pont.

Le pont (partie grisée) a été équipé par trois sondes Pt100 pour les mesures de température de la chaussée à diverses profondeurs (10, 50 et 90mm), ainsi que d'une sonde supplémentaire installée sous le pont. En plus, deux sondes actives de type BOSO et ARCTIS ont été mises en place à la surface du pont. Sur la Figure 27 est représentée la coupe A-A de la Figure 26 qui indique la position des diverses sondes installées ainsi que les caractéristiques des couches de la chaussée.

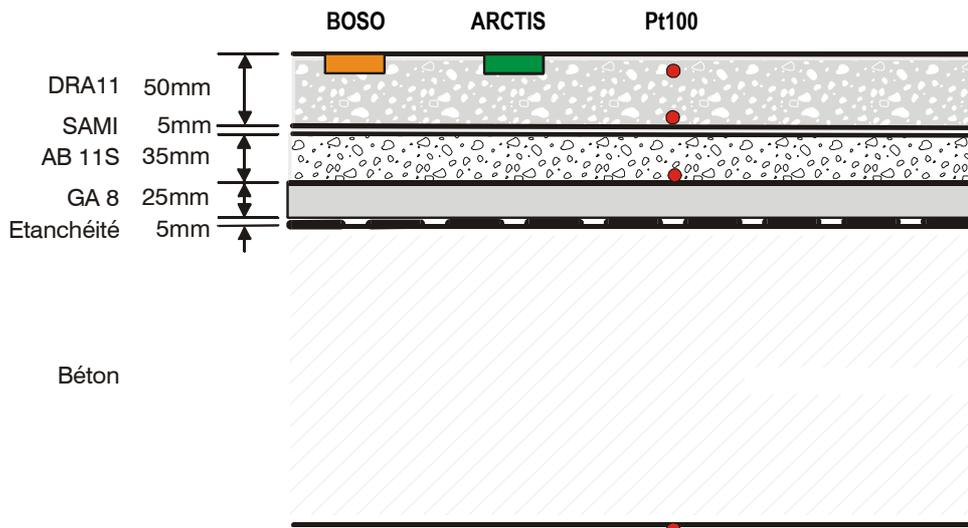


Figure 27: Coupe A-A : Situation des diverses sondes installées sur et dans l'enrobé du pont.

La partie hors pont (remblai) a été équipée par huit sondes Pt100 et une sonde active BOSO en surface. Les Pt100 ont été installées à des profondeurs de 40, 45, 205, 410, 560, 900, 1300 et 1800mm. Sur la Figure 28 est représentée la coupe B-B de la Figure 26 qui indiquant la position des diverses sondes installées ainsi que les caractéristiques des différentes couches de la chaussée.

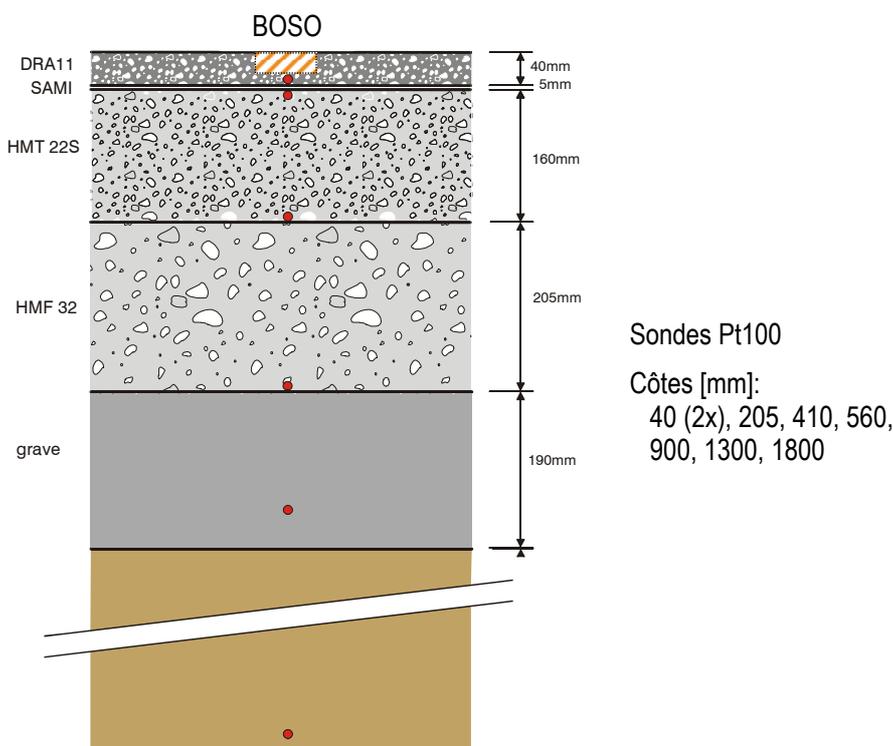


Figure 28: Coupe B-B : Situation des diverses sondes installées dans la partie hors pont.

#### 4.2.1.1 Sondes Pt100

Les sondes Pt100 permettent de mesurer la température de la chaussée à différentes profondeurs. La mesure de la température se fait de manière indirecte par la mesure de la résistance électrique de la sonde. La variation de la tension ainsi détectée, dans un circuit électrique qui englobe cette résistance, permet d'aboutir à des mesures très précises de la température. Ces sondes sont abondamment utilisées et jouissent d'une très bonne réputation dans la pratique.

#### 4.2.1.2 Sondes BOSO et ARCTIS

Les sondes BOSO et ARCTIS sont des sondes actives qui refroidissent artificiellement leurs surfaces pour déterminer à quel instant précis il y a formation de glace. Elles peuvent être utilisées de manière autonome ou combinée. Pour le deuxième cas, l'exploitation simultanée de deux sondes permet, grâce à un procédé de cycles de refroidissement parallèles, un temps de réponse rapide, tout en offrant une certaine redondance aux mesures effectuées. Le modèle utilisant les deux sondes actives en même temps assure donc une fiabilité optimale des données. Pour le cas de la planche d'essai sur le pont de l'Arnon, une sonde BOSO seule a été installée sur remblai, tandis que sur le pont, les deux sondes actives ont été mises en place.

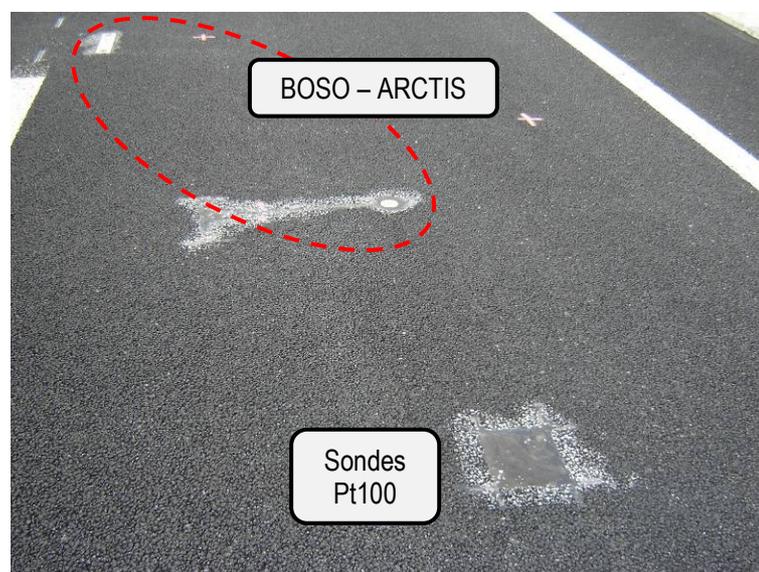


Figure 29: Vue des sondes à la surface du pont.

Le fonctionnement des deux sondes est semblable mais se différencie toutefois par certains paramètres. La sonde BOSO permet de refroidir activement par cycle sa surface de 2°C au-dessous de la température de la chaussée grâce à un élément thermique Peltier. Elle mesure ensuite les conditions de surface refroidie et peut de cette façon détecter directement la formation de glace. Les grandeurs physiques intéressantes à en tirer sont la température de la surface de la chaussée ainsi que l'état de cette chaussée (sèche, humide, mouillée à différents niveaux, verglacée, gelée). La BOSO intègre également une combinaison de capteurs de mesure actifs et passifs pour garantir une meilleure fiabilité des données récoltées.

La sonde ARCTIS s'utilise généralement en tant que complémentaire à une sonde passive ou une sonde active BOSO. Elle refroidit activement sa surface de 15°C au-dessous de la température de la chaussée et détermine de cette manière précisément la température du point de congélation, qui représente la température à laquelle la glace se forme sur la surface de la sonde. En plus des mêmes caractéristiques mesurées par les deux sondes (température de surface, état de chaussée), la sonde permet aussi d'évaluer l'épaisseur du film liquide présent sur la chaussée. Le risque d'aquaplaning sur la chaussée peut ainsi être estimé.

La sonde ARCTIS permet également de déterminer la quantité réelle de produit décongelant nécessaire pour maintenir la surface de la chaussée exempte de verglas. En effet les données indispensables pour cette détermination (température du point de congélation, épaisseur du film d'eau à la surface, caractéristiques et concentration du produit décongelant utilisé) sont connues ou peuvent être mesurées. Notons aussi que l'influence de produits chimiques multiples, de la saleté, de la gomme des pneus et d'autres résidus se trouvant sur la surface de la chaussée est prise en compte lors de la mesure de la température du point de congélation. Ces facteurs peuvent avoir une grande influence sur le point de congélation.

L'utilisation de la sonde ARCTIS en combinaison avec la sonde BOSO permet d'améliorer la fiabilité et la précision des informations concernant le risque ou la présence de verglas sur la chaussée, principalement grâce à une détection à de multiples endroits et à une technique de mesure redondante.

#### 4.2.1.3 Mât *Boschung*

Le mât *Boschung* possède les composants suivants:

- instruments de mesure des caractéristiques météorologiques
- appareils électroniques nécessaires pour la récolte, le traitement et le transfert des données provenant des capteurs

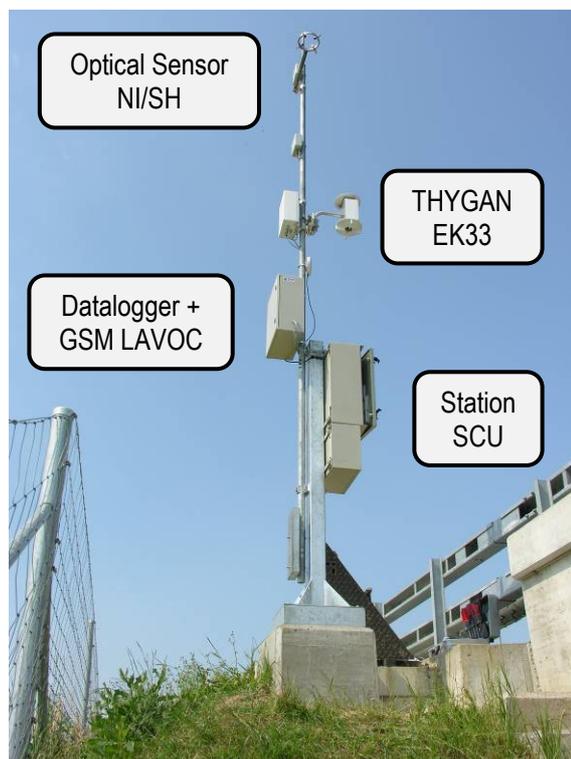


Figure 30: Vue du mât *Boschung*.

Les caractéristiques météorologiques ont été déterminées à l'aide de deux systèmes:

- système de détection du brouillard et du givre (THYGAN EK33)
- système de détection de précipitation (Optical Sensor NI/SH)

Le THYGAN EK33 mesure la température du point de rosée à l'aide d'une technique sensorielle ainsi que la température de l'air grâce à un capteur de température ambiante intégré. Avec ces deux mesures, l'humidité relative est calculée directement dans le boîtier. Le système, non optique, est basé sur la mesure de l'augmentation artificielle de la pression de vapeur d'eau (hygromètre à point de rosée), qui permet de déterminer la densité du brouillard. Ce dernier est divisé en quatre niveaux:

- Niveau 0 – pas de brouillard
- Niveau 1 – risque de brouillard
- Niveau 2 – faible brouillard (visibilité ~ 150 à 300m)
- Niveau 3 – fort brouillard (visibilité < 150m)

Le détecteur de brouillard et de givre (THYGAN EK33) est muni d'un dispositif de nettoyage automatique et régulier qui le rend insensible à la pollution provenant de la route. En même temps, il est chauffé en cas de risque de brouillard pour le rendre insensible aux conditions météorologiques difficiles.

Le détecteur de précipitation (Optical Sensor NI/SH) permet de faire la différence entre la pluie et la neige à trois niveaux d'intensité différents. Le procédé de mesure est optique et permet également de détecter une quelconque pollution de l'air. Le système de détection se compose de quatre capteurs optiques, montés sur une tige métallique en forme de cercle et opposés deux par deux dans un plan horizontal. Chaque capteur émet en même temps un rayon infrarouge et capte celui venant du capteur en face. En fonction de la présence de gouttelettes entre ces capteurs, le système peut déterminer le niveau de précipitation.

Un capteur de la température ambiante est également intégré à ce système de détection. En outre, un élément de chauffage, présent dans chacun des quatre capteurs optiques, empêche la formation de glace ou l'apparition de gouttelettes de condensation sur le capteur.

Les instruments électroniques montés sur le mât sont également au nombre de deux: la Station SCU de Boschung et le dispositif Datalogger + GSM du LAVOC. Ces deux équipements permettent de récolter les données de mesure provenant des instruments météorologiques du mât Boschung et des sondes installées dans la chaussée. Ces données sont ensuite conditionnées et transmises aux responsables respectifs.

#### 4.2.2 Instrumentation sur le portique

L'instrumentation mise en place sur le portique se compose d'un radiomètre mesurant les caractéristiques du rayonnement solaire et infrarouge (Figure 32). Le portique était existant et muni d'un système de télématique (panneaux à messages variables) sur une voie, à 1200m de l'entrée de la galerie d'Onnens. Le radiomètre a été installé sur la voie normale dans la direction d'Yverdon.

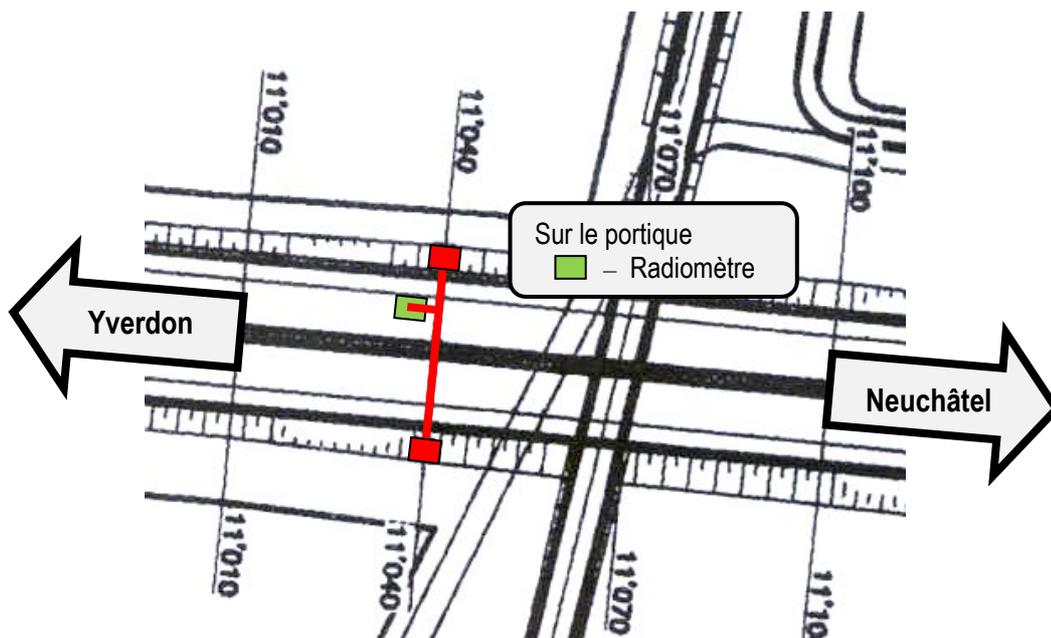


Figure 31: Vue générale de la situation des instruments de mesure sur le portique.

Le radiomètre se compose de deux pyranomètres et de deux pyr géomètres. Les deux premiers sont utilisés pour mesurer le rayonnement solaire et les deux autres pour le rayonnement infrarouge. Le radiomètre est aussi équipé par une sonde Pt100 ainsi que par un dispositif de chauffage, les deux étant intégrées au boîtier du capteur. La mesure du rayonnement solaire et infrarouge est donnée en puissance moyenne par surface ( $W/m^2$ ).

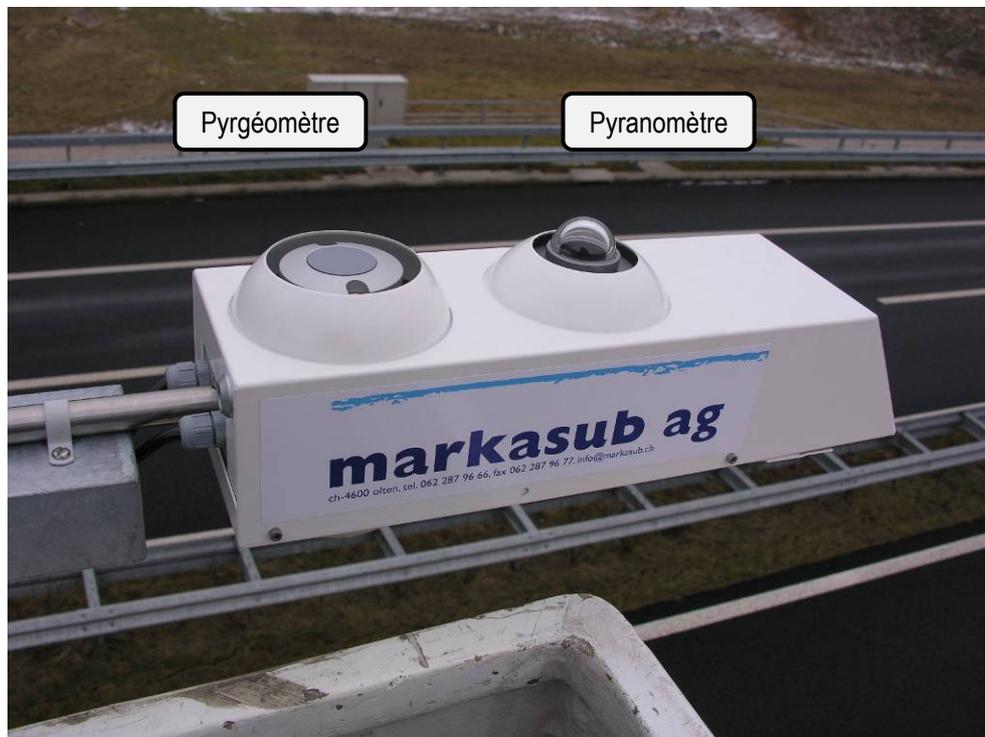


Figure 32: Vue du radiomètre installé sur un portique.

Les pyranomètres, dont le domaine spectral se situe entre  $0.3$  et  $3\mu m$ , mesurent avec précision le rayonnement solaire. Un des capteurs est tourné vers le ciel pour mesurer le rayonnement incident, alors que l'autre est tourné vers la chaussée pour mesurer le rayonnement réfléchi. De cette manière, l'albédo (rapport entre le rayonnement réfléchi et incident) peut être calculé directement.

Les pyr géomètres, dont le domaine spectral se situe entre  $5$  et  $42\mu m$ , mesurent avec précision le rayonnement infrarouge. Un des capteurs est tourné vers le ciel pour mesurer le rayonnement venant du ciel, alors que l'autre est tourné vers la chaussée pour mesurer le rayonnement venant de la surface de la chaussée.

Les deux types de capteurs satisfont les normes de qualité ISO et sont caractérisés par une très bonne linéarité de la mesure à long terme. Les éléments sensibles sont bien protégés, comme par exemple le capteur du pyranomètre qui est logé au-dessous de deux dômes en verre concentrique. La réception se fait de manière optimale (ouverture d'angle jusqu'à  $180^\circ$ ).

#### 4.2.3 Station météorologique de Method

La station à Method (station de type ENET) fait partie du réseau de stations météorologiques suisses. Les caractéristiques du vent ont été récoltées à cet endroit, du fait qu'aucun dispositif de mesure de ce genre n'est compris dans la station Boschung. Les caractéristiques collectées sont la direction l'intensité du vent.

### 4.3 ANALYSE D'UN ENROBE DRAINANT SUR PONT ET SUR REMLAI

L'analyse du comportement hivernal de l'enrobé drainant sur et hors pont a été menée. Premièrement un aperçu général a été donné pour permettre de comparer le comportement du drainant entre les deux hivers 2005/2006 et 2006/2007. Pour le premier hiver (2005/2006), les données de mesures ont été récoltées à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2005 jusqu'au 30 avril 2006. Pour le deuxième hiver (2006/2007) les données ont été obtenues pour ce qui est considéré comme étant la période hivernale complète définie entre le 1<sup>er</sup> octobre 2006 et le 30 avril 2007. Ensuite des situations d'alarmes ont été définies et analysées pour le site d'étude. Finalement, une analyse détaillée de certains événements particuliers et caractéristiques a été menée.

#### 4.3.1 Comparaison entre le comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai

Le tableau ci-après montre, pour les deux hivers 2005/2006 et 2006/2007, les moyennes annuelles des différentes températures mesurées (air, surface pont, surface remblai), de l'humidité relative de l'air, du rayonnement solaire, ainsi que du vent. Ces moyennes sont décrites plus en détails par la suite. La deuxième partie du tableau indique le nombre d'heures présentant une température, de l'air ou de la surface, inférieure à 0°C. Ces données sont également traitées plus spécifiquement par la suite.

		hiver (1.10. au 30.40)	
		2005/2006 *	2006/2007
Moyennes annuelles	température de l'air [°C]	3.6	7.7
	température de surface du pont [°C]	5.8	9.6
	température de surface du remblai [°C]	6.2	10.2
	Humidité relative [%]	76.8	76.0
	Rayonnement solaire [W/m <sup>2</sup> ]	- **	95.9
	Vent [m/s]	2.9	2.5
Heures où température < 0°C	Température de l'air	802	286
	Température de surface du pont	761	342
	Température de surface du remblai	681	224

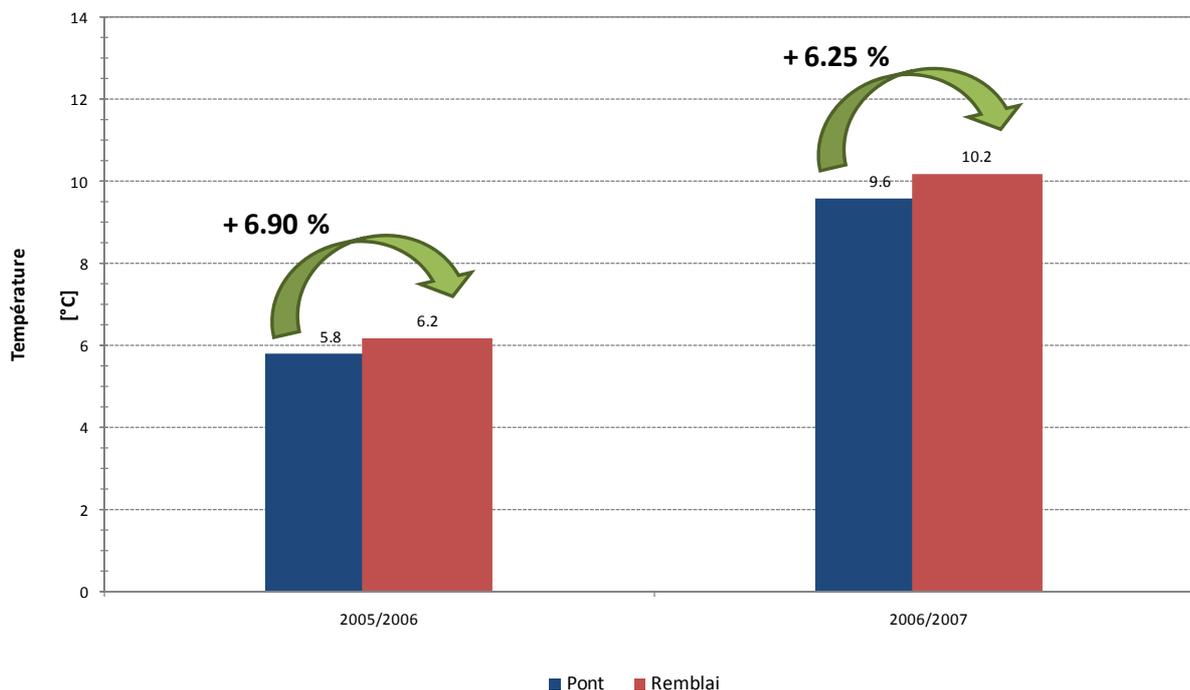
\* à partir du 01.01.2006

\*\* pas de mesures avant le 19 avril 2006

**Tableau 17:** Aperçu des mesures ayant une incidence sur les caractéristiques de surface.

Les valeurs du Tableau 17 indiquent une température moyenne de la surface du pont inférieure à celle qui a été mesurée sur remblai. Cette différence atteint 6.90% pour l'hiver 2006/2007, alors qu'elle est de 6.25% pour l'hiver précédent (Figure 33). Sur le remblai, qui est beaucoup moins exposé au vent que le pont, la surface est exposée à une certaine inertie thermique venant du sol, ce qui se traduit par un comportement hivernal distinct. Notons aussi la différence entre les deux hivers, en effet, l'hiver 2005/2006 présente des températures plus basses que celui de 2006/2007, du fait qu'il s'agissait d'un hiver beaucoup plus froid.

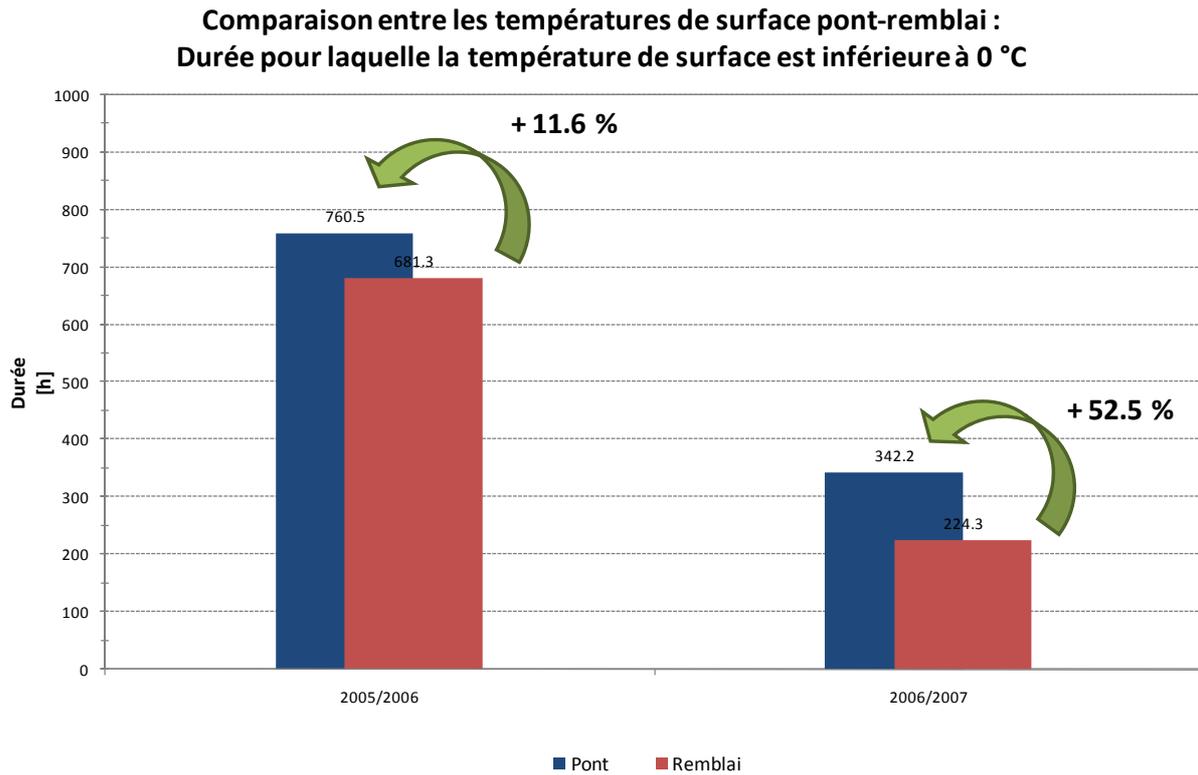
**Comparaison entre les températures de surface pont-remblai :  
Température moyenne de la surface**



**Figure 33:** Températures moyennes de la surface (pont et remblai) pour les deux hivers.

Une observation plus détaillée des données de mesure montre que pendant les périodes froides, la température de surface du pont est toujours plus faible que celle du remblai. Par contre, lors de périodes plus chaudes, la température de surface du pont peut être plus élevée que celle du remblai, principalement lors de périodes fortement ensoleillées. En ce qui concerne les variations de températures, celles-ci sont très semblables pour les deux surfaces, la différence se réalisant pendant des périodes à température plutôt constante.

La différence de température entre la surface du pont et la surface du remblai est d'autant plus marquée pour des valeurs extrêmes. Les périodes pendant lesquelles la température se trouve en-dessous de 0°C sont en effet plus nombreuses sur le pont que sur le remblai. Pour l'hiver 2006/2007 par exemple, la température de surface du remblai était inférieure à 0°C pendant 224 heures, alors qu'elle l'était pendant 342 heures pour le pont. Ceci correspond à une augmentation de 52.5% sur tout l'hiver (Figure 34).



**Figure 34:** Durées des périodes où les températures de surface (pont/remblai) sont inférieures à 0°C.

La même comparaison peut être faite en ajoutant les périodes pendant lesquelles la température de l'air est inférieure à 0°C (Figure 35). Pour l'hiver 2005/2006 la température de l'air est plus souvent en-dessous de 0°C que la température de surface du pont ou du remblai, tandis que pour l'hiver 2006/2007, les périodes pendant lesquelles la température de l'air est inférieure à 0°C sont plus nombreuses qu'à la surface du remblai mais plus rares qu'à la surface du pont.

### Comparaison entre les températures de surface et de l'air : Durée pour laquelle la température est inférieure à 0 °C

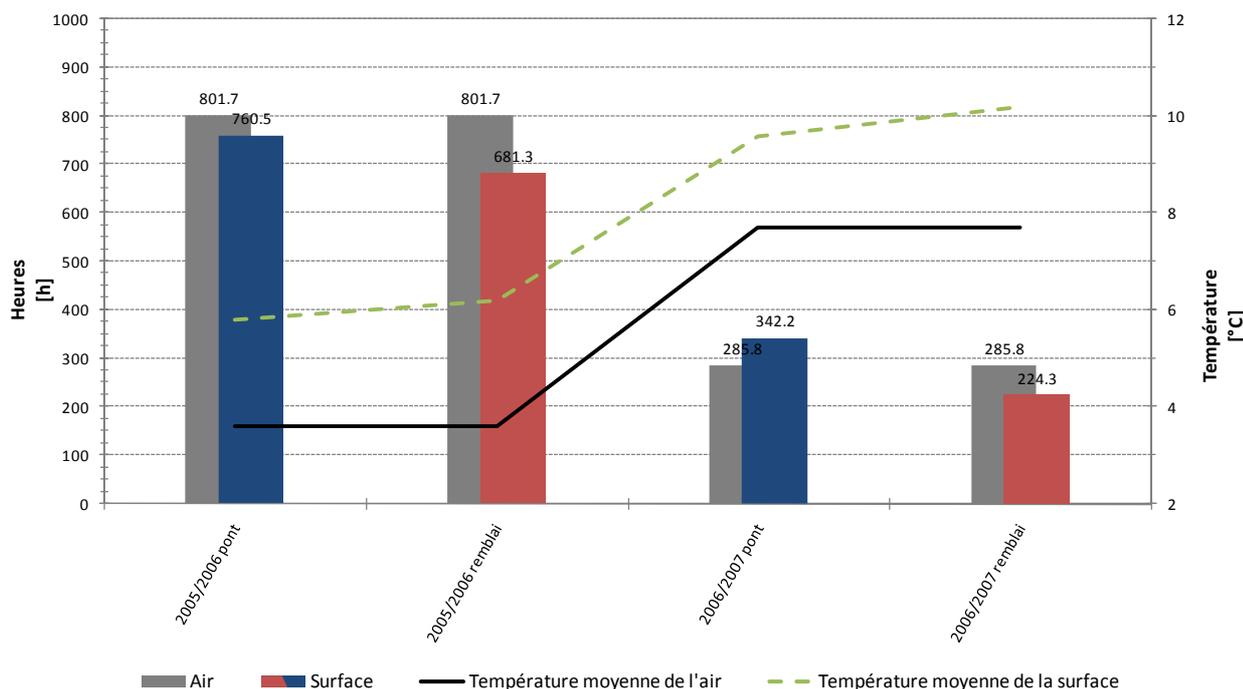


Figure 35: Durées des périodes où les températures (air/surface/moyenne) sur pont et remblai sont inférieures à 0°C.

La Figure 35 montre clairement la différence entre les deux hivers considérés, l'un pouvant plutôt être classé comme étant un hiver doux avec une température moyenne de l'air de 7.7°C (2006/2007), tandis que l'autre se présente comme un hiver plus rude avec une température moyenne de 3.6°C (2005/2006).

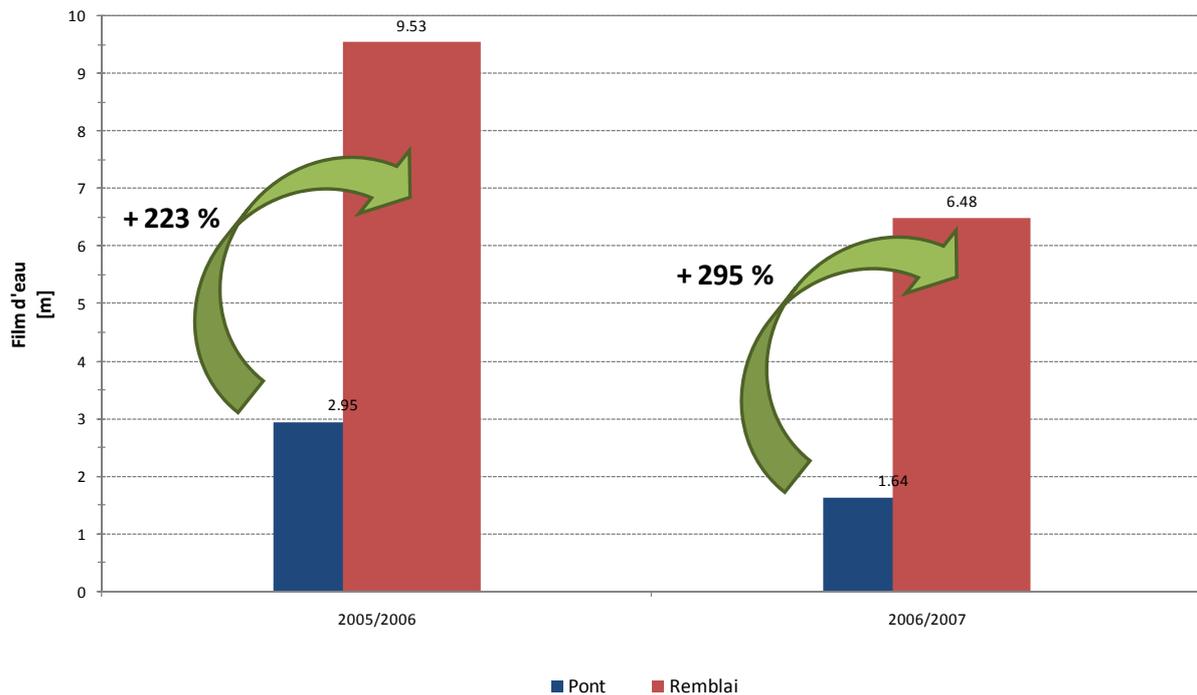
L'appareillage de mesure mis en place sur le pont et sur le remblai permet de détecter l'humidité de la chaussée par une mesure du film d'eau à la surface de la chaussée. Ces mesures sont classées en 5 catégories selon le Tableau 18.

Niveau d'humidité de la chaussée	Description correspondante	Epaisseur film d'eau calculée [mm]
-	Sèche	0
M	Humide	0.15
M1	Mouillée	0.5
M2	Fortement mouillée	0.8
M3	Détrempée	1.2

Tableau 18: Aperçu des niveaux d'humidité et de leurs épaisseurs de film d'eau équivalentes.

Ces catégories peuvent être transformées en épaisseurs de film d'eau équivalentes. La comparaison entre la somme des films d'eau sur pont et sur remblai indique une forte inégalité (Figure 36). On constate que la partie hors pont contient beaucoup plus d'eau que le pont et que cette différence atteint plus de 200%. Une possible explication de ce phénomène est que le pont, de par sa configuration, est plus exposé à l'action du vent et donc au séchage plus rapide de l'eau se trouvant sur la sonde de mesure. Le sel de déverglaçage pourrait aussi jouer un rôle dans cette différence, du fait qu'une plus grande quantité est appliquée sur le pont que sur la chaussée se trouvant en remblai, le sel asséchant également la surface.

**Comparaison entre les états de chaussées pont-remblai :  
Somme des films d'eau mesurés**



**Figure 36:** Somme des épaisseurs d'eau calculées [mm].

**4.3.2 Analyse des situations d'alarmes observées sur le site d'étude**

Pour comparer plus en détail le comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai, des critères d'alarmes ont été analysés. Ceux-ci proviennent d'une part de l'entreprise Boschung, qui gère toute une série de stations de mesures sur le réseau suisse, et d'autre part du rapport réalisé au LAVOC [16]. La définition des diverses alarmes utilisées est donnée dans le Tableau 19.

Alarme	Définition	Formule
A1	La température de la chaussée ou de l'air est inférieure à 0 °C et la chaussée n'est pas sèche	Temp. surface ou temp. air < 0 °C Etat chaussée ≠ sec
A2	La différence entre la température de la chaussée et la température du point de congélation (TGT) est inférieure ou égale à 2 °C (risque de verglas)	Temp. surface - TGT ≤ 2°C
A3	La température de la chaussée est inférieure ou égale à la température du point de congélation (TGT) (formation de verglas)	Temp. surface ≤ TGT
Neige	De la neige est détectée	Précipitation = N
Rudesse hivernale	Il y a situation de rudesse hivernale si l'un des deux critères est vrai : 1. La température de l'air est inférieure à 5 °C et de la pluie ou de la neige est détectée 2. La température de l'air est inférieure à 5 °C et l'humidité relative de l'air est supérieure à 75 %	1. Temp. air < 5 °C Précipitation = N ou P 2. Temp. air < 5 °C RH > 75 %

**Tableau 19:** Définition des alarmes Boschung et de la rudesse hivernale décrite dans [16].

La rudesse hivernale, ainsi que l'alarme neige, est uniquement dépendante de mesures météorologiques globales. Aucune distinction entre l'enrobé drainant sur pont et celui sur remblai ne peut donc être faite. Les alarmes Boschung (A1, A2 et A3) sont plus spécifiques et prennent en compte les mesures effectuées à la surface des deux points de mesure. Pour ce qui est de l'alarme A1, une comparaison détaillée peut être faite entre le pont et le remblai. Par contre, les alarmes A2 et A3 ne sont déterminées que pour le pont, du fait que la sonde utilisée pour mesurer la température du point de congélation a été posée uniquement sur ce dernier.

Le critère de rudesse hivernale est peu contraignant, ce qui rend son utilisation difficile. Sur les deux graphes ci-après, les journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige sont indiquées. Pour l'hiver 2005/2006 (du 1.1.2006 au 30.4.2006), l'alarme de rudesse hivernale est actionnée fréquemment, soit 91 jours sur 120 (76%), et de la neige est détectée lors de 23 journées (Figure 37).

### Hiver 05/06 : Journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige

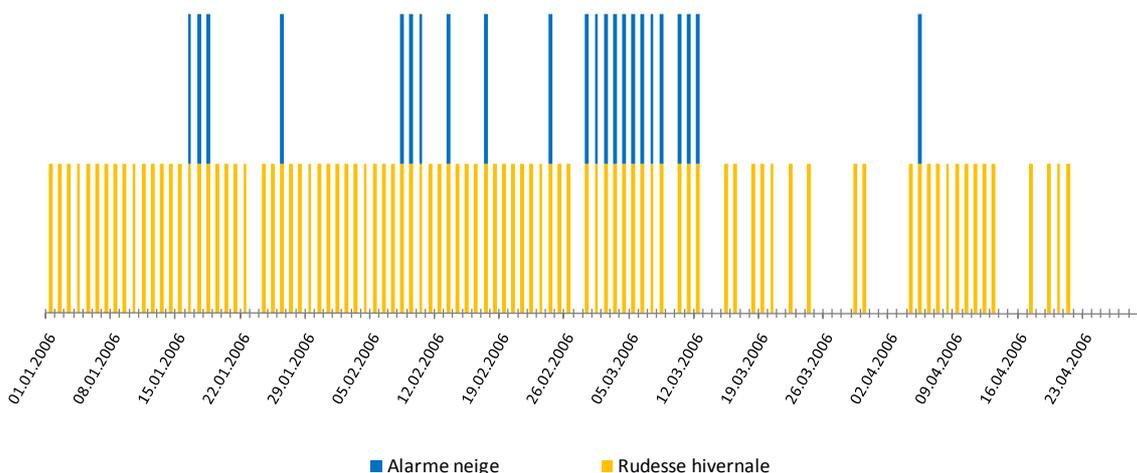
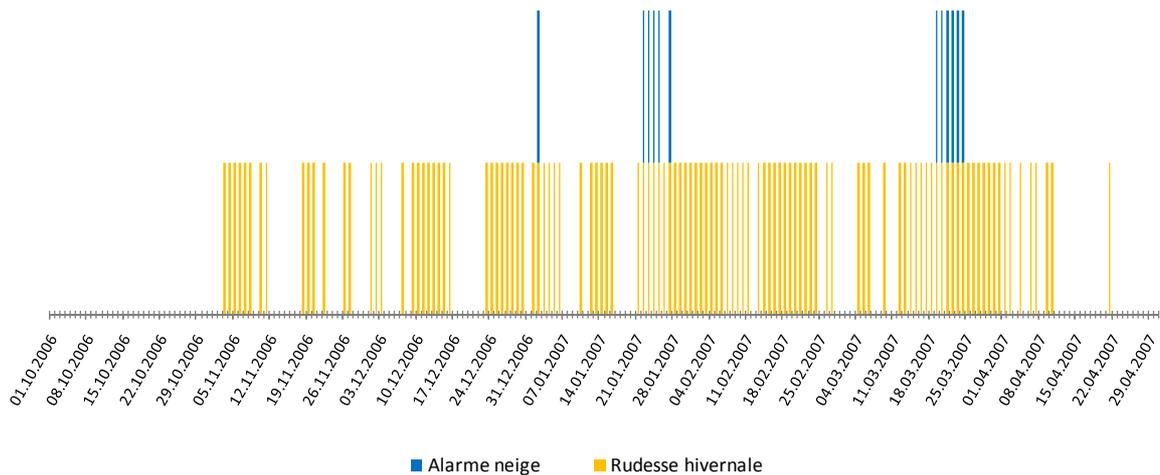


Figure 37: Journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige (hiver 2005/2006).

Pour l'hiver 2006/2007 (du 1.10.2006 au 30.4.2007), l'alarme de rudesse hivernale est déclenchée à 114 reprises sur un total de 212 journées (54%), de la neige est détectée lors de 12 journées (Figure 38).

### Hiver 06/07 : Journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige



**Figure 38:** Journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige (hiver 2006/2007).

En ce qui concerne les alarmes A1 à A3, celles-ci ont des caractéristiques bien différentes. L'alarme A1 est moins contraignante et peut se produire pendant de longues périodes. Elle peut être déterminée pour le pont et pour le remblai. Les deux alarmes A2 et A3 sont de paires. La première indique quand un risque de verglas existe. Elle avertit donc le service hivernal à temps, pour que celui-ci puisse intervenir avant que le verglas ne se forme. L'alarme A3 se déclenche quand le verglas se forme effectivement, elle se produit donc seulement si une alarme A2 est déjà active. Par contre il n'existe pas de relation stricte entre l'alarme A1 et les deux dernières. Certains de ces cas sont traités plus en détail ci-après.

En annexe, les graphes représentant les situations d'alarmes (A1 à A3, neige et rudesse hivernale) sont donnés pour chaque mois de l'hiver 2005/2006 (janvier à avril) et de l'hiver 2006/2007 (novembre à avril – le mois d'octobre n'est pas ajouté du fait qu'aucune alarme n'a été déclenchée) (Annexe 9.2).

Sur les graphes ci-après, les journées présentant des situations d'alarmes A1 à A3 sur le pont sont indiquées et ceci pour les deux hivers en question. Pour l'hiver 2005/2006 (du 1.1.2006 au 30.4.2006), l'alarme A1 se déclenche à 49, l'alarme A2 à 30 et l'alarme A3 à 12 reprises sur un total de 120 jours (41, 25 et 10%).

### Hiver 05/06 : Journées présentant des situations d'alarme (pont)

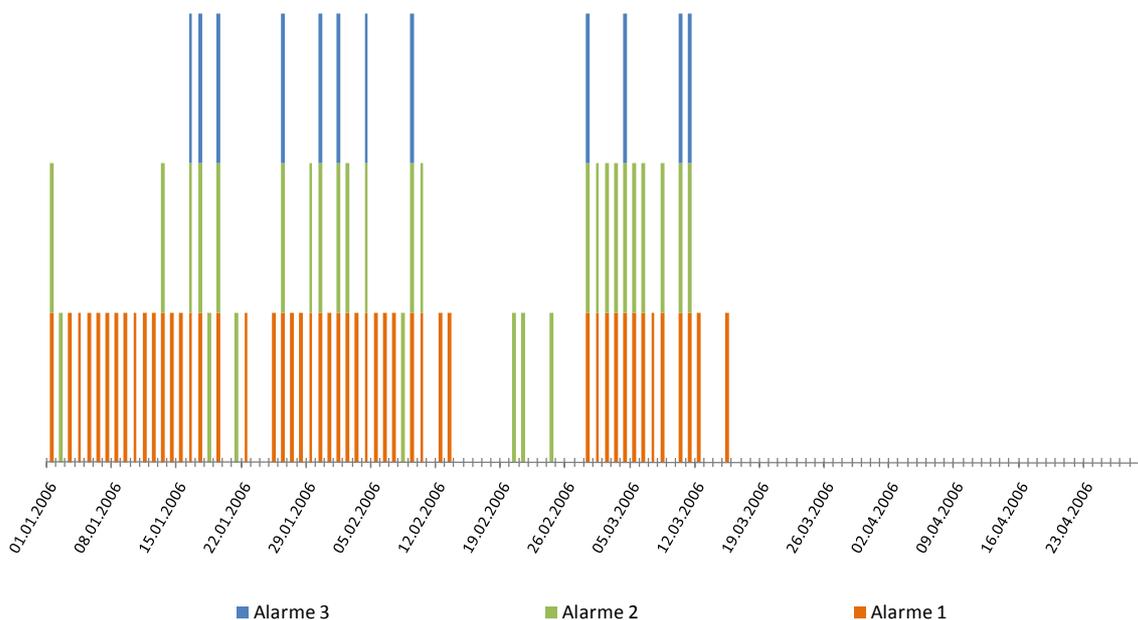


Figure 39: Journées présentant des situations d'alarme A1, A2 et A3 sur le pont (hiver 2005/2006).

Pour l'hiver 2006/2007 (du 1.10.2006 au 30.4.2007), l'alarme A1 se déclenche à 33, l'alarme A2 à 25 et l'alarme A3 à 3 reprises sur un total de 212 jours (16, 12 et 1%).

### Hiver 06/07 : Journées présentant des situations d'alarme (pont)

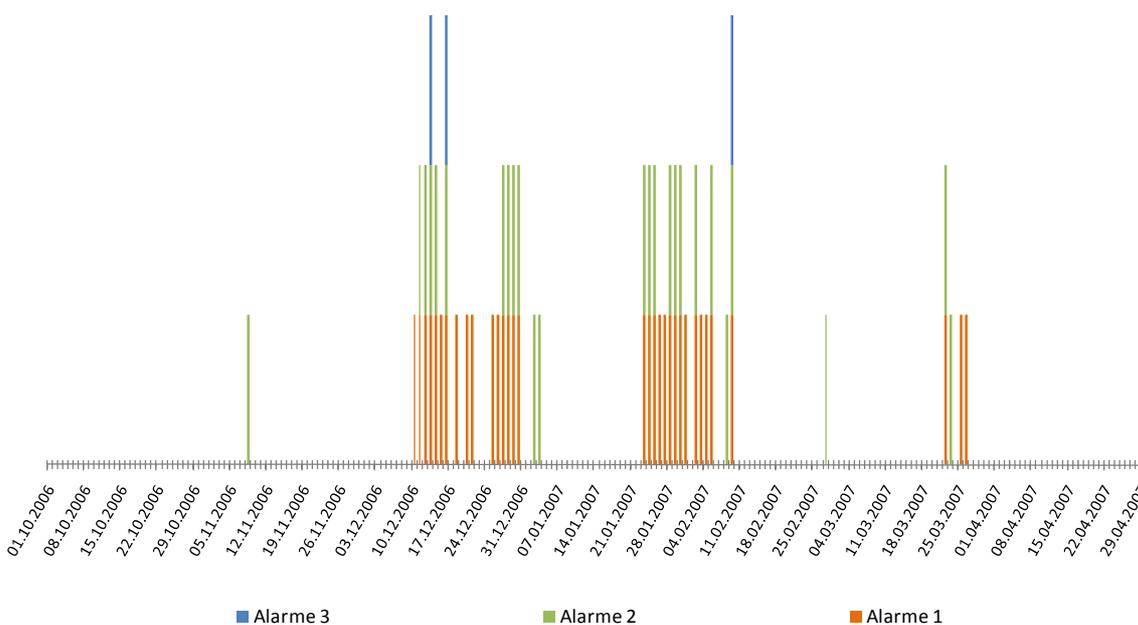


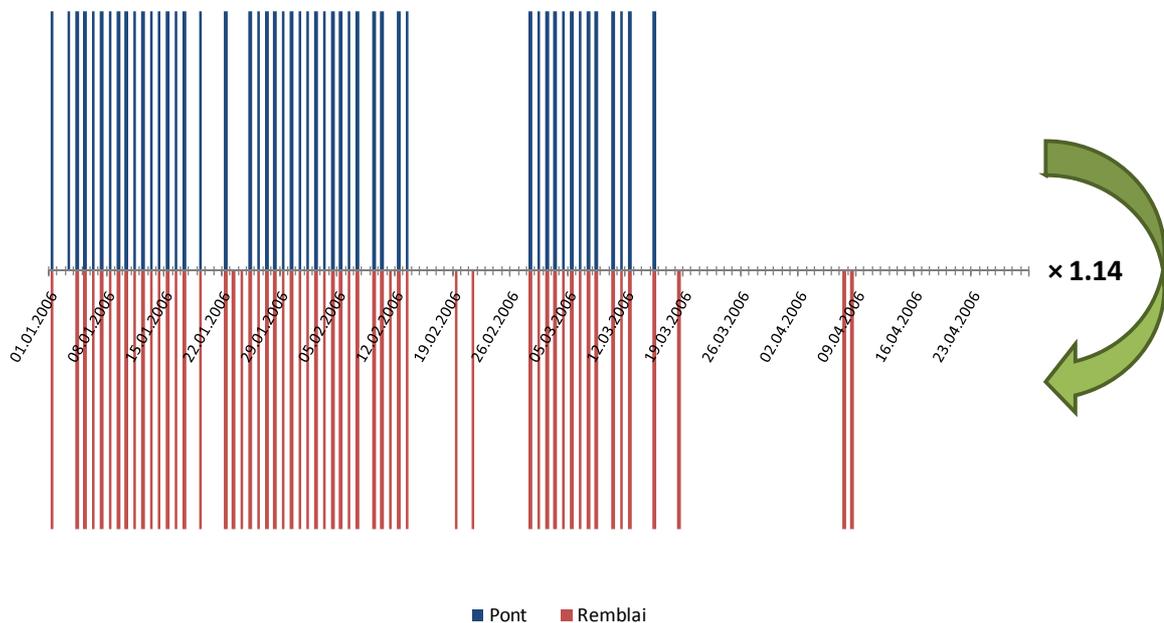
Figure 40: Journées présentant des situations d'alarme A1, A2 et A3 sur le pont (hiver 2006/2007).

La douceur du deuxième hiver ressort de nouveau de ces chiffres. De même, l'alarme A3 est très peu actionnée pour ce cas, ce qui indique que le nombre de périodes de formation de verglas était très faible ou alors que le service hivernal a été efficace et a permis de limiter son apparition à temps.

La comparaison entre le comportement hivernal de l'enrobé drainant sur pont et sur remblai est possible grâce à l'alarme A1 qui fait interagir la température de surface et l'état d'humidité de la chaussée. Les deux graphes ci-après montrent les journées présentant des alarmes A1 sur pont et sur remblai et ceci pour les deux hivers consécutifs.

L'hiver 2005/2006 (du 1.1.2006 au 30.4.2006) compte 49, respectivement 56 journées, où l'alarme A1 se déclenche sur le pont, respectivement sur le remblai, soit un facteur de +1.14 entre le pont et le terrain.

**Hiver 05/06 : Journées présentant des situations d'alarme 1 (pont & remblai)**



**Figure 41:** Journées présentant des situations d'alarme A1 sur pont et remblai (hiver 2005/2006).

Par contre, l'hiver 2006/2007 (du 1.10.2006 au 30.4.2007) compte 33, respectivement 22 journées, où l'alarme A1 se déclenche sur le pont, respectivement sur le remblai, soit un facteur de -1.5 entre le pont et le remblai.

### Hiver 06/07 : Journées présentant des situations d'alarme 1 (pont & remblai)

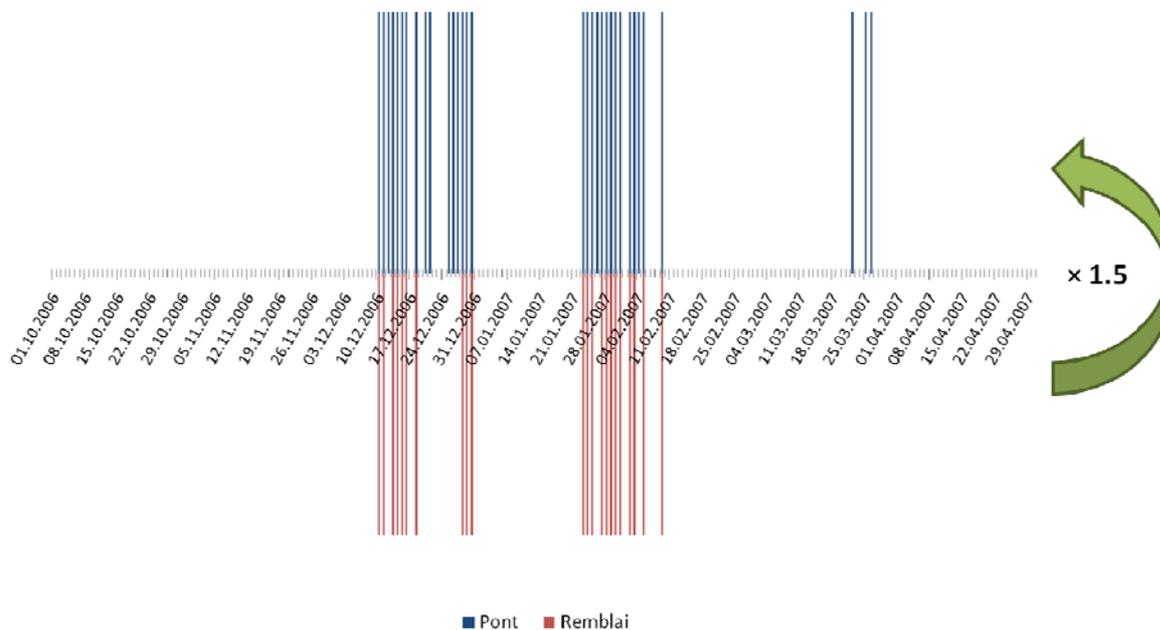


Figure 42: Journées présentant des situations d'alarme A1 sur pont et remblai (hiver 2006/2007).

Du fait que la température de surface du pont soit inférieure à celle du remblai, il est à attendre que l'alarme A1 se déclenche moins souvent sur ce dernier. Néanmoins, cette affirmation n'est valable que pour l'hiver 2006/2007. Pour l'hiver précédent, la tendance s'inverse du fait que l'enrobé sur remblai est bien plus souvent humide ou mouillé alors que le pont est sec. Ceci peut être la conséquence de l'effet du vent sur celui-ci, ou d'un salage plus poussé sur le pont. Lors de journées-types, où les deux chaussées sont humides ou mouillées et où la température de l'air est proche de 0°C, c'est uniquement la température de surface qui fait la différence. Dans ces cas, qui se rencontrent assez souvent lors de périodes de froid prolongé, le pont est plus souvent en alarme que le remblai.

La moyenne globale du nombre d'alarmes A1 des deux hivers (82 journées sur le pont, 78 sur le remblai, soit un facteur de 1.05) montre, qu'il est difficile de juger le comportement hivernal de l'enrobé drainant. De même, les deux hivers sont très différents, l'un ayant des caractéristiques d'un hiver très « doux » et l'autre d'un hiver très « rude ». Des mesures supplémentaires sur davantage d'hivers seraient nécessaires pour permettre un jugement adéquat.

En résumé, un aperçu des situations d'alarmes est donné sur les graphes ci-après. Les alarmes sont cette fois-ci définies en heures et non plus en journées.

### Hiver 05/06 : Heures en situations d'alarme

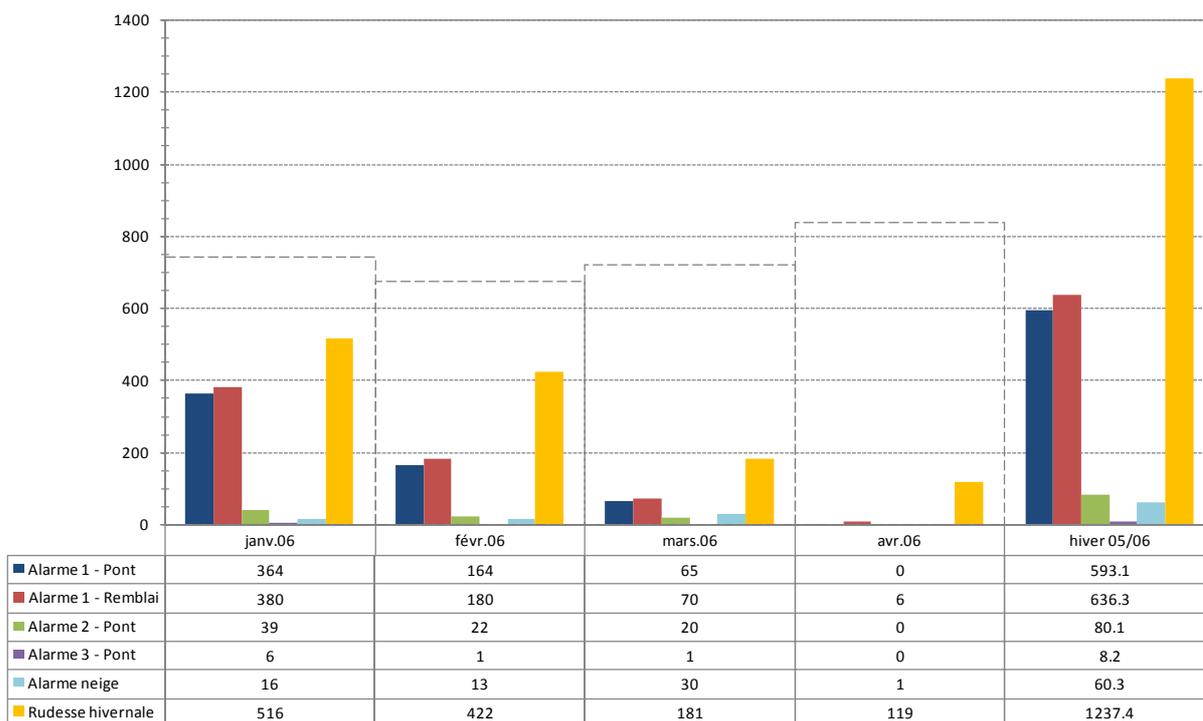


Figure 43: Nombre d'heures en situation d'alarme (hiver 2005/2006).

### Hiver 06/07 : Heures en situations d'alarme

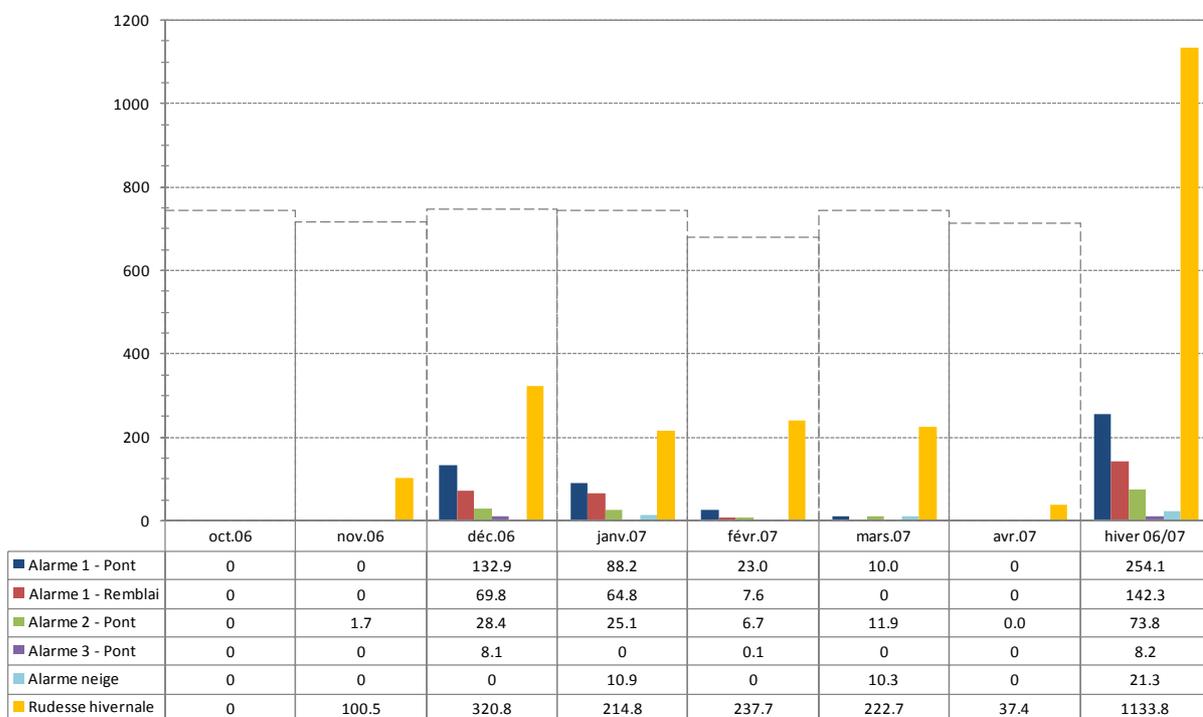


Figure 44: Nombre d'heures en situation d'alarme (hiver 2006/2007).

En comparant les heures d'alarmes A1 entre le pont et le remblai (847 heures sur le pont, 779 heures sur le remblai, soit un facteur de 1.09), l'on constate qu'il y a une bonne concordance avec les journées d'alarmes (facteur 1.05).

### 4.3.3 Analyse détaillée de certains événements

Le comportement hivernal d'un enrobé, drainant ou non, est fortement influencé par des facteurs externes tels que les conditions météorologiques. Dans la comparaison entre l'enrobé sur pont et l'enrobé sur remblai, il est à noter que le comportement atypique d'un pont peut jouer un rôle important dans l'apparition ou la disparition d'une alarme et que l'exposition au vent n'est pas à négliger. Celui-ci peut refroidir plus rapidement le pont ou alors aussi le réchauffer plus vite en cas de remontée de température de l'air. En plus, l'assèchement par le vent doit aussi être étudié. Dans la suite, un certain nombre d'événements particuliers ont été décrits, ces événements pouvant aussi bien être des cas habituels que des cas exceptionnels.

#### 4.3.3.1 Événement 1 – Nuit du 30 au 31 janvier 2007

Les caractéristiques de l'événement 1 sont:

- Température de surface du pont inférieure à la température de surface du remblai
- Chaussée humide sur pont sans précipitations (rosée, brume,...)
- Vent faible

Un cas fréquent est celui se produisant la nuit, quand les chaussées sur pont et sur terrain sont humides (rosée, brume, etc.) sans qu'il y ait de précipitation. Cette situation s'est présentée par exemple pendant la nuit du 30 au 31 janvier 2007 (Figure 45).

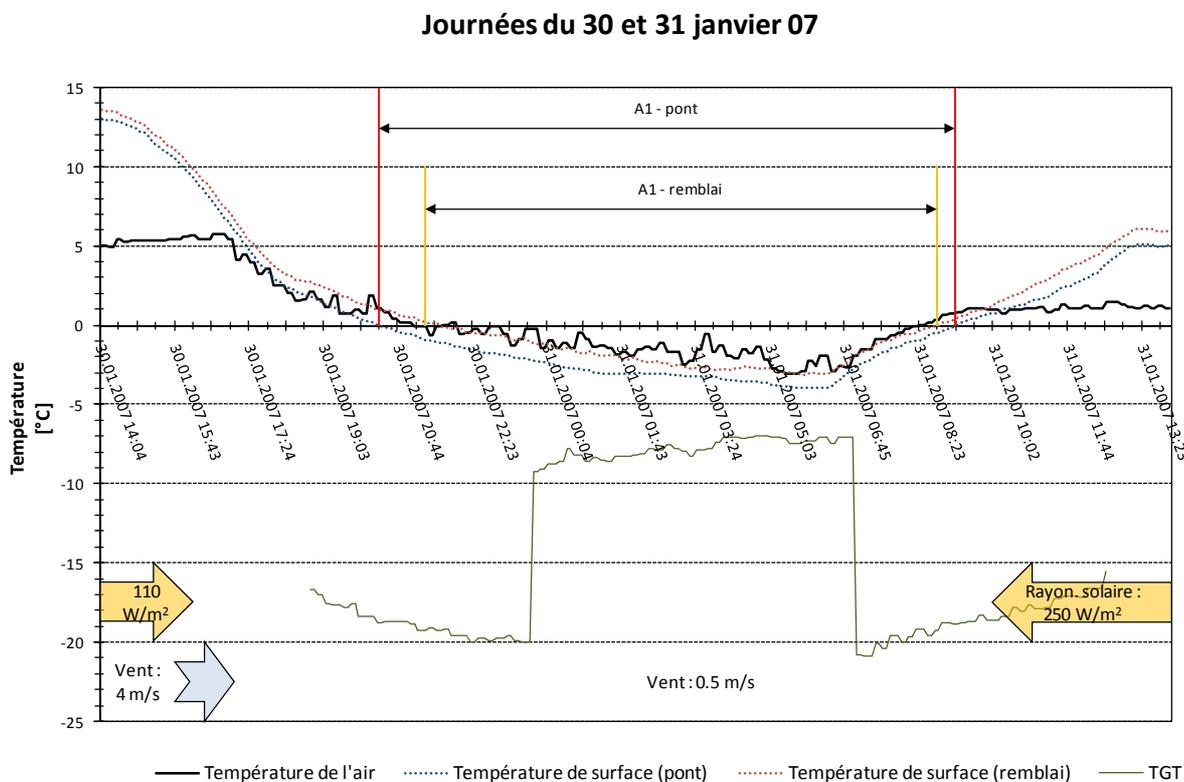


Figure 45: Événement 1 – Nuit du 30 au 31 janvier 2007.

Pour cet événement, les températures de surfaces sont prépondérantes pour l'apparition d'une quelconque alarme. Il est clairement visible que la température de surface du pont est inférieure à celle du remblai, ce qui

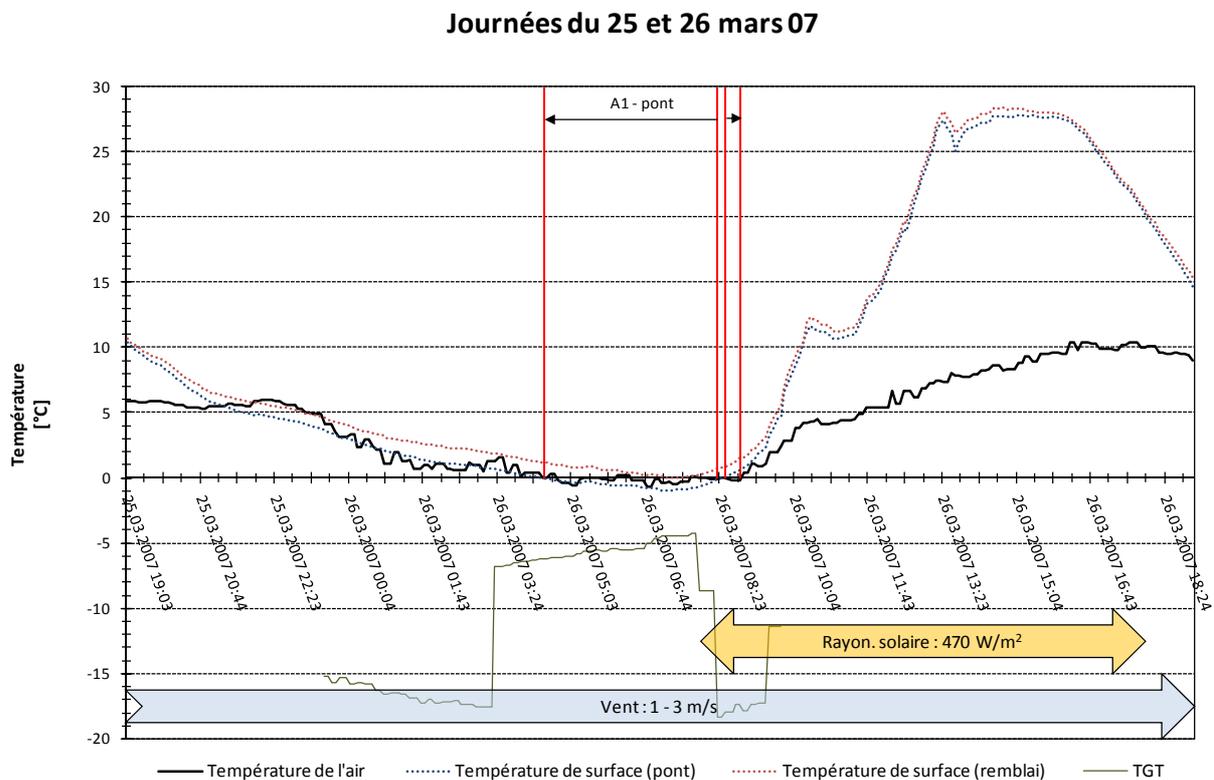
se traduit par une apparition plus rapide, et une disparition plus tardive, de l'alarme A1 sur le pont. Le vent est très faible pendant cette période ( $\sim 0.5\text{m/s}$ ), et la température du point de congélation est maintenue à une valeur acceptable.

#### 4.3.3.2 Événement 2 – Nuit du 25 au 26 mars 2007

Les caractéristiques de l'événement 2 sont:

- Température de surface du pont inférieure à  $0^\circ\text{C}$ ; température de surface du remblai supérieure à  $0^\circ\text{C}$
- Rayonnement solaire important durant plusieurs heures
- Chaussée humide sans précipitations (rosée, brume,...)
- Vent faible et régulier

Durant cet événement avec des températures générales plus clémentes et une température de la surface du remblai continuellement au-dessus de  $0^\circ\text{C}$ , l'alarme A1 ne se déclenche pas pour celui-ci. Par contre, elle se déclenche sur le pont lorsque la température de sa surface passe au-dessous de  $0^\circ\text{C}$ . Cet événement s'est produit pendant la nuit du 25 au 26 mars 2006 (Figure 46).



**Figure 46:** Événement 2 – Nuit du 25 au 26 mars 2007.

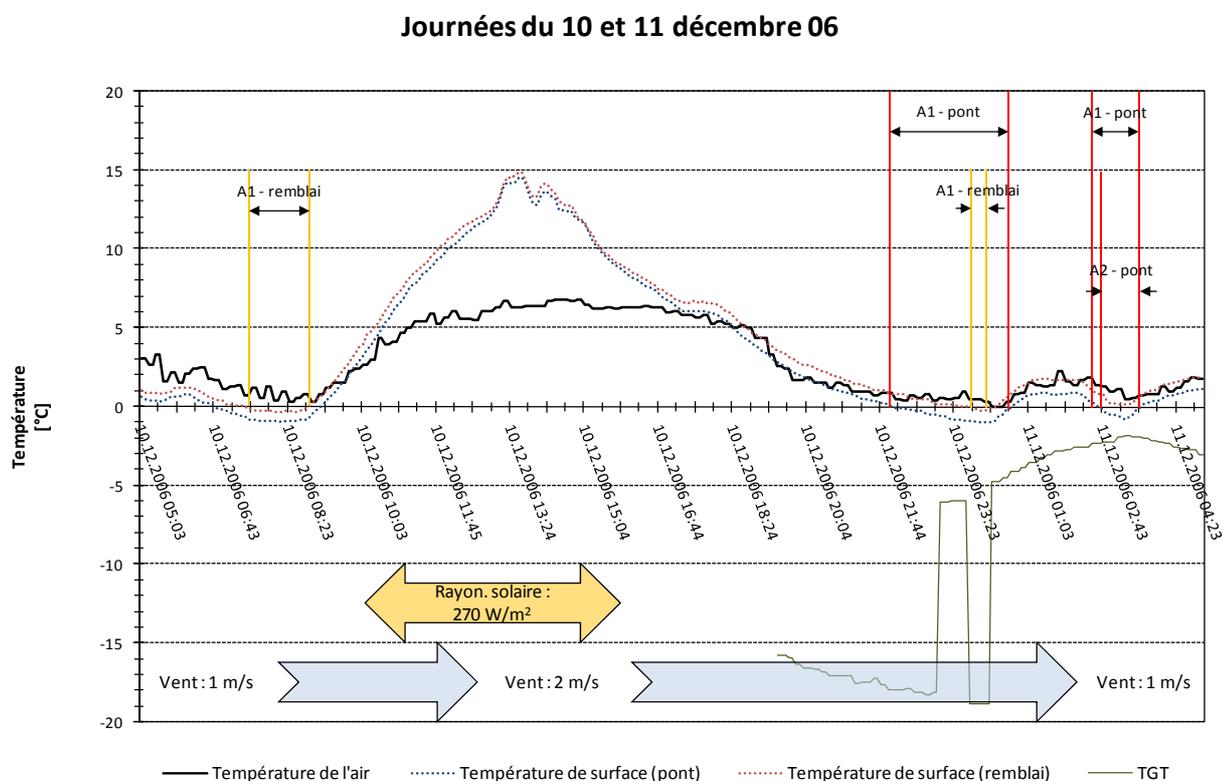
Lors du déclenchement de l'alarme A1 sur le pont, seule la température de sa surface se trouve au-dessous de la barre des  $0^\circ\text{C}$ , contrairement à la température de la chaussée sur remblai. A la fin de l'alarme, un rayonnement solaire puissant réchauffe les températures de surface, qui font un saut de plus de  $25^\circ\text{C}$  en moins de 5 heures. Le vent est assez régulier mais reste faible pendant cette période, il varie de 1 à  $3\text{m/s}$ . En ce qui concerne le service hivernal, on constate qu'il y a eu une intervention de salage à l'approche du déclenchement de l'alarme, ce qui a permis d'abaisser la température du point de congélation et de limiter l'apparition du verglas.

### 4.3.3.3 Événement 3 – Journées du 10 et 11 décembre 2006

Les caractéristiques de l'événement 3 sont:

- Température de surface du pont inférieure à la température de surface du remblai
- Rayonnement solaire moyen durant plusieurs heures
- Chaussée fortement mouillée sur remblai et sèche sur pont le 10 décembre au matin
- Chaussée mouillée sur remblai et sur pont pendant la nuit du 10 au 11 décembre
- Vent très faible et régulier

Pendant la journée du 10 décembre 2006 et de la nuit qui a suivi, deux périodes d'alarmes se sont présentées. Il y a eu des alarmes A1 sur le pont et sur le remblai ainsi qu'une alarme A2 sur le pont (Figure 47).



**Figure 47:** Événement 3 – Journées du 10 et 11 décembre 2006.

La première période d'alarme, le 10 décembre au matin, ne s'est produite que sur le remblai, même si la température de la surface du pont était inférieure. Par contre le pont était sec à ce moment là, tandis que le remblai était fortement mouillé. L'explication de ce phénomène peut être due aux effets locaux du vent spécialement aux abords d'un pont.

La deuxième période d'alarme s'est produite pendant la nuit. Le déclenchement de l'alarme A1 suit le raisonnement fait pour les deux premiers événements, avec une apparition plus rapide sur le pont que sur le remblai. L'alarme A1 ne s'est produite sur remblai que pendant un laps de temps faible car sa température de surface était souvent au-dessus de 0°C. Parallèlement, une alarme A2 s'est déclenchée pendant environ 1 heure alertant ainsi d'un risque de verglas. L'alarme n'arrivant pas à atteindre le niveau A3, il ne semble pas y avoir eu de formation de verglas. Notons à ce moment que la chute brusque de la température du point de congélation vers minuit indique certainement un passage du service hivernal, dont l'efficacité semble être de

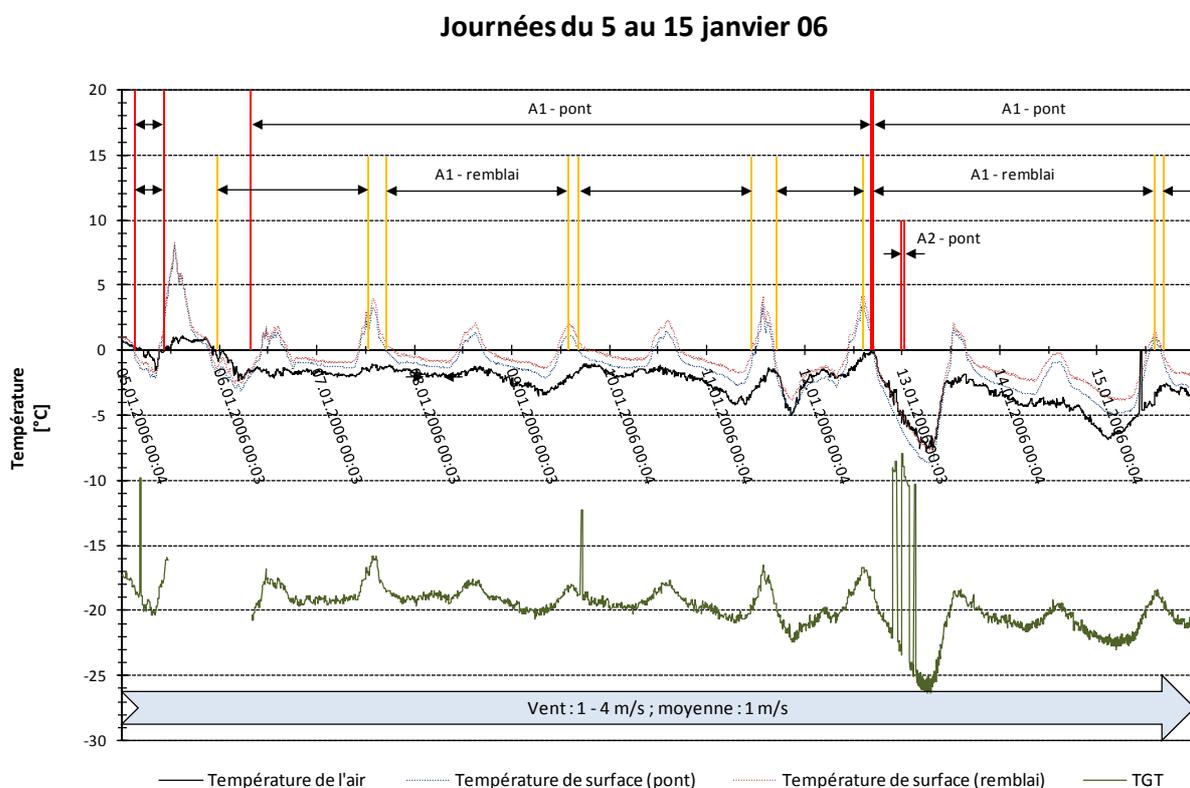
courte durée. Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour déterminer si le salage n'a pas été performant ou si l'instrumentation de mesure de la température du point de congélation n'est pas adaptée aux enrobés drainants.

#### 4.3.3.4 Événement 4 – Période du 5 au 15 janvier 2006

Les caractéristiques de l'événement 4 sont:

- Période de froid prolongé (10 jours) avec la température de l'air continuellement en-dessous de 0°C
- Chaussée humide sur pont et sèche par intermittence sur remblai (vers midi)
- Vent faible et régulier

Au début de l'année 2006 une longue période de froid prolongé s'est produite. Pendant 10 jours consécutifs (du 5 au 15 janvier) la température de l'air est restée continuellement en-dessous de 0°C (Figure 48).



**Figure 48:** Événement 4 – Période du 5 au 15 janvier 2006.

L'alarme A1 a été active sur le pont pendant de longues périodes du fait de la présence d'humidité permanente sur la chaussée. Par contre le remblai présentait certains moments très brefs, se situant toujours vers midi, où l'état de sa surface était sec. Le vent étant assez stable pendant ces périodes, l'explication de ce phénomène peut se trouver dans le rayonnement solaire, dont les mesures n'étaient pas disponibles à cette période.

Une brève apparition du risque de verglas s'est produite pendant la nuit du 12 au 13 janvier lors du déclenchement de l'alarme A2, qui n'a toutefois pas évolué en alarme A3 accompagnant la formation de verglas. Grâce à un salage adéquat pendant cette période de froid prolongé, la température du point de congélation a pu être maintenue entre -15 et -25°C. Pendant la nuit du 12 au 13 janvier, la forte chute de la température de l'air a provoqué plusieurs remontées de la température du point de congélation. Des interventions fréquentes ont été nécessaires pour éviter la formation de verglas.

### 4.3.3.5 Événement 5 – Nuit du 24 au 25 janvier 2006

Les caractéristiques de l'événement 5 sont:

- Température de surface du pont inférieure à la température de surface du remblai
- Chaussée humide sur pont sans précipitations (rosée, brume,...)
- Vent très faible et régulier

La nuit du 24 au 25 janvier 2006 est semblable à l'événement 1 du point de vue des caractéristiques météorologiques. Par contre, les alarmes A1 ne sont pas apparues de la même manière (Figure 49).

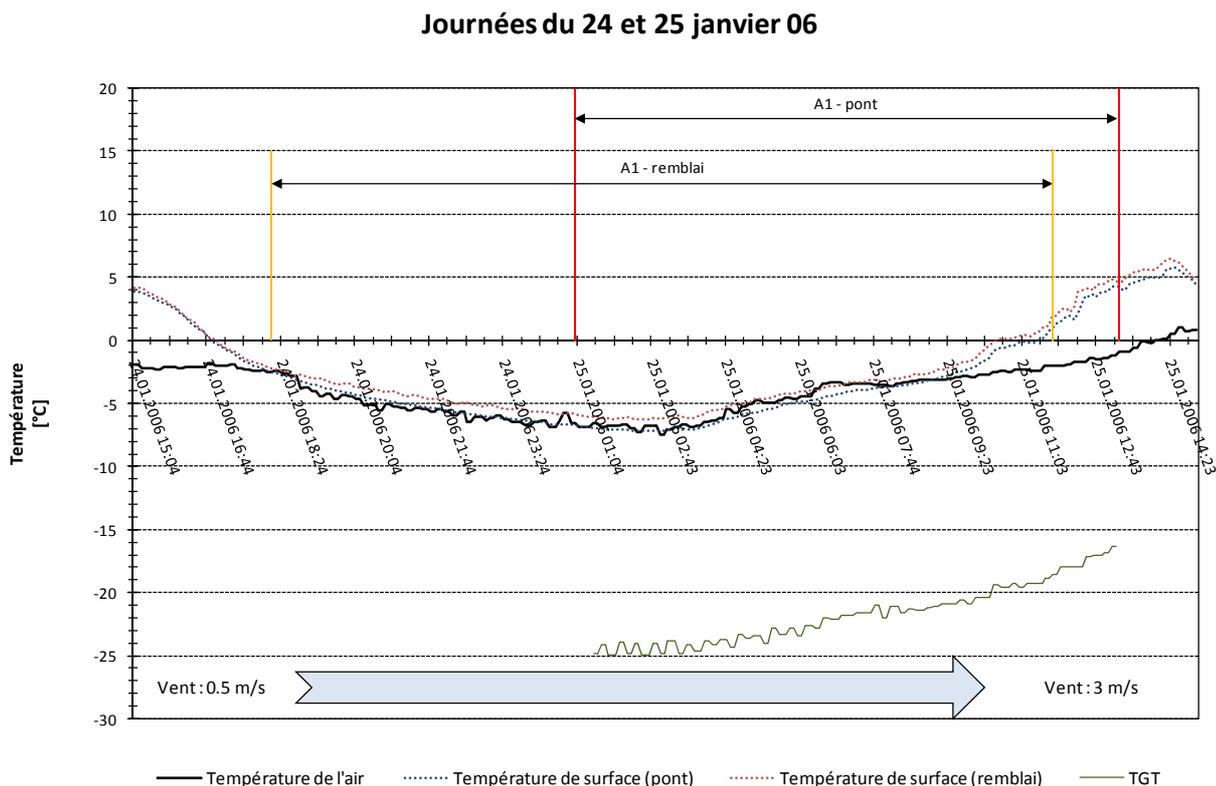


Figure 49: Événement 5 – Nuit du 24 au 25 janvier 2006.

Pour cet événement, l'alarme A1 sur le remblai s'est activée plus tôt que sur le pont. Il est possible qu'un salage ait eu lieu en début de soirée, avec une concentration augmentée de sel sur le pont. Ceci a éloigné le verglas de ce dernier pendant une longue période alors que le remblai était humide à cause de la rosée ou la brume, car aucune précipitation n'a été enregistrée.

Vers 1h du matin l'alarme A1 est aussi apparue sur le pont, la concentration de sel n'étant peut-être plus suffisante pour empêcher la chaussée s'humidifier. Par contre le salage a été assez important pour tenir la température du point de congélation suffisamment éloignée de la température de surface du pont et le préserver de la formation de verglas en évitant le déclenchement de l'alarme A2.

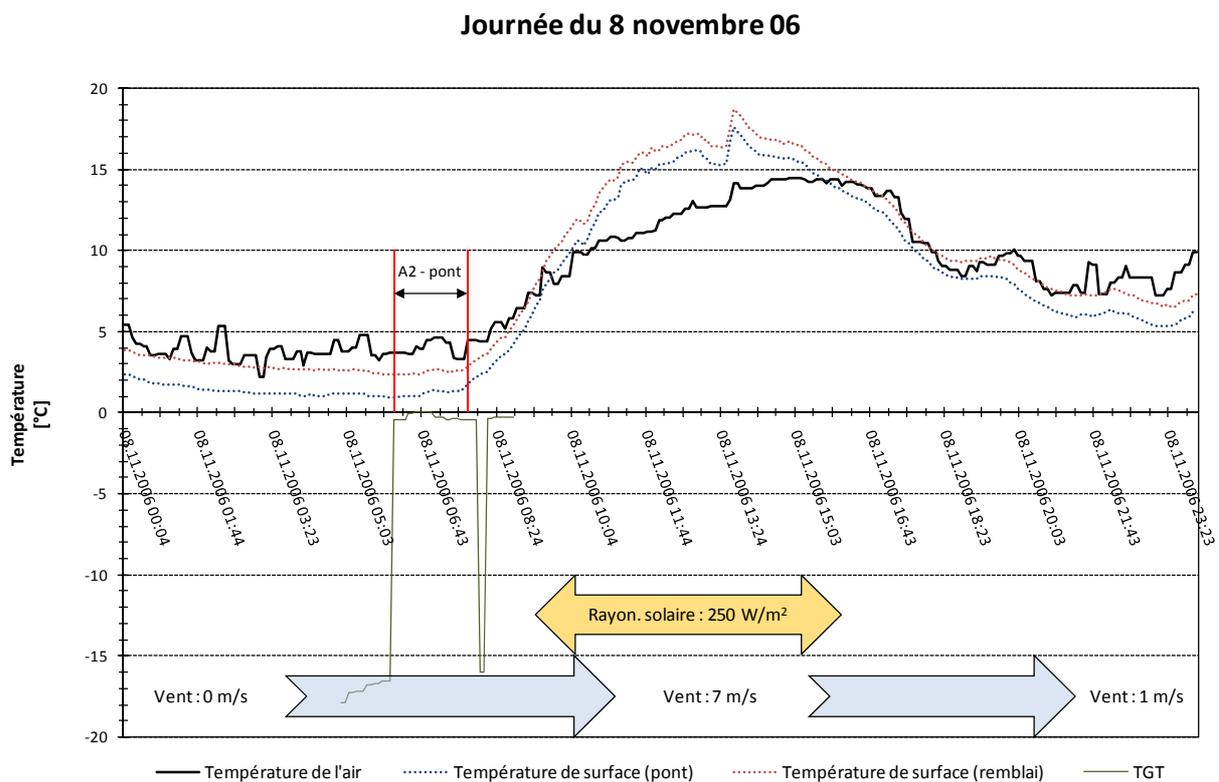
Avec l'apparition des premiers rayonnements solaires du matin, la température de surface du remblai a augmenté plus rapidement entraînant l'assèchement de la chaussée.

#### 4.3.3.6 Événement 6 – Journée du 8 novembre 2006

Les caractéristiques de l'événement 6 sont:

- Température de l'air supérieure à 0°C
- Températures de surface du pont et du remblai supérieures à 0°C
- Rayonnement solaire durant plusieurs heures
- Vent peu variable

La journée du 8 novembre 2006 est caractérisée par l'apparition d'une alarme A2, alors qu'aucune alarme A1 n'a été détectée et que les températures de l'air et des deux surfaces étaient supérieures à 0°C (Figure 50).



**Figure 50:** Événement 6 – Journée du 8 novembre 2006.

Le matin, la température de surface du pont était très proche de la température du point de congélation ce qui explique le déclenchement de l'alarme A2. Cependant, du fait de la remontée de la température de l'air et de l'apparition d'un rayonnement solaire, l'alarme A3 ne s'est pas activée. Un événement vers 8h du matin a fait que la température du point de congélation s'est abaissée en passant de -1°C à -16°C pour remonter à -1°C environ une demi heure plus tard. Le fournisseur de ces sondes de mesure a expliqué le phénomène comme suit: la sonde active refroidit sa surface jusqu'à 15°C en-dessous de la température de surface de la chaussée et détermine ainsi la température de congélation. La sonde fait 5 mesures consécutives et la valeur est acceptée et appelée "température de congélation mesurée" si les 5 résultats sont proches. Par contre, si 1 ou 2 résultats divergent, la sonde renvoie une valeur dite "température de congélation estimée". Les données fournies au Lavoc par le fabricant ne permettent pas de différencier la valeur mesurée de celle qui est estimée.

Sur le graphe, l'écart entre les températures de surface du pont et du remblai est apparent. Au moment où l'alarme A2 est activée la différence vaut 2°C. De même, elle reste assez constante tout au long de cette journée et indique une variation similaire des températures du pont et du remblai.

### 4.3.3.7 Événement 7 – Nuit du 2 au 3 janvier 2007

Les caractéristiques de l'événement 7 sont:

- Température de l'air supérieure à 0°C
- Température de surface du pont inférieure à la température de surface du remblai
- Ciel couvert pendant la nuit
- Chaussée sur pont sèche ou humide avec des précipitations intermittentes
- Vent variable

Pendant la nuit du 2 au 3 janvier 2007, l'alarme A2 s'est déclenchée sur le pont à cause de précipitations intermittentes. Ces précipitations se sont manifestées sous forme d'un mélange de pluie et neige (Figure 51).

#### Journées du 2 et 3 janvier 07

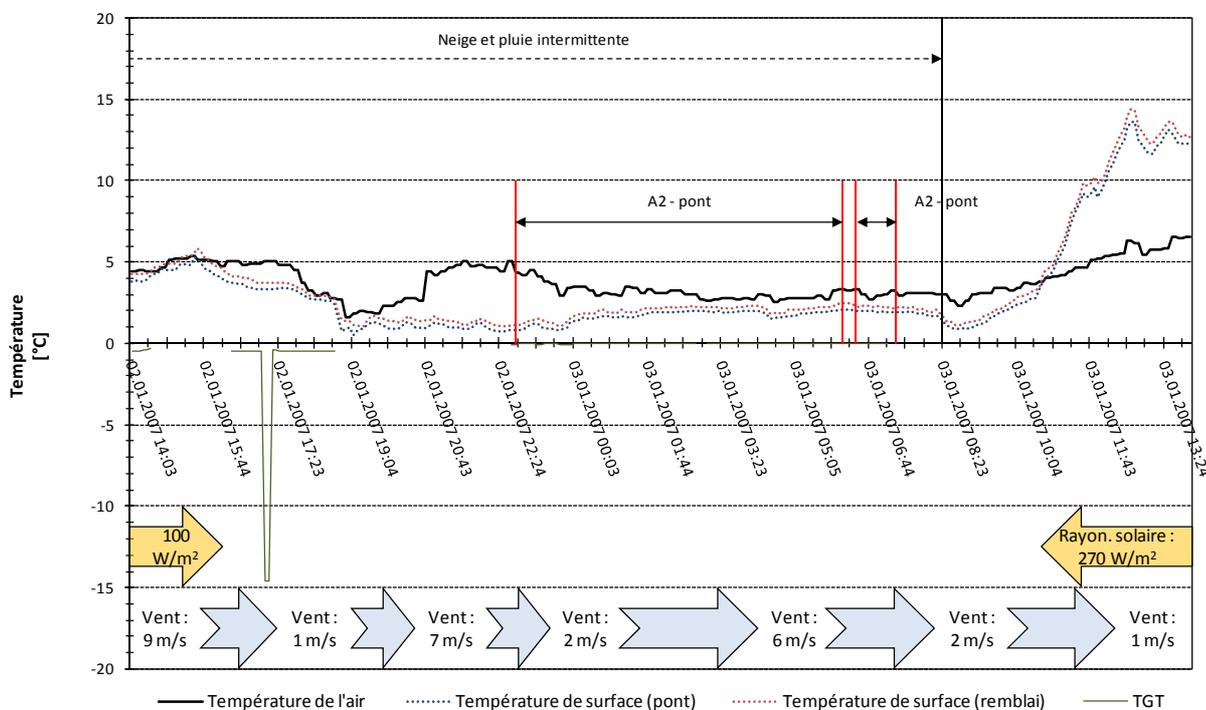


Figure 51: Événement 7 – Nuit du 2 au 3 janvier 2007.

En présence de précipitations de neige ou de pluie, les températures de l'air et de la surface peuvent subir des variations rapides se produisant sur de très courtes périodes. Ceci se traduit par des pics très petits entre les périodes où il pleut ou neige et les périodes où il n'y a pas de précipitation. En cas de neige, l'alarme A2 est très souvent déclenchée et la température du point de congélation s'approche des 0°C du fait du brassage du sel avec la neige. L'image radar (Figure 52) indique le passage de plusieurs fronts pluvieux pendant la nuit du 2 au 3 janvier 2007.

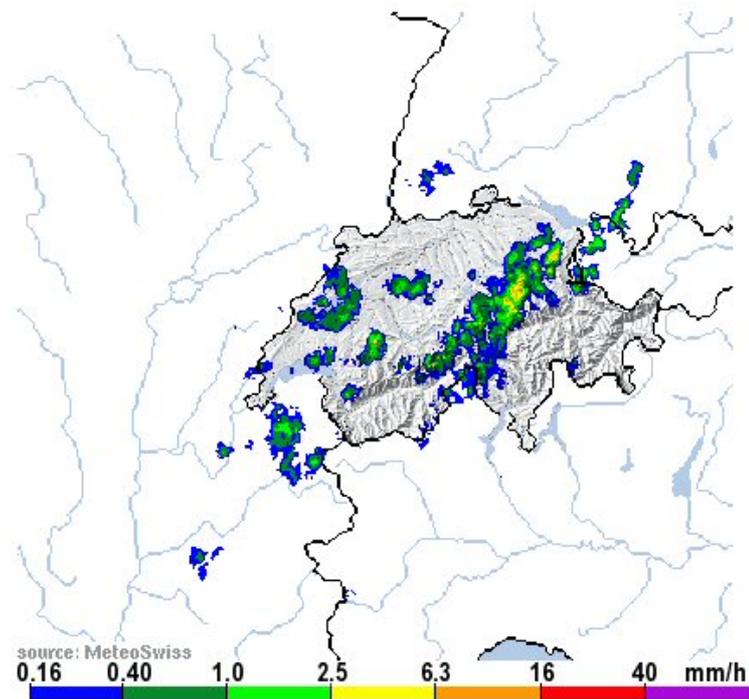


Figure 52: Image radar de la Suisse à 4h 30 le 3 janvier 2007 (Meteosuisse).

Pour la nuit du 2 au 3 janvier 2007, les températures de l'air et de surface ont été proches de 0°C mais sont restées au-dessus de cette valeur. Ceci a empêché l'apparition d'une alarme A1. Par contre la manifestation d'une alarme A2 sur le pont n'a pas pu être évitée. Et ce n'est qu'à cause des conditions météorologiques, entravant la température de surface de baisser d'avantage, que la formation de verglas ne s'est pas concrétisée. Le salage n'a pas réussi à éloigner la température du point de congélation des 0°C.

Un autre fait marquant de cet événement est l'instabilité du vent. Celui-ci a une grande influence sur l'état des chaussées qui se trouvent humides ou mouillées par moments et sèches à d'autres moments. Ces variations sont plus marquées pour le pont, qui est plus sujet aux rafales de vent.

#### 4.3.3.8 Événement 8 – Nuit du 12 au 13 décembre 2006

Les caractéristiques de l'événement 8 sont:

- Apparition de toutes les alarmes
- Température de surface du pont inférieure à la température de surface du remblai
- Ciel dégagé pendant la nuit
- Chaussée humide sur pont sans précipitations
- Vent très faible et régulier

Le dernier cas montre l'apparition de toutes les alarmes Boschung sur le pont et d'une alarme A1 sur remblai. Cette situation s'est présentée pendant la nuit du 12 au 13 décembre 2006 (Figure 53).

## Journées du 12 et 13 décembre 06

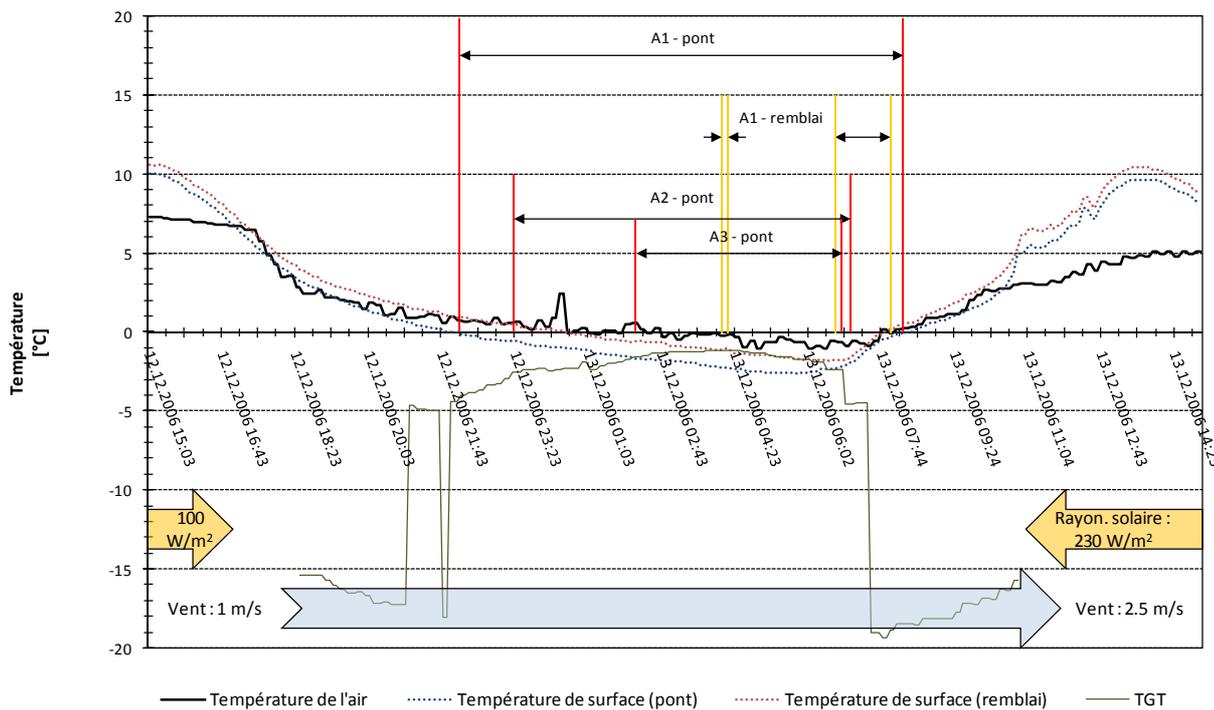


Figure 53: Evénement 8 – Nuit du 12 au 13 décembre 2006.

Tout d'abord l'alarme A1 s'est manifestée sur le pont quand la température de surface est passée en-dessous des 0°C. Ensuite l'alarme A2, qui indique un risque accru d'apparition de verglas, s'est produite. Puis l'alarme A3, qui se manifeste lorsque la température de la chaussée devient inférieure à la température du point de congélation, a été déclenchée. Le salage n'a pas été efficace à ce moment même si la longue période d'alarme A2, avant que celle-ci ne se transforme en alarme A3, indiquait bien un risque élevé de formation de verglas.

La courbe de la température du point de congélation montre qu'une intervention du service hivernal a eu lieu le matin vers 7h et ceci en plusieurs fois (paliers bien visibles de la température du point de congélation).

#### 4.3.4 Mesures thermographiques effectuées par l'EMPA

En parallèle aux mesures du comportement hivernal menées par le LAVOC, l'EMPA a effectué une série de mesures thermographiques sur la planche d'essai sur l'autoroute A5, près du cours d'eau de l'Arnon. Les buts de ces expériences étaient les suivants:

- Vérification de la représentativité des mesures thermographiques stationnaires ponctuelles pour la totalité du pont.
- Extrapolation des mesures ponctuelles stationnaires à l'ensemble du pont.
- Comparaison entre les températures sur et hors pont au cours d'une chute de température extérieure d'une valeur supérieure à 0°C à une valeur inférieure à 0°C.

Les mesures ont été effectuées le 21 et 22 février 2007, dans des conditions météorologiques ne correspondant pas aux conditions prévues. Les conclusions qui ont pu être tirées sont les suivantes:

- Les sondes de mesure stationnaires n'exercent qu'une faible influence sur la température du revêtement dans leur voisinage immédiat. Lors de la campagne de mesures thermographiques, cette influence n'atteignait au maximum que 0.5°C.

- La température superficielle du revêtement est dans une large mesure homogène aussi bien sur le pont qu'à distance de ce dernier. En particulier, aucune influence des éléments de construction tels que les poutres longitudinales n'a été constatée. Ainsi les températures mesurées par les sondes stationnaires sont représentatives.
- Les endroits humides visibles à l'œil nu se distinguent en partie sur les plans de température. Cet effet pourrait éventuellement s'utiliser dans l'avenir pour évaluer la capacité de drainage des revêtements bitumineux drainants.

Les détails de ces mesures thermographiques sont donnés dans le rapport de l'EMPA qui peut être consulté en annexe (Annexe 9.3).

#### **4.3.5 Conclusion de l'analyse du comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai**

L'analyse des données récoltées sur l'autoroute A5 a permis de comparer le comportement hivernal de l'enrobé drainant sur pont avec celui sur remblai. Plusieurs points importants ont été constatés de manière générale, tels que les différences de températures et d'état de surface entre les deux endroits instrumentés. Grâce à l'analyse des données sur deux hivers, deux situations bien distinctes ont pu être observées avec un hiver rude (2005/2006) et un hiver plus doux (2006/2007).

Les observations générales faites lors de ces deux hivers sont les suivantes:

- La température moyenne de surface du pont est inférieure à la température moyenne de surface sur remblai
- Lors de périodes froides (température de l'air inférieure à 0°C), la température de surface du pont est toujours plus faible que celle du remblai
- La différence de température entre la surface du pont et la surface du remblai est d'autant plus marquée pour des valeurs négatives extrêmes de la température de l'air (aux alentours de -10°C)
- L'état de la surface de la partie hors pont est plus souvent "mouillé" ou "humide" que la surface du pont (de l'ordre de 200%)
- L'analyse des situations d'alarme a montré que l'alarme de rudesse hivernale n'est pas assez restrictive et peu représentative des situations dangereuses
- L'analyse des situations d'alarme A1 à A3 indique certains phénomènes contradictoires d'un hiver à l'autre, notamment la durée de déclenchement des alarmes
- Sur les deux hivers, l'alarme A1 est plus souvent déclenchée sur pont (+5%, facteur relativement faible)
- Les alarmes A2 et A3 indiquant respectivement un risque de formation et une formation effective de gel, n'ont pu être constatées que sur le pont, ce qui rend impossible une comparaison directe avec la partie sur remblai
- L'analyse des événements particuliers ne permet pas d'affirmer qu'il existe un risque accru sur pont ou sur remblai

L'absence d'un capteur ARCTIS sur remblai rend difficile une comparaison du comportement de l'enrobé drainant par rapport à la formation de gel. En effet, la température de surface plus basse sur pont ne permet pas de conclure que celui-ci est plus dangereux, car d'autres facteurs interviennent dans le déclenchement des alarmes A2 et A3. Un de ces facteurs est l'état de la chaussée, qui indique précisément une tendance inverse, c'est-à-dire que la chaussée sur remblai est plus dangereuse car elle est plus souvent humide ou mouillée. Des conclusions plus précises ne peuvent donc pas être tirées.

Compte tenu des résultats de l'analyse de cette planche d'essai, on ne peut pas déclarer que l'enrobé drainant sur pont est plus dangereux que l'enrobé drainant sur remblai.

#### 4.4 ANALYSE D'UN ENROBE DRAINANT ET TRADITIONNEL SUR REMBLAI

Grâce au recours aux données de mesure provenant du canton de Valais (autoroute A9 à Ardon, près du pont sur le cours d'eau "La Lizerne", une comparaison concrète entre le comportement hivernal d'un enrobé traditionnel sur remblai et le comportement d'un enrobé drainant sur remblai a pu être analysée en détail. En effet, ce tronçon est équipé avec une station de mesure depuis 1989, permettant de récolter en continue des données de températures de surface (à différentes profondeurs), de rayonnement (visible et infrarouge) et des paramètres météorologiques (humidité relative, température de l'air). En 2002, l'enrobé traditionnel a été remplacé par un enrobé drainant, ce qui permet une comparaison indirecte entre ces deux types de revêtements.

La première partie de cette analyse consistait à récolter les données brutes et de les traiter afin d'obtenir des valeurs comparables. Tout d'abord certains hivers représentatifs ont été déterminés pour ainsi prendre en considération le fait que la station présentait par moment de longues périodes de disfonctionnement. Les hivers suivants ont donc été inclus dans la comparaison détaillée:

- Enrobé traditionnel: hiver 1993/1994, 1994/1995, 1998/1999, 1999/2000 et 2000/2001
- Enrobé drainant: hiver 2005/2006 et 2006/2007

Après la mise en place de l'enrobé neuf en 2002, la station de mesure était hors service pendant deux hivers, ce qui explique le nombre peu élevé de données pour l'enrobé drainant.

Les caractéristiques générales de tous les hivers sont données sur la figure ci-après. Les hivers représentatifs sont notés sur fond vert.

hiver (1.10. au 30.40)	heures où t <sub>air</sub> < 0 °C	heures où t <sub>surf</sub> < 0 °C (t <sub>surf</sub> à -5 cm)	Moyennes							
			t <sub>air</sub> [°C]	Humidité relative [%]	Rayonnement Solaire [W/m <sup>2</sup> ]	t <sub>sol1</sub> (-5 cm) [°C]	t <sub>sol2</sub> (-10 cm) [°C]	t <sub>sol3</sub> (-20 cm) [°C]	t <sub>sol4</sub> (-30 cm) [°C]	t <sub>sol5</sub> (-35 cm) [°C]
1992/1993	1336	480	4.17	69.92	86.91	6.96	6.80	6.93	6.96	6.94
1993/1994	931	207	4.97	70.69	86.02	8.29	7.94	8.09	10.36	8.38
1994/1995	916	321	5.36	72.62	90.07	7.51	14.27	9.29	9.00	9.01
1995/1996	906	43	5.91	64.98	94.68	9.45	9.20	14.30	9.35	9.45
1996/1997	808	214	5.74	60.40	96.16	10.11	8.72	8.35	9.95	10.57
1997/1998	783	244	5.75	61.74	88.69	8.11	8.36	8.88	8.27	10.17
1998/1999	1405	967	4.06	72.21	78.19	6.30	4.87	6.70	6.26	6.87
1999/2000	1436	945	4.64	73.27	82.21	7.31	17.73	7.47	6.48	13.23
2000/2001	591	209	5.86	75.78	73.58	7.92	9.25	8.39	12.27	10.87
2001/2002	1166	917	5.42	71.66	84.54	10.51	15.45	8.91	8.24	-
2002/2003	499	8	6.88	72.58	91.09	8.63	-	10.10	8.30	12.69
2003/2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2004/2005	491	210	5.93	63.94	129.93	9.68	9.31	9.27	8.97	7.21
2005/2006	1892	1316	3.46	73.24	80.92	6.17	5.93	6.37	6.48	4.29
2006/2007	776	358	6.43	71.61	82.99	8.96	8.64	9.02	8.94	6.36

Tableau 20: Aperçu des caractéristiques générales des hivers.

La comparaison générale du comportement hivernal des enrobés montre qu'il est difficile de juger un hiver par rapport à un autre. En effet, chaque hiver étant bien spécifique, une comparaison directe n'est pas possible. En plus les deux derniers hivers étaient bien particuliers: celui de 2005/2006 était l'hiver le plus rude et celui de 2006/2007 le plus doux parmi les hivers représentatifs.

Sur la figure ci-après sont indiquées les durées des périodes pour lesquelles les températures de l'air et de la surface (à -5cm) sont inférieures à 0°C. L'analyse du rapport entre ces deux périodes n'aboutit pas d'avantage à une différence marquée entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants.

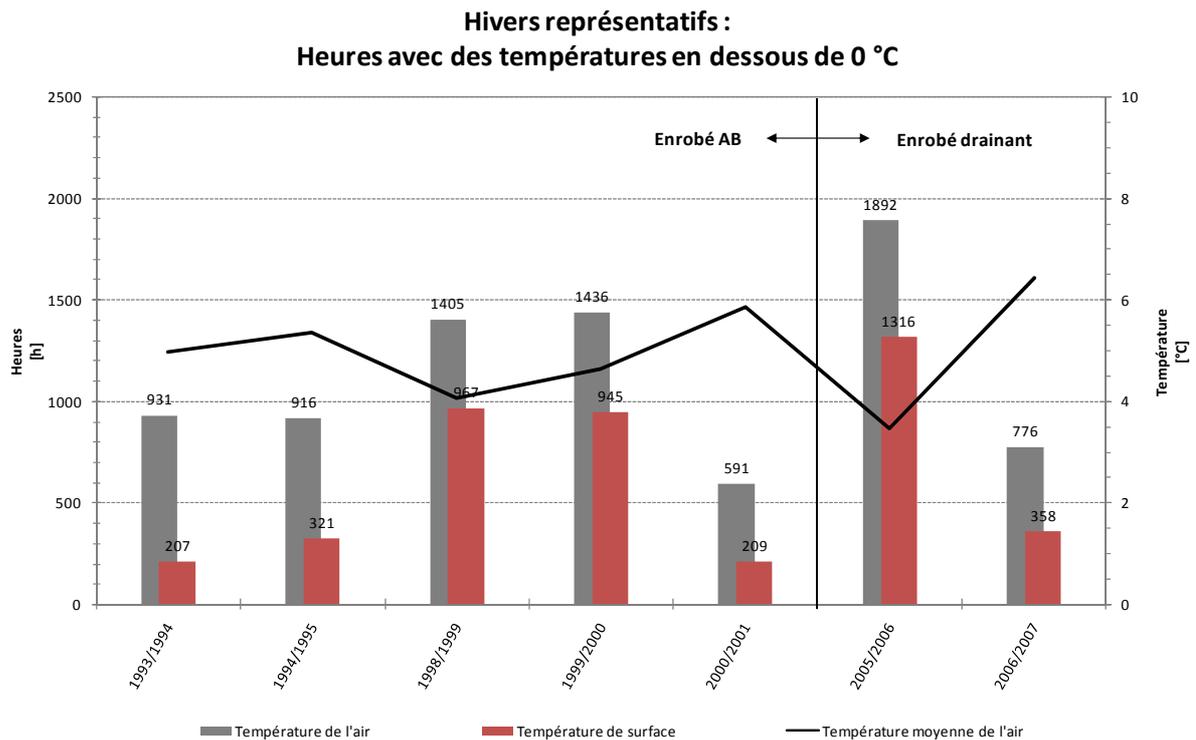


Figure 54: Durées des périodes où les températures (air/surface) sont inférieures à 0°C.

L'étude de la différence entre la température moyenne de l'air et la température moyenne de la surface (à -5cm) sur un hiver (Figure 55), ne montre pas non plus de contraste marqué entre les deux types de revêtements. Les valeurs de l'enrobé drainant se trouvent être parfaitement incluses dans l'intervalle de celles d'un enrobé traditionnel.

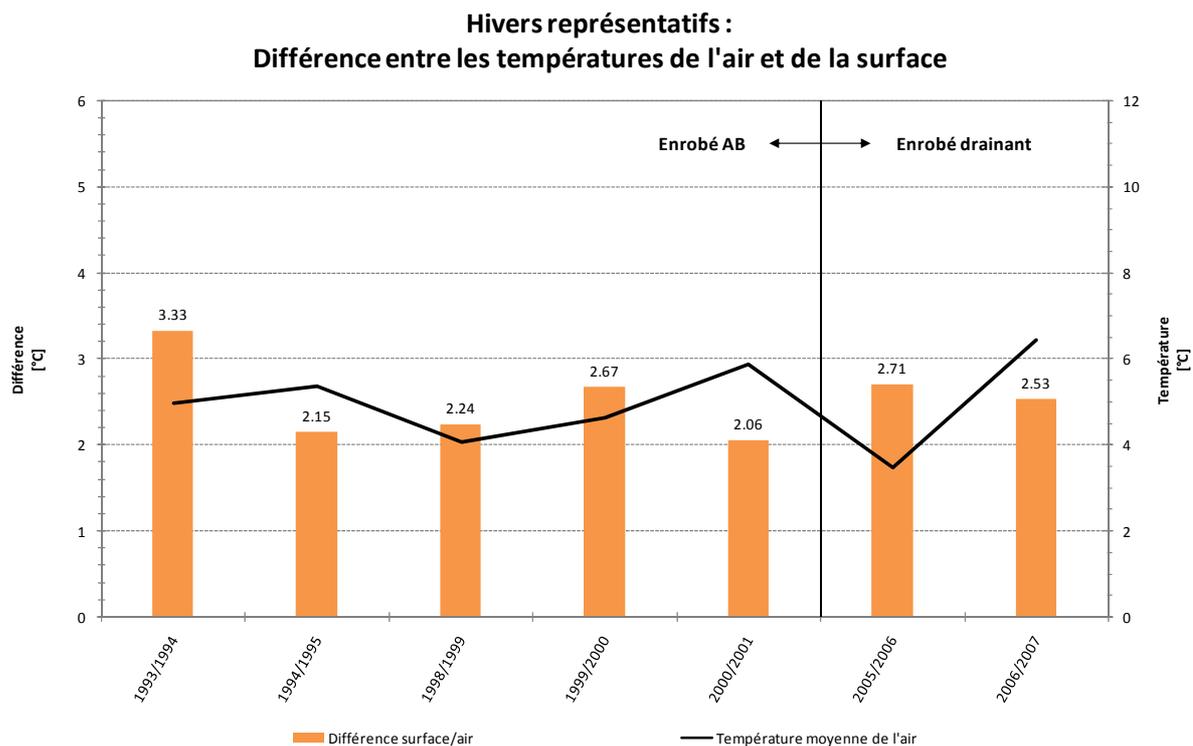


Figure 55: Différence entre les températures moyennes de surface et de l'air.

Afin de déterminer une analogie plus poussée entre le comportement hivernal des deux types d'enrobés, une méthode de comparaison adaptée est utilisée par la suite. Il s'agit de définir des périodes-types permettant de comparer des situations analogues entre les différents hivers. Pour aboutir à ce but, trois périodes ont été définies: Une période de froid extrême, pendant laquelle la température de l'air tombe à des valeurs très basses; Une période de froid prolongé, pendant laquelle la température de l'air reste faible pour une longue durée; Et une période de variation rapide de température, qui est caractérisée soit par une chute soit par une montée brusque de la température de l'air. La définition exacte de ces trois périodes-types est donnée dans le tableau ci-après.

Nom	Abréviation	Définition
"Froid extrême"	FE	Température de l'air inférieure ou égale à - 10 °C
"Froid prolongé"	FP	Température journalière moyenne de l'air inférieure à 0 °C pendant au moins 5 journées de suite
"Variation rapide des températures"	VT	Différence d'au moins 10 °C entre le maximum et le minimum de la température de l'air d'une période de 24h ; température minimale inférieure ou égale à - 5 °C

**Tableau 21:** Définition des périodes-types.

Le recours à des situations bien spécifiques permet de comparer les deux types d'enrobés se trouvant au même endroit, mais pendant des hivers différents. Ces périodes représentent des cas particuliers ayant une grande influence sur le comportement hivernal d'un revêtement quelconque. Pour arriver à une bonne concordance entre deux périodes, plusieurs facteurs doivent être pris en compte. Il s'agit principalement de la température de l'air, de l'humidité relative et du rayonnement solaire qui doivent être semblables d'une situation à l'autre. Sur la figure ci-après, le nombre de périodes-types (en journées équivalentes) est donné pour les hivers représentatifs.

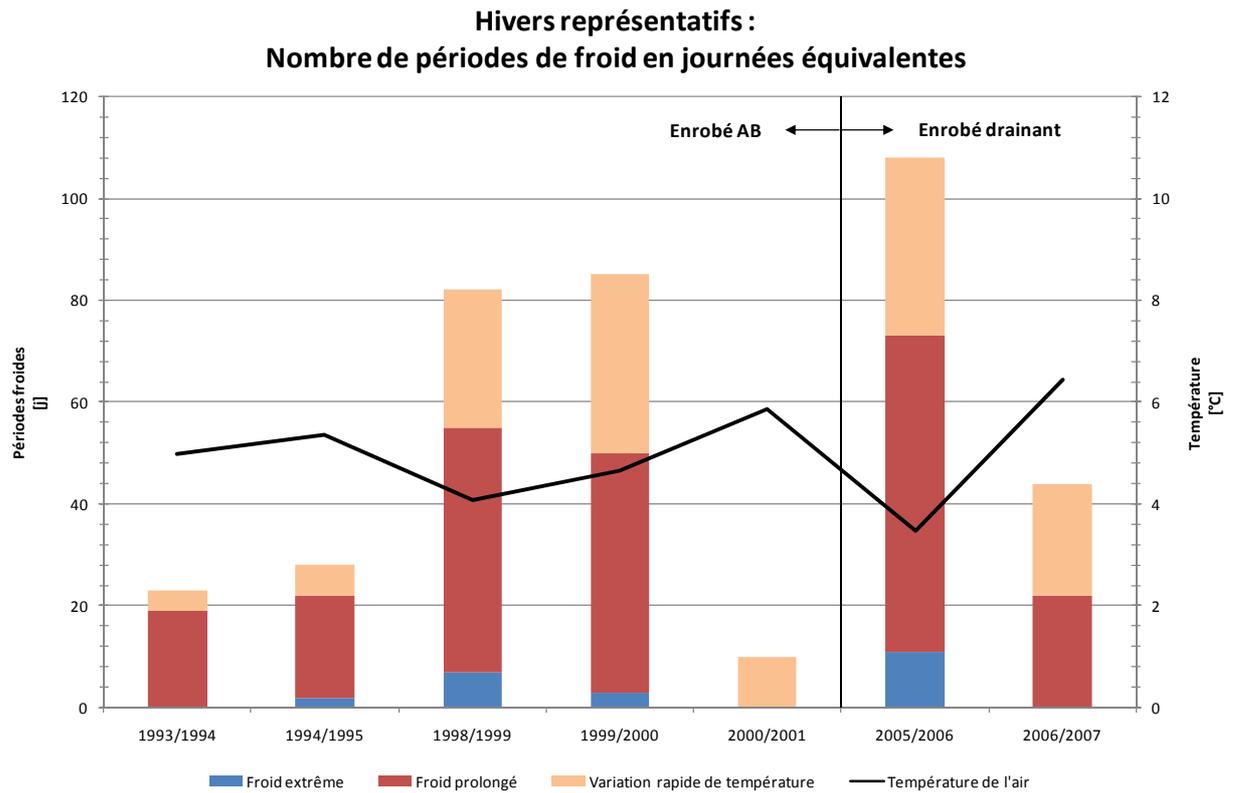
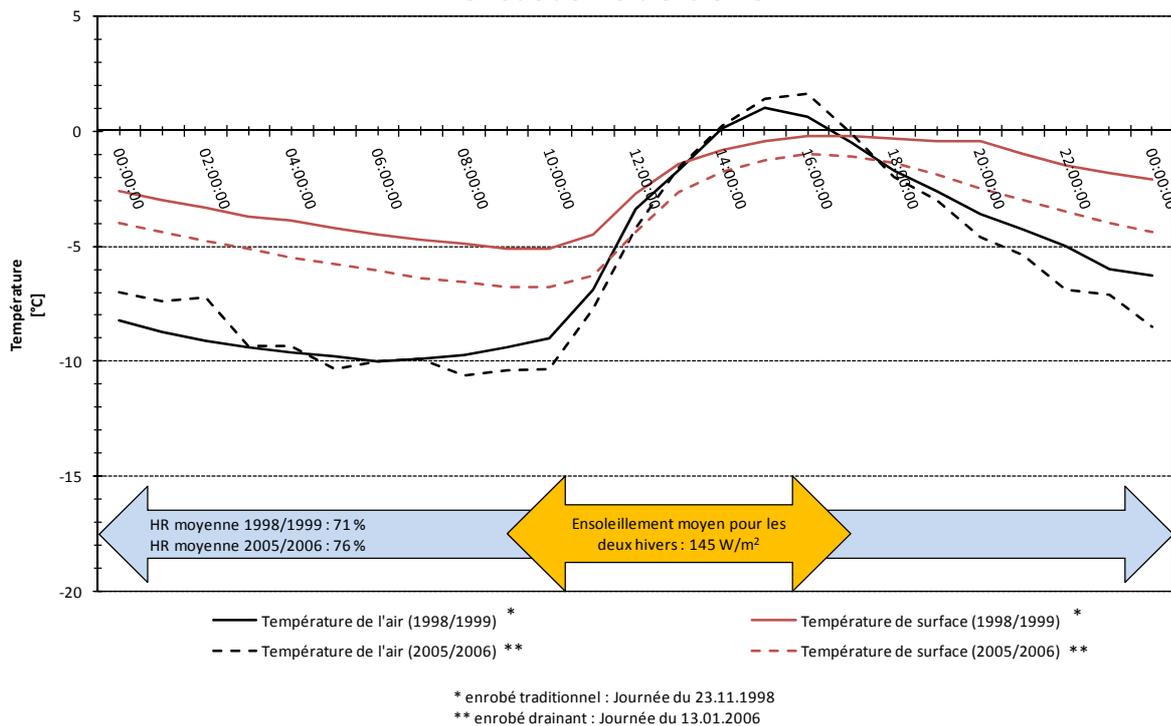


Figure 56: Nombre de périodes-types pour les hivers représentatifs.

#### 4.4.1 Période de froid extrême

Pour apprécier le comportement d'un enrobé traditionnel ou drainant pendant des périodes de froid extrême, certaines situations analogues ont pu être comparées. Sur la figure ci-après un cas est donné, où la température de l'air passe de -10°C la nuit à plus de 0°C la journée. Les autres facteurs, humidité relative et rayonnement solaire, sont très proches pour les deux situations.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :  
Période de froid extrême**



**Figure 57:** Exemple de deux périodes de froid extrême semblables.

Lors de périodes très froides, la température de surface d'un enrobé drainant se trouve être plus souvent inférieure à celle d'un enrobé traditionnel. La différence peut avoisiner les deux degrés, dont le maximum se produit principalement pendant la nuit. En présence d'un rayonnement solaire cette différence se réduit, et la température de surface d'un enrobé drainant se rapproche d'avantage de celle d'un enrobé traditionnel. La variation de température de surface est proche pour les deux types de revêtements. Elle dépend principalement de la variation de la température de l'air, mais aussi de l'ensoleillement.

La différence de température entre les types d'enrobés peut s'expliquer par des considérations thermiques des revêtements. En effet, un enrobé drainant, de part sa teneur en vide élevée, a une moins grande masse thermique et est donc plus sujet aux changements de température. Ceci explique le fait que la température de l'enrobé drainant est toujours très proche de la température de l'air.

Le comportement hivernal d'un enrobé drainant est, pour le cas des périodes de froid extrême, plus délicat que celui d'un enrobé traditionnel. Des différences de plusieurs degrés pour la température de surface peuvent avoir des conséquences dangereuses et nécessitent des interventions plus importantes.

**4.4.2 Période de froid prolongé**

Le comportement d'un enrobé traditionnel ou drainant pendant des périodes de froid prolongé a pu être comparé à l'aide de quelques cas particuliers. Sur les figures ci-après deux de ces cas sont donnés, où la moyenne journalière de la température de l'air reste inférieure à 0°C pendant plusieurs journées. Les autres facteurs, humidité relative et rayonnement solaire, sont très proches d'un enrobé à l'autre.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :  
Période de froid prolongé**

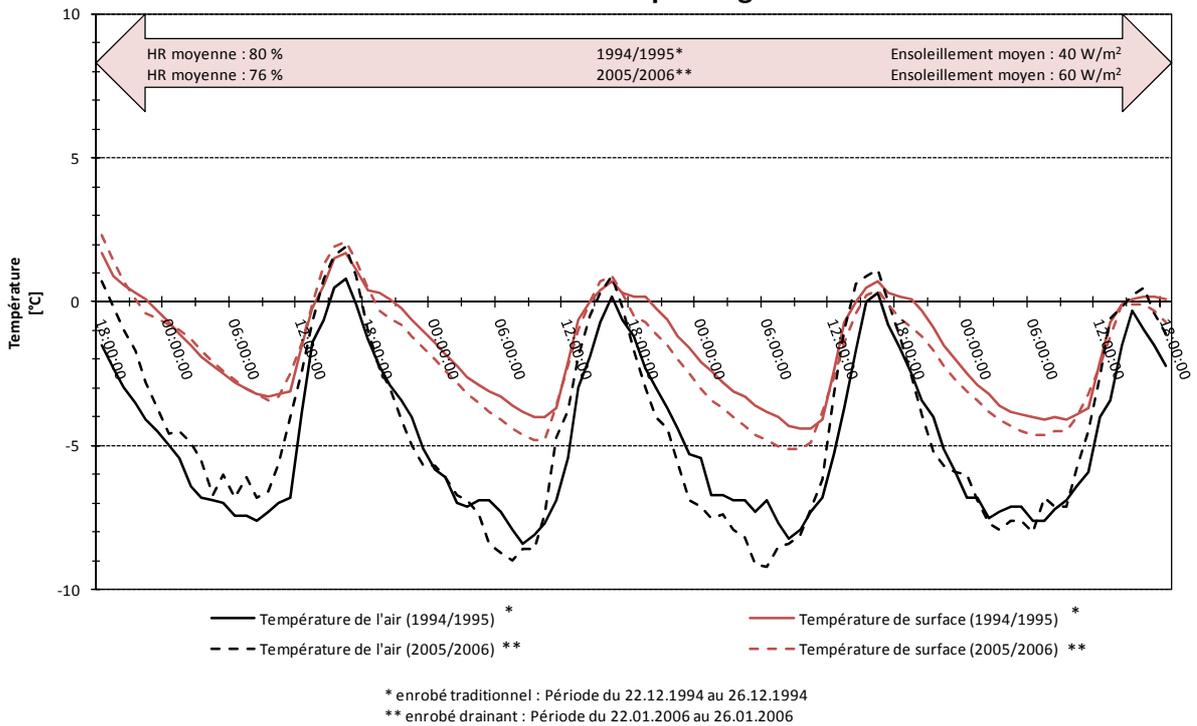


Figure 58: Premier exemple de deux périodes semblables de froid prolongé.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :  
Période de froid prolongé**

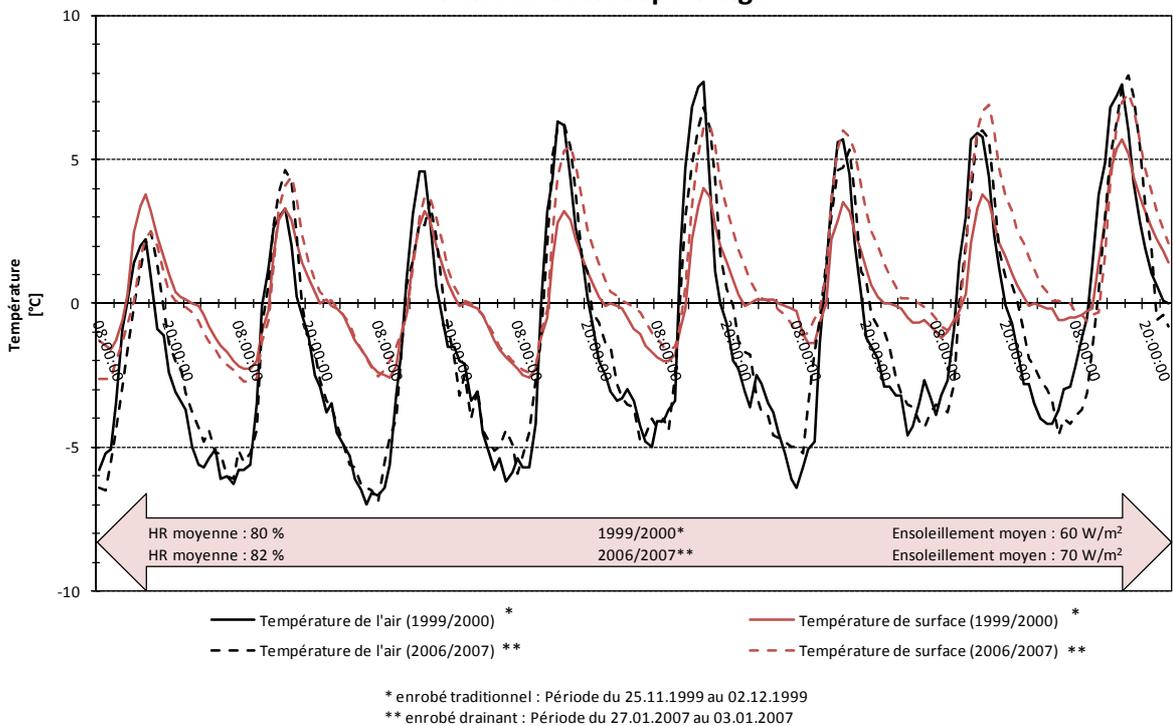


Figure 59: Deuxième exemple de deux périodes semblables de froid prolongé.

En ce qui concerne les périodes de froid prolongé, il est plus difficile d'aboutir à des conclusions concrètes car les cas examinés ne sont pas toujours concordants. Néanmoins, plusieurs remarques importantes peuvent être faites. Notons qu'il n'est pas aisé de trouver de longues périodes ayant des caractéristiques identiques pour tous les hivers représentatifs, ce qui limite cette comparaison à quelques cas distincts.

La première conclusion à tirer de ces cas est la suivante: Lors de journées très froides la température de surface de l'enrobé drainant est inférieure à celle de l'enrobé traditionnel. Ceci permet d'affirmer les premières conclusions élaborées pour les périodes de froid extrême. Ensuite, lors de journées plus ensoleillées et en présence de températures de l'air supérieures à 0°C, les enrobés drainants se réchauffent d'avantage que les enrobés traditionnels et la température de surface du premier revêtement dépasse celle du deuxième.

L'ensoleillement a une importance primordiale sur la température de surface des enrobés, et ceci non seulement pendant les heures où le soleil est visible. En effet, un réchauffement de la chaussée pendant la journée se traduit par une augmentation de la température de surface. Une fois le soleil couché, la masse thermique élevée empêche une forte perte de chaleur pendant la nuit. L'enrobé n'a donc pas le temps de se refroidir complètement pendant la nuit et conserve ainsi une chaleur importante pendant les périodes sans soleil. Ceci implique qu'un cycle journalier peut être très différent selon l'intensité du rayonnement solaire, même si la température de l'air et l'humidité relative sont identiques entre les deux situations.

Il est difficile de juger le comportement hivernal d'un enrobé, traditionnel ou drainant, lors de périodes de froid prolongé. En effet, beaucoup de facteurs interviennent et ont une très grande influence sur ce comportement de chacun des enrobés. Pour des situations identiques, il faut aussi distinguer entre les où la température de l'air est très basse (enrobé drainant moins avantageux), et les cas où la température de l'air est proche ou supérieure à 0°C (enrobé drainant plus avantageux).

### 4.4.3 Période de variation rapide de température

Le comportement d'un enrobé lors de périodes de variation rapide de température, a pu être observé à l'aide de quelques cas particuliers. Sur les figures ci-après deux de ces cas sont donnés: Le premier représente une augmentation de plus de 10°C de la température de l'air, alors que le deuxième montre le cas d'une baisse de température du même ordre de grandeur.

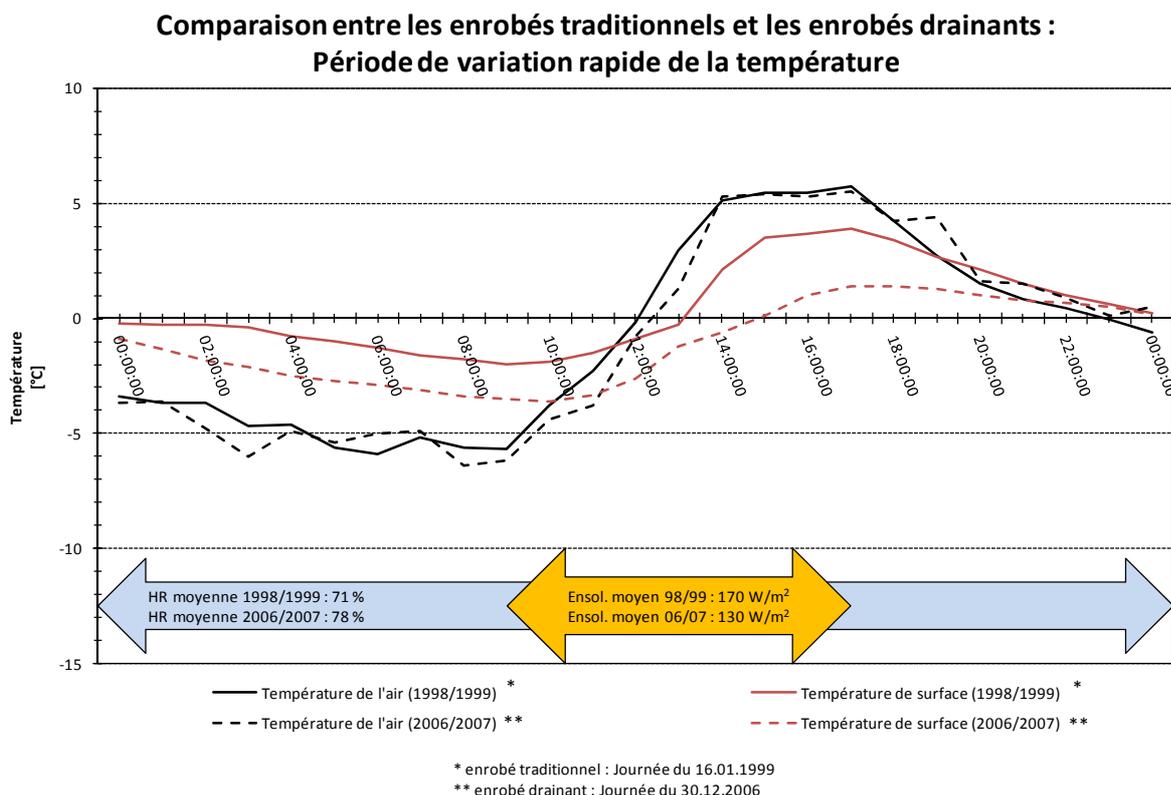
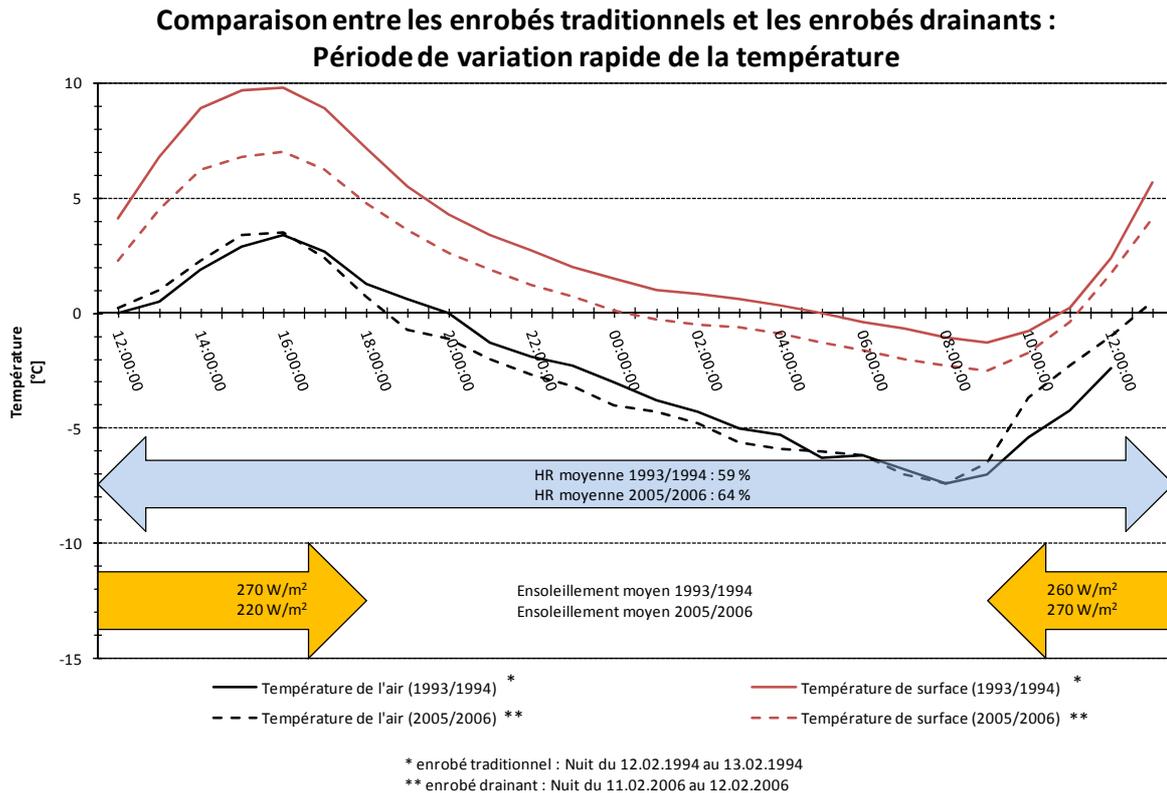


Figure 60: Premier exemple de deux périodes de variation rapide de température semblables.



**Figure 61:** Deuxième exemple de deux périodes de variation rapide de température semblables.

Une variation de plus de 10°C en une journée se produit lorsque des périodes d'ensoleillement fortes se présentent. Néanmoins, il est très difficile de trouver des situations avec des rayonnements solaires moyens identiques. Les variations de températures des deux types d'enrobés dépendent principalement du rayonnement solaire. Lors de situations identiques, l'enrobé drainant présente des variations plus marquées. L'enrobé traditionnel de son côté a besoin de conditions d'ensoleillement plus prononcée pour des variations de température identiques. Le deuxième exemple (Figure 61) montre bien cet événement: Lors de la première période d'ensoleillement, qui est plus marquée pour l'enrobé traditionnel, les variations de températures sont assez proches et la différence entre les températures de surface reste plus ou moins constante. Pour la deuxième période d'ensoleillement, qui présente des conditions quasi identiques, la différence entre les températures de surface diminue, ce qui montre que l'enrobé drainant se réchauffe plus rapidement.

#### 4.4.4 Conclusion de l'analyse d'un enrobé drainant et traditionnel sur remblai

La comparaison concrète entre le comportement hivernal des deux types d'enrobés s'est faite à l'aide de périodes-types. Il aurait été avantageux d'avoir accès à des mesures enrobé/traditionnel sur un même tronçon et en même temps, mais ceci n'a pas été possible pour le site de l'Ardon au Valais. Néanmoins, plusieurs points importants découlent de cette analyse : La difficulté de trouver des situations avec des conditions identiques pour aboutir à une comparaison idéale est à noter. Par contre, certaines conclusions peuvent être tirées des cas traités. L'enrobé drainant est plus susceptible aux conditions météorologiques que l'enrobé traditionnel, ce qui a une influence non négligeable sur son comportement hivernal. Sa température de surface est plus proche de la température de l'air, impliquant un risque accru en cas de forte chute de température. Le temps d'intervention est plus faible et le service hivernal doit se faire de manière plus intense. Par contre lors des remontées de température, ou lors de périodes ensoleillées, l'enrobé drainant est avantageux par rapport à un enrobé traditionnel. La possibilité d'emmagasiner de la chaleur est très différente pour les deux enrobés. La présence de vides dans l'enrobé drainant implique que sa température se trouve toujours proche de la température de l'air, alors que l'enrobé traditionnel joue plus le rôle d'un réservoir de chaleur nécessitant plus de temps pour s'adapter aux variations.

#### 4.5 ANALYSE ET PREVISION A L'AIDE D'UN OUTIL DE SIMULATION

La comparaison pont/remblai pour un enrobé drainant (case 1, Figure 62) a été établie à l'aide des mesures effectuées sur l'autoroute A5 près d'Arnon. La comparaison drainant/traditionnel sur remblai (case 2, Figure 62) a été analysée à l'aide des mesures récoltées sur l'autoroute A9 près d'Ardon. Pour aboutir finalement à une analyse générale (case 3, Figure 62), un outil de modélisation a été élaborée, permettant d'une part de simuler le comportement d'un enrobé traditionnel sur pont et d'autre part de comparer toutes les données entre elles pour ainsi juger du bien-fondé de l'application d'un enrobé drainant sur un ouvrage d'art.

	PONT	REMBLAI
ENROBE DRAINANT	✓ 1	✓ 2
ENROBE TRADITIONNEL	✗ 3	✓

Figure 62: Comportement mesuré et comportement modélisé.

Cette partie du projet a été effectuée en collaboration avec un bureau privé, mandaté à cette occasion par le LAVOC. La contribution du bureau au projet consistait à assister le LAVOC pour l'élaboration, la calibration et l'exploitation d'un modèle numérique servant à la simulation du comportement thermique de la chaussée sur ouvrage d'art dans le cadre précis du présent mandat. Le but de la modélisation est de comprendre les phénomènes physiques inhérents à l'emploi d'un revêtement drainant sur les ouvrages d'art et d'évaluer les risques encourus par rapport à la viabilité hivernale.

Le mandat a porté sur les objectifs suivants:

- Construction du modèle en éléments finis avec un logiciel mis à disposition par le LAVOC,
- Adaptation et mise en forme des données mesurées pour leur exploitation dans le modèle,
- Calibration du modèle avec les données de journées/événements types sélectionnés,
- Support pour une exploitation du modèle.

##### 4.5.1 Récolte et mise en forme des mesures

Le développement d'un modèle de comportement thermique d'une structure de chaussée routière nécessite la prise en compte de paramètres physiques et météorologiques déterminants. Les mesures récoltées ont été exploitées soit comme entrées au modèle (conditions initiales et conditions aux limites), soit comme valeurs cibles à comparer avec les sorties du modèle. Elles sont énumérées au Tableau 22.

Nom du paramètre	Type du paramètre	Unité	Source de la mesure
Température	Entrée ou Valeur cible	°C	1. Sondes Pt100 LAVOC (section sur remblai) 2. Sondes Pt100 Boschung (section sur remblai et section sur pont) 3. Sondes BOSO et ARCTIS Boschung (section sur remblai et section sur pont)
Rayonnement solaire et infrarouge	Entrée	W/m <sup>2</sup>	Radiomètre Kipp & Zonen sur le portique
Vent : vitesse + direction	Entrée	m/s + (°)	Station de Method

**Tableau 22:** Liste des paramètres physiques récoltés.

Les mesures récoltées par le LAVOC et celles de la station ENET de Method ont été extraites avec un pas de temps de 10 minutes. Les mesures fournies par Boschung ont été enregistrées toutes les 5 minutes environ. Le volume important des données enregistrées et l'impossibilité de leur manipulation avec un tableur classique (existence de plusieurs bases de temps) ont nécessité la construction d'une base de données sous Microsoft Access.

#### 4.5.2 Approche de calibration

La calibration consiste à déterminer par une approche itérative les paramètres physiques du modèle pour qu'il soit capable de restituer de manière satisfaisante le comportement thermique de la structure sous l'influence de sollicitations météorologiques données. L'approche de calibration préconisée est de déterminer les paramètres physiques en partant d'un modèle aussi simple que possible et en introduisant progressivement des phénomènes de transfert thermiques de plus en plus complexes.

Les phénomènes de transfert de chaleurs considérés sont (du plus simple au plus complexe):

1. La conduction
2. Le rayonnement
3. La convection

Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact quand il existe un gradient de température au sein d'un système. Le rayonnement est un transfert d'énergie sans matière. Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde dépend de la température du corps émetteur de chaleur. La convection est un transfert d'énergie qui s'accompagne de mouvement de molécules dans un fluide (liquide ou gaz).

La convection peut être:

- Naturelle (libre): Le transfert de chaleur provoque son mouvement par lui-même.
- Forcée: Le transfert de chaleur est forcé par un facteur provoquant le mouvement des molécules. Le vent ou l'eau de ruissellement sont des exemples de convection forcée.

##### 4.5.2.1 Conduction seule

Le phénomène de conduction est régi par la loi de Fourier et peut s'écrire dans un problème 1D comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$T$  est la température à déterminer par la résolution de l'équation aux dérivés partielles (par rapport à la position  $x$  et au temps  $t$ ),  $\lambda$  est le coefficient de conduction thermique exprimée en W/m/K,  $\rho$  est la masse

volumique du matériau conducteur exprimée en  $\text{kg/m}^3$  et  $C$  est la chaleur massique du même matériau exprimée en  $\text{J/kg/K}$ .  $Q$  est l'énergie produite au sein même du matériau en  $\text{W/m}^3$  et est nulle dans notre cas.

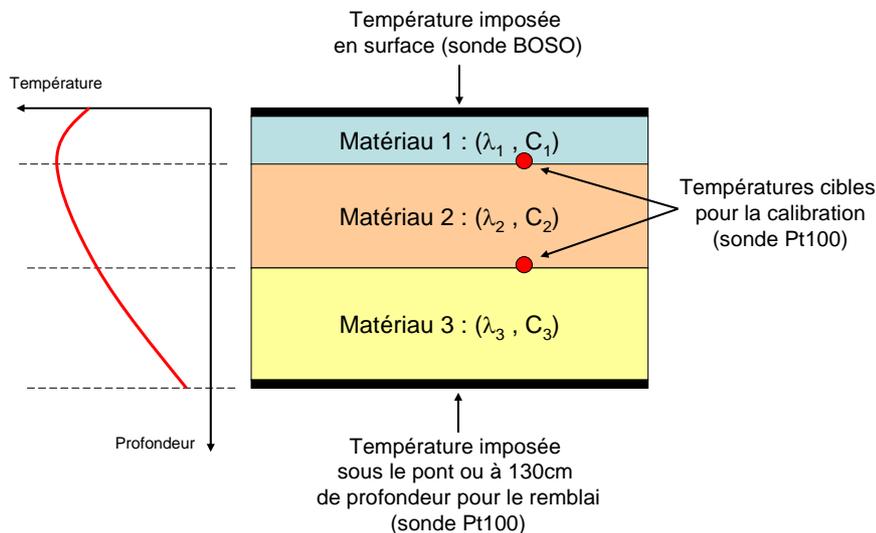
L'imposition des mesures de température comme conditions aux limites de notre structure (géométrie) permet de s'affranchir dans un premier temps des phénomènes de rayonnement et de convection.

La masse volumique est un paramètre connu et obtenu de l'étude de formulation des matériaux. Les paramètres physiques qui restent à déterminer sont le coefficient de conduction thermique et la chaleur massique pour chaque matériau de notre modèle.

Les températures imposées comme conditions aux limites de la structure sont:

1. la température en surface fournie par la sonde BOSO,
2. la température à la limite inférieure du modèle qui est:
  - a. la température sous le tablier du pont fournie par une sonde Pt100,
  - b. la température à 130cm de la surface pour la section en remblai fournie également par une sonde Pt100.

Le modèle thermique est schématisé sur la Figure 63.



**Figure 63:** Schéma du modèle thermique avec prise en compte de la conduction seule.

Le point situé à 130cm de profondeur dans le remblai est considéré comme étant assez éloigné de la surface pour être considéré constant lors de la durée du calcul servant à la calibration.

#### 4.5.2.2 Conduction et rayonnement

L'énergie rayonnée par un corps quelconque est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann qui s'écrit:

$$E = \varepsilon S \sigma T^4 \tag{4}$$

$\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$ ),  $S$  est la surface rayonnante,  $\varepsilon$  est un coefficient qui vaut 1 pour un corps noir et varie entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau,  $T$  est la température du corps exprimée en Kelvin.

En simplifiant le phénomène de rayonnement (négligence de plusieurs phénomènes d'absorption et de réflexion dans l'atmosphère) nous pouvons résumer le cheminement du rayonnement comme suit (Figure 64): Le rayonnement solaire descendant ( $R_s \downarrow$ ) est en partie réfléchi par la surface du revêtement ( $R_s \uparrow$ ) et la différence contribue au réchauffement du matériau en surface. La surface, portée à une température donnée,

émet un rayonnement infrarouge ( $R_i \uparrow$ ) qui est perdu dans l'atmosphère par temps clair ou (re)réfléchi vers le sol par temps nuageux ( $R_i \downarrow$ ).

Le bilan du rayonnement à la surface du sol, appelé rayonnement net, est donné par la somme:

$$R_{net} = R_s \downarrow - R_s \uparrow - R_i \uparrow + R_i \downarrow \tag{5}$$

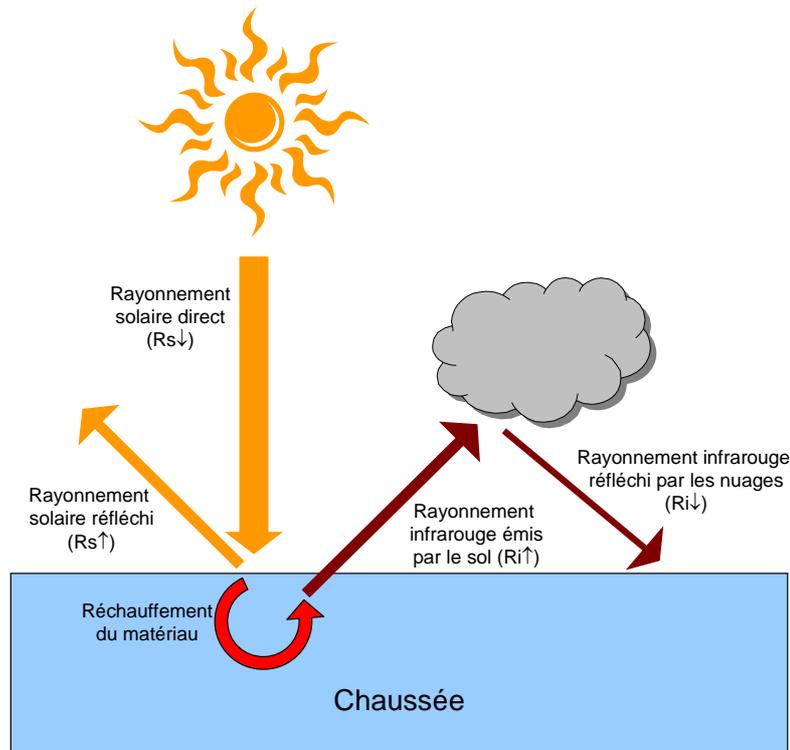


Figure 64: Rayonnements considérés dans le modèle thermique de la structure de la chaussée.

La valeur du rayonnement net est obtenue directement du radiomètre.

La sélection de journées avec vent très faible permet de minimiser l'effet de la convection et d'affiner les paramètres de conduction afin de retrouver les gradients thermiques obtenus en imposant les températures aux limites (chapitre 4.5.2.1).

#### 4.5.2.3 Conduction, rayonnement et convection

L'énergie échangée par convection est donnée par la loi de Newton:

$$Q = hS(T_s - T_\infty) \tag{6}$$

$S$  est la surface d'échange,  $T_s$  est la température de la surface,  $T_\infty$  est la température du fluide en mouvement.  $h$  est le coefficient d'échange thermique ou coefficient de convection et est donné dans la littérature par des formules empiriques. En règle générale, plus ce coefficient est élevé plus les valeurs de température du sol et de l'air se rapprochent. La valeur de  $h$  dépend essentiellement de la vitesse du vent, et à moindre échelle de la température de l'air et de l'état de surface de la chaussée. Une formule empirique de  $h$  est proposée par Côté et Konrad [9]:

$$h = 1.163 \cdot (4.84 + 3.36 V_{vent}) \cdot \frac{294.16}{273.16 + T_{air}} \tag{7}$$

$V_{vent}$  est la vitesse du vent exprimée en m/s et  $T_{air}$  est la température de l'air exprimée en degrés Celsius. Nous constatons qu'à vitesse de vent nulle, le coefficient de convection est non nul (5.75 W/m/K à 15 °C) et

correspond au coefficient d'échange thermique de la convection libre. Nous devons donc considérer une valeur non nulle pour ce coefficient dans l'étape précédente (chapitre 4.5.2.2).

La formule empirique finale de  $h$  pour notre modèle devra tenir compte de la situation particulière du site (orientation des vents dominants) et effet du parapet du pont.

Le trafic a un effet non négligeable sur la valeur du coefficient de convection mais cette influence n'est pas considérée dans notre modélisation.

#### 4.5.2.4 Modélisation de la chaleur latente

La chaleur latente peut être modélisée en additionnant à la valeur de la chaleur spécifique massique une fonction croissante entre  $T_1$  et 0 et décroissante entre 0 et  $T_2$ , avec respectivement  $T_1$  et  $T_2$  les températures de début et de fin de la fusion de la glace.

Nous posons par exemple que  $T_2 = -T_1 = 1^\circ\text{C}$ .

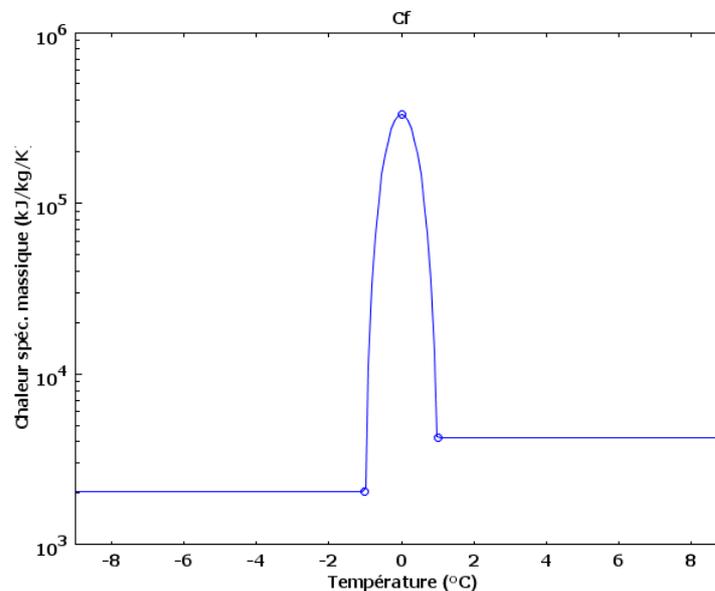


Figure 65: Simulation de la chaleur latente au travers de la chaleur massique.

L'intégrale de cette fonction est égale à la chaleur latente de fusion de la glace.

La résolution du système thermique avec cette forte discontinuité peut poser des problèmes de convergence étant donné le changement brusque imposé à la chaleur spécifique qui est fonction de la température elle-même paramètre calculé. Il convient de vérifier que les valeurs prises par la chaleur spécifique massique lors de la modélisation ne présentent pas de sauts (Figure 66).

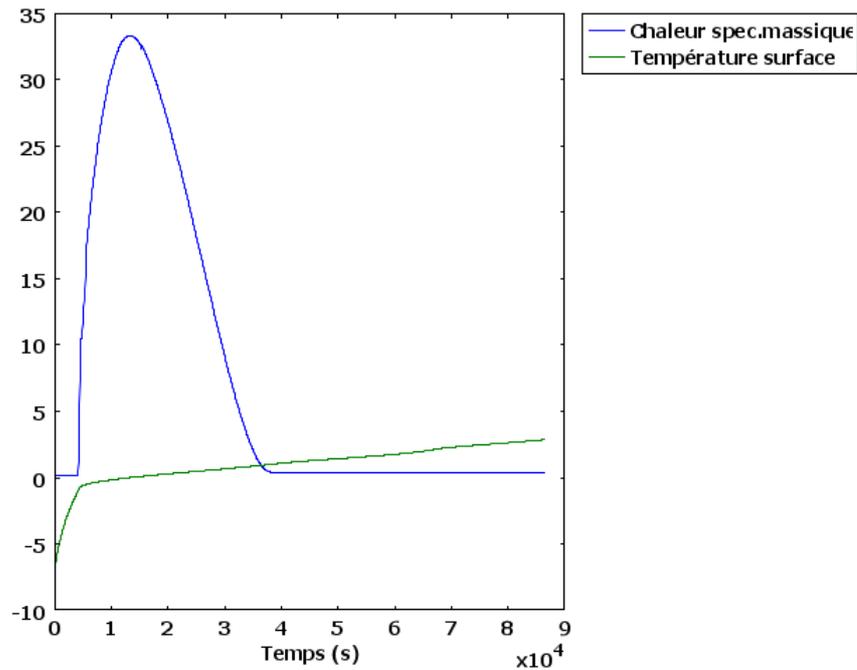


Figure 66: Simulation de la température lors d'un changement de phase.

### 4.5.3 Construction des modèles en éléments finis et leur utilisation

#### 4.5.3.1 Logiciel

Le logiciel "COMSOL Multiphysics" a été retenu pour la simulation du comportement thermique de la chaussée. Il s'agit d'un environnement de modélisation et de résolution de différents types de problèmes scientifiques ou d'engineering basés sur des équations aux dérivées partielles (mécanique des solides, champs électromagnétiques, acoustique, transfert de chaleur, etc.). COMSOL permet de combiner plusieurs modèles physiques de base pour étudier des phénomènes physiques couplés tout en dispensant l'utilisateur d'entrer en détail des équations théoriques et d'analyse numérique.

COMSOL (anciennement FEMLAB) est un projet issu de la suite de calcul MATLAB, il partage les mêmes bibliothèques de calcul et peut être enrichi par des fonctions personnalisées écrites dans le langage MATLAB.

#### 4.5.3.2 Géométrie

La mise au point du modèle thermique de la structure passe par le choix:

- du type de la modélisation (1D, 2D, 3D)
- du nombre et des dimensions des matériaux aux propriétés homogènes (nombre de couches)

La continuité d'une structure de chaussée dans le sens longitudinal limite le type du modèle au cas 1D ou 2D. Le modèle 2D est une coupe simplifiée de la structure construite qui prend en compte l'effet thermique de bord (la proximité du parapet ou du talus ou la variation transversale de l'épaisseur du tablier du pont). Le modèle 1D néglige cet effet de bord et donc la géométrie des couches est définie par leur épaisseur uniquement.

Le choix du modèle 1D au lieu du modèle 2D doit être justifié par la vérification que l'effet de bord est bien négligeable en comparant les réponses thermiques des deux modèles aux mêmes sollicitations météorologiques. Dans les deux modèles (1D et 2D), les matériaux constituant de la structure du pont sont, par simplification, regroupés en 3 milieux continus homogènes:

1. Béton de ciment: comprend le tablier du pont, la poutre longitudinale et le parapet
2. Enrobé fermé (AC) avec une épaisseur de 70mm
3. Enrobé drainant (PA) avec une épaisseur de 50mm

Le modèle 2D de la structure sur le pont (Figure 67) est construit sur la base de la coupe transversale de l'ouvrage sur le plan conforme à l'exécution. La symétrie de l'ouvrage est exploitée en modélisant la moitié de la géométrie.

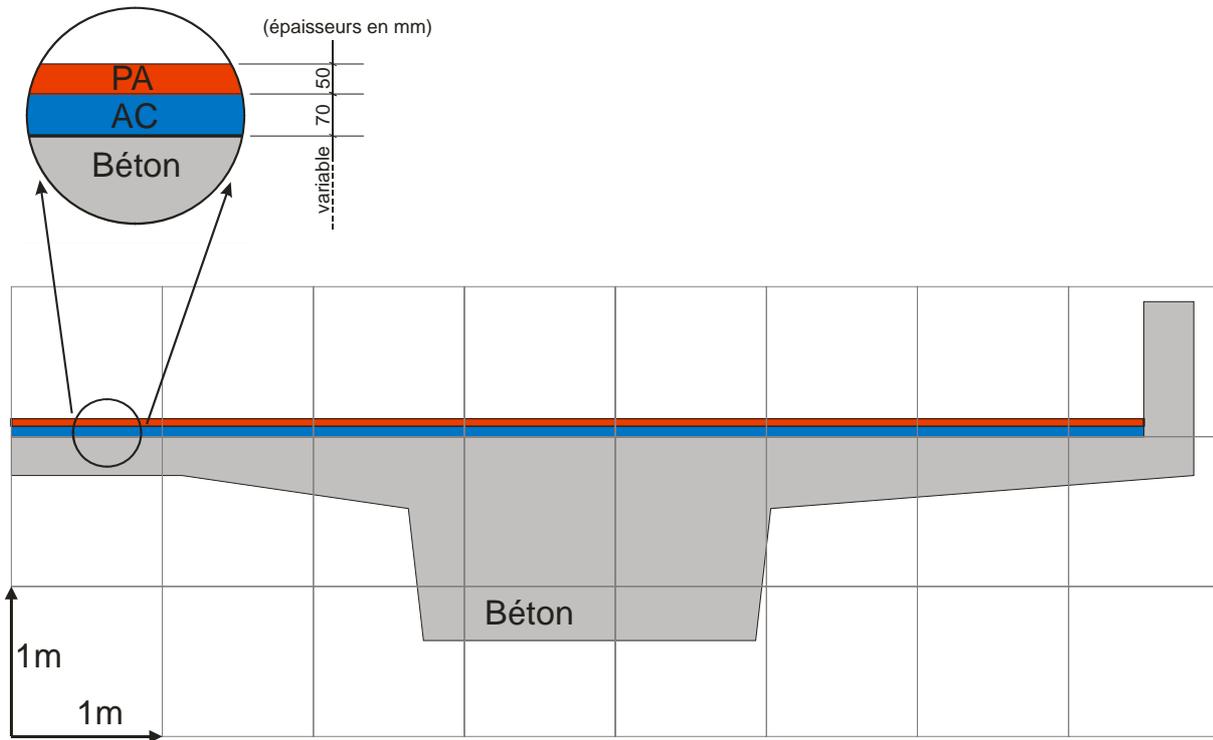


Figure 67: Schéma du modèle 2D.

La structure en remblai est également modélisée par 3 milieux continus homogènes:

1. Le remblai jusqu'à une profondeur de 1300mm
2. L'enrobé fermé (AC) avec une épaisseur de 380mm
3. L'enrobé drainant (PA) avec une épaisseur de 40mm

Dans le cas 2D, nous retenons pour le maillage des éléments triangulaires à interpolation quadratique (Figure 68). Le maillage est affiné près de la surface de la couche de roulement.

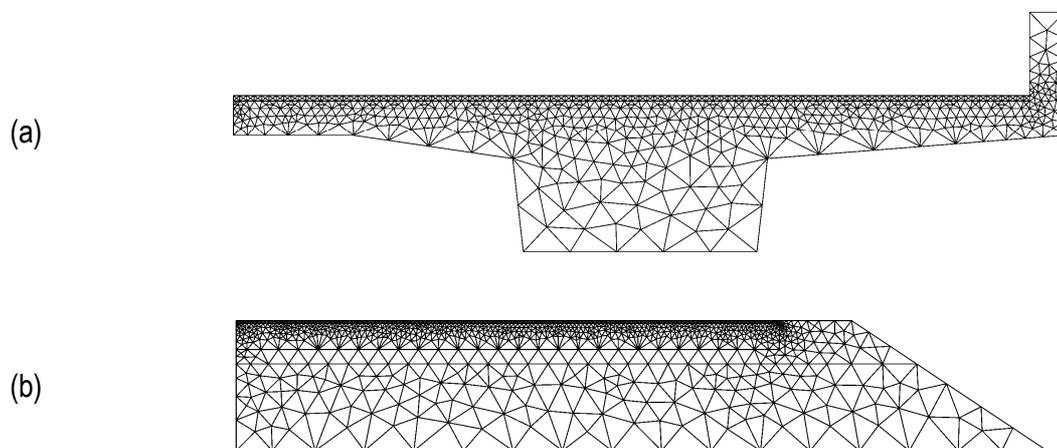


Figure 68: Maillage 2D par éléments finis de la structure de chaussée sur le pont (a) et la structure sur remblai (b).

La couche d'étanchéité entre le béton et le AC ainsi que le SAMI sous le PA ne sont pas considérés géométriquement dans le modèle. Leur effet thermique sera combiné avec celui des deux matériaux bitumineux par le choix de paramètres de conduction adéquats (processus de calibration).

Les gradients thermiques calculés avec les modèles 1D et 2D, et pour différentes combinaisons de sollicitations météorologiques, sont très proches. Nous nous limiterons, pour la suite de l'étude au modèle en éléments finis 1D, ce qui réduit considérablement le temps de calcul et le post-traitement des résultats.

#### 4.5.3.3 Propriétés thermiques des matériaux

Le comportement thermique d'un matériau est défini par 3 propriétés physiques qui sont « théoriquement » intrinsèques:

1. La conduction thermique
2. La chaleur massique
3. La masse volumique

Les valeurs des autres propriétés physiques telles que le coefficient de convection sont dépendantes des interactions avec les éléments de la structure et du milieu environnant. La masse volumique est caractérisée avec précision par des essais en laboratoire.

Le Tableau 23 donne des valeurs indicatives de la conductivité thermique et de la chaleur massique pour différents matériaux rencontrés dans une structure de chaussée [53].

Matériaux	Conductivité thermique [ $\lambda$ ] $\lambda$ : ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	Chaleur massique C : ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
air	0,02	1
eau	0,06	4
glace	2,25	2
béton bitumineux	2,20	869
enrobé drainant	1,50	995
grave bitume	1,90	869
grave laitier	1,40	964
grave non traitée	1,80	964
béton de ciment	1,80	933

**Tableau 23:** Propriétés thermiques type des matériaux de chaussée.

Nous constatons que la conductivité thermique est plus ou moins proportionnelle à la compacité du matériau. Le volume de vides dans le matériau agit comme un isolant thermique. La conduction thermique et la chaleur massique peuvent être déterminées en laboratoire, et le résultat peut être influencé par les conditions expérimentales. Un essai de détermination des propriétés thermique a été conduit à l'ENTPE<sup>1</sup> sur les matériaux constitutifs d'une carotte prélevée *in situ*. Une synthèse des résultats obtenus est donnée dans le Tableau 24.

<sup>1</sup> Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (Lyon)

La mesure des propriétés thermiques de l'enrobé drainant est rendue difficile par la porosité du milieu. Pour cela, l'essai est réalisé:

- sur l'éprouvette seule (nue)
- sur l'éprouvette isolée thermiquement par ses faces planes avec des panneaux de polystyrène
- sur l'éprouvette enveloppée par un film plastique sur sa surface latérale (limiter les perturbations latérales dues à la porosité)

Le coefficient d'échange au bord (convection) n'est pas nul et comprend la convection libre et les effets de l'enceinte thermique servant à la mise de la température. Ce coefficient est à déterminer pour chaque configuration d'essai.

Les propriétés thermiques des matériaux sont déterminées par un calage des paramètres du modèle par éléments finis de l'essai (logiciel COMSOL) afin de faire correspondre les températures calculées aux températures mesurées lors de la mise en température des éprouvettes.

Couche	Surface			Base	Fondation
	nue	isolée	avec film plastique		
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1978			2413	2362
Conductivité thermique (W/m/K)	1.0	3.0	2.0	2.0 – 3.0	1.9
Chaleur massique (J/kg/K)	1350	1350	1350	1350 – 1400	1200
Coefficient d'échange aux bords (W/m <sup>2</sup> /K)	37.0	60 – 30 (suivant T)	10.5 – 12 (suivant T)	56	35 – 45 (suivant T)

**Tableau 24:** Propriétés thermiques des matériaux déterminées par des essais en laboratoire.

Nous constatons que le coefficient de conduction thermique de l'enrobé drainant et le coefficient d'échange thermique dépendent fortement des conditions de l'essai, ils ne peuvent être considérés dans la pratique comme des propriétés intrinsèques.

#### 4.5.3.4 Conditions aux limites

Les limites d'un modèle transfert de chaleur sont constituées de points dans le cas 1D, de lignes dans le cas 2D et de surfaces dans le cas 3D. Il existe quatre types de conditions aux limites dans un problème de transfert de chaleur:

1. une isolation thermique
2. une continuité
3. une température imposée
4. un flux de chaleur imposé

Le flux de chaleur traversant la frontière d'un milieu continu est donné par:

$$Q = -\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla \vec{T}) \quad (8)$$

Avec  $\vec{n}$ , la normale à la frontière,  $\lambda$ , la conduction thermique et  $\nabla$ , l'opérateur nabla (*grad*  $\vec{T}$ ).

Condition aux limites	Equation
isolation thermique	$-\vec{n}(-\lambda \nabla \vec{T}) = 0$
continuité	$-\vec{n}_1(-\lambda_1 \nabla \vec{T}_1) - \vec{n}_2(-\lambda_2 \nabla \vec{T}_2) = 0$ (les indices 1 et 2 désignent respectivement les propriétés du matériau 1 et 2 ayant la frontière en commun)
température imposée	$T = T_0$
flux de chaleur imposé	$-\vec{n}(-\lambda \nabla \vec{T}) = \underbrace{q_0}_{\text{flux de chaleur entrant}} + \underbrace{h(T_{\text{fluide}} - T)}_{\text{convection}} + \underbrace{\varepsilon \sigma (T_{\text{ambient}}^4 - T^4)}_{\text{radiation}}$

Tableau 25: Conditions aux limites dans un problème de transfert de chaleur.

Les valeurs des paramètres physiques fournis au modèle sont souvent variables en fonction du temps ou de la position dans la structure. COMSOL permet de définir ces paramètres comme des fonctions à une ou plusieurs variables. La fonction d'un paramètre variable dans le temps est définie en y associant un fichier texte contenant la série des valeurs du paramètre avec les pas de temps correspondants. Le logiciel de calcul se base sur cette table pour déterminer la valeur du paramètre à un temps donnée par interpolation linéaire ou cubique.

Les valeurs et les temps sont disposés en une seule ligne chacun et sont séparés par des espaces (Figure 69).

```
% Time
0 300 660 900 1260 1500 1920 2160 2400 2760 3000 3360 3660 3900 4260 4500 4860 5160 5400 5760 6000 6360 6660 6900 7260 7500 7860 8160 8400 8760 9000
9240 9660 9900 10260 10500 10920 11160 11400 11760 12000 12240 12660 12900 13260 13500 13740 14160 14400 14760 15000 15360 15660 15900 16260 16500
16740 17160 17400 17760 18000 18360 18660 18900 19260 19500 19860 20160 20400 20760 21000 21360 21660 21900 22260 22500 22860 23100 23400 23760
24000 24360 24600 24900 25260 25500 25860 26100 26400 26760 27000 27360 27600 27900 28260 28500 28860 29100 29400 29760 30000 30360 30600 30900
31260 31500 31860 32100 32340 32760 33000 33360 33600 33960 34260 34500 34860 35100 35460 35760 36000 36360 36600 36960 37260 37500 37860 38100
38460 38760 39000 39360 39600 39960 40260 40500 40860 41100 41460 41760 42000 42360 42600 42960 43260 43500 43860 44100 44460 44760 45000 45360
45600 45960 46260 46500 46860 47100 47460 47760 48000 48360 48600 48960 49200 49500 49860 50100 50460 50700 51000 51360 51600 51960 52200 52500
52860 53100 53460 53700 53940 54360 54600 54960 55200 55560 55860 56100 56460 56700 57060 57360 57600 57960 58200 58560 58860 59100 59460 59700
60060 60360 60600 60960 61200 61560 61800 62100 62460 62700 63060 63300 63600 63960 64200 64560 64800 65220 65460 65700 66060 66300 66660 66960
67200 67560 67800 68160 68460 68700 69060 69300 69660 69900 70200 70560 70800 71160 71400 71640 72060 72300 72660 72900 73260 73560 73800 74160
74400 74760 75060 75300 75660 75900 76260 76500 76800 77160 77400 77760 78000 78300 78660 78900 79260 79500 79740 80160 80400 80760 81000 81360
81660 81900 82260 82500 82860 83160 83400 83760 84000 84360 84600 84900 85260 85500 85860 86100

% T_top
10.1 10.1 10.1 10.0 9.9 9.9 9.7 9.6 9.5 9.3 9.1 8.9 8.8 8.7 8.5 8.4 8.2 8.0 7.9 7.6 7.5 7.2 7.0 6.9 6.6 6.3 6.1 5.9 5.7 5.5 5.3 5.1 4.9 4.7 4.5 4.3 4.1 4.0 3.9 3.6 3.5 3.3 3.2 3.1
2.9 2.9 2.8 2.6 2.5 2.4 2.3 2.2 2.1 2.0 1.9 1.8 1.7 1.7 1.6 1.5 1.4 1.3 1.3 1.2 1.1 1.0 0.9 0.9 0.8 0.8 0.7 0.6 0.6 0.5 0.5 0.4 0.4 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 0.1 0.0 0.0 -0.1 -0.1 -0.2 -
0.2 -0.2 -0.3 -0.3 -0.4 -0.4 -0.4 -0.5 -0.5 -0.5 -0.5 -0.6 -0.6 -0.7 -0.7 -0.8 -0.8 -0.8 -0.8 -0.9 -0.9 -0.9 -0.9 -1.0 -1.0 -1.0 -1.1 -1.1 -1.1 -1.2 -1.3 -1.3 -1.3 -1.4
-1.4 -1.4 -1.4 -1.5 -1.5 -1.5 -1.6 -1.6 -1.6 -1.6 -1.7 -1.7 -1.7 -1.7 -1.8 -1.8 -1.8 -1.8 -1.9 -1.9 -1.9 -1.9 -2.0 -2.0 -2.0 -2.1 -2.1 -2.1 -2.2 -2.2 -2.3 -2.3 -2.3 -2.3 -
2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.5 -2.5 -2.5 -2.5 -2.5 -2.5 -2.6 -2.6 -2.6 -2.6 -2.7 -2.7 -2.7 -2.7 -2.8 -2.8 -2.8 -2.8 -2.9 -2.9 -2.9 -3.0 -3.0 -3.0 -3.1 -3.1 -3.1 -3.2 -3.2 -3.2 -3.2 -
-0.3 -0.3 -0.2 -0.1 0.0 0.0 0.1 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.6 0.7 0.8 0.8 0.9 1.0 1.1 1.3 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 3.4 3.8 5.0 5.1 5.2 5.6 5.6 5.4 5.4 5.4
5.6 5.9 5.8 5.9 6.1 6.4 6.8 6.8 6.8 7.0 7.9 7.9 7.4 7.2 7.6 8.1 8.4 8.8 9.0 9.2 9.3 9.4 9.6 9.7 9.7 9.7 9.7 9.7 9.7 9.6 9.5 9.4 9.2 9.1 9.0 8.9 8.9 8.7 8.6 8.3 8.3
```

Figure 69: Exemple de fichier texte servant à définir un paramètre fonction du temps.

Ce format d'introduction des données est pénalisant en pratique. D'une part la structure du fichier doit être générée par des sous-routines adaptées (une étape supplémentaire lors de la copie des mesures du tableur Excel vers le logiciel de calcul), d'autre part, le nombre de couples (temps, valeur du paramètre) est limité<sup>1</sup>.

La durée retenue pour la simulation est de 24h avec un pas de calcul de 10 minutes correspondant à l'intervalle de récolte des données *in situ*. Le temps de la simulation est ainsi compris entre 0 et 86400 secondes avec un pas de 600 secondes.

Les températures, le rayonnement global et la vitesse du vent sont définis par la méthode décrite ci-dessus.

<sup>1</sup> COMSOL limite le nombre de valeurs pouvant être importées d'un fichier texte externe. Une simulation avec un pas de 10 minutes ne peut ainsi dépasser une durée totale de 36 heures environ.

#### 4.5.3.5 Conditions initiales

L'état thermique initial de la structure est défini par l'imposition du gradient thermique mesuré *in situ* au début de la simulation. Ce gradient thermique est défini par une fonction dans COMSOL basée sur un fichier texte contenant les valeurs de température en fonction de la position (profondeur) dans la structure. La procédure est similaire à celle décrite dans le paragraphe 4.5.3.4.

#### 4.5.3.6 Paramètre de résolution du problème (Solver)

La philosophie de COMSOL est de dispenser l'utilisateur de faire des considérations techniques liées aux méthodes d'analyse numérique. Le logiciel sélectionne le jeu d'équation et de méthodes de résolution adaptées. Il est néanmoins délicat de faire confiance aveuglément aux choix adoptés étant donné la complexité relative du problème à résoudre (plusieurs types de conditions aux limites, simulation en régime transitoire, risques de divergence liés au choix du pas de temps par rapport à la durée totale de la simulation, etc.)

La méthode de résolution du problème transitoire est itérative et est très sensible aux pas de calcul. L'option par défaut dans COMSOL se base sur des pas de temps déterminés librement (*free time steps*) par le « Solver » en fonction de la sensibilité du système à la variabilité des paramètres. L'imposition de pas de calcul intermédiaires (*intermediate time steps*) assure une convergence plus sûre de la solution<sup>1</sup>

### 4.5.4 Phase I: calibration du modèle sans prise en compte du vent

#### 4.5.4.1 Conduction seule

L'imposition des mesures de température comme conditions aux limites permet, comme décrit au paragraphe 4.5.2.1, de déterminer les paramètres de conduction sans se préoccuper des phénomènes de rayonnement et de convection. Cette étape de calibration a pour but de déterminer six paramètres thermiques. Il s'agit des coefficients de conduction thermique et les chaleurs massiques des trois milieux homogènes considérés.

Afin de limiter l'influence de la convection sur le comportement thermique de la structure, nous sélectionnons des journées avec un vent très faible (Tableau 26). Les journées retenues pour la calibration sont le 9.10.2006 et le 28.10.2006.

Jour	Vitesse maximale du vent (m/s)	Cas retenu pour la modélisation
12.06.2006	3	
20.06.2006	2.5	
11.07.2006	2	
23.08.2006	2.5	
25.08.2006	3	
01.09.2006	2.8	
10.09.2006	2	
29.09.2006	2.2	
30.09.2006	2.5	
09.10.2006	1.8	X
10.10.2006	2.4	
22.10.2006	1.7	
28.10.2006	1.7	X

Tableau 26: Journées avec un vent très faible.

<sup>1</sup> Des différences très significatives des résultats ont été observées pour des journées présentant un paramètre météorologique avec une forte variabilité (discontinuités marquées).

La journée du 1.6.2006 est également retenue pour la calibration dans le but de voir l'influence du vent sur la modélisation dans cette phase de la calibration (sans convection). En effet, la vitesse du vent est nulle jusqu'à 8h, varie entre 4 et 8m/s pendant le jour, avant de retomber de nouveau après 18h.

Le Tableau 27 contient l'ensemble des paramètres utilisés lors de cette première phase de calibration, les graphiques de températures correspondants sont donnés en annexe (Annexe 9.4). Seuls les cas (itérations) déterminants ont été retenus. Plusieurs simulations intermédiaires ayant servi, par tâtonnement, pour aboutir à ces cas déterminants ont été omises.

Le cas 32 contient le jeu de propriétés thermiques indicatives données dans le rapport [53]. Il s'agit du cas initial servant comme point de départ pour la procédure calibration avec imposition des températures mesurées aux frontières supérieures et inférieures de la structure.

Les cas simulés auparavant (cas 1 à 31) ont permis la mise au point de la stratégie de calibration décrite au chapitre 4.5.2, la justification du choix du modèle 1D, et la compréhension de la réponse de celui-ci à la variation des valeurs des propriétés thermiques. Ces cas ne sont pas décrits dans ce rapport.

N° du cas	Jour	Couche 3 (PA)		Couche 2 (AC)		Couche 1 (Béton)	
		$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)
32	09.10.2006	1.5	995	2.2	869	1.8	933
33	09.10.2006	1.5	995*1.3	2.2	869*1.3	1.8	933*1.3
34	09.10.2006	1.5*0.6	995*1.3	2.2*0.6	869*1.3	1.8*0.6	933*1.3
35	09.10.2006	1.5*0.35	995*0.1	2.2*0.3	869*0.4	1.8*0.3	933*0.7
35b (*)	09.10.2006	0.75	142	0.94	497	0.77	933
36	28.10.2006	0.75	142	0.94	497	0.77	933
37	01.06.2006	0.75	142	0.94	497	0.77	933

\* : Equivalent au cas 35

**Tableau 27:** Paramètres utilisés pour la calibration du modèle avec de la conduction seule.

La décision de retenir un jeu de propriétés thermiques pour une simulation se base sur trois critères qui, par ordre d'importance, sont:

1. la vitesse de variation de la température (concordance des pentes)
2. le décalage temporel de cette variation
3. les amplitudes maximales ou minimales des températures

Il est intéressant de savoir que dans un problème de conduction thermique où l'on impose une température donnée aux limites, le comportement thermique dépend uniquement des ratios entre les paramètres. En d'autres termes, tous les jeux de propriétés thermiques ( $\alpha \cdot \lambda_i$ ,  $\alpha \cdot C_i$ ), avec  $\alpha$  nombre réel quelconque, donnent des résultats de simulation identiques. Ceci veut dire que les valeurs données dans le Tableau 27 ne doivent pas être considérées comme des valeurs absolues, elles seront adaptées dans la suite de calibration par simple multiplication de tous les paramètres par un coefficient réel donnée. Par exemple, le cas 35b donne le même résultat que le cas 35 du fait que tous les paramètres ont été divisés par 0.7.

La température au début de la simulation peut s'écarter rapidement de celle mesurée. Il convient de ne pas tenir compte de ce phénomène transitoire lié plutôt à la procédure de calcul numérique et à l'hétérogénéité des couches admises homogènes du point de vue thermique.

La sonde de température située à 20mm de profondeur semble être influencée de manière excessive par la température en surface. La couche en enrobé drainant aurait pu être modélisée en deux sous-couches avec des propriétés différentes (couche supérieure plus isolante) mais la précision du calcul numérique aurait été affectée (problèmes de convergence dans le cas d'éléments finis distordus ou avec des différences

importantes dans leurs dimensions). Le plus important est de garder en tête que le but de la simulation est de restituer de manière fiable la température en surface, zone d'intérêt de la présente étude.

Le cas 35 est considéré comme très satisfaisant au regard des trois critères décrits plus haut. Le même jeu de paramètres est utilisé pour vérifier la qualité de la simulation pour les deux autres journées:

- le cas 36 pour le 28/10/06
- le cas 37 pour le 01/06/06

Les résultats sont également très satisfaisants.

#### 4.5.4.2 Conduction et rayonnement

Le but de cette étape est d'introduire l'effet du rayonnement solaire dans la simulation en partant du cas 35 (cas retenu au paragraphe 4.5.4.1). Le rayonnement global ( $R_{net}$ ) décrit au paragraphe 4.5.2.2 est appliqué comme condition aux limites sur la surface supérieure du modèle. La température mesurée est toujours imposée comme condition à la limite inférieure du modèle du fait du manque de fiabilité de la sonde Pt100 placé sous le pont. Les paramètres déterminés pour la conduction seule doivent être réajustés pour « compenser » les effets de l'introduction du rayonnement.

N° du cas	Jour	Couche 3 (PA)		Couche 2 (AC)		Couche 1 (Béton)		Conditions en surface	
		$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	Rayonnement	Coef. de convection
38	09.10.2006	0.75	142	0.94	497	0.77	933	$R_{net}$	0

Tableau 28: Paramètres utilisés pour la calibration du modèle avec de la conduction et rayonnement.

Les résultats sont représentés en annexe 9.4 (Cas 38: journée du 9.10.06). Nous observons une forte augmentation de la température pouvant atteindre 20°C en surface par rapport au cas 35. Nous concluons qu'il n'est pas judicieux d'introduire l'effet du rayonnement sans considérer celui de la convection. Les deux phénomènes se compensent pour ne pas conduire à un réchauffement ou un refroidissement excessif de la chaussée. Le coefficient de convection, comme expliqué au paragraphe 4.5.2.3, n'est pas nul pour une vitesse de vent nulle. La chaussée dissipe une bonne quantité de chaleur uniquement grâce à la convection naturelle.

#### 4.5.5 Phase II: calibration du modèle avec prise en compte de la convection

Nous commençons par sélectionner des journées avec un vent modéré (Tableau 29). La journée du 3.6.2006 qui se caractérise par un vent régulier convient bien à la procédure de calibration. Il faut néanmoins garder à l'esprit que la station de mesure du vent de « Method » est éloignée du site. Il y a de fortes chances que le vent réel soit différent en intensité et en durée, d'où le choix d'une journée avec un vent régulier sur une longue période.

Jour	Vitesse maximale du vent (m/s)	Cas retenu pour la modélisation
20.05.2006	12.2	
03.06.2006	9.6	X (Vent régulier)
01.08.2006	11	
08.09.2006	11.4	
03.10.2006	14.2	
19.12.2006	14.3	

Tableau 29: Journées avec un vent fort.

Nous appliquons au niveau de la surface supérieure un flux de chaleur imposé comprenant:

- le rayonnement global  $R_{net}$
- le coefficient de convection calculé en fonction de la vitesse du vent et de la température de l'air par l'équation de Côté et Konrad ( $h_{CK}$ ) décrite au paragraphe 4.5.2.3.

Le cas n°35 sert de base pour la procédure de calibration pour la prise en compte de l'effet du rayonnement et celui du vent. Nous retenons dans un premier temps la formule de Côté et Konrad pour le coefficient de convection, et nous affectant aux paramètres de conduction ( $\lambda_i$ ,  $C_i$ ), un coefficient  $\alpha$  du fait que cette opération ne change en rien le comportement de conduction dans la structure.

La calibration consiste à trouver le coefficient  $\alpha$  qui permet de retrouver les courbes d'évolution de la température pour les trois journées avec vent faible. Nous aboutissons à un  $\alpha$  égal à 2.4, ce qui nous permet de donner les nouveaux paramètres de conduction thermique dans le Tableau 30.

N° du cas	Jour	Couche 3 (PA)		Couche 2 (AC)		Couche 1 (Béton)		Conditions en surface	
		$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	Rayonnement	Coef. de convection
39	09.10.2006	1.8	341	2.256	1193	1.848	2239	$R_{net}$	$h_{CK}$
40	28.10.2006								
41	01.06.2006								

**Tableau 30:** Paramètres utilisés pour la calibration du modèle avec prise en compte du rayonnement et de la convection.

Les résultats de la simulation sont représentés à l'annexe 9.4. Les paramètres thermiques sont valables pour les journées avec vent faible. La simulation n°41 (1.6.2006) qui se caractérise par un vent modéré est celle qui présente le moins de concordance avec les mesures.

Nous effectuons finalement la simulation sur la journée avec vent fort (3.6.2006) pour affiner la calibration pour des vitesses de vent, et donc de coefficients de convection, beaucoup plus élevées. La formule utilisée jusqu'ici est probablement valable pour une surface dégagée avec une texture moins rugueuse que celle de l'enrobé drainant. Les parapets du pont ainsi que les glissières ont un effet non négligeable sur l'intensité du brassage de l'air à la surface de la chaussée.

Nous pouvons admettre qu'il existe une relation linéaire entre le coefficient de convection et la vitesse du vent (en accord avec la corrélation de Côté et Konrad) avec une ordonnée à l'origine non nulle. Nous multiplions donc la fonction  $h_{CK}$  par un coefficient  $\beta$ . Nous obtenons la meilleure concordance entre la simulation et les mesures pour un coefficient  $\beta$  de 0.4. Le résultat est donné à l'annexe 9.4.

La simulation avec les mêmes paramètres appliqués à la structure sur remblai donne des résultats plus que satisfaisants (Annexe 9.4, Cas 43).

#### 4.5.6 Phase III: simulation de journées avec risque de verglas

Les propriétés thermiques obtenues à la fin de la procédure de calibration (Tableau 30) sont dans les mêmes ordres de grandeur de celles données dans la littérature. Nous notons toutefois que la chaleur massique est plus faible pour le drainant (341 au lieu de 995), et plus élevée pour le béton. Ces écarts peuvent néanmoins être justifiés par le fait que ces propriétés thermiques sont la résultante de la combinaison de plusieurs sous-couches et membranes adjacentes aux matériaux modélisés (SAMI, GA, ferrailage du pont, etc.).

Le LAVOC a déterminé sur la base des paramètres mesurés (températures et état de mouillage de la chaussée) les différentes alarmes d'apparition du risque de verglas sur la chaussée. Il a sélectionné des journées particulières présentant différents types d'évènements critiques.

Une partie de ces évènements (Tableau 31) a été retenue pour faire l'objet d'une simulation avec le modèle, permettant d'étudier le comportement thermique des structures sur pont et sur remblai avec deux matériaux pour la couche de roulement: un enrobé drainant et un enrobé traditionnel (dense).

Événement	Date de début	Date de fin	Remarques
1	30.01.2007 14:00	31.01.2007 14:00	Vent faible
3	10.12.2006 05:00	10.12.2006 10:00	Alarme sur le terrain uniquement (surface pont sèche)
	10.12.2006 21:00	11.12.2006 05:00	Alarme sur le terrain et le pont
7	02.01.2007 14:00	03.01.2007 14:00	Températures proches de 0 °C sur une longue période
8	12.12.2006 15:00	13.12.2006 15:00	Déclenchement des trois types d'alarmes

Tableau 31: Evènements particuliers retenus pour la simulation thermique.

Nous retenons pour la simulation les propriétés thermiques données par la littérature qui sont assez proches de celles obtenues par calibration.

Structure	Couche 3 (PA)		Couche 2 (AC)		Couche 1 (Béton)		Conditions en surface	
	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	Rayonnement	Coefficient de convection
Drainant sur pont	1.50	995	2.50	1086	1.80	933	$R_{net}$	$h = 3 \cdot V_{vent}$
Drainant sur remblai	1.50	995	2.50	1086	1.50	1120	$R_{net}$	$h = 3 \cdot V_{vent} + 6$
Traditionnel sur pont	2.50	1086	2.50	1086	1.80	933	$R_{net}$	$h = 3 \cdot V_{vent}$
Traditionnel sur remblai	2.50	1086	2.50	1086	1.50	1120	$R_{net}$	$h = 3 \cdot V_{vent} + 6$

Tableau 32: Paramètres utilisés pour la simulation.

Pour les structures avec couche de roulement en enrobé traditionnel, les propriétés thermiques sont admises égales pour les deux couches bitumineuses. Les paramètres de conduction thermique pour la grave sont tirés de [19]. La fondation est un calcaire du Jura bien compacté. Le coefficient de conduction varie de 1.5 à 3.3W/m/K et la chaleur massique de 850 à 2200J/kg/K. Nous retenons pour la simulation une valeur courante de 1.5W/m/K pour le coefficient de conduction et 1120J/kg/K pour la chaleur massique.

La formule de la fonction du coefficient de convection est affinée avec les nouveaux paramètres thermiques retenus. Elle est donnée par:

$$- h = 3 \cdot V_{vent} \text{ pour la structure sur le pont}$$

$$- h = 3 \cdot V_{vent} + 6 \text{ pour la structure sur remblai}$$

Ces formules simplifiées sont similaires à celle de Côté et Konrad, sauf pour l'abscisse à l'origine dans le cas de la structure sur le pont.

Les événements simulés ont déjà été décrit dans le chapitre sur l'analyse d'un enrobé drainant sur pont et sur remblai (chapitre 4.3.3). Il s'agit donc d'événements réels qui se sont produits lors de la campagne de mesure.

#### 4.5.6.1 Modélisation de l'événement 1 – Nuit du 30 au 31 janvier 2007

L'événement 1 est caractérisé par une baisse de la température de l'air de 6°C à -3°C pendant la nuit. Le vent est très faible et le ciel dégagé lors d'une grande partie de la nuit. Le matin du 31 janvier, un rayonnement net plus élevé (dû au rayonnement solaire direct) fait remonter la température de l'air au-dessus de 0°C (Figure 70).

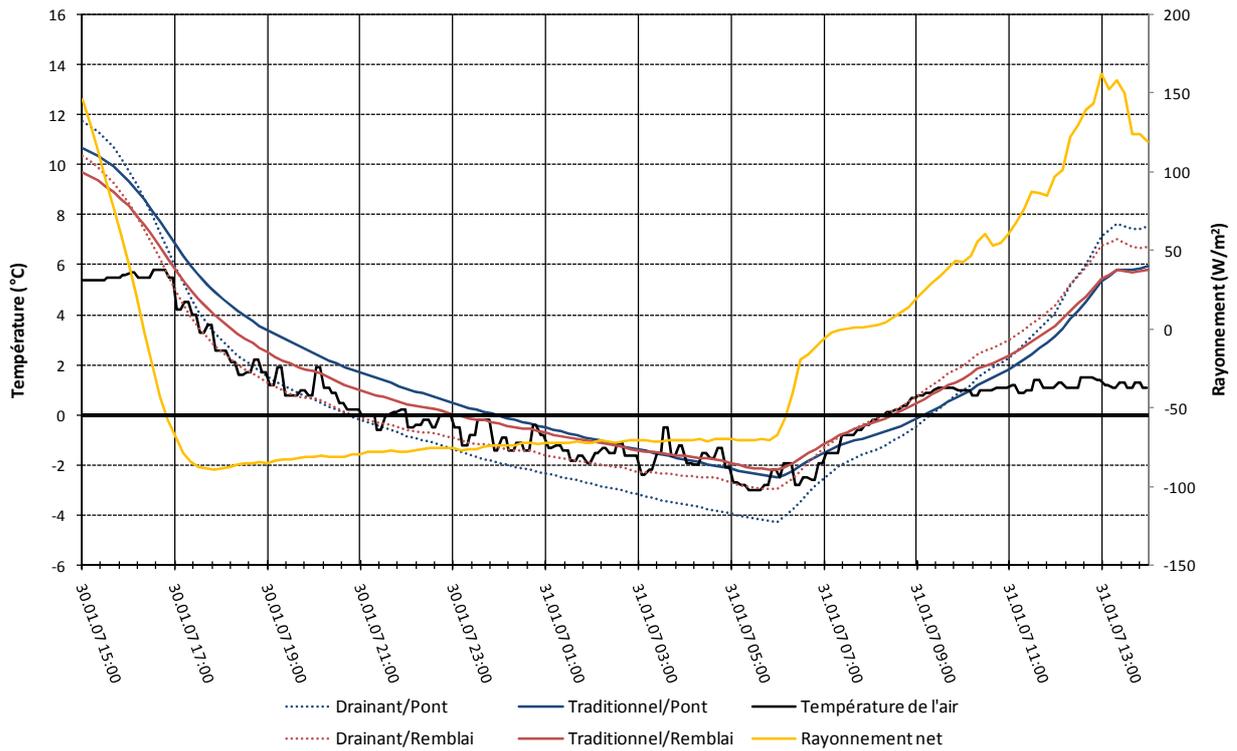


Figure 70: Modélisation de l'événement 1 – Nuit du 30 au 31 janvier 2007.

La modélisation de cet événement permet de noter les constatations suivantes:

- à 21h, la température de l'air et des deux surfaces en drainant passent l'isotherme 0°C. A ce moment, la température des surfaces traditionnelles est à 1.7°C pour le pont et 1.0°C pour le remblai
- les surfaces traditionnelles passent la barre du 0°C entre 23h et 0h
- à 6h le 31 janvier, la température de l'air remonte et à partir de 9h, la température des drainants est supérieure à celle des traditionnels
- les surfaces se refroidissent plus vite que l'air, cela étant certainement lié à la déperdition due au rayonnement terrestre de nuit
- le refroidissement/réchauffement horaire maximal (°C par heure) est le suivant:

	Air	Pont	Remblai
Drainant	-2.9 / +2.0	-4.0 / +3.1	-3.5 / +2.4
Traditionnel		-2.6 / +2.2	-2.6 / +1.9

Tableau 33: Modélisation de l'événement 1 – Refroidissement/réchauffement horaire maximal [°C/h].

Les enrobés drainants se refroidissent plus vite, mais se réchauffe aussi plus rapidement le matin

- les surfaces en drainant restent plus longtemps à des températures inférieures à 0°C que les surfaces en enrobé traditionnel:

	<b>Air</b>	<b>Pont</b>	<b>Remblai</b>
<b>Drainant</b>	600	750	680
<b>Traditionnel</b>		560	560

**Tableau 34:** Modélisation de l'événement 1 – Températures inférieures à 0°C [min].

– pour un traitement de la chaussée à une température de surface de 0°C, le temps d'intervention lorsque la température de l'air tombe en-dessous de 2°C est donné dans le Tableau 35. Un facteur de 2 différencie les enrobés drainants des enrobés traditionnels.

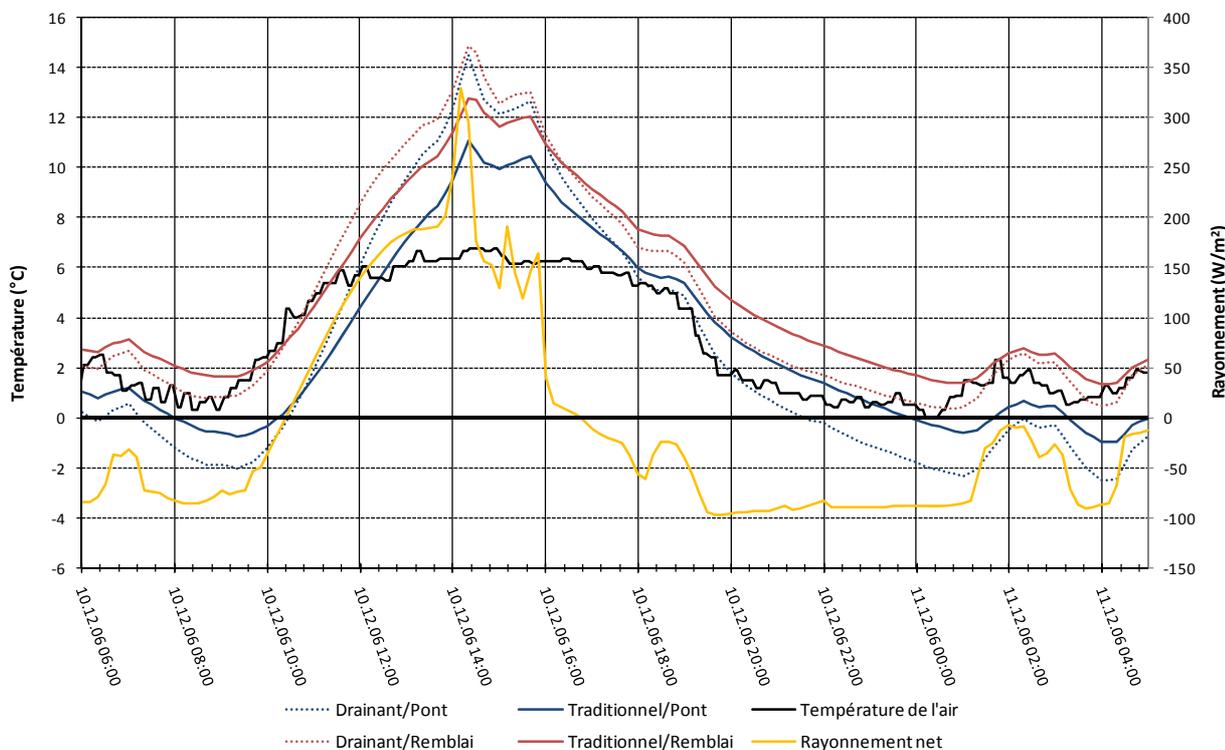
	<b>Pont</b>	<b>Remblai</b>
<b>Drainant</b>	146	156
<b>Traditionnel</b>	336	286

**Tableau 35:** Modélisation de l'événement 1 – Temps d'intervention pour un traitement à 0°C [min].

– à 6h du matin, lorsque le rayonnement solaire net augmente, les enrobés drainants réagissent plus vite à ce changement climatique et leur température de surface croît plus rapidement.

4.5.6.2 Modélisation de l'événement 3 – Journées du 10 et 11 décembre 2006

L'événement 3 est caractérisé par l'apparition de deux moments critiques, l'un se produisant le matin (10 décembre 2006) et l'autre pendant la nuit (10 au 11 décembre 2006). La température de l'air s'approche de la température de 0°C, mais celle-ci n'est finalement jamais atteinte. Le vent reste très faible lors des deux moments critiques, mais devient plus important le jour (jusqu'à 2m/s). Le ciel est dégagé lors d'une grande partie de cette période. Pendant la journée du 10 décembre un rayonnement net élevé (dû au rayonnement solaire direct) fait remonter la température de l'air jusqu'à ~6°C (Figure 71).



**Figure 71:** Modélisation de l'événement 3 – Journées du 10 et 11 décembre 2006.

La modélisation de cet événement permet de noter les constatations suivantes:

- la nuit, le pont en drainant est beaucoup plus froid que les remblais ( $\sim 3^{\circ}\text{C}$ ) mais également plus froid que le pont traditionnel ( $\sim 2^{\circ}\text{C}$ )
- les températures de surface des enrobés sur remblai ne tombent jamais en-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ , alors que les enrobés sur pont affichent des températures minimales de  $-2.5^{\circ}\text{C}$  pour le pont en drainant, respectivement  $-0.9^{\circ}\text{C}$  pour le pont en traditionnel
- le réchauffement est plus rapide sous l'effet du rayonnement solaire dès 7h, pour les surfaces en drainant
- le refroidissement/réchauffement horaire maximal ( $^{\circ}\text{C}$  par heure) est le suivant:

	Air	Pont	Remblai
Drainant	-3.3 / +2.9	-3.9 / +4.2	-3.5 / +3.6
Traditionnel		-2.4 / +3.2	-2.4 / +2.7

**Tableau 36:** Modélisation de l'événement 3 – Refroidissement et réchauffement horaire maximal [ $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ].

- la déperdition de chaleur par l'atmosphère joue un rôle très important: le ciel est couvert entre 1h et 3h du matin (rayonnement net proche de  $0\text{W}/\text{m}^2$ ) ce qui a un impact direct et conséquent sur les températures de l'air et des différentes surfaces
- les surfaces sur pont présentent des températures inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$  pendant 650min pour l'enrobé drainant, respectivement 360min pour l'enrobé traditionnel

#### 4.5.6.3 Modélisation de l'événement 7 – Nuit du 2 au 3 janvier 2007

L'événement 7 est caractérisé par une température de l'air assez constante, se situant entre 2 et  $5^{\circ}\text{C}$  pendant toute la nuit. Le vent est très instable et peut monter jusqu'à des vitesses de  $7\text{m}/\text{s}$ . Le ciel est couvert lors de la majeure partie de cette période (rayonnement net nul). Vers 11h du matin du 3 janvier, un rayonnement solaire direct conséquent (jusqu'à  $420\text{W}/\text{m}^2$ ) fait remonter la température de l'air (Figure 72).

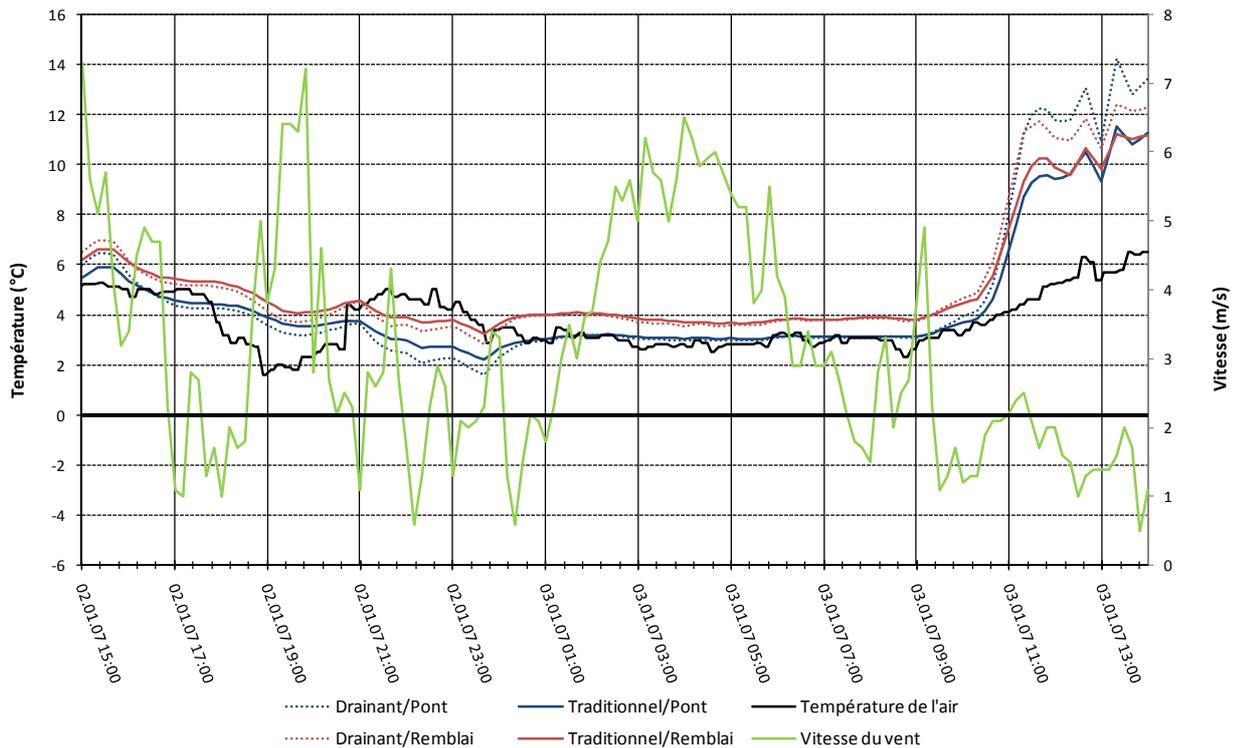


Figure 72: Modélisation de l'événement 7 – Nuit du 2 au 3 janvier 2007.

La modélisation de cet événement permet de noter les constatations suivantes:

- dans une situation stable de 0h à 10h, la température de surface du pont est proche de la température de l'air tandis que le remblai est légèrement plus chaud (~1°C)
- les températures de surface pour un enrobé donné (drainant ou traditionnel) sont très proches, que l'on considère le pont ou le remblai
- le réchauffement horaire maximal (°C par heure) lors du fort rayonnement solaire direct du matin est indiqué dans le Tableau 37. Les enrobés drainants se réchauffent beaucoup plus vite et de manière conséquente (+7.4°C en une heure pour l'enrobé drainant sur pont).

	Air	Pont	Remblai
Drainant	+2.4	+7.4	+6.4
Traditionnel		+5.1	+4.8

Tableau 37: Modélisation de l'événement 7 – Réchauffement horaire maximal [°C/h].

- le brassage de l'air dû au vent maintient la température de surface du pont proche de la température de l'air; pour le remblai, l'effet de l'échange thermique avec le sol influence sa température

#### 4.5.6.4 Modélisation de l'événement 8 – Nuit du 12 au 13 décembre 2006

L'événement 8 est caractérisé par une baisse progressive de la température de l'air pendant la nuit. Elle passe les 0°C vers 1h du matin et atteint -1°C vers 6h. Le vent reste très faible et se situe entre 0 et 1m/s pendant la nuit. Le ciel est dégagé entre 18h et 8h et le rayonnement net se trouve entre -70 et -90W/m<sup>2</sup> (Figure 73).

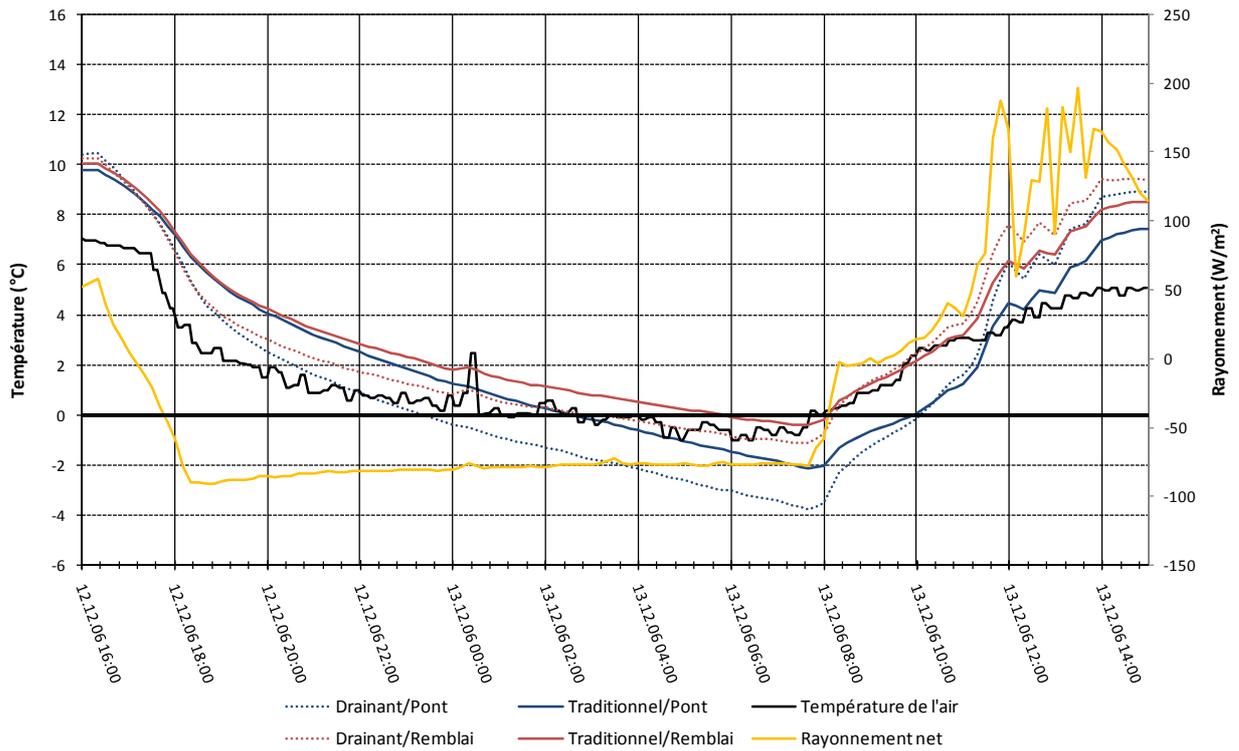


Figure 73: Modélisation de l'événement 8 – Nuit du 12 au 13 décembre 2006.

La modélisation de cet événement permet de noter les constatations suivantes:

- à 23h, la température de surface de l'enrobé drainant sur pont passe l'isotherme 0°C. A ce moment, les autres surfaces se situent entre 1.2°C (drainant sur remblai) et 2.2°C (traditionnel sur remblai)
- l'enrobé drainant sur remblai ainsi que l'enrobé traditionnel sur pont passent les 0°C vers 3h. A ce moment, l'enrobé drainant sur pont se trouve déjà à -1.8°C et l'enrobé traditionnel sur remblai est encore à 0.8°C
- l'enrobé traditionnel sur remblai passe finalement la barre du 0°C vers 6h
- à 7h40, les températures de surfaces atteignent des valeurs minimales (Tableau 38)

	Pont	Remblai
Drainant	-3.8	-1.1
Traditionnel	-2.1	-0.4

Tableau 38: Modélisation de l'événement 8 – Température minimale [°C].

- le refroidissement/réchauffement horaire maximal (°C par heure) est le suivant:

	Air	Pont	Remblai
Drainant	-3.6 / +1.8	-3.3 / +4.5	-3.2 / +4.0
Traditionnel		-2.3 / +3.2	-2.4 / +2.9

Tableau 39: Modélisation de l'événement 8 – Refroidissement et réchauffement horaire maximal [°C/h].

- les surfaces en drainant restent plus longtemps à des températures inférieures à 0°C que les surfaces en enrobé traditionnel:

	Air	Pont	Remblai
Drainant	282	650	330
Traditionnel		440	130

**Tableau 40:** Modélisation de l'événement 8 – Températures inférieures à 0°C [min].

- pour un traitement de la chaussée à une température de surface de 0°C, le temps d'intervention lorsque la température de l'air tombe en-dessous de 2°C est donné dans le Tableau 35. Un facteur de 3 différencie les enrobés drainants sur pont des enrobés traditionnels sur remblai:

	Pont	Remblai
Drainant	218	428
Traditionnel	418	618

**Tableau 41:** Modélisation de l'événement 8 – Temps d'intervention pour un traitement à 0°C [min].

- le rayonnement global est extrême pendant la nuit ce qui provoque un refroidissement important des ouvrages dont la couche de surface est isolante. D'autre part, la texture de l'enrobé drainant fait que la surface en contact avec l'air est plus importante que pour l'enrobé traditionnel et donc la déperdition est plus grande
- à partir de 8h, la température de l'air remonte, due à un rayonnement solaire direct moyen, et les surfaces en drainant se réchauffent plus vite que les surfaces en traditionnel

#### 4.5.6.5 Analyse de deux événements extrêmes

L'analyse des données météorologiques récoltées sur le site d'essais permet de définir des situations extrêmes d'un point de vue du rayonnement net, du vent ainsi que des températures de l'air. Les cas extrêmes observés lors des deux hivers sont les suivants:

- le rayonnement net varie entre -120W/m<sup>2</sup> et 790W/m<sup>2</sup>
- la diminution horaire maximale de la température de l'air est d'environ 4°C pour des températures hivernales proches de 0°C

A ce stade, deux cas extrêmes de comportement ont donc été modélisés pour expliciter le risque probable lors d'un refroidissement extrême. Les conditions météorologiques défavorables choisies sont les suivantes:

- un vent nul
- un ciel bien dégagé pour produire un rayonnement terrestre maximum (déperdition importante de la chaleur de la chaussée)
- un rayonnement solaire nul
- la température de l'air et la température initiale dans la structure sont pour le premier cas reprises des mesures d'une journée réelle (événement 1 – nuit du 30 au 31 janvier 2007), et pour le deuxième cas une diminution maximale de la température est choisie (-4°C/h)

La considération d'un ciel dégagé sans rayonnement solaire est simulée par un rayonnement net constant de -100W/m<sup>2</sup> appliqué à la surface supérieure de la chaussée.

Le premier événement extrême (Figure 74) reprend donc les températures de l'air de l'événement 1, modélisé dans le chapitre 4.5.6.1.

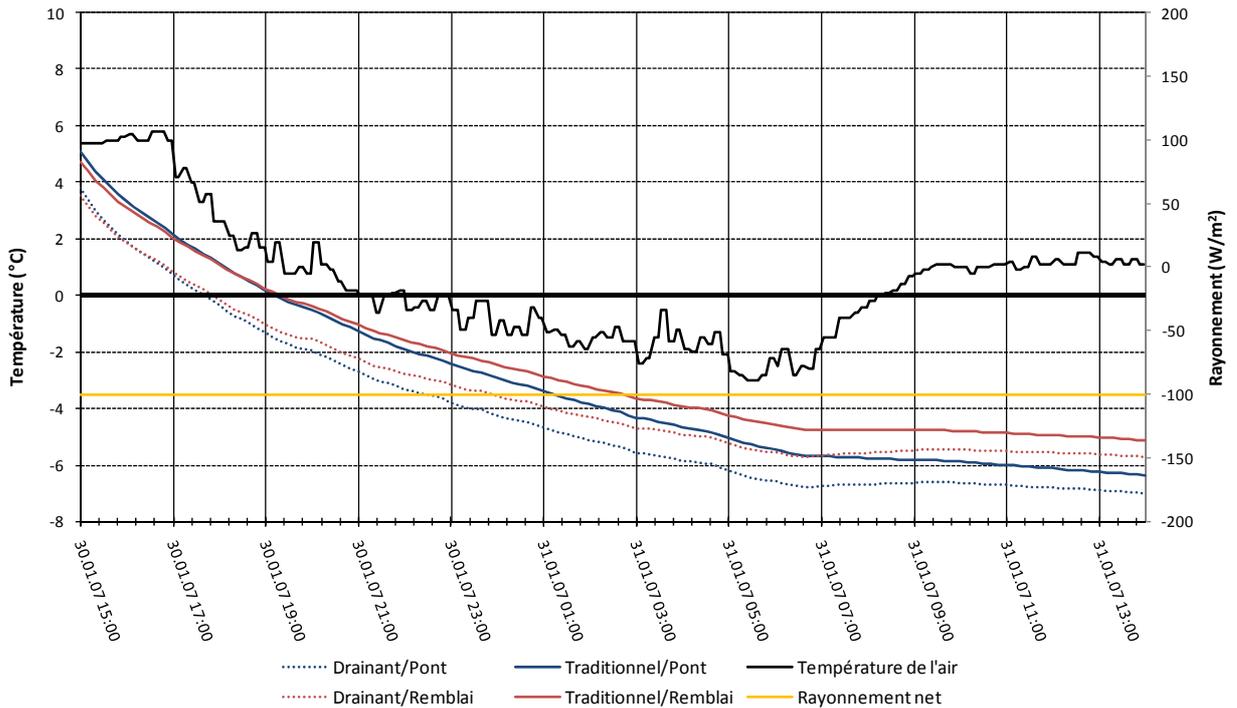


Figure 74: Modélisation du premier cas extrême.

Des constatations similaires que pour le cas réel peuvent être faites:

- à 18h, la température de surface des deux enrobés drainants passe l'isotherme 0°C. A ce moment, la température des surfaces traditionnelles est à 1.3°C
- les surfaces traditionnelles passent la barre des 0°C à 19h20
- à 7h, alors que la température de l'air remonte, la température de l'enrobé drainant sur remblai est supérieure à celle de l'enrobé traditionnel sur pont. A ce moment les températures sont les suivantes: - 6.8°C pour le drainant sur pont; -5.7°C pour le drainant sur remblai et le traditionnel sur pont; -4.8°C pour le traditionnel sur remblai
- la remontée de la température de l'air à partir de 7h a pour conséquence que les températures de surface restent constantes
- le temps écoulé entre le moment où le premier enrobé passe la barre des 0°C et le moment où les autres enrobés passent cette barre, est le suivant:

	Pont	Remblai
<b>Drainant</b>	-	10
<b>Traditionnel</b>	90	90

Tableau 42: Cas extrême 1 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de 0°C et les autres [min].

- le temps écoulé entre le moment où le premier enrobé passe la barre des -4°C et le moment où les autres enrobés passent cette barre, est le suivant:

	Pont	Remblai
Drainant	-	90
Traditionnel	170	280

Tableau 43: Cas extrême 1 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de -4°C et les autres [min].

Le deuxième cas extrême (Figure 75) applique des conditions météorologiques encore plus extrêmes. Le rayonnement net est de -100W/m<sup>2</sup>, le vent est nul et la température tombe de 10°C à -6°C en 4 heures (diminution de -4°C par heure).

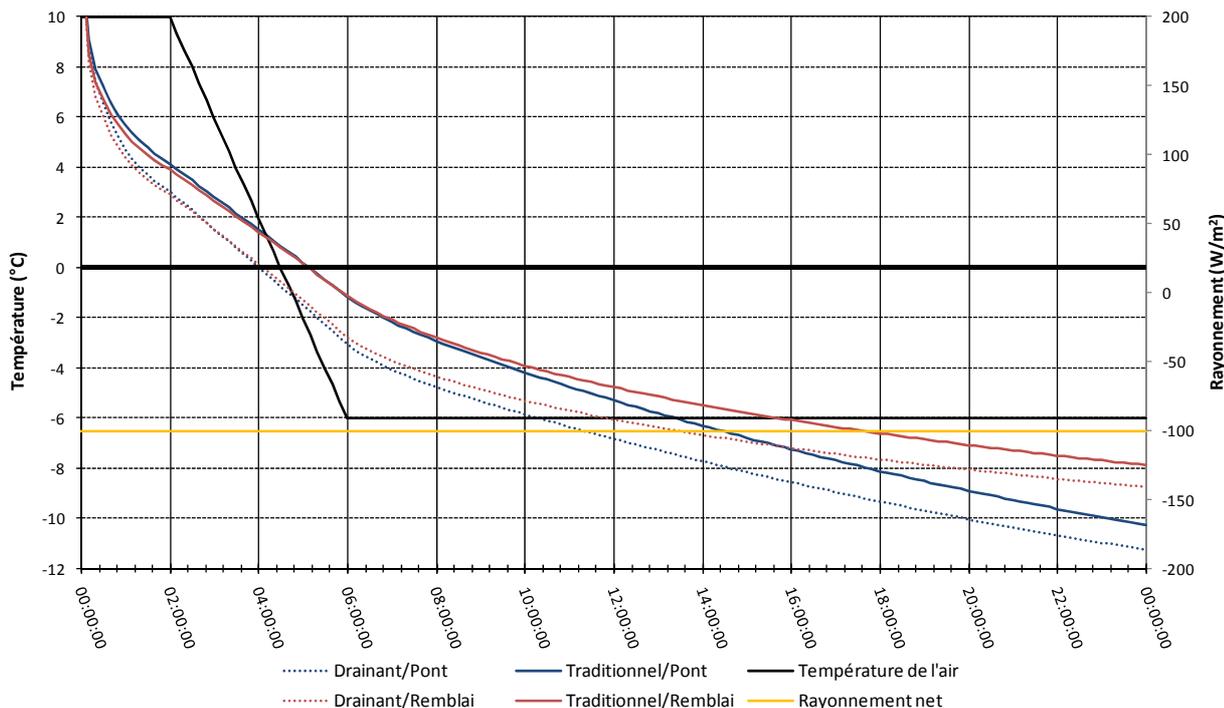


Figure 75: Modélisation du deuxième cas extrême.

La modélisation de cet événement permet de noter les constatations suivantes:

- 2 heures après le début de la modélisation, la température de l'air est toujours à 10°C alors que les températures de surface des enrobés se trouvent déjà à 3°C pour les drainants et à 4°C pour les traditionnels. Cette chute de température est due aux conditions météorologiques particulièrement défavorables
- 4 heures après le début de la modélisation, la température de surface des deux enrobés drainants passe l'isotherme 0°C. A ce moment, la température des surfaces traditionnelles est à 1.3°C
- les surfaces traditionnelles passent la barre des 0°C 5h et 20min après le début de la modélisation
- le temps écoulé entre le moment où le premier enrobé passe la barre des 0°C et le moment où les autres enrobés passent cette barre, est le suivant:

	Pont	Remblai
Drainant	-	-
Traditionnel	70	60

Tableau 44: Cas extrême 2 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de 0°C et les autres [min].

- le comportement d'un enrobé lors de la chute de la température de l'air est très similaire que l'on se trouve sur remblai ou sur pont. Ce n'est qu'après avoir atteint des températures de surfaces très basses (-3 à -4°C) que le comportement des deux cas se différencie et que le pont se refroidit plus rapidement
- lorsque la température atteint sa valeur minimale de -6°C 6h après le début de la modélisation, les températures de surface des enrobés drainants se situe autour de -3° alors que celle des enrobés traditionnels est de -1°C. Les températures de surface des enrobés n'arrivent pas à suivre la chute abrupte de la température de l'air
- les enrobés drainants réagissent plus vite au changement de température de l'air lorsque celle-ci arrête de baisser
- le temps écoulé entre le moment où le premier enrobé passe la barre des -6°C et le moment où les autres enrobés passent cette barre, est le suivant:

	Pont	Remblai
Drainant	-	90
Traditionnel	180	320

**Tableau 45:** Cas extrême 2 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de -6°C et les autres [min].

La température de l'air atteint les -6°C 270 minutes avant que ce soit le cas pour l'enrobé drainant sur pont

- les températures de surface continuent à baisser même à température de l'air constante. 24h après le début de la modélisation, les différences de températures entre les enrobés drainants et traditionnels n'est plus que de 1°C, alors que cette différence atteignait 2°C après 6h de modélisation

#### 4.5.7 Conclusion de l'analyse de simulation

L'exploitation des mesures récoltées au niveau de la Station sur l'Arnon a été facilitée par la mise au point d'une base de données MS Access regroupant l'ensemble des mesures fournies par quatre types d'enregistreurs (Dataloggers MADD et Campbell Scientific, station Boschung et station ENET de Method). L'interrogation de cette base de données à partir de MS Excel a permis d'identifier rapidement des journées intéressantes pour la calibration du modèle de calcul par éléments finis.

Le logiciel COMSOL est utilisé avec succès pour réaliser les simulations du comportement thermique des structures routières sur pont et en remblai. Un modèle par éléments finis 2D est mis au point sur la base des coupes transversales des structures sur le pont et sur le remblai. L'équivalence des résultats entre les modèles 1D et 2D a justifié le recours dans la suite des calculs au modèle 1D pour réduire les temps de calcul et de traitement et simplifier la procédure de calibration.

Les avantages du logiciel COMSOL résident essentiellement dans son aptitude à simplifier pour l'utilisateur certains aspects du calcul numérique en choisissant les méthodes de formulation et de résolution les plus adaptées au phénomène simulé. La possibilité de définir les propriétés thermiques du problème par un interpréteur de d'expression permet d'exploiter toutes les variables ou fonctions importées d'un fichier externe ou calculées pendant la simulation (exemple du coefficient de convection fonction de la vitesse du vent et de la température ambiante).

Il existe néanmoins quelques limitations qui ne peuvent être contournées qu'au bout d'un effort de mise en forme des données et de programmation qui aurait pu être pris en charge par le logiciel. Il s'agit notamment de la fonction d'importation de données externes qui est limitée en taille, ou encore les outils permettant une manipulation plus pointues du type de maillage.

Une procédure de calibration est mise au point pour déterminer progressivement les paramètres thermiques des matériaux et des interfaces. Les résultats des modèles construits sont très satisfaisants compte tenu des diverses simplifications sur la géométrie ou l'indisponibilité de certains paramètres météorologiques.

Les paramètres obtenus par la calibration ne sont pas très éloignés de ceux proposés dans la littérature. D'autres améliorations peuvent être apportées au modèle par la prise en compte de données plus fiables, notamment, une mesure *in situ* du vent et des mesures de températures plus fiables (Sonde Boschung sous le pont).

Les événements particuliers sélectionnés ont été simulés pour les structures existantes et les structures non disponibles (enrobé traditionnel sur le pont et sur le remblai). Des constatations générales sur la température en surface peuvent être décrites:

1. Quelque soit le matériau de la couche de roulement (drainant ou traditionnel), la température en surface sur le pont est systématiquement inférieure à la température en surface sur le remblai pour des températures de l'air basses ( $<0^{\circ}\text{C}$ ).
2. Sur le pont, et en cas de refroidissement rapide de la chaussée, la température en surface de l'enrobé drainant est inférieure par rapport à la température en surface de l'enrobé traditionnel (jusqu'à  $2^{\circ}\text{C}$ ).
3. La pente de la variation de la température à la surface de l'enrobé drainant est plus importante lors du refroidissement et du réchauffement de la chaussée. La surface du drainant se refroidit puis se réchauffe plus vite que la surface de l'enrobé traditionnel.
4. Les températures en surface des enrobés drainants et traditionnels sont proches dans le cas:
  - a. d'un brassage important de l'air en contact avec la chaussée (vent fort ou trafic)
  - b. d'évènements de froid prolongé

L'étude de cas extrêmes apporte des constatations similaires que pour les cas réels avec une différence de température entre drainant/traditionnel moins marquée (environ  $1$  à  $2^{\circ}\text{C}$ ).

D'autres utilisations du modèle peuvent être envisagées, comme la simulation d'un gel de l'eau au sein du drainant, ou encore la diffusion de la température dans la chaussée et son exploitation pour des mesures de calcul inverse.

#### 4.6 CONCLUSION DE L'ETUDE DU COMPORTEMENT HIVERNAL

Le site du pont sur l'Arnon sur l'autoroute A5 a permis de comparer le comportement hivernal d'un enrobé drainant sur pont avec celui d'un enrobé drainant sur remblai. L'analyse des mesures provenant d'une multitude de capteurs a montré qu'un enrobé drainant sur pont se comporte différemment par rapport au même enrobé posé sur remblai, mais que cette différence est très faible et ne permet pas de différencier clairement le comportement sur pont de celui sur remblai.

Le site du pont sur la Lizerne à proximité d'Ardon sur l'autoroute A9 a permis de comparer le comportement hivernal d'un enrobé traditionnel sur remblai avec celui d'un enrobé drainant sur remblai. Cette comparaison a amené plusieurs observations, telles la susceptibilité thermique plus élevée pour l'enrobé drainant, propriété qui peut être avantageuse lors de l'augmentation de la température de l'air (le drainant se réchauffe plus rapidement) ou défavorable lors de sa diminution (le drainant se refroidit plus rapidement).

L'utilisation d'un outil de modélisation a permis de comparer entre eux les comportements hivernaux des quatre cas suivants:

- enrobé traditionnel sur remblai
- enrobé traditionnel sur pont
- enrobé drainant sur remblai
- enrobé drainant sur pont

Cette comparaison indique des comportements différents selon le cas observé avec des enrobés drainants plus susceptibles aux variations de température de l'air et des enrobés sur pont sujets à des températures de surface plus basses que les enrobés sur remblai pour des températures de l'air faibles ( $<0^{\circ}\text{C}$ ). Néanmoins, certaines situations ont montré que les températures de surface des enrobés peuvent être très proches lors

---

d'événements particuliers (vent fort, froid prolongé), que ce soit pour le cas des enrobés sur pont ou sur remblai.

De même l'influence des conditions météorologiques extérieures a pu être analysée grâce à certains cas extrêmes. On constate par exemple qu'un ciel dégagé, un vent nul et une chute rapide de la température de l'air est très dangereux pour le comportement des enrobés.



## 5 CONCLUSIONS GENERALES

Le comportement des enrobés drainants sur les ouvrages d'art vis-à-vis de l'écoulement de l'eau et de l'entretien hivernal n'est à ce jour pas résolu. Une recherche pour tenter de résoudre le manque de connaissances a été menée, en particulier par la réalisation, le suivi et l'analyse détaillée d'une planche d'essai.

Tout d'abord un questionnaire a été envoyé aux administrations cantonales au niveau suisse et internationales (membres de l'AIPCR) pour récolter des expériences concrètes et établir un état des connaissances. Le dépouillement des réponses a révélé plusieurs phénomènes. En cas de pluie, les avantages d'un enrobé drainant sur pont sont semblables à ceux d'un enrobé drainant hors pont, c'est-à-dire une meilleure adhérence, une diminution du risque d'aquaplaning, l'absence de projections d'eau, une visibilité nocturne accrue, etc. Les inconvénients d'un tel enrobé se rencontrent principalement en période hivernale, comme l'apparition précoce de verglas, le givrage plus fréquent, les températures de surfaces inférieures, un enneigement plus marqué, une sensibilité thermique plus prononcée, des traitements hivernaux plus complexes, etc. En général, le risque d'aquaplaning d'un enrobé drainant sur pont est considéré comme étant inférieur à celui d'un enrobé traditionnel, tandis que le comportement hivernal est jugé moins bon que celui d'un enrobé traditionnel, mais maîtrisable moyennant un service hivernal adapté.

Concernant l'accidentologie avant et après la mise en place d'un enrobé drainant, les données statistiques utilisées sont peu nombreuses pour une évaluation objective du risque. On constate que lors de périodes hivernales des accidents ont lieu aussi bien sur un revêtement drainant que traditionnel. Il n'y a pas d'accroissement notable lors du remplacement d'un enrobé traditionnel par un enrobé drainant. Par contre en période de pluie, une diminution du nombre d'accidents sur enrobé drainant a été constatée par rapport à un enrobé traditionnel.

En ce qui concerne l'analyse de l'écoulement des eaux de surface sur un ouvrage d'art en enrobé drainant, il a été observé que la perméabilité du revêtement drainant varie sensiblement en fonction de la position latérale de mesure sur la chaussée mais que les valeurs absolues de perméabilité sont globalement satisfaisantes et n'affectent pas la qualité drainante de la structure. Il a également été constaté que le film d'eau en surface disparaît très vite après l'arrêt de la précipitation, mais que la vidange du stock d'eau est plus lente, une fois ce film d'eau résorbé. Au droit du joint de transition du pont, l'écoulement de l'eau se fait par des orifices et des stagnations et/ou des résurgences qui étaient attendues en amont du joint n'ont pas été observées.

L'analyse du comportement hivernal d'un ouvrage d'art en enrobé drainant s'est déroulée en trois étapes:

- comparaison du comportement entre un enrobé drainant sur pont et sur remblai sur l'autoroute A5 dans le canton de Vaud près du cours d'eau de l'Arnon
- comparaison des profils thermiques entre un enrobé traditionnel et drainant sur remblais sur l'autoroute A9 en Valais à proximité du village d'Ardon
- comparaison générale entre des enrobés drainants et traditionnels sur pont et sur remblai à l'aide d'un outil de simulation

Au cours de l'étape 1, des données de mesure provenant d'une multitude de capteurs installés sur l'autoroute A5 ont été analysées. L'évaluation complète a montré qu'un enrobé drainant sur pont se comporte différemment d'un enrobé identique posé sur remblai, mais que cette différence reste très faible.

La deuxième étape consistait à analyser des données de mesure provenant de capteurs installés sur l'autoroute A9. Plusieurs phénomènes ont pu être observés, tels que la susceptibilité thermique plus élevée de l'enrobé drainant. Cette propriété peut être avantageuse lors de l'augmentation de la température de l'air (le drainant se réchauffe plus rapidement) ou défavorable lors de sa diminution (le drainant se refroidit plus rapidement).

La troisième étape a fait le lien entre les deux enrobés (drainant et traditionnel) et les deux situations de pose (sur pont et sur remblai). L'utilisation d'un outil de modélisation a permis de comparer entre eux les

comportements hivernaux de ces quatre cas. Cette comparaison a montré des comportements différents selon le cas observé, notamment que:

- les enrobés drainants sont plus susceptibles aux variations de la température de l'air, ce qui se traduit par des vitesses de refroidissement ou de réchauffement plus élevées
- lors de périodes froides (température de l'air  $<0^{\circ}\text{C}$ ), les températures de surface sont plus faibles sur pont que sur remblai, et ceci aussi bien pour les enrobés drainants que pour les traditionnels
- dans certaines situations spécifiques (vent fort, froid prolongé), les températures de surface des enrobés drainant et traditionnel sont très proches que ce soit sur pont ou sur remblai
- certaines conditions météorologiques particulières (vent nul, ciel dégagé et rayonnement solaire direct nul, chute rapide de la température de l'air) impliquent un risque accru pour les enrobés drainants, mais il est également constaté que ce même risque existe pour les enrobés traditionnels

Finalement il n'a pas été constaté de comportement hivernal qui distingue nettement la situation d'un enrobé drainant avec un enrobé traditionnel. Sous certaines conditions l'un ou l'autre peut évoluer vers un risque hivernal. De plus la différence entre un pont et un remblai est également constatée avec un enrobé drainant, sans être quantitativement plus importante. Le pont reste plus sensible aux conditions météorologiques que le remblai mais l'enrobé drainant n'accroît pas cette problématique.

## 5.1 PROPOSITIONS PRATIQUES POUR L'APPLICATION D'UN ENROBE DRAINANT SUR OUVRAGE D'ART

L'expérience des gestionnaires de route a montré que les enrobés drainants présentent un comportement particulier lors des périodes hivernales. Sur une année, un revêtement drainant est susceptible de présenter quelques jours seulement pendant lesquels son comportement hivernal peut être problématique. Il s'agit dans ces cas-là de procéder à une maintenance hivernale adaptée en agissant ponctuellement au plus tôt par des interventions de salage répétées sans surdosage en sel. Il pourrait dans certains cas être judicieux d'étudier la possibilité de mettre en place une installation automatique de déverglaçage, et tout particulièrement sur les ponts en enrobé drainant. Il est conseillé d'éviter de mettre en place un revêtement drainant sur les chaussées dont le tracé est en courbe/pente prononcée, où les forces tangentielles/longitudinales peuvent être importantes. Il est également conseillé de ne pas appliquer un revêtement drainant dans les endroits où les chaînes à neige sont susceptibles d'être utilisées car il en découle une dégradation instantanée du revêtement et la perte des capacités acoustiques de l'enrobé.

Du point de vue de la capacité drainante du revêtement, les mesures de perméabilité et les simulations de pluies ont montré la nécessité de porter une attention spéciale à l'homogénéité de pose du revêtement drainant durant sa mise en place sur toute la longueur de la chaussée. La zone au voisinage des joints de dilatation du pont doit être traitée méticuleusement afin d'éviter un compactage différent du revêtement et des risques postérieurs de résurgences d'eau. Les orifices aménagés dans le joint de dilatation du pont sont efficaces.

Le principe de limitation de l'utilisation des enrobés drainants en altitude au-dessus de 600m (SN 640 433a) est à respecter.

## 5.2 PROPOSITIONS POUR L'ADAPTATION DES NORMES

Dans les normes qui mentionnent les revêtements en enrobé drainant devraient figurer les précautions à prendre pour l'écoulement de l'eau au droit des joints de dilation d'un pont.

Les normes suisses ne donnent pas de prescriptions spécifiques concernant les traitements hivernaux à effectuer en fonction du revêtement mis en place. Les diverses situations d'alarmes telles qu'elles sont utilisées dans la pratique n'y sont pas détaillées.

L'analyse de l'évolution des températures de surface lors des divers événements hivernaux fournit des informations précieuses pour le développement de schémas de traitement, notamment les temps d'intervention limites.

### 5.3 PROPOSITIONS POUR DES RECHERCHES ULTERIEURES

La recherche effectuée dans le présent rapport a fourni une base importante dans le domaine de l'analyse du comportement hivernal sur deux hivers, de l'écoulement des eaux sur deux mesures ponctuelles et de l'accidentologie sur 10 ans avant et après la mise en place d'un revêtement drainant. Il serait intéressant d'étudier ces trois paramètres sur de plus longues périodes, de telle manière à disposer d'un échantillon plus important de données, en considérant par exemple toute la durée de vie du revêtement.

En analysant les données, la question s'est posée de savoir si les capteurs à la surface du revêtement étaient suffisamment représentatifs de l'état réel de la chaussée. En effet, on juge l'état global de la chaussée en ne considérant qu'un point de mesure ponctuel situé au centre de la voie de dépassement, ce qui peut biaiser l'appréciation de l'état de la surface. Les capteurs utilisés dans cette étude ont été ceux employés dans les revêtements traditionnels. Il se peut que certaines mesures ne soient pas relevées de manière objective, notamment la mesure de l'épaisseur du film d'eau, car celle-ci ne stagne en principe pas à la surface de la chaussée poreuse. Cette incertitude peut mener à une interprétation des situations d'alarme pouvant être peu représentative des conditions réelles de surface. De plus, une recherche sur les définitions, précisions et valeurs limites des alarmes apporterait une meilleure efficacité du service hivernal.



## 6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Verhalten von offenporigem Asphalt auf Brücken in Bezug auf den Wasserabfluss und den Winterdienst ist bis heute unklar. Mit der vorliegenden Forschungsarbeit wurde versucht, den Kenntnismangel zu verkleinern, insbesondere durch die Realisierung, die Beobachtung und die detaillierte Analyse einer Versuchsfläche.

Zunächst ist ein Fragebogen an die internationalen (AIPCR-Mitglieder) und die kantonalen Verwaltungen gesendet worden, um konkrete Erfahrungen zu sammeln und den heutigen Kenntnisstand zusammenzustellen. Die Antworten haben mehrere Phänomene zu Tage gebracht. Bei Regen sind die Vorteile eines offenporigen Asphalts auf Brücken jenen des offenporigen Asphalts auf offener Strecke ähnlich (bessere Griffigkeit, Senkung des Aquaplaningsrisiko, kein Sprühnebel, verbesserte Nachtsichtbarkeit usw). Nachteile dieses Asphaltmischguts sind besonders in der Winterzeit in Form von rascherer Glatteisbildung, häufigerem Reifaufkommen, niedrigeren Oberflächentemperaturen, grösseren Schneehöhen, stärkerer thermischen Empfindlichkeit und komplexerem Winterdienst zu beobachten. Im Allgemeinen ist das Aquaplaningrisiko auf einem offenporigen Asphalt auf Brücken niedriger als jenes auf einem traditionellen Asphaltmischgut, während das winterliche Verhalten demjenigen eines traditionellen Asphaltmischguts unterlegen ist. Dies kann aber mittels eines angepassten Winterdienstes in den Griff bekommen werden.

Was die Unfälle vor und nach der Einführung eines offenporigen Asphalts betrifft, sind die zur Verfügung stehenden statistischen Daten für eine objektive Risikobewertung ungenügend. Trotzdem stellt man fest, dass während der Winterzeit Unfälle sowohl auf offenporiger als auch auf traditioneller Asphaltdeckschicht stattfinden und es keine wesentliche Unfallzunahme beim Austausch eines traditionellen Asphaltmischguts durch offenporigen Asphalt gibt. Bei Regen ist hingegen eine Senkung der Unfallzahlen auf offenporigem Asphalt gegenüber dem traditionellen Asphaltmischgut feststellbar.

Bezüglich des Wasserabflusses auf der offenporigen Asphaltoberfläche auf Brücken ist beobachtet worden, dass die Durchlässigkeit des offenporigen Asphalts merklich von der Messposition auf der Fahrbahn abhängig ist. Die Durchlässigkeitswerte sind aber insgesamt zufriedenstellend und die dränierende Funktion der Struktur bleibt erhalten. Es ist ebenfalls festgestellt worden, dass der Wasserfilm auf der Oberfläche nach Niederschlagsende zwar sehr schnell verschwindet, der Wasserabfluss danach aber langsamer ist. Bei den Fugen der Brücke fliesst das Wasser durch die Entwässerung ab, Stagnation und das erwartete Hervorquellen des Wassers konnten nicht beobachtet werden.

Das winterliche Verhalten einer Brücke mit offenporigem Asphalt wurde in drei Etappen analysiert:

- Vergleich des Verhaltens von offenporigem Asphalt auf einer Brücke und auf einer Erdaufschüttung der Autobahn A5 im Kanton Waadt, nahe beim Bach "Arnon",
- Vergleich der Thermoprofile eines traditionellen Asphaltmischguts und eines offenporigen Asphalts auf einer Erdaufschüttung der Autobahn A9 im Wallis bei Ardon,
- allgemeiner Vergleich zwischen offenporigen und traditionellen Asphalten auf Brücken und Erdaufschüttungen mit Hilfe einer Computersimulation.

Im Laufe der ersten Etappe sind Messdaten analysiert worden, die von mehreren auf der Autobahn A5 installierten Messgeräten stammen. Die Analyse zeigte, dass sich der offenporige Asphalt auf der Brücke leicht anders als das identische Asphaltmischgut auf der Erdaufschüttung verhält.

In der zweiten Etappe wurden die Messdaten analysiert, die von auf der Autobahn A9 installierten Messgeräten stammen. Mehrere Phänomene konnten beobachtet werden. Besonders zu bemerken ist die höhere thermische Empfindlichkeit des offenporigen Asphalts. Diese Eigenschaft ist beim Anstieg der Lufttemperatur vorteilhaft (der offenporige Asphalt erwärmt sich schneller), bei der Abkühlung des Asphalts hingegen wirkt sich dies nachteilig aus (der offenporige Asphalt kühlt sich schneller ab).

In der dritten Etappe wurden beide Mischguttypen (offenporig und traditionell) sowie beide Einbausituationen (auf Brücke oder Erdaufschüttung) mittels einer Computersimulation für das winterliche Verhalten dieser vier Fälle untereinander verglichen. Aufgrund dieses Vergleichs wurden folgende Unterschiede festgestellt:

- gegenüber Veränderungen der Lufttemperatur sind offenporige Asphalte empfindlicher, was sich in einer höheren Abkühl- bzw. Erwärmungsgeschwindigkeit äussert.
- bei Kälteperioden (Lufttemperatur  $<0^{\circ}\text{C}$ ) sind die Oberflächentemperaturen auf der Brücke tiefer als auf der Erdaufschüttung. Dies gilt sowohl für offenporige Asphalte als auch für Traditionelle.
- in bestimmten Situationen (starker Wind, längere Kälteperioden), sind die Oberflächentemperaturen der offenporigen und traditionellen Asphalte sehr ähnlich, sei es auf der Brücke oder auf der Erdaufschüttung.
- besondere Wetterbedingungen (kein Wind, wolkenfreier Himmel und keine direkte Sonneneinstrahlung, schneller Fall der Lufttemperatur) haben ein erhöhtes Risiko für offenporige Asphalte zur Folge. Allerdings konnte ebenfalls festgestellt werden, dass für traditionelle Asphaltmischgute dasselbe Risiko besteht.

Schliesslich unterscheidet sich das Verhalten von offenporigem und traditionellem Asphalt bei winterlichen Bedingungen nur wenig. Unter bestimmten Bedingungen kann der eine oder andere Asphalt eine erhöhte Glättegefahr aufweisen. Ausserdem wurden beim offenporigen Asphalt nur geringfügige Unterschiede zwischen Brücke und Erdaufschüttung festgestellt. Im Brückenbereich wurde eine sensiblere Reaktion auf Wetterbedingungen festgestellt als im Bereich des Damms, aber ein offenporiger Asphalt verstärkt dieses Phänomen nicht.

## 6.1 PRAKTISCHE EMPFEHLUNGEN FÜR DEN EINBAU EINES OFFENPORIGEN ASPHALTS AUF EINER BRÜCKE

Die Erfahrung der Strassenverwalter hat gezeigt, dass offenporige Asphalte ein besonderes Verhalten bei winterlichen Bedingungen an den Tag legen. Über das Jahr gesehen ist das winterliche Verhalten einer offenporigen Deckschicht nur während einiger wenigen Tage problematisch. In solchen Fällen muss der Winterdienst angepasst werden, indem man punktuell so früh als möglich wiederholt Taumittel ohne Überdosierung streut. Es könnte in bestimmten Fällen angebracht sein, den Einbau einer automatischen Taumittelsprühanlage zu prüfen, ganz besonders auf Brücken mit offenporigem Asphalt. Es ist nicht ratsam, einen offenporigen Asphalt dort einzubauen, wo die Streckenführung starke Kurven und Gefälle aufweist und damit die Tangential-/Längskräfte stark sein können. Es wird ebenfalls geraten, keine offenporigen Asphalte einzubauen, wenn Schneeketten benutzt werden können, denn diese zerstören die Deckschicht rasch und führen zu einem Verlust der lärmabsorbierenden Wirkung des Mischguts.

Was die dränierenden Eigenschaften der Deckschicht betrifft, haben die Durchlässigkeitsmessungen und die Regensimulationen die Notwendigkeit aufgezeigt, dass beim Einbau der Deckschicht auf der ganzen Fahrbahnlänge der Homogenität eine spezielle Beachtung zu schenken ist. Der Zone nahe der Dehnfugen der Brücke muss eine spezielle Aufmerksamkeit geschenkt werden, um eine ungleiche Verdichtung der Deckschicht und ein späteres Risiko von Austreten des Wassers zu vermeiden. Die Öffnungen, die in der Dehnfuge der Brücke eingerichtet wurden, sind wirksam.

Der Grundsatz, dass offenporige Asphalte auf über 600m Höhe nicht eingebaut werden sollten, wird gestützt (SN 640.433a).

## 6.2 VORSCHLÄGE FÜR DIE NORMENANPASSUNG

In den einschlägigen Normen über offenporige Asphalte müssten die Vorsichtsmassnahmen für den Wasserabfluss an den Dehnfugen einer Brücke erwähnt werden.

Die Schweizer Normen geben keine spezifischen Vorschriften zum Winterdienst in Abhängigkeit der eingebauten Deckschicht. Die verschiedenen, in der Praxis benutzten Alarmsituationen, werden nicht spezifiziert.

Die Analyse der Veränderung der Oberflächentemperaturen bei verschiedenen winterlichen Ereignissen liefert wertvolle Informationen für die Erarbeitung von Einsatzplänen, insbesondere der Interventionszeiten.

### 6.3 VORSCHLÄGE FÜR SPÄTERE FORSCHUNGSARBEITEN

Die durchgeführte Forschung liefert eine wichtige Basis für die Analyse des winterlichen Verhaltens von Belägen. Die während zwei Wintern durchgeführten Messungen des Wasserabflusses, sowie die Erfassung der Unfallhäufigkeit seit der Einführung der offenporigen Beläge, erlauben eine Verifikation der Resultate. Vertiefere und fundiertere Aussagen wären möglich, wenn die Messungen über einen längeren Zeitraum erfolgen würden.

Bei der Datenanalyse stellt sich die Frage, ob die Messresultate an der Deckschichtoberfläche repräsentativ genug sind, um den Zustand der Fahrbahn zu beurteilen. Der globale Zustand der Fahrbahn wird bloss an einem Messpunkt beurteilt, der sich im Zentrum der Überholspur befindet, was die Aussage zum Oberflächenzustand verfälschen kann. Die in dieser Studie benutzten Messgeräte waren dieselben, die auch für traditionelle Deckschichten benutzt werden. Es kann sein, dass bestimmte Parameter nicht zuverlässig gemessen wurden. Die Dicke des Wasserfilms, denn diese stagniert im Prinzip nicht an der Oberfläche des offenporigen Asphalts, ist schwierig zu messen. Diese Ungenauigkeit kann zu einer Interpretation der Alarmsituationen führen, die wenig repräsentativ für die wirklichen Oberflächenbedingungen sein kann. Ausserdem würde eine Erforschung der Definitionen, Einzelheiten und Alarmgrenzwerte eine bessere Wirksamkeit des Winterdienstes bringen.



## 7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] BACKSTROM M., BERGSTORM A., "Draining function of porous asphalt during snow melt and temporary freezing", *Can J. Civ. Eng.* 27 (3), june 2000, p. 594-598.
- [2] BONJOUR J.-E., "Déformation de la surface des routes pendant le gel (Rapport partiel)", Office Fédéral des Routes, 13, 1981.
- [3] BONJOUR J.-E., "Profondeur du gel et isolation thermique des chaussées (Planches d'essai de Payerne et des Moulins)", Office Fédéral des Routes, 17, 1981.
- [4] BONJOUR J.-E., "Profondeur de pénétration du gel, mesures à Payerne (VD)", Office Fédéral des Routes, 106, 1985.
- [5] CLEMENT B., BONJOUR J.-E., "Les moyens de retarder l'apparition du verglas sur les ponts", Office Fédéral des Routes, 96, 1985.
- [6] COCU X., "Suivi du comportement hivernal d'une section expérimentale en enrobé drainant bicouche", *Revue Générale des Routes*, N° 844, novembre 2005.
- [7] COMSOL Multiphysics User Guide version 3.3, August 2006
- [8] COMSOL Heat Transfert Module User Guide version 3.3, August 2006
- [9] CÔTÉ J., KONRAD J.-M., "Périodes de risque de givrage différentiel sur le territoire québécois", rapport CREIG-S2, Université de Laval.
- [10] CROTTAZ R., DUMONT A.-G., "Etude d'un revêtement antibruit – BAR – Fribourg", LAVOC, avril 1985.
- [11] CROTTAZ R., PITTET M., "Etude d'une saumure de NaCl avec fixatif destiné au traitement anti-verglas, octobre 1979.
- [12] CROTTAZ R., DUMONT A.-G., "Traitement anti-verglas semi-permanent des chaussées (procédé "Selfix") M. Dubois – Essais sur routes et en laboratoire", mai 1981.
- [13] DUMONT A.-G., SIMOND E., "Expérimentation d'un additif au sel de déverglaçage dans le cadre de la réalisation de traitement automatique du pont d'Aigues-Vertes – N1A, Genève", janvier 1994.
- [14] DUMONT A.-G., SIMOND E., "Installation de salage automatique et additif anti-corrosif", LAVOC-EPFL, mai 1997.
- [15] DUMONT A.-G., BAUMANN D., "Etude d'implantation d'une installation automatique de déverglaçage – Autoroute A12", LAVOC-EPFL, septembre 2004.
- [16] DUMONT A.-G., BAUMANN D., "Critères d'opportunité et de choix des installations automatiques de déverglaçage", LAVOC-EPFL, février 2005.
- [17] DURTH W., FERRERO T., LEVIN C., BREUER B., ROTH J., "Winterdienst auf Deckschichten aus Drainasphalt im Vergleich zu herkömmlichen Deckschichten", Forschungsauftrag FE 03.203 R 89 H des Bundesministers für Verkehr, Schlussbericht, Technische Hochschule Darmstadt, 1991.
- [18] DURTH W., "Stand der Forschung zum Winterdienst auf offenporigen Deckschichten", *Strasse und Autobahn* 45 (10), 1994, p. 581-586.
- [19] DYSLI M., "Le gel et son action sur les sols et les fondations", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [20] FERRERO T., LEVIN C., ROTH J., "Verkehrssicherheit von offenporigen Asphaltdeckschichten im Winter–Ergebnisse einer Untersuchung auf Bundesautobahnen", *Strasse und Autobahn* 43 (6), p. 359-369.
- [21] HERNANDEZ J. A., VERBURG D. J., "Winter Maintenance on Porous Asphalt: The Dutch Experience", *European Conference on porous asphalt*, Madrid, Volume 1, 1997, p. 529-542.

- [22] HOPMAN P. C., "Porous Asphalt on Dutch van Brienoord Bridge: Modified Bitumen Recommended", *PT/Civiele Techniek* 44 (3), 1989, p. 22-29.
- [23] IHS A., "Winter maintenance in Sweden", COST 344, 2002.
- [24] IWATA H., WATANABE T., SAITO T., "Study on the performance of porous asphalt pavement on winter road surface conditions", XI<sup>st</sup> PIARC International Winter Road Congress, Sapporo, 2002.
- [25] KAWAMURA M., SAITA K., OGIHARA E., TAKIGUCHI T., "Installation and follow-up evaluation of draining pavement on highways", 10<sup>th</sup> Road Engineering Association of Asia and Australasia Conference, Tokyo, 2000.
- [26] KOMAI T., TAKEDA H., MIYAJIMA M., IKEMOTO T., "Structure of drainage pavement in considering maintenance of road surface in winter", XI<sup>st</sup> PIARC International Winter Road Congress, Sapporo, 2002.
- [27] KORNFELD G., "End of ice age? A just-in-time de-icing solution", *Traffic Technology International '99*, 1999, p. 60-63.
- [28] LITZKA J., "Austrian Experience with Winter Maintenance on Porous Asphalt", 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen", august 2002, p. 7.
- [29] LIVET J., FABRE P., ROUSSEL J.-C., "Winter behavioural patterns of self draining roadways", Transportation Research Board, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology (SIRWEC), Minneapolis, September 1992.
- [30] LIVET J., "The specific winter behaviour of porous asphalt – The situation as it stands in France", 9<sup>th</sup> Piarc International Winter Road Congress, 1994, p. 217-223.
- [31] LIVET J., "Assessment of the effect of porous asphalt concretes on winter road operations", 10<sup>th</sup> World Road Congress, Montreal, 1995, p. 293-295.
- [32] LIVET J., "Evaluation des bétons bitumineux drainants en termes d'exploitation hivernale d'un réseau routier", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N° 204, 1996, p.15-23.
- [33] LIVET J., "Dispositions particulières pour l'exploitation hivernale des bétons bitumineux drainants", Note d'information circulation, sécurité équipement, exploitation, 2001.
- [34] LUPTON A., "A gritty challenge", *Surveyor* 190 (5764), janvier 2004, p. 14-15.
- [35] MACDONALD A., "Winter Maintenance", *Highways* 60 (9), septembre 1992, p. 14-17.
- [36] NOORT M., "Winter maintenance on porous asphaltic concrete", (WXA-R-91-6), octobre 1991.
- [37] NOORT M., "Strassenwinterdienst auf Drainasphalt", 9<sup>th</sup> Piarc International Winter Road Congress, 1994, p. 224-231.
- [38] NOORT M., "Winter maintenance on porous asphalt", *Proceedings of the Snow Removal and Ice Control Technology*, Reno, 1997, p. 33-40.
- [39] ORVAL J. G., HAZELZET P. A., VAN DEN BOOM W. C., "Durchgehend bewehrte Betonfahrbahndecken", 7<sup>th</sup> International Symposium on Concrete Roads, Vienna, 1994, p. 165-169.
- [40] PEARSON B., SHAO J., MCDONALD A., "Greater care for porous asphalt", *Highways* 61 (9), septembre 1993, p. 39-41.
- [41] PITTET M., "Canton de Vaud. SR, routes nationales. Rapport d'étude. A1 Autoroute Yverdon-Berne. Revêtement Payerne-Avenches, lot 1816. Couche de roulement DRA 11 et DRA 8 au liant Styrelf 13/80, LAVOC, octobre 1999.
- [42] RAABERG J., SCHMIDT B., BENDTSEN H., "Technical Performance and Long-Term Noise Reduction of Porous Asphalt Pavement", Report (112), 2001, p. 14.
- [43] SCHMITT E., "Winter Road Maintenance on Porous Asphalt", 9<sup>th</sup> Piarc International Winter Road Congress, 1994, p. 210-216.

- 
- [44] SIMONSSON B., GUSTAFSON K., "Maintenance Practice in Sweden", Proceedings of the United States Strategic Highway Research Program Conference, London, 1990, p. 425-434.
- [45] SN 640 009a, "Accidents de la circulation routière: Localisation et classement de points noirs", VSS, 2006.
- [46] SWART J. H., DEWIT L. B., VAN DER KOOIJ J., "Porous asphalt and traffic safety", Proceedings of the East-West European Road Conference, Volume 2, 1993, p. 276-280.
- [47] TORDAY A., BAUMANN D., "Suivi des installations automatiques de déverglacement. Autoroute de contournement de Lausanne", LAVOC-ENAC, mars 2003.
- [48] TURTSCHY J.-C., PITTET M., "Planches d'essai en DRA 11 sur la chaussée montagne, caractérisation des liants, A9 autoroute du Léman lot 52/807. Renouvellement des revêtements entre Aigle et Bex-sud", LAVOC, juillet 2000.
- [49] VAN DER KAMP W. J., NOORT M., "Deicing system on the bridge over the river Ijssel near Arnhem, Netherlands", 9th Piarç International Winter Road Congress, 1994, p. 757-764.
- [50] VAN DER KAMP W. J., NOORT M., "Winter maintenance by means of spraying on the Ijssel bridge near Westervoort", OTAR, avril 1994, p. 111-113.
- [51] VEGTER T. L., "Developments in Winter Maintenance", Ingenieur (Neth.) 104 (2), février 1992, p. 25-30.
- [52] "Propriétés physiques enrobés drainants / béton bitumineux", articles en ligne sur le site web du Ministère de l'Équipement français, <http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr>.
- [53] "Viabilité hivernale - Petit cours de physique", Site web du Ministère de l'Équipement français, La documentation des techniques routières françaises DTRF, <http://dtrf.setra.equipement.gouv.fr>.



## 8 LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1: Questionnaire envoyé aux administrations nationales et internationales. ....	5
Figure 2: Véhicules d'entretien hivernal. ....	19
Figure 3: Enrobé drainant de type hybride. ....	19
Figure 4: Evolution du TJM de 1995 à 2004. ....	22
Figure 5: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A1. ....	23
Figure 6: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A5. ....	24
Figure 7: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A9 (km 0 à 4). ....	25
Figure 8: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A9 (km 30 à 33). ....	25
Figure 9: Statistiques d'accidents sur les ponts en enrobé drainant – Autoroute A9 (km 46 à 58). ....	26
Figure 10: Détail de la rigole (point bas et point haut). ....	29
Figure 11: Détail du joint de pont. ....	29
Figure 12: Situation de l'expérience. ....	30
Figure 13: Système d'arrosage avec buses pivotantes sur 90°. ....	31
Figure 14: Mesure du débit sortant et entrant. ....	31
Figure 15: Schéma de situation des essais d'arrosage pour la journée du 11/05/2005. ....	32
Figure 16: Zones saturées sur le pont. ....	34
Figure 17: Evolution du stock d'eau dans le revêtement en fonction de la teneur en vide théorique retenue pour le calcul. ....	34
Figure 18: Zone fortement saturées en aval du joint. ....	35
Figure 19: Zones peu saturées en amont du joint. ....	36
Figure 20: Avancement du front des résurgences lors de l'arrosage linéaire en amont du dévers. ....	37
Figure 21: Saturation apparente du revêtement pour différents niveaux d'intensité de pluie. ....	39
Figure 22: Disparition du film d'eau en surface après l'arrêt de l'arrosage. ....	40
Figure 23: Perméabilité moyenne sur un profil transversal sur le pont et hors du pont. ....	41
Figure 24: Situation générale de la planche d'essai. ....	43
Figure 25: Situation de la planche d'essai sur l'A5. ....	44
Figure 26: Vue générale de la situation des sondes de mesure sur et hors pont. ....	45
Figure 27: Coupe A-A : Situation des diverses sondes installées sur et dans l'enrobé du pont. ....	46
Figure 28: Coupe B-B : Situation des diverses sondes installées dans la partie hors pont. ....	46
Figure 29: Vue des sondes à la surface du pont. ....	47
Figure 30: Vue du mât Boschung. ....	48
Figure 31: Vue générale de la situation des instruments de mesure sur le portique. ....	49
Figure 32: Vue du radiomètre installé sur un portique. ....	50
Figure 33: Températures moyennes de la surface (pont et remblai) pour les deux hivers. ....	52
Figure 34: Durées des périodes où les températures de surface (pont/remblai) sont inférieures à 0°C. ....	53
Figure 35: Durées des périodes où les températures (air/surface/moyenne) sur pont et remblai sont inférieures à 0°C. ....	54
Figure 36: Somme des épaisseurs d'eau calculées [mm]. ....	55
Figure 37: Journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige (hiver 2005/2006). ....	56
Figure 38: Journées présentant des situations de rudesse hivernale et d'alarmes de neige (hiver 2006/2007). ....	57
Figure 39: Journées présentant des situations d'alarme A1, A2 et A3 sur le pont (hiver 2005/2006). ....	58

Figure 40: Journées présentant des situations d'alarme A1, A2 et A3 sur le pont (hiver 2006/2007).	58
Figure 41: Journées présentant des situations d'alarme A1 sur pont et remblai (hiver 2005/2006).	59
Figure 42: Journées présentant des situations d'alarme A1 sur pont et remblai (hiver 2006/2007).	60
Figure 43: Nombre d'heures en situation d'alarme (hiver 2005/2006).	61
Figure 44: Nombre d'heures en situation d'alarme (hiver 2006/2007).	61
Figure 45: Événement 1 – Nuit du 30 au 31 janvier 2007.	62
Figure 46: Événement 2 – Nuit du 25 au 26 mars 2007.	63
Figure 47: Événement 3 – Journées du 10 et 11 décembre 2006.	64
Figure 48: Événement 4 – Période du 5 au 15 janvier 2006.	65
Figure 49: Événement 5 – Nuit du 24 au 25 janvier 2006.	66
Figure 50: Événement 6 – Journée du 8 novembre 2006.	67
Figure 51: Événement 7 – Nuit du 2 au 3 janvier 2007.	68
Figure 52: Image radar de la Suisse à 4h 30 le 3 janvier 2007 (Meteosuisse).	69
Figure 53: Événement 8 – Nuit du 12 au 13 décembre 2006.	70
Figure 54: Durées des périodes où les températures (air/surface) sont inférieures à 0°C.	73
Figure 55: Différence entre les températures moyennes de surface et de l'air.	73
Figure 56: Nombre de périodes-types pour les hivers représentatifs.	75
Figure 57: Exemple de deux périodes de froid extrême semblables.	76
Figure 58: Premier exemple de deux périodes semblables de froid prolongé.	77
Figure 59: Deuxième exemple de deux périodes semblables de froid prolongé.	77
Figure 60: Premier exemple de deux périodes de variation rapide de température semblables.	78
Figure 61: Deuxième exemple de deux périodes de variation rapide de température semblables.	79
Figure 62: Comportement mesuré et comportement modélisé.	80
Figure 63: Schéma du modèle thermique avec prise en compte de la conduction seule.	82
Figure 64: Rayonnements considérés dans le modèle thermique de la structure de la chaussée.	83
Figure 65: Simulation de la chaleur latente au travers de la chaleur massique.	84
Figure 66: Simulation de la température lors d'un changement de phase.	85
Figure 67: Schéma du modèle 2D.	86
Figure 68: Maillage 2D par éléments finis de la structure de chaussée sur le pont (a) et la structure sur remblai (b).	86
Figure 69: Exemple de fichier texte servant à définir un paramètre fonction du temps.	89
Figure 70: Modélisation de l'événement 1 – Nuit du 30 au 31 janvier 2007.	95
Figure 71: Modélisation de l'événement 3 – Journées du 10 et 11 décembre 2006.	96
Figure 72: Modélisation de l'événement 7 – Nuit du 2 au 3 janvier 2007.	98
Figure 73: Modélisation de l'événement 8 – Nuit du 12 au 13 décembre 2006.	99
Figure 74: Modélisation du premier cas extrême.	101
Figure 75: Modélisation du deuxième cas extrême.	102
Tableau 1: Liste et dates de réponse des cantons.	6
Tableau 2: Ponts revêtus en enrobé drainant – Vaud.	7
Tableau 3: Ponts revêtus en enrobé drainant – Neuchâtel.	8
Tableau 4: Ponts revêtus en enrobé drainant – Lucerne.	8

Tableau 5: Envoi du questionnaire au niveau international.....	9
Tableau 6: Ponts revêtus en enrobé drainant au niveau international.....	9
Tableau 7: Ponts revêtus en enrobé drainant – Autriche.....	10
Tableau 8: Compteurs de trafic pour chaque pont – Vaud.....	21
Tableau 9: TJM des différents postes de comptage.....	22
Tableau 10: TJM mesurés et TJM interpolés graphiquement.....	22
Tableau 11: Taux d'accidents sur ponts – A1.....	26
Tableau 12: Taux d'accidents sur ponts – A9 (poste de comptage 64).....	27
Tableau 13: Taux d'accidents sur ponts – A9 (poste de comptage 83).....	27
Tableau 14: Taux d'accidents sur ponts – A9 (poste de comptage 250).....	27
Tableau 15: Caractéristiques des différents paliers d'arrosage hors du pont.....	38
Tableau 16: Aperçu et caractéristiques des capteurs et sondes.....	44
Tableau 17: Aperçu des mesures ayant une incidence sur les caractéristiques de surface.....	51
Tableau 18: Aperçu des niveaux d'humidité et de leurs épaisseurs de film d'eau équivalentes.....	54
Tableau 19: Définition des alarmes Boschung et de la rudesse hivernale décrite dans [16].....	55
Tableau 20: Aperçu des caractéristiques générales des hivers.....	72
Tableau 21: Définition des périodes-types.....	74
Tableau 22: Liste des paramètres physiques récoltés.....	81
Tableau 23: Propriétés thermiques type des matériaux de chaussée.....	87
Tableau 24: Propriétés thermiques des matériaux déterminées par des essais en laboratoire.....	88
Tableau 25: Conditions aux limites dans un problème de transfert de chaleur.....	89
Tableau 26: Journées avec un vent très faible.....	90
Tableau 27: Paramètres utilisés pour la calibration du modèle avec de la conduction seule.....	91
Tableau 28: Paramètres utilisés pour la calibration du modèle avec de la conduction et rayonnement.....	92
Tableau 29: Journées avec un vent fort.....	92
Tableau 30: Paramètres utilisés pour la calibration du modèle avec prise en compte du rayonnement et de la convection.....	93
Tableau 31: Evénements particuliers retenus pour la simulation thermique.....	94
Tableau 32: Paramètres utilisés pour la simulation.....	94
Tableau 33: Modélisation de l'événement 1 – Refroidissement/réchauffement horaire maximal [°C/h].....	95
Tableau 34: Modélisation de l'événement 1 – Températures inférieures à 0°C [min].....	96
Tableau 35: Modélisation de l'événement 1 – Temps d'intervention pour un traitement à 0°C [min].....	96
Tableau 36: Modélisation de l'événement 3 – Refroidissement et réchauffement horaire maximal [°C/h].....	97
Tableau 37: Modélisation de l'événement 7 – Réchauffement horaire maximal [°C/h].....	98
Tableau 38: Modélisation de l'événement 8 – Température minimale [°C].....	99
Tableau 39: Modélisation de l'événement 8 – Refroidissement et réchauffement horaire maximal [°C/h].....	99
Tableau 40: Modélisation de l'événement 8 – Températures inférieures à 0°C [min].....	100
Tableau 41: Modélisation de l'événement 8 – Temps d'intervention pour un traitement à 0°C [min].....	100
Tableau 42: Cas extrême 1 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de 0°C et les autres [min].....	101
Tableau 43: Cas extrême 1 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de -4°C et les autres [min].....	102
Tableau 44: Cas extrême 2 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de 0°C et les autres [min].....	102
Tableau 45: Cas extrême 2 – Temps écoulé entre le passage du premier enrobé en-dessous de -6°C et les autres [min].....	103

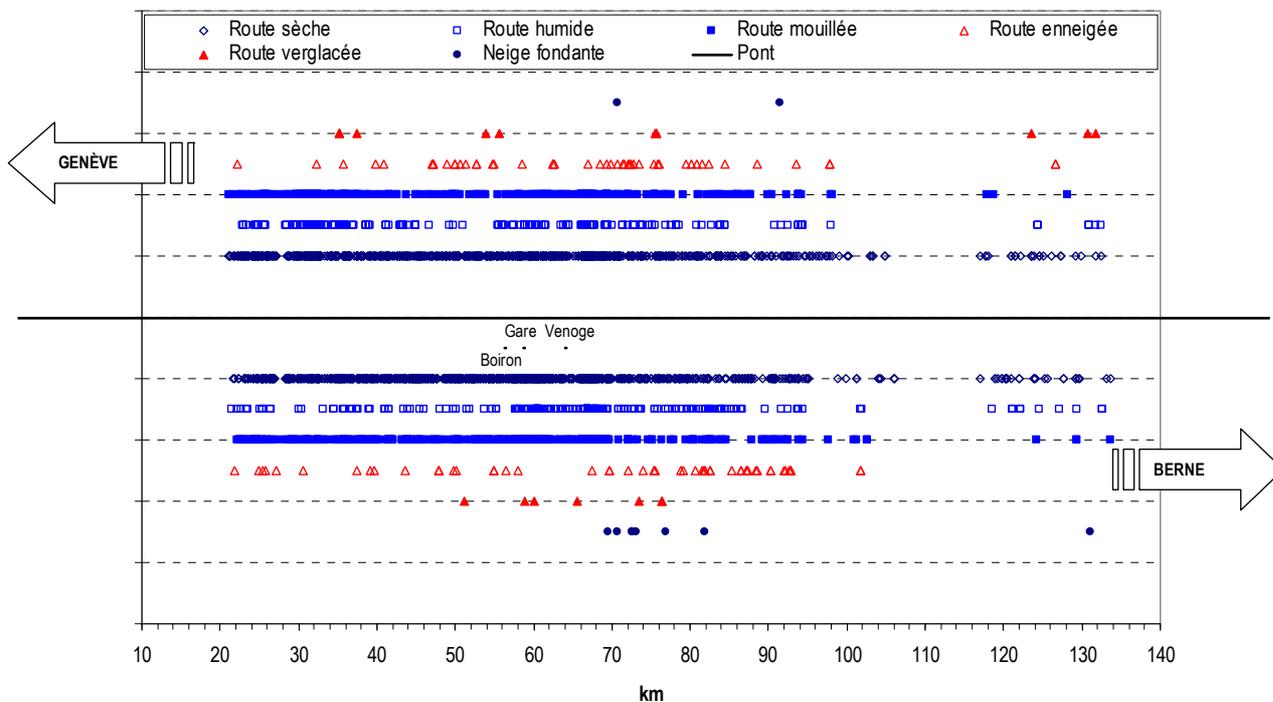


## 9 ANNEXES

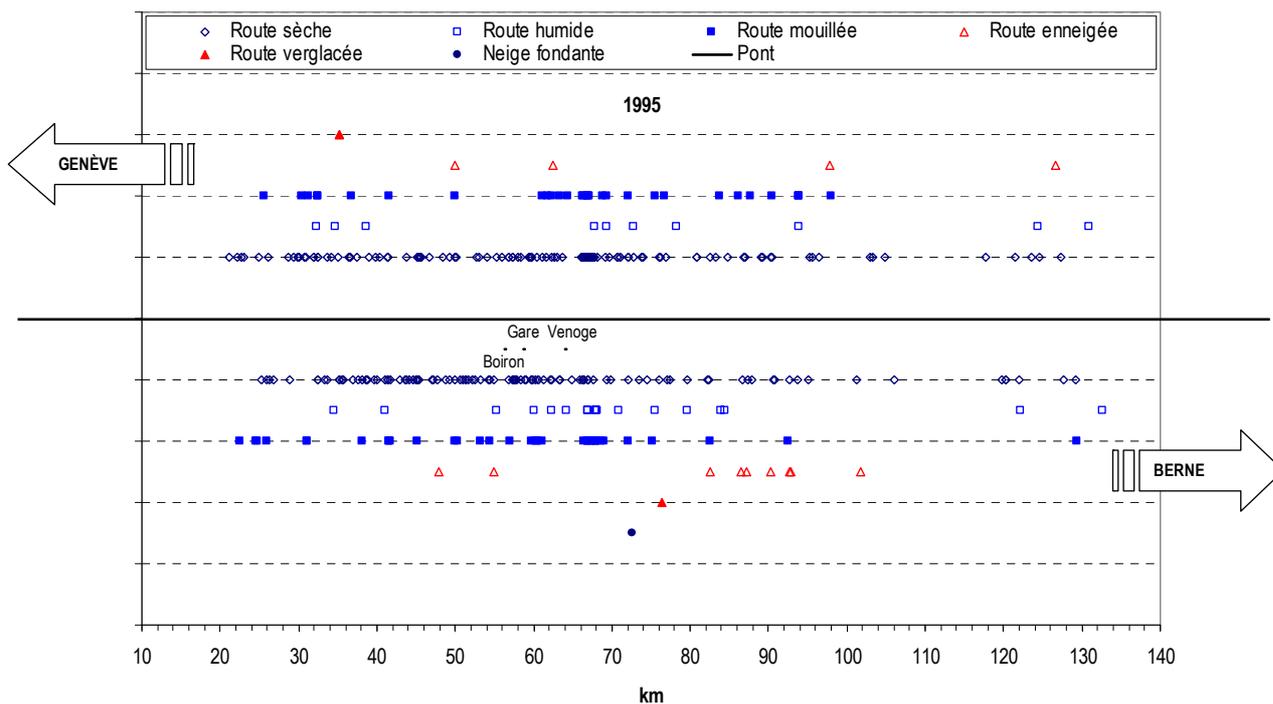
### 9.1 STATISTIQUES D'ACCIDENTS

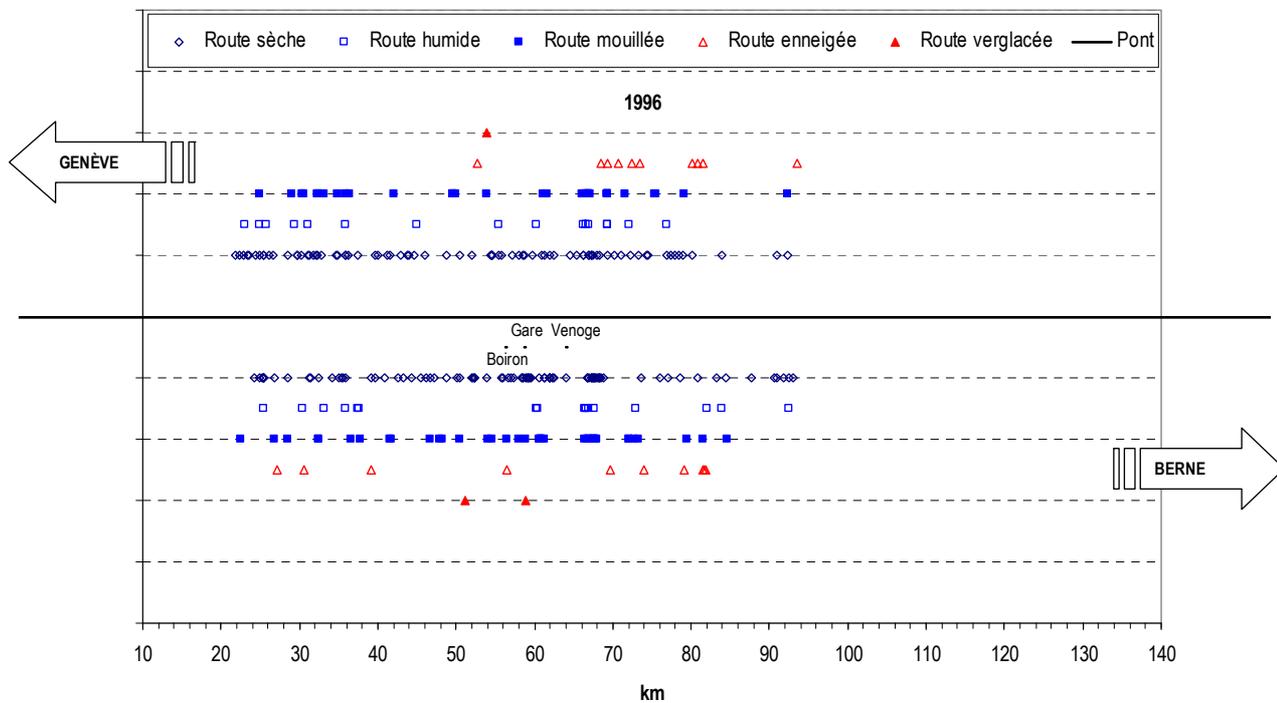
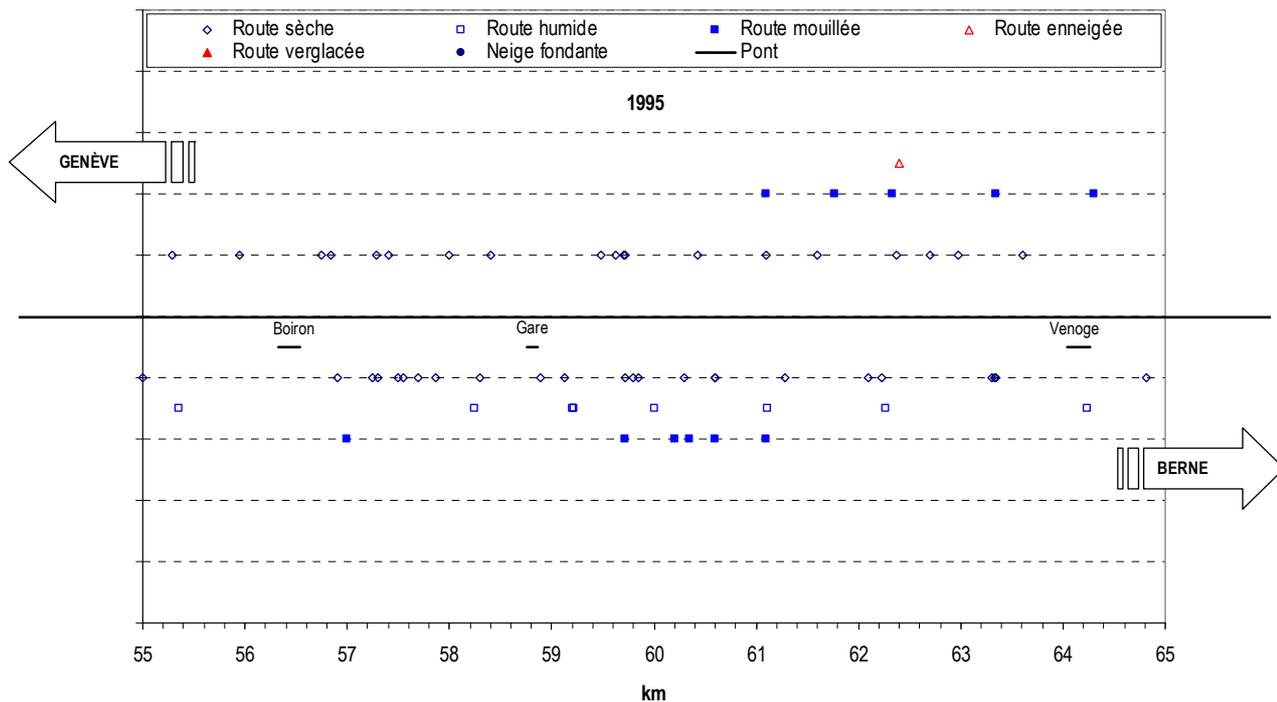
#### 9.1.1 Autoroute A1 – Vaud

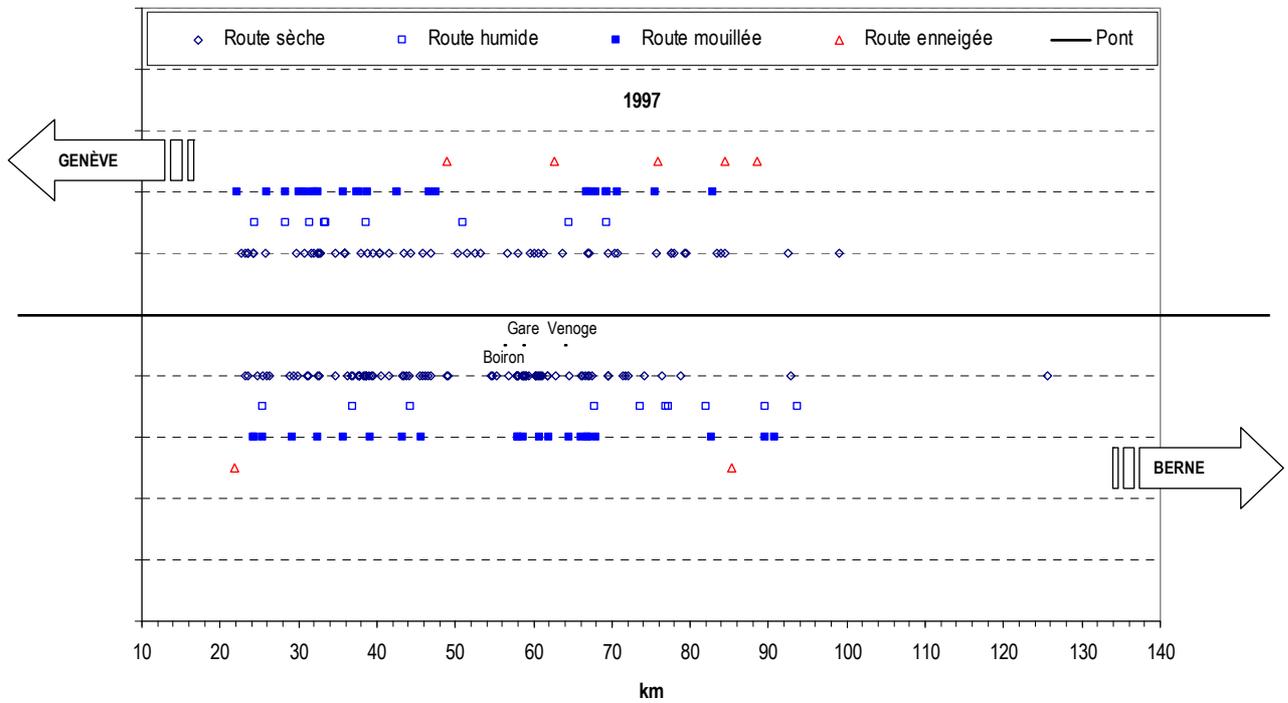
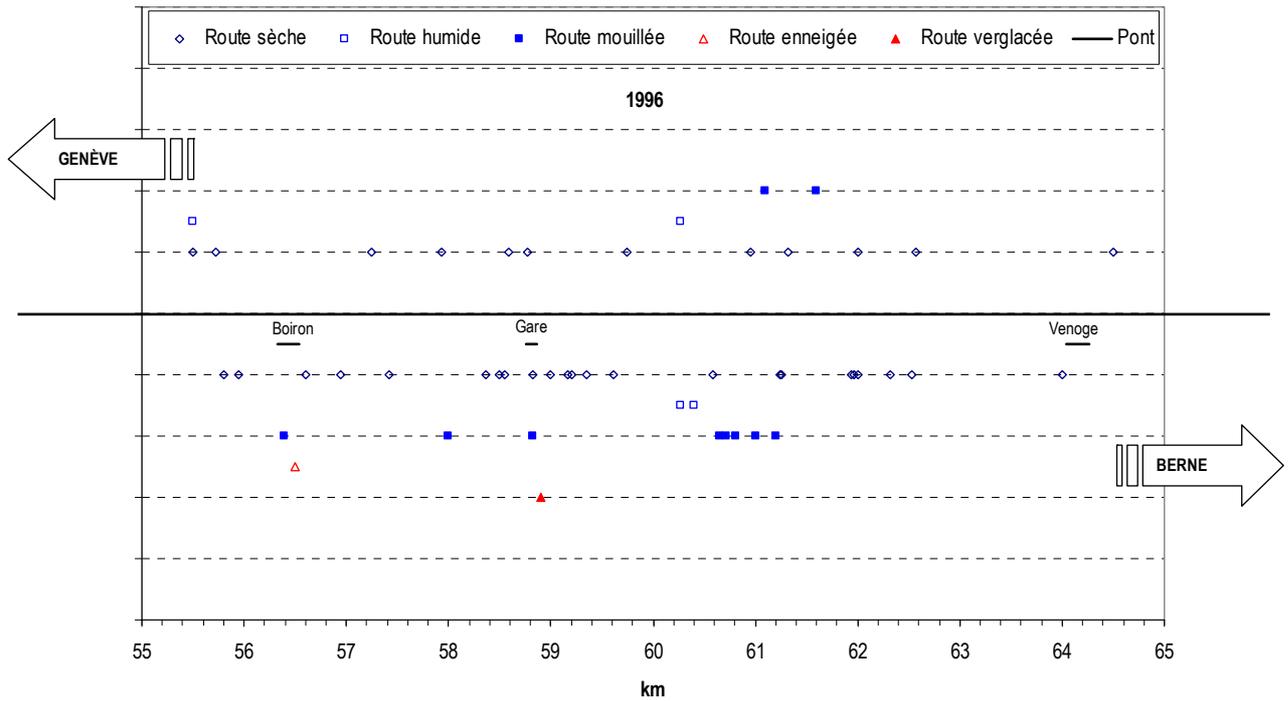
##### 9.1.1.1 Tronçon complet

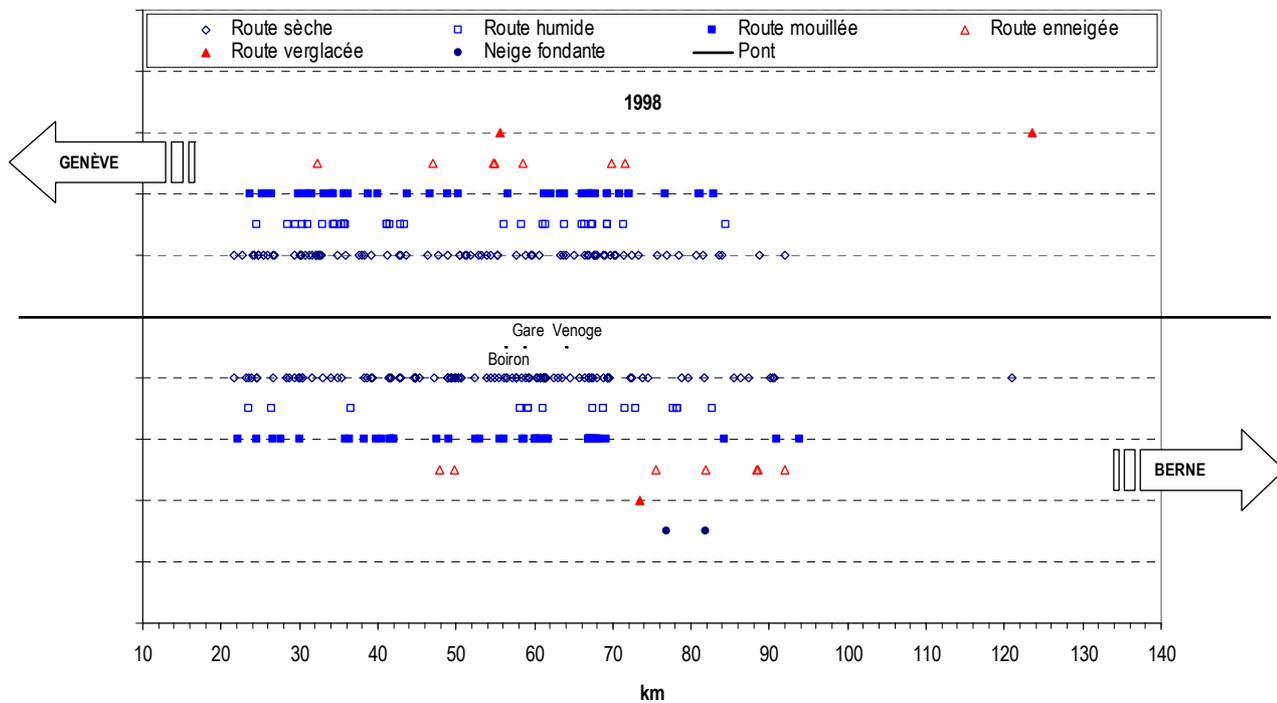
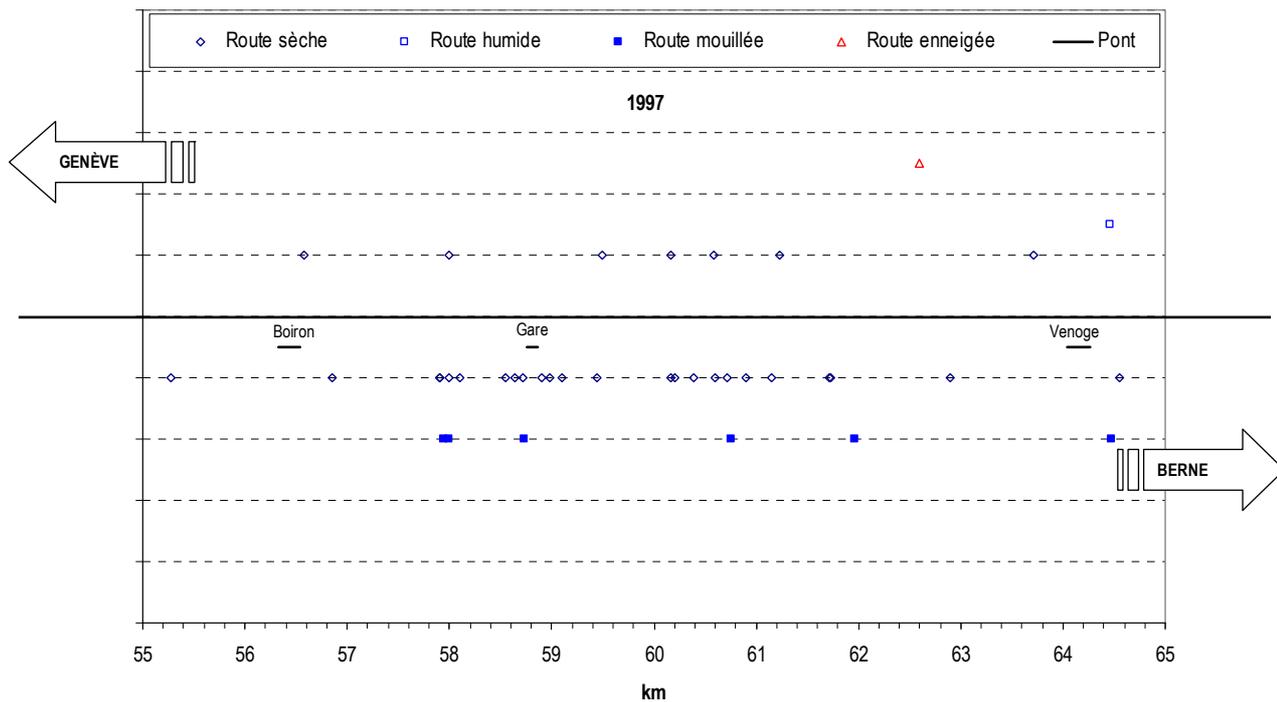


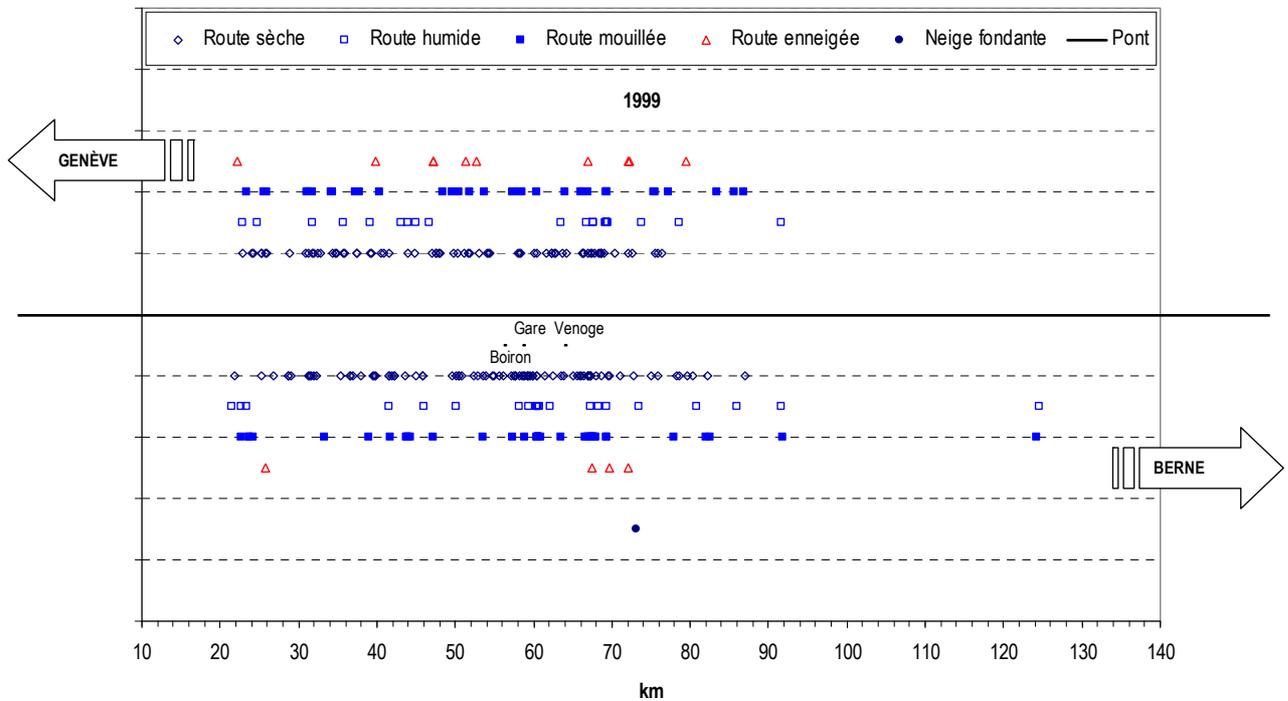
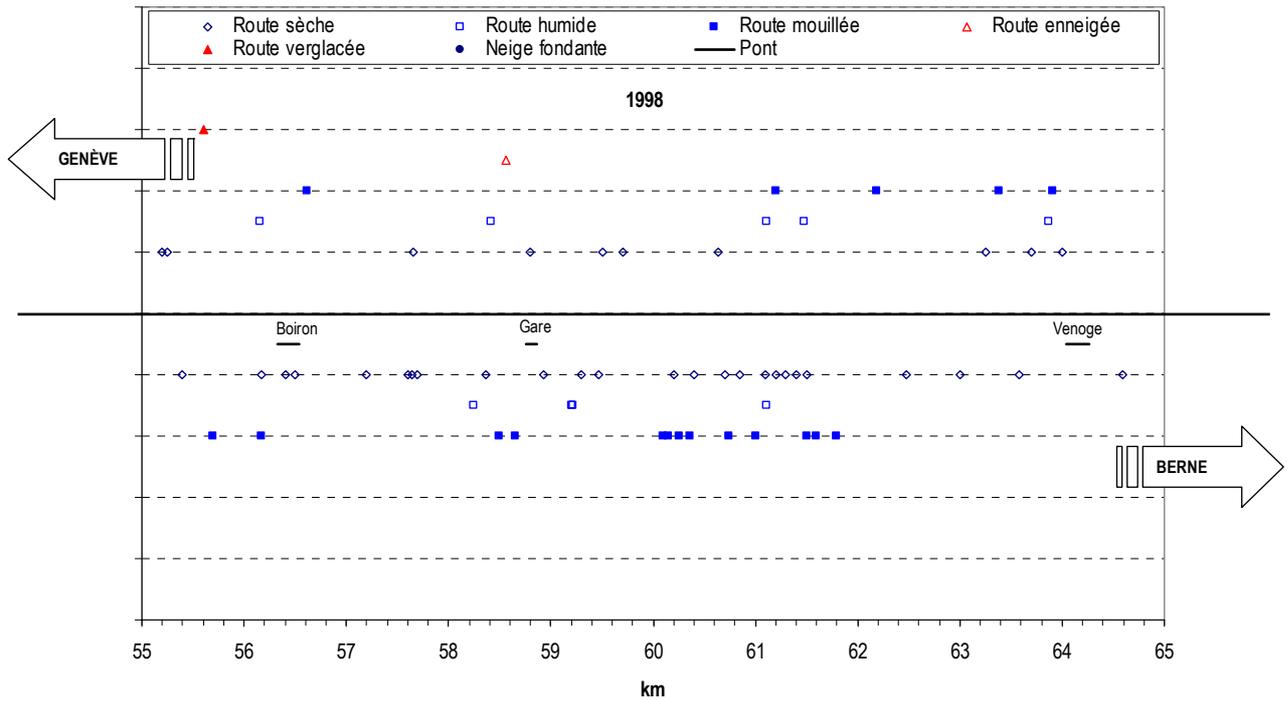
##### 9.1.1.2 Statistiques par année

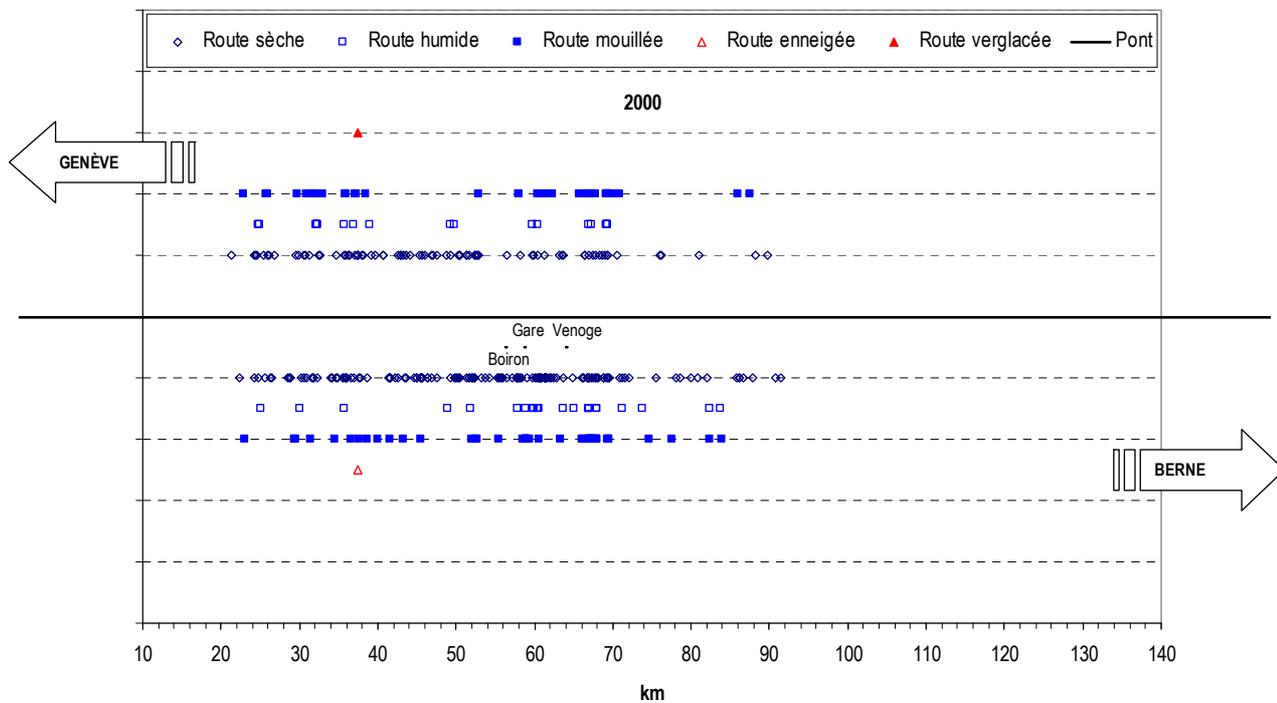
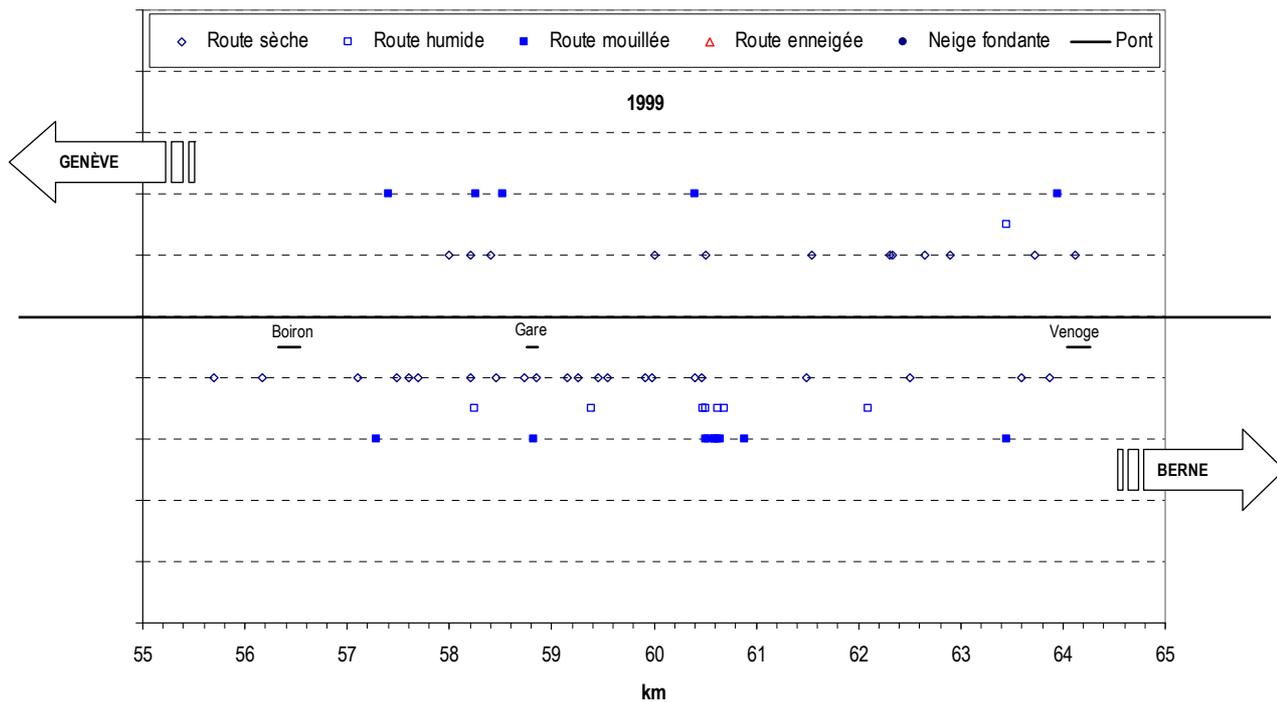


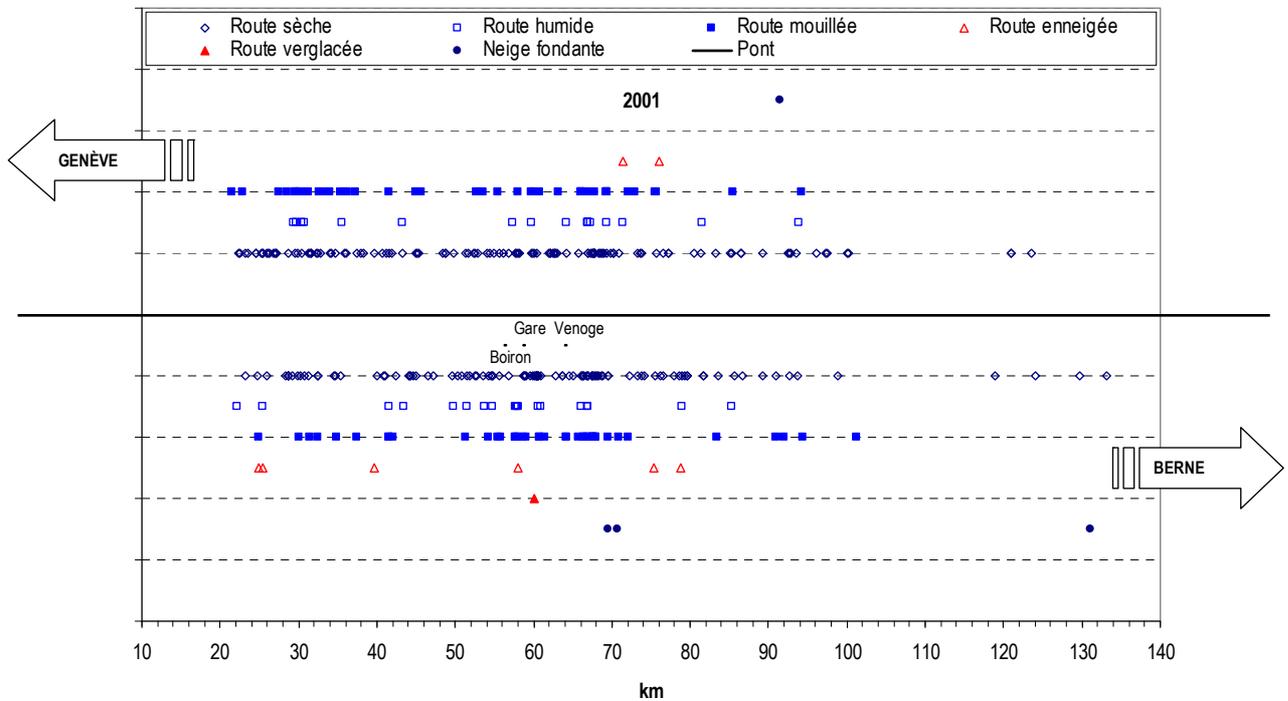
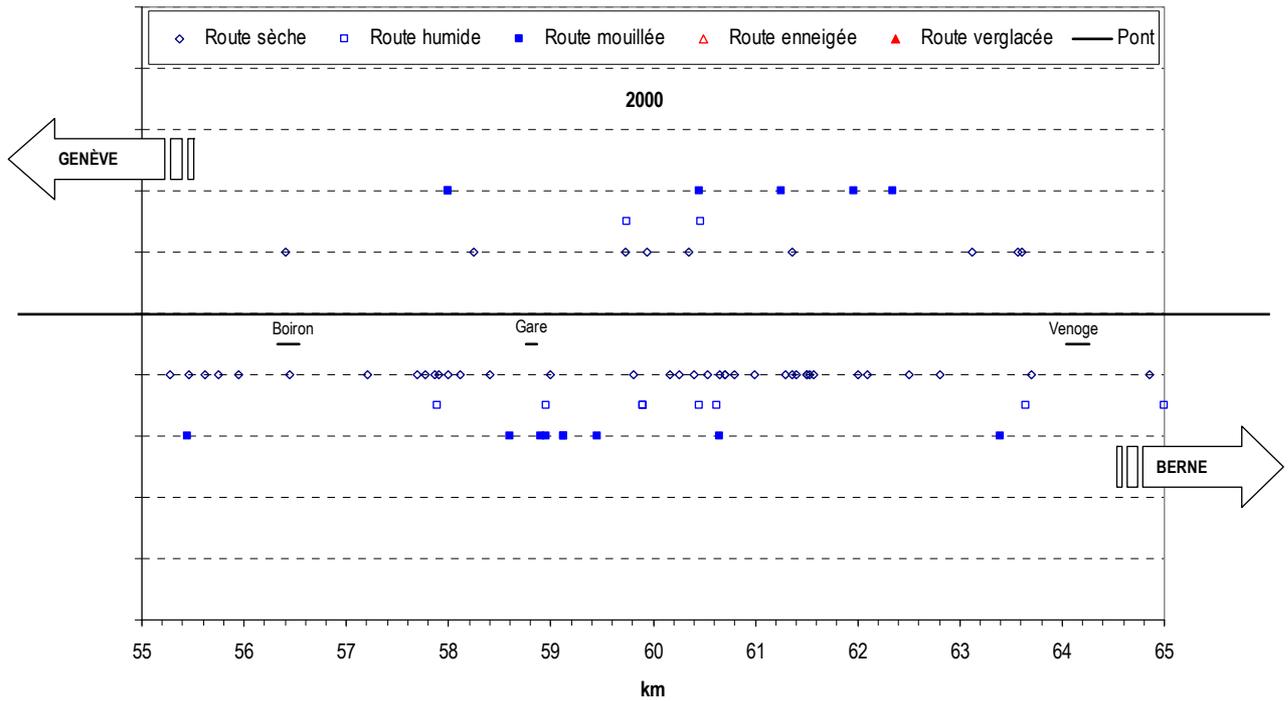


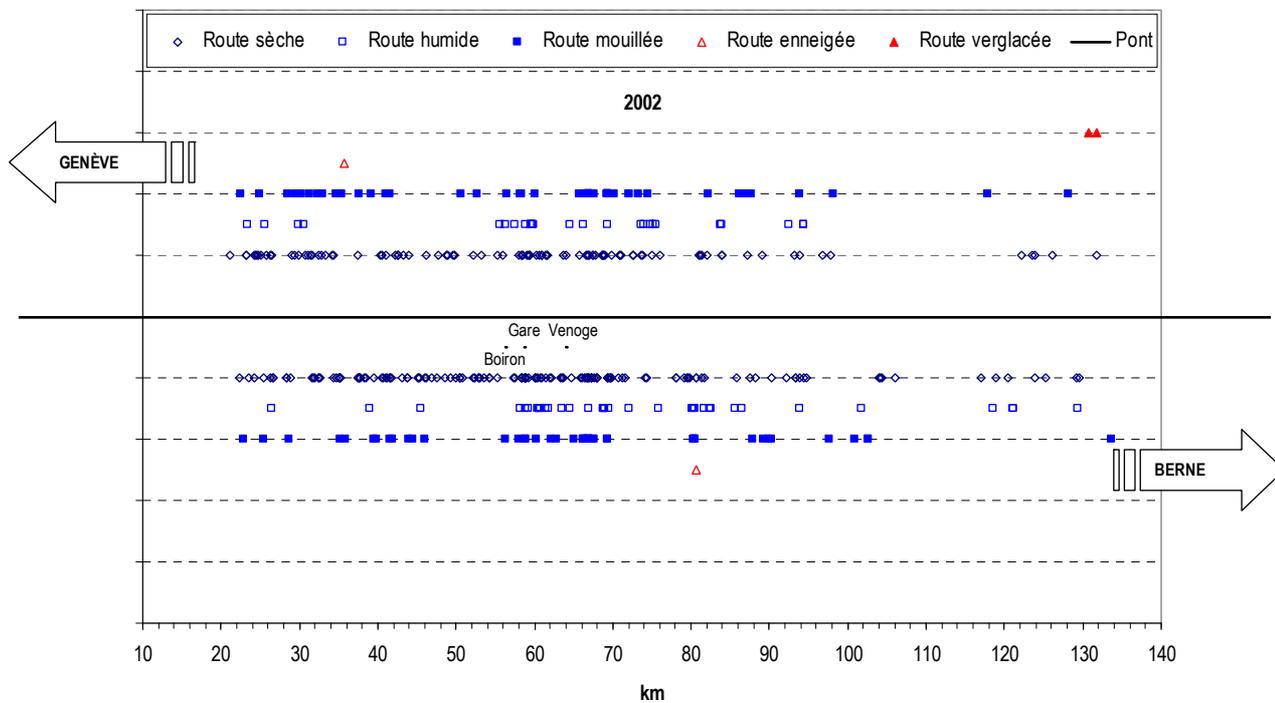
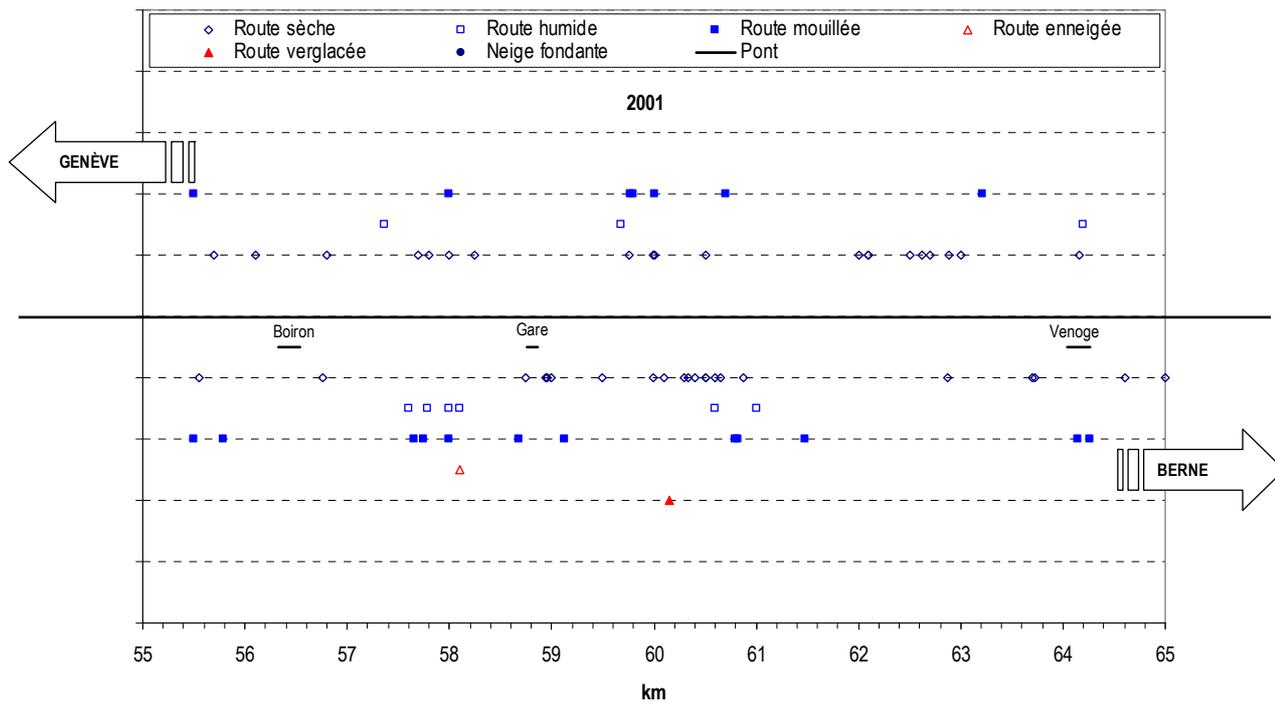


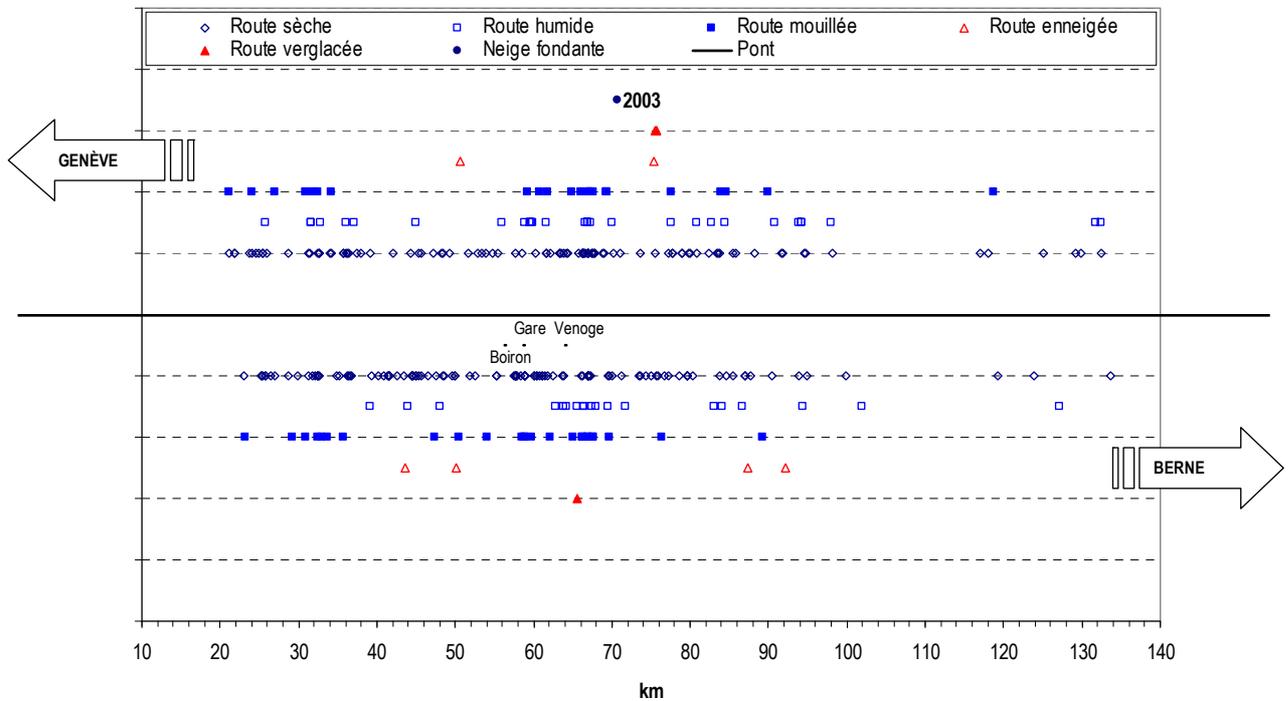
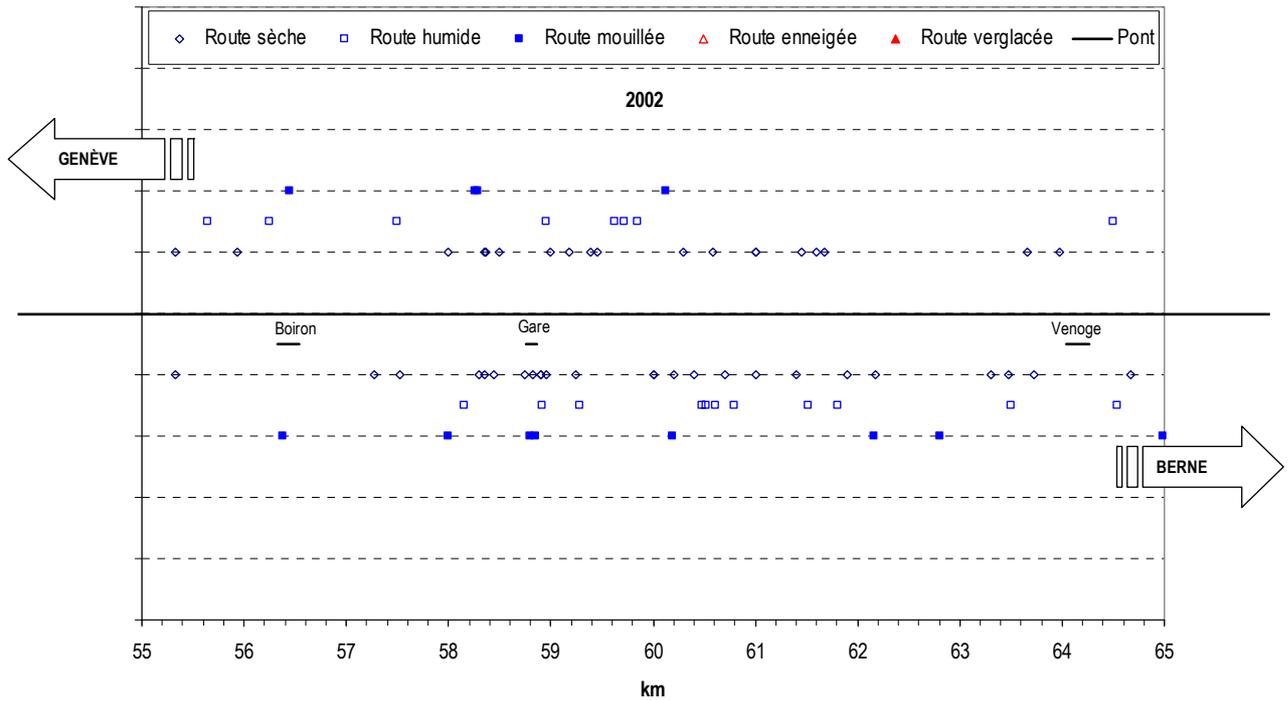


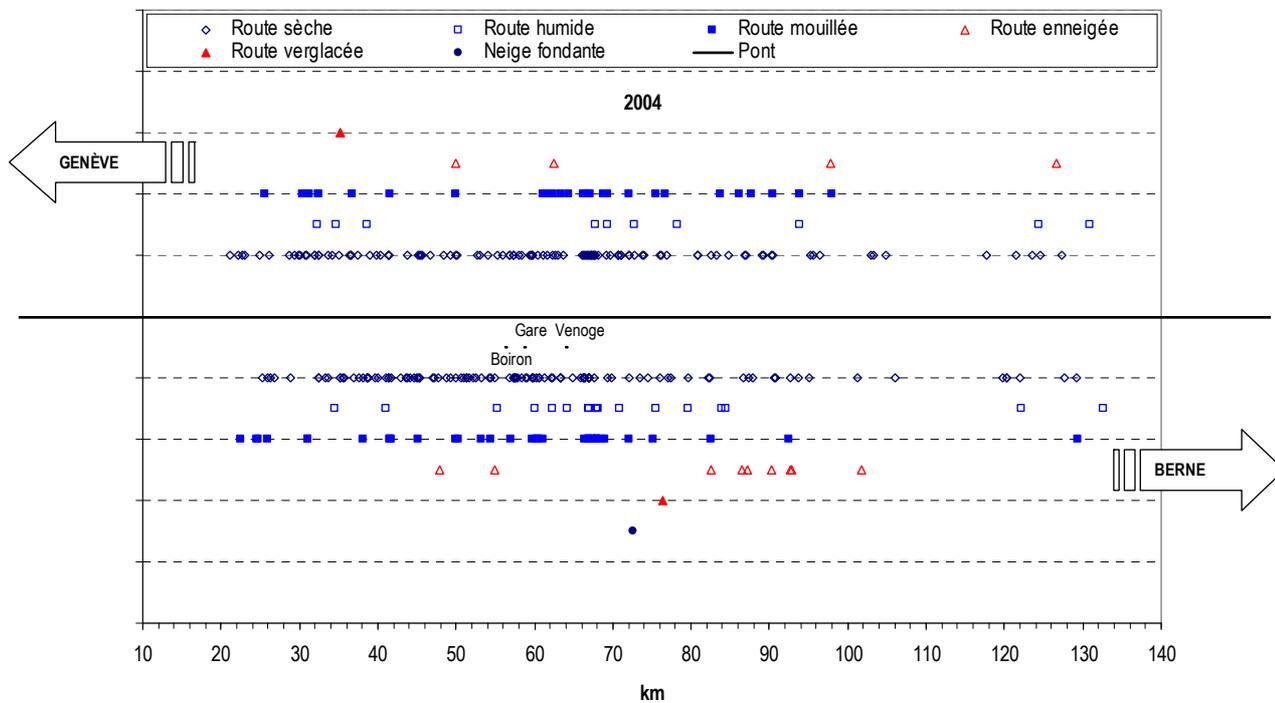
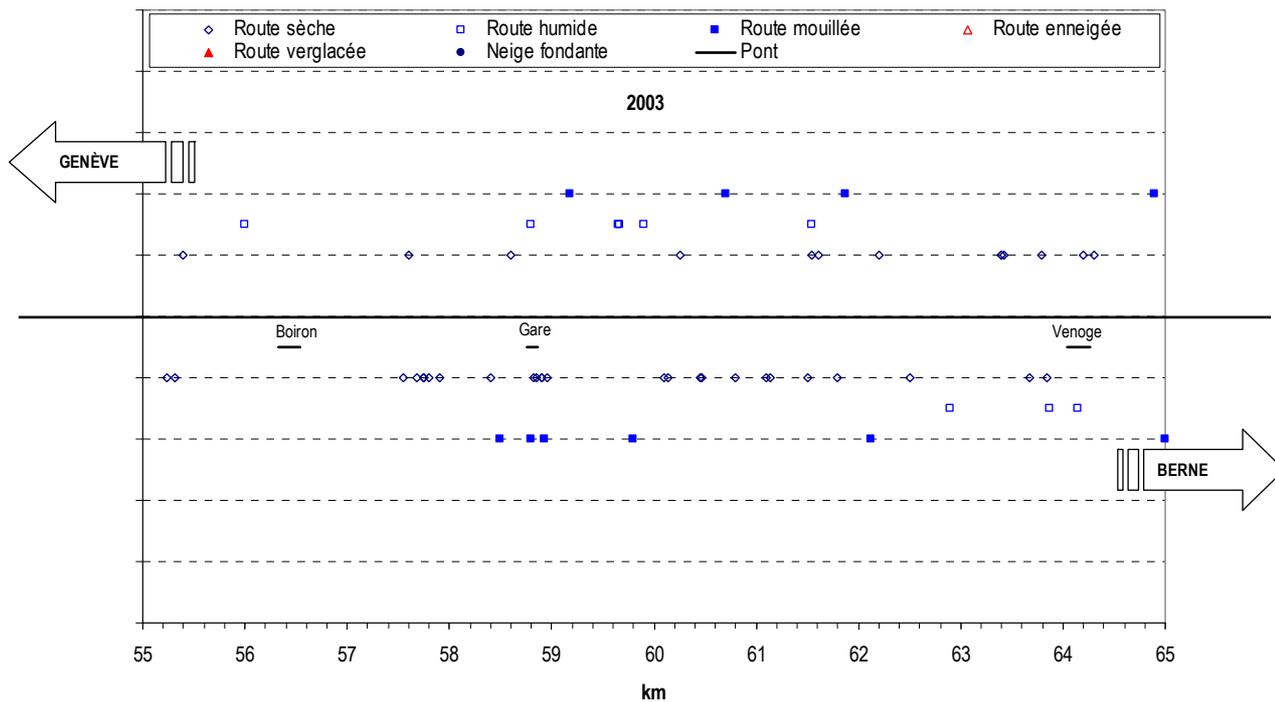


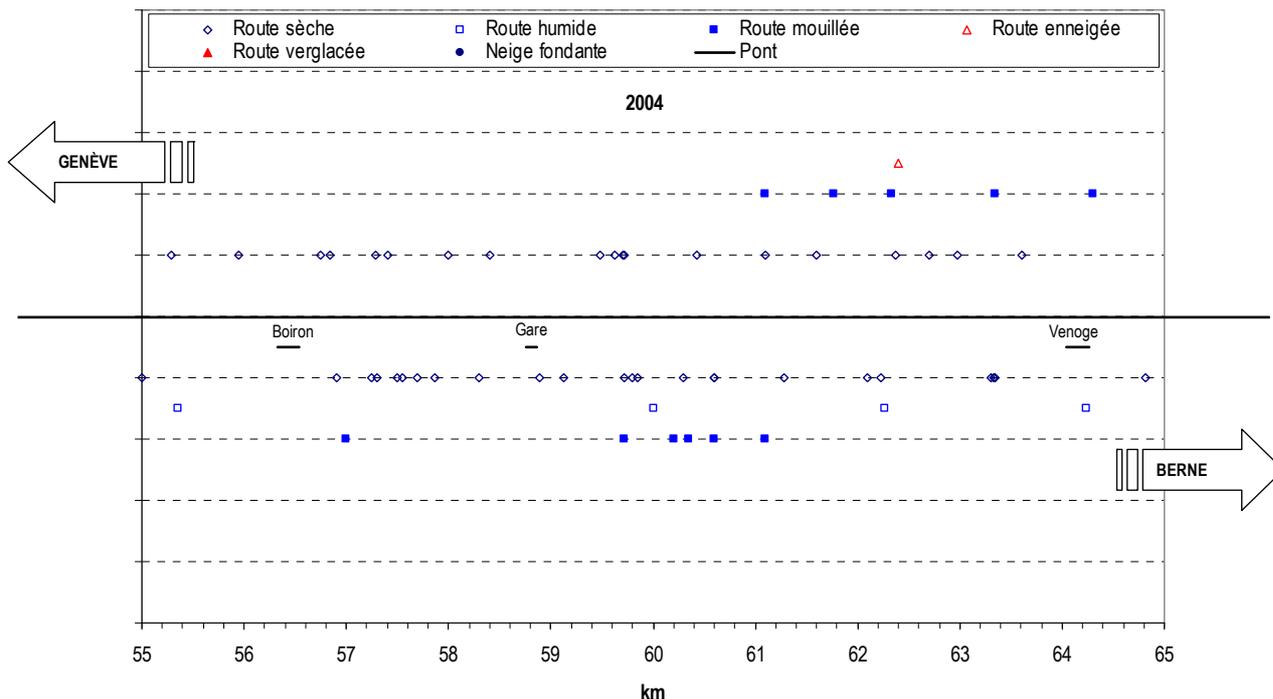






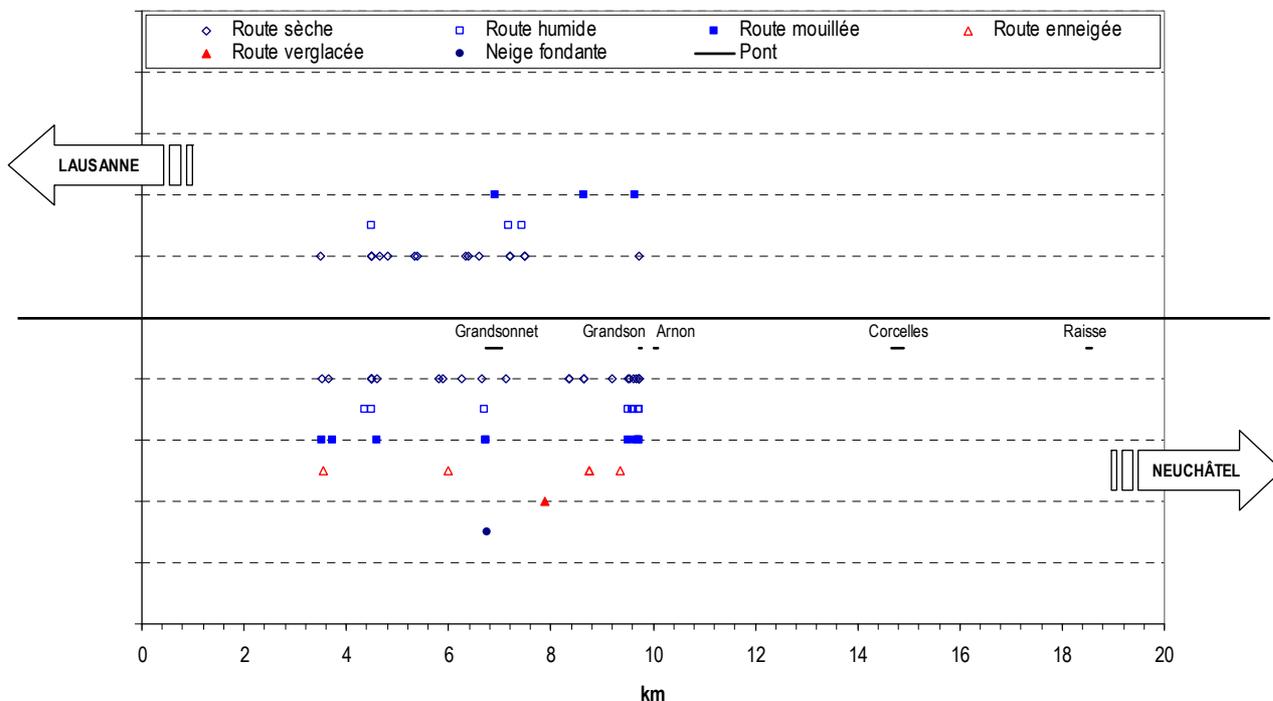




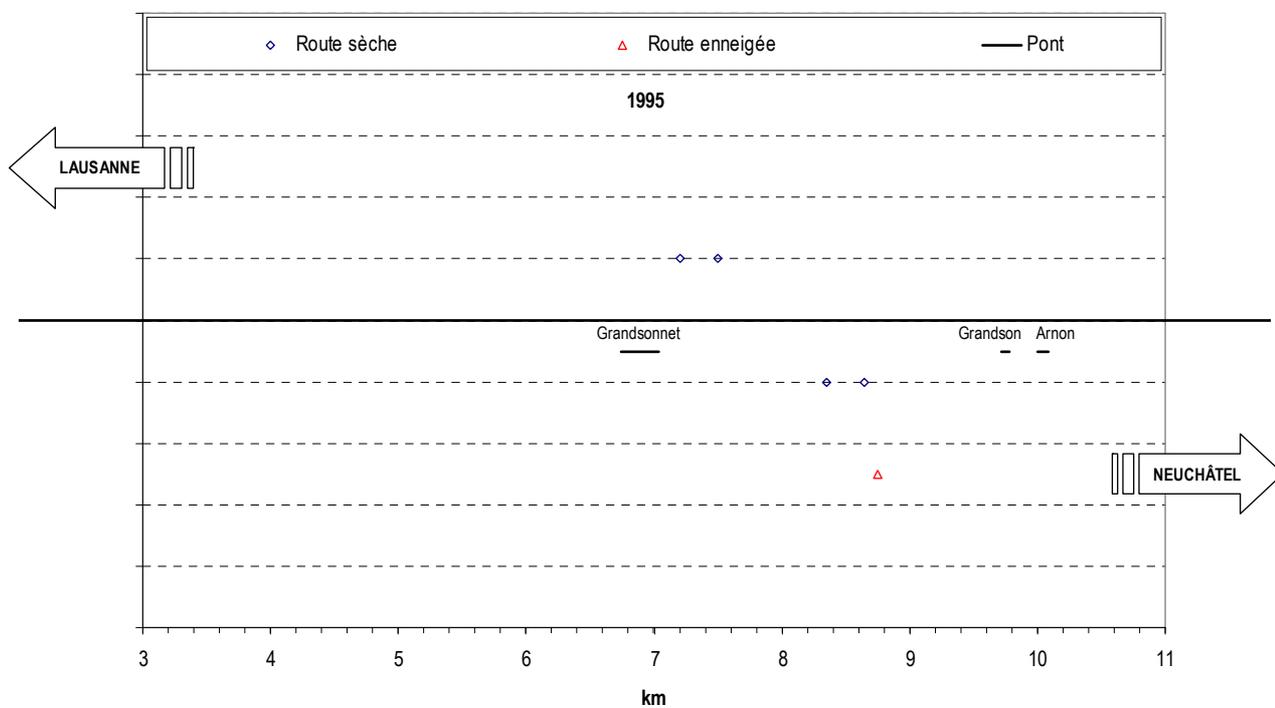
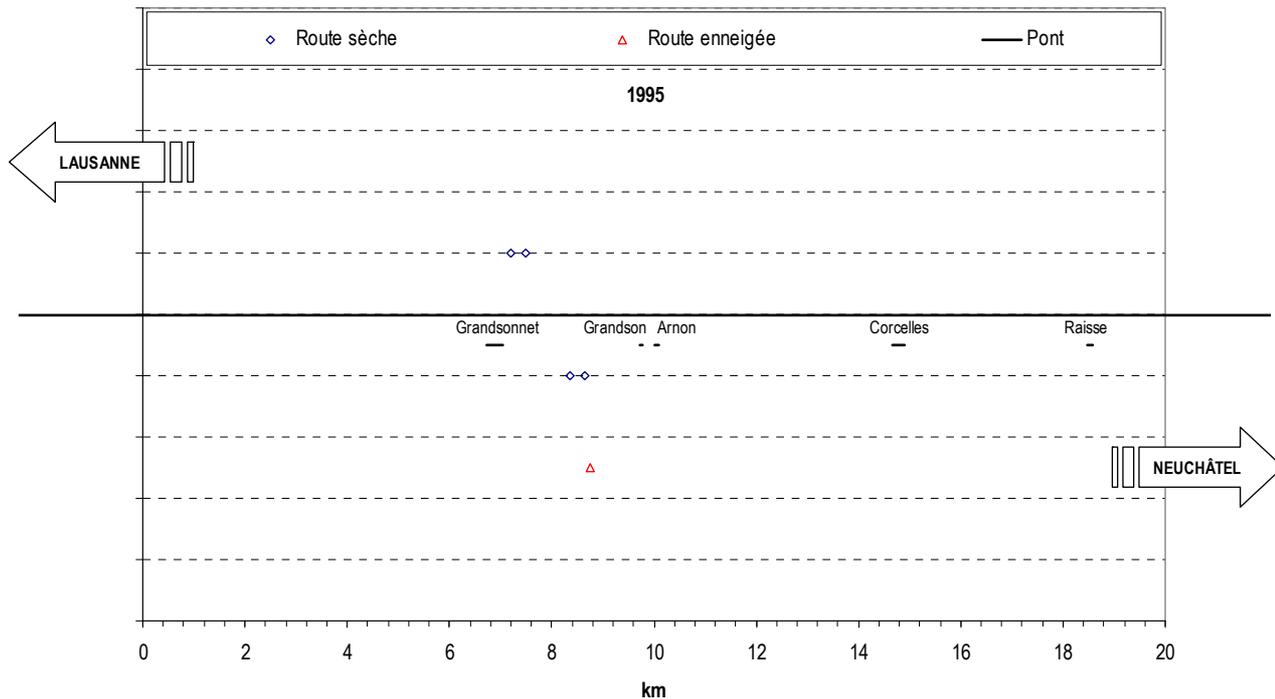


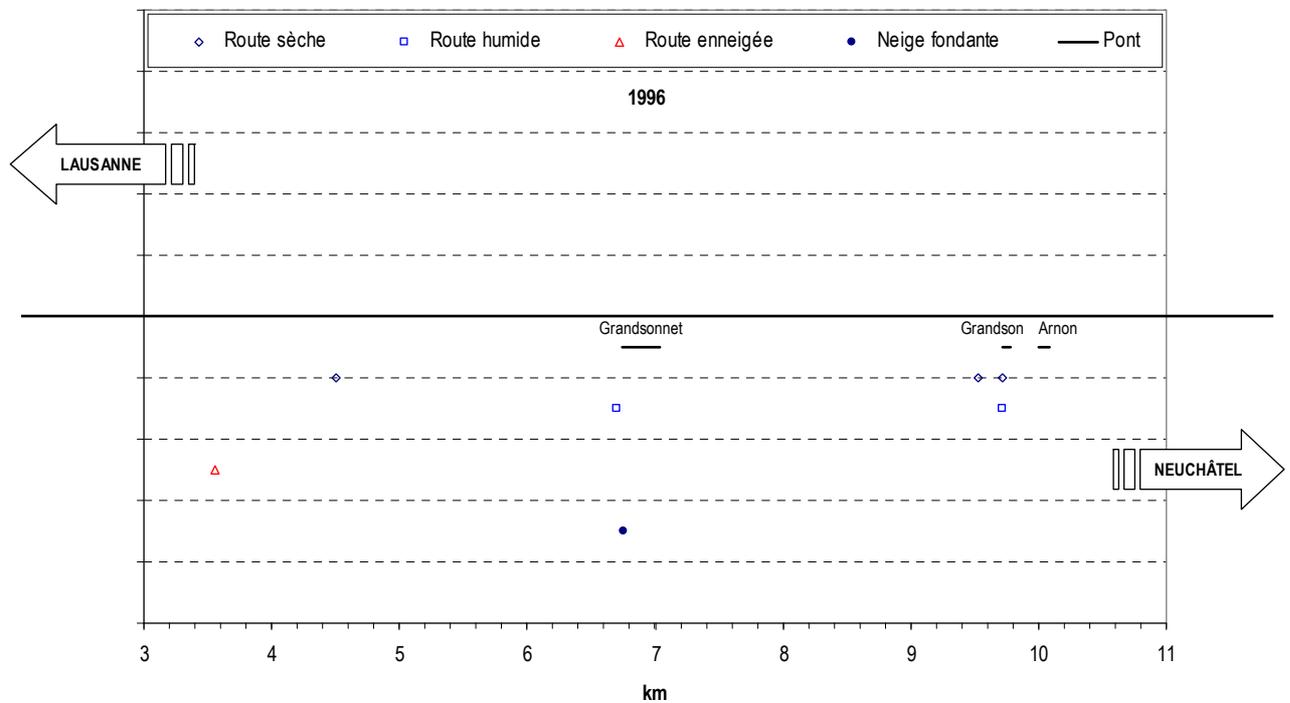
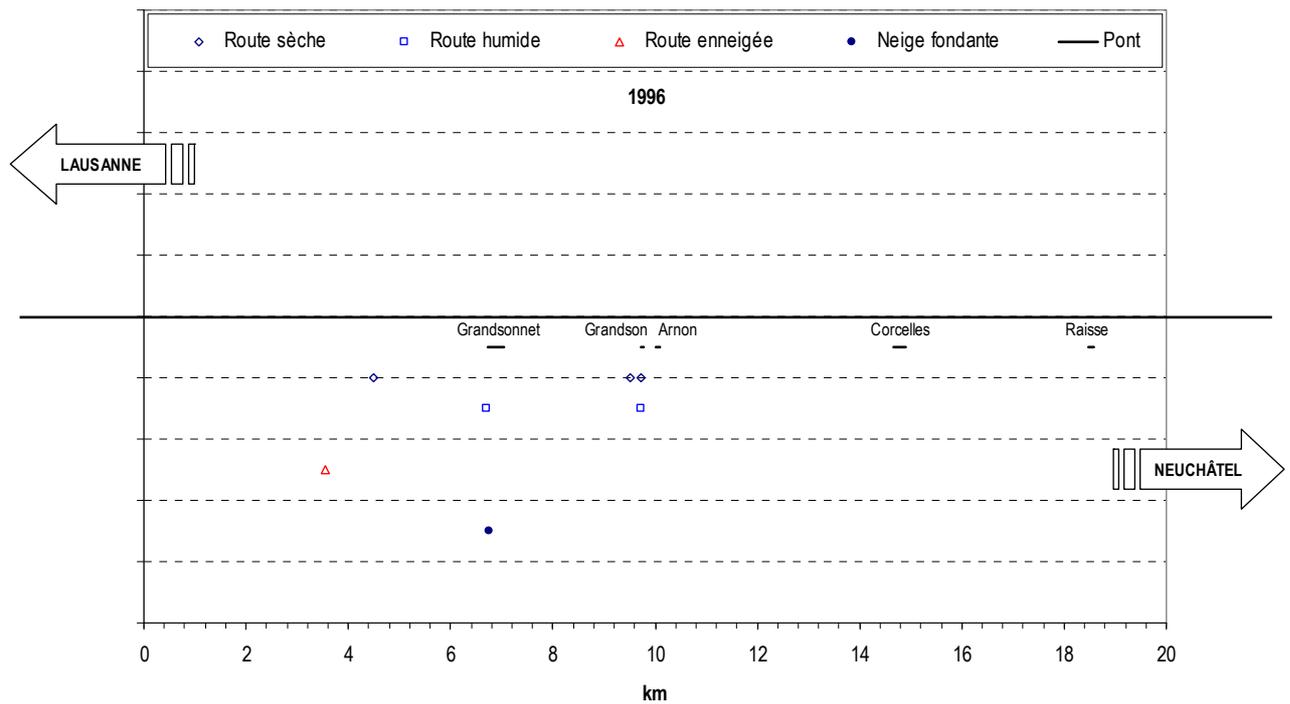
### 9.1.2 Autoroute A5 – Vaud

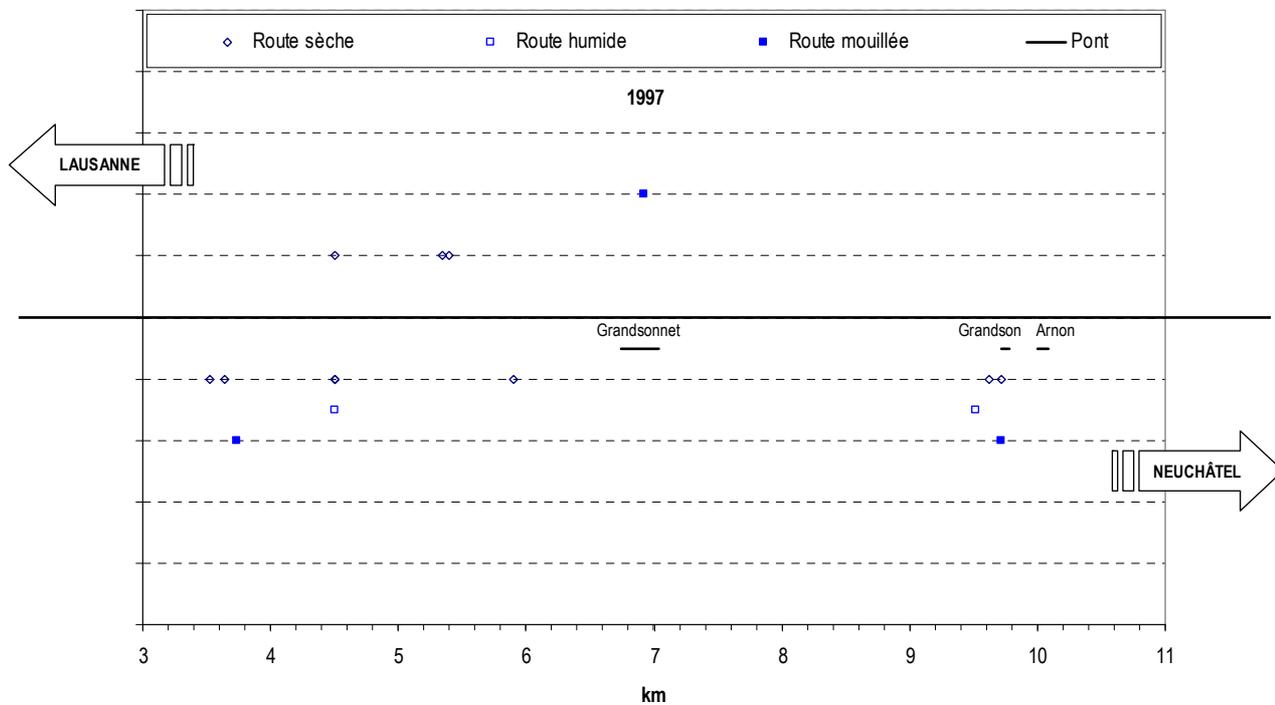
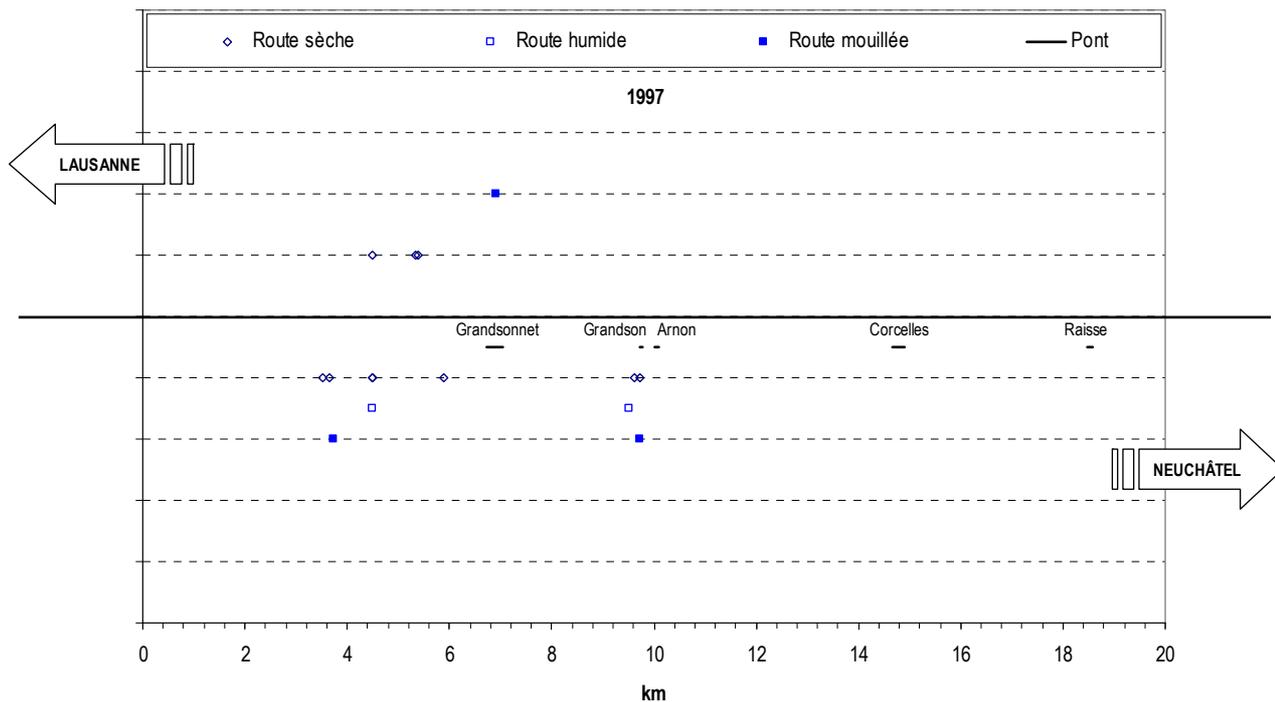
#### 9.1.2.1 Tronçon complet

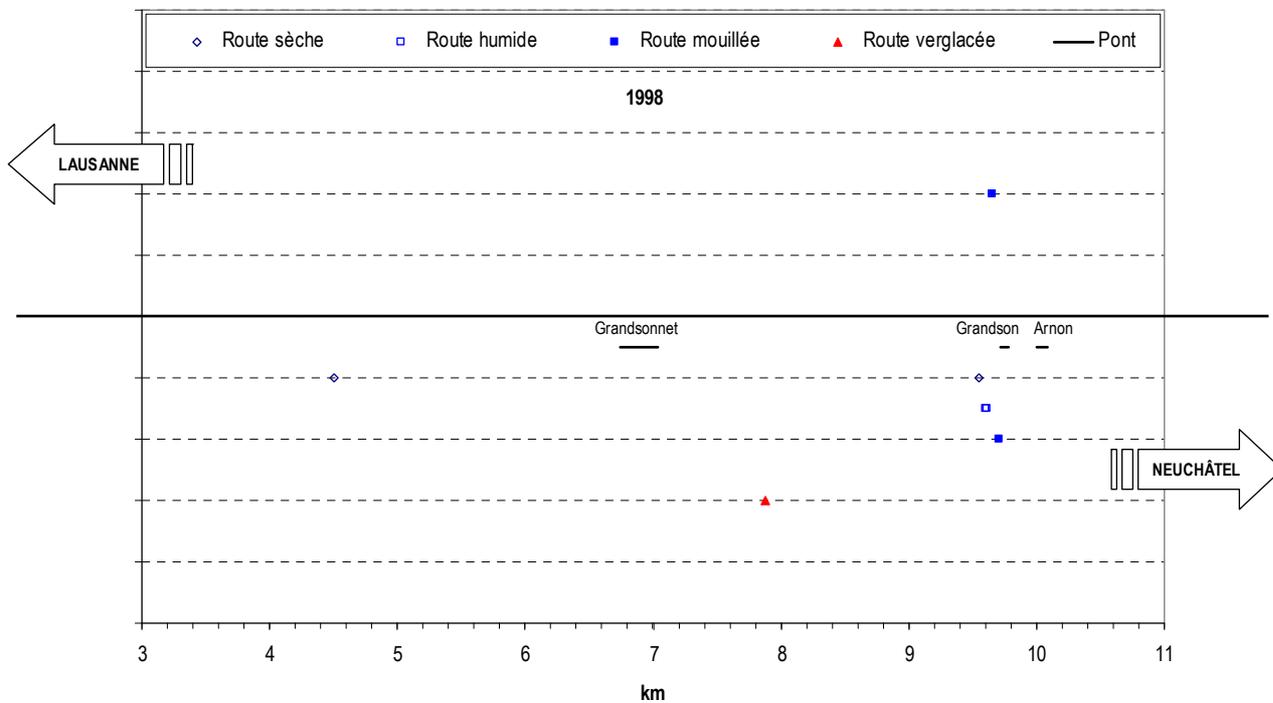
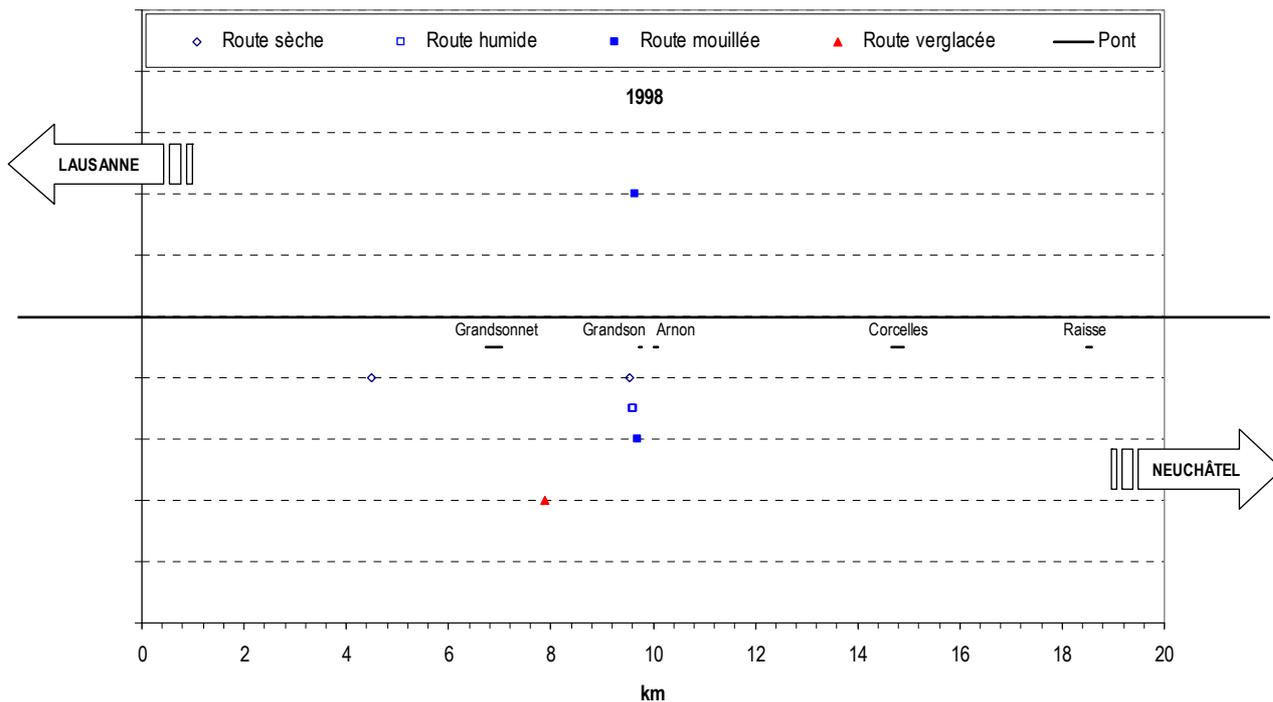


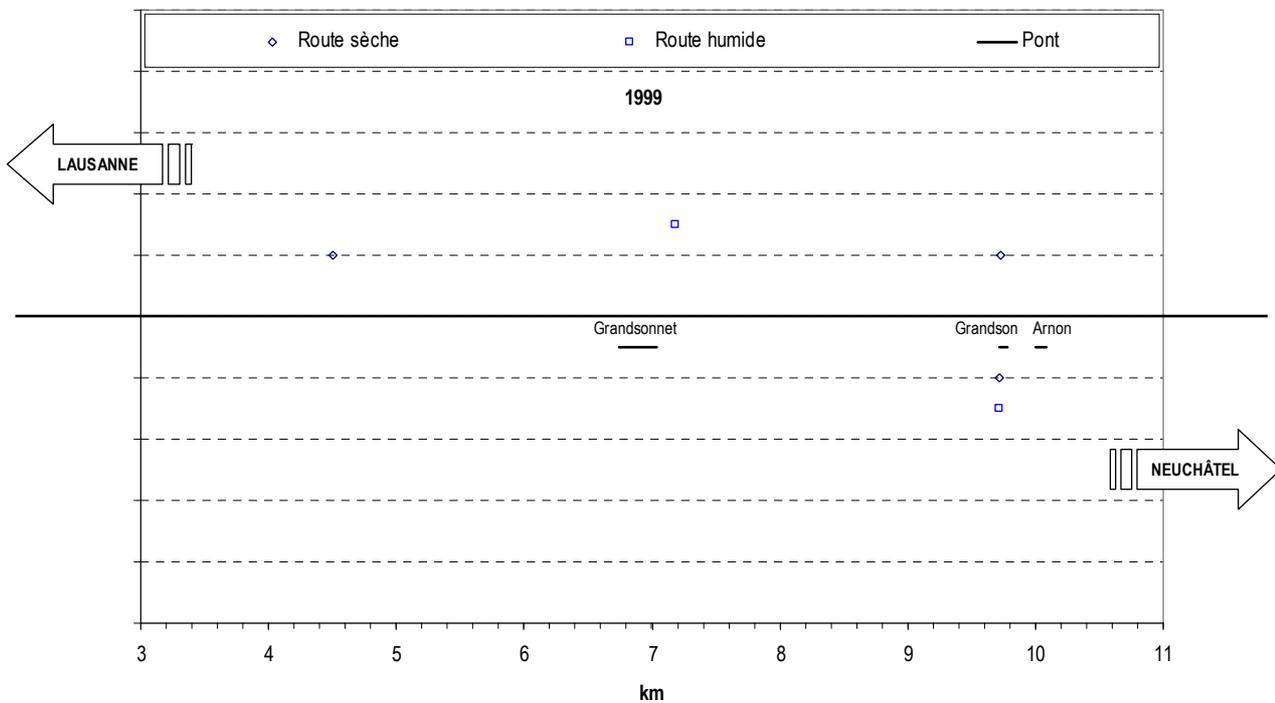
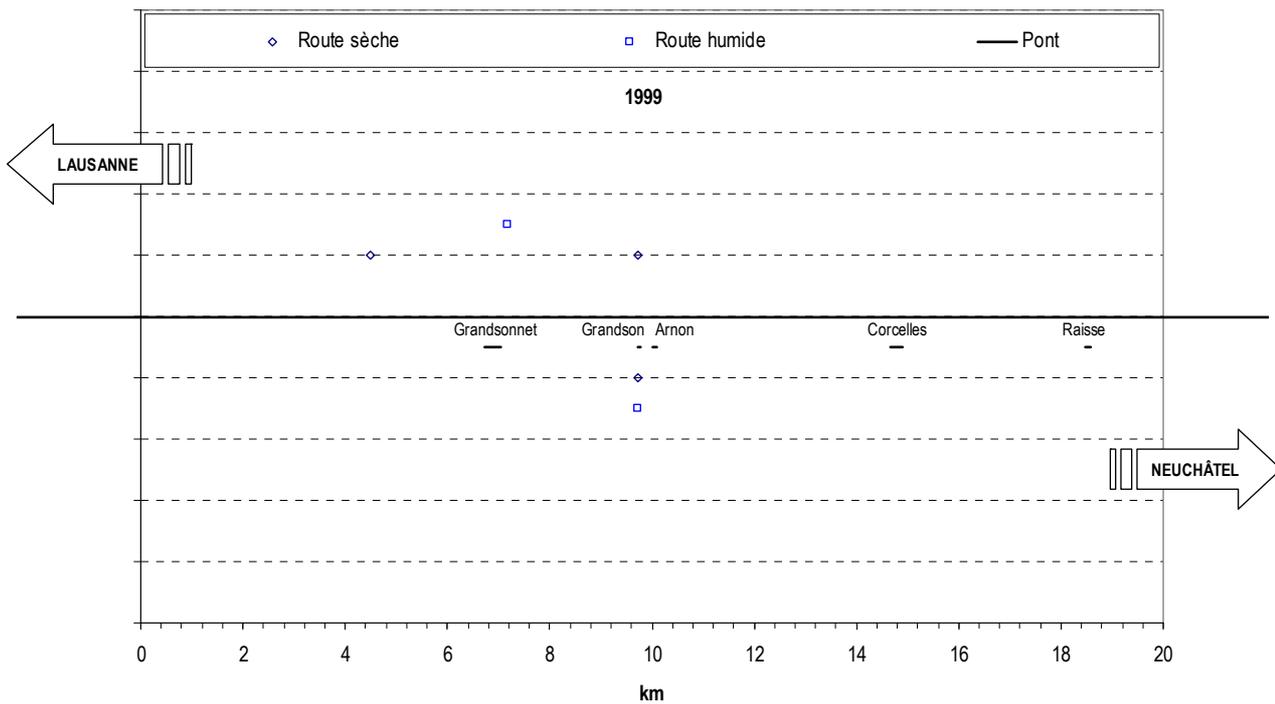
9.1.2.2 Statistiques par année

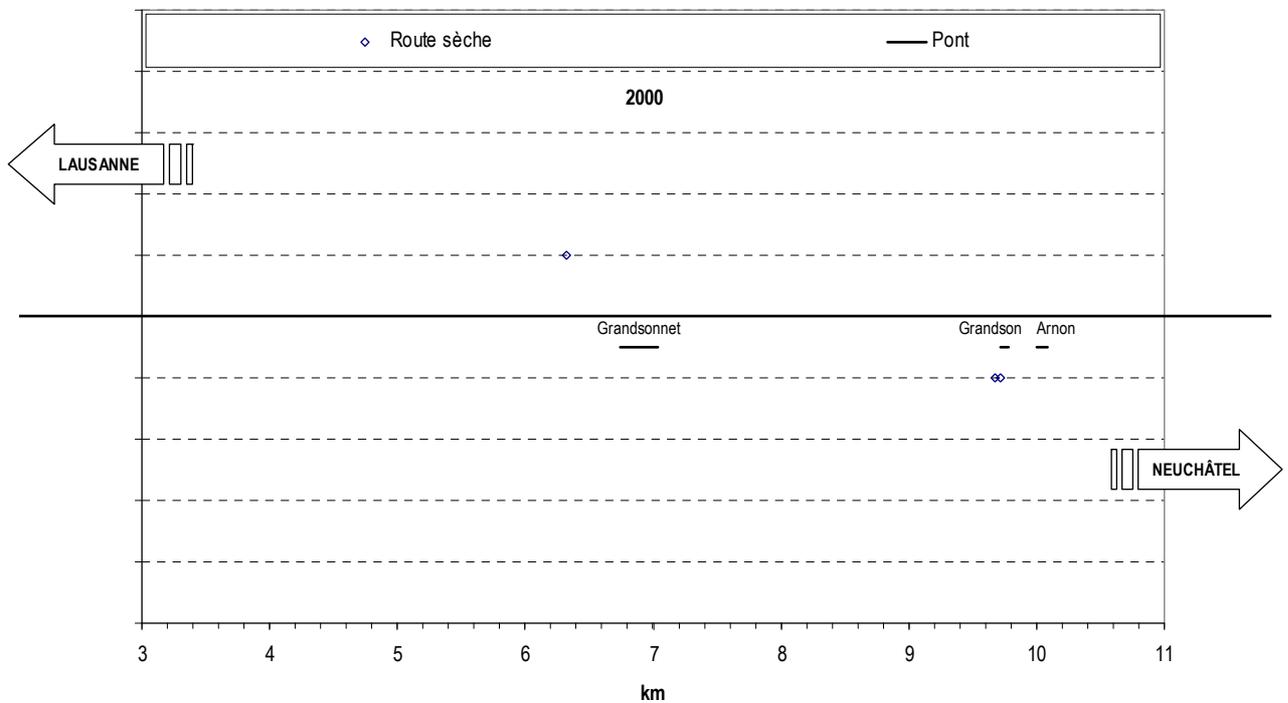
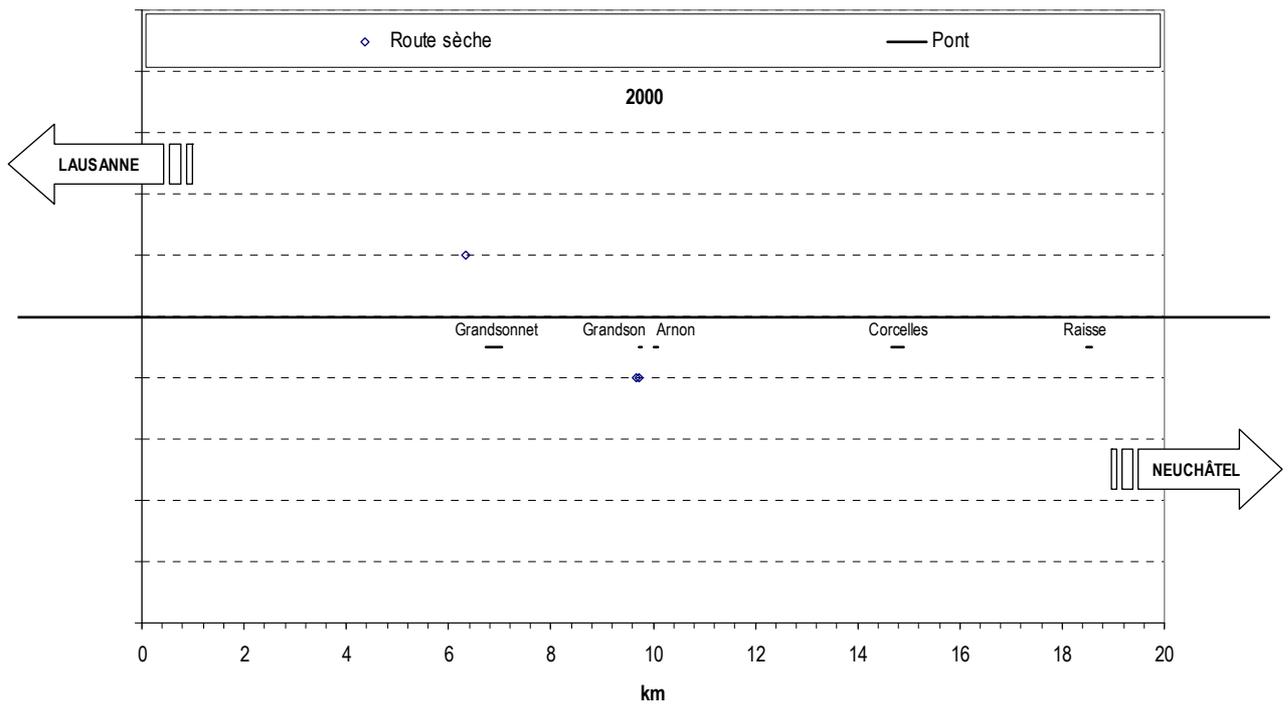


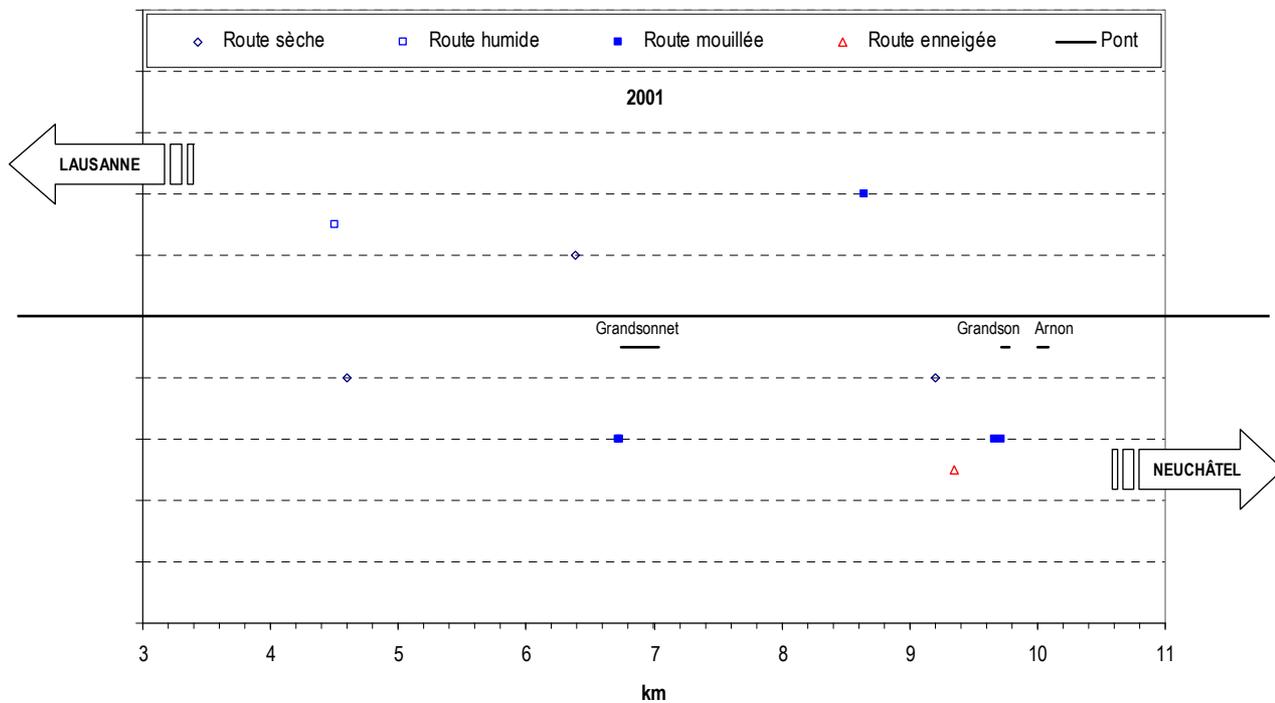
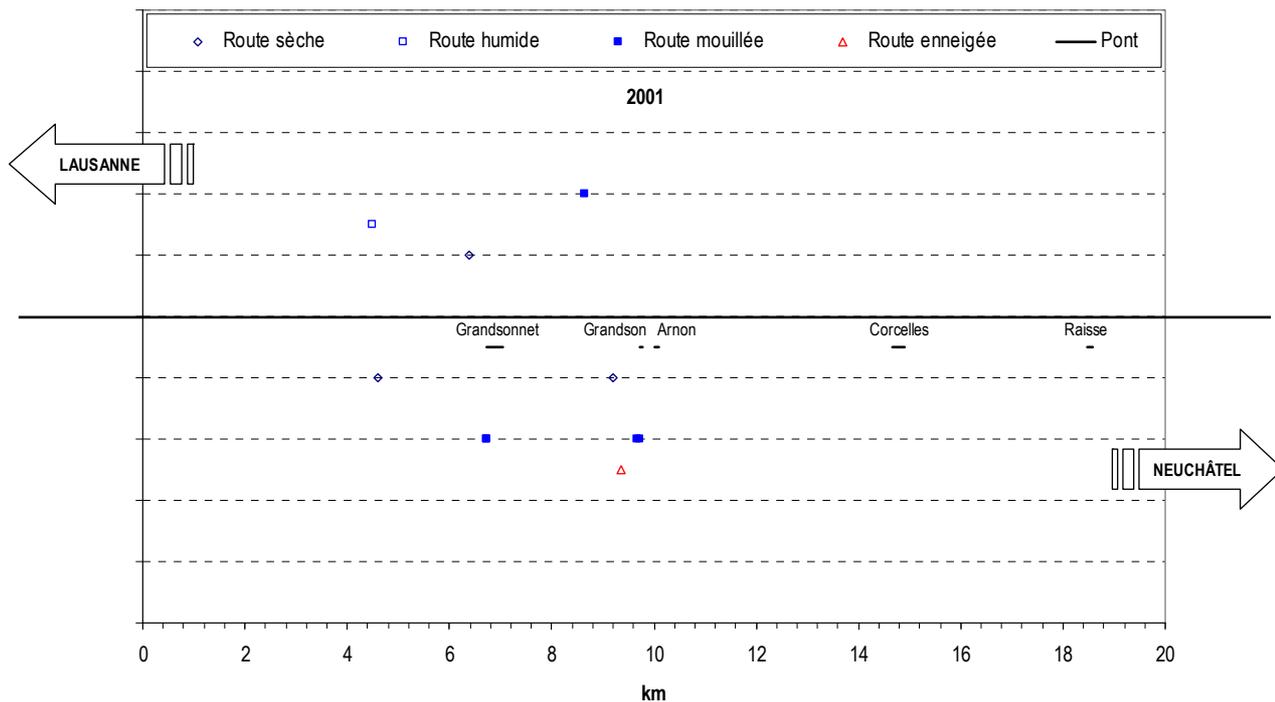


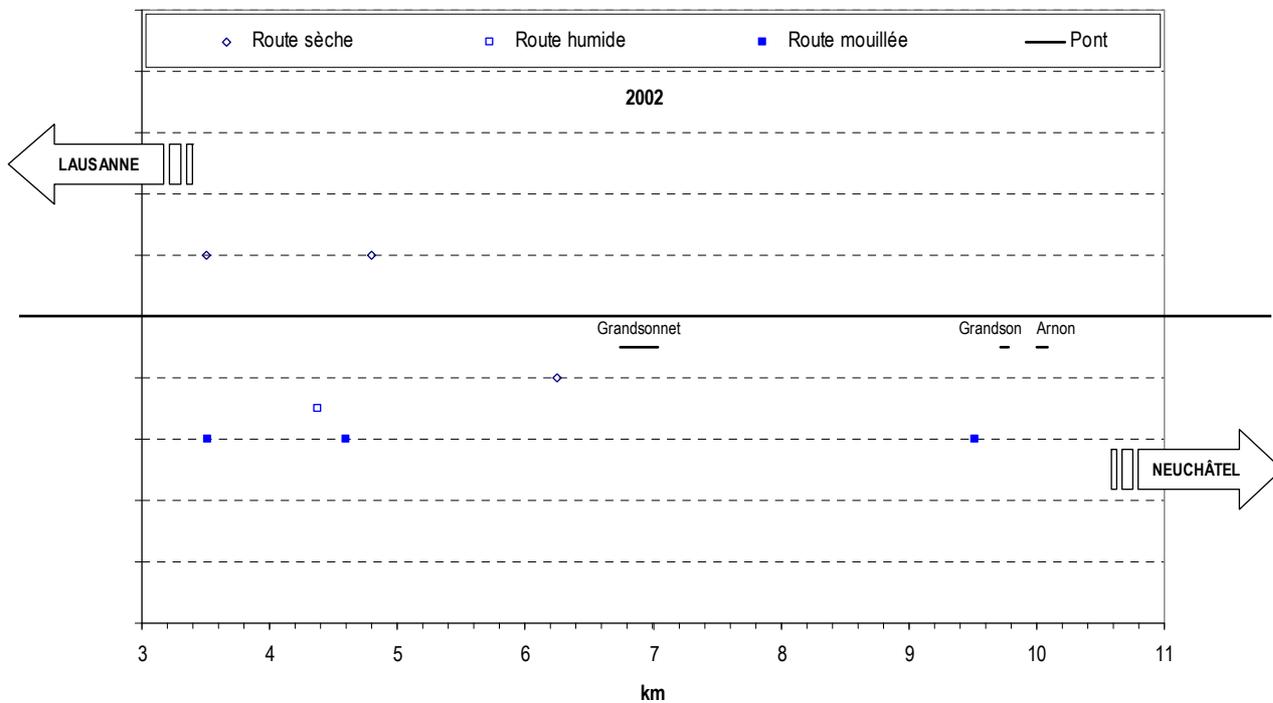
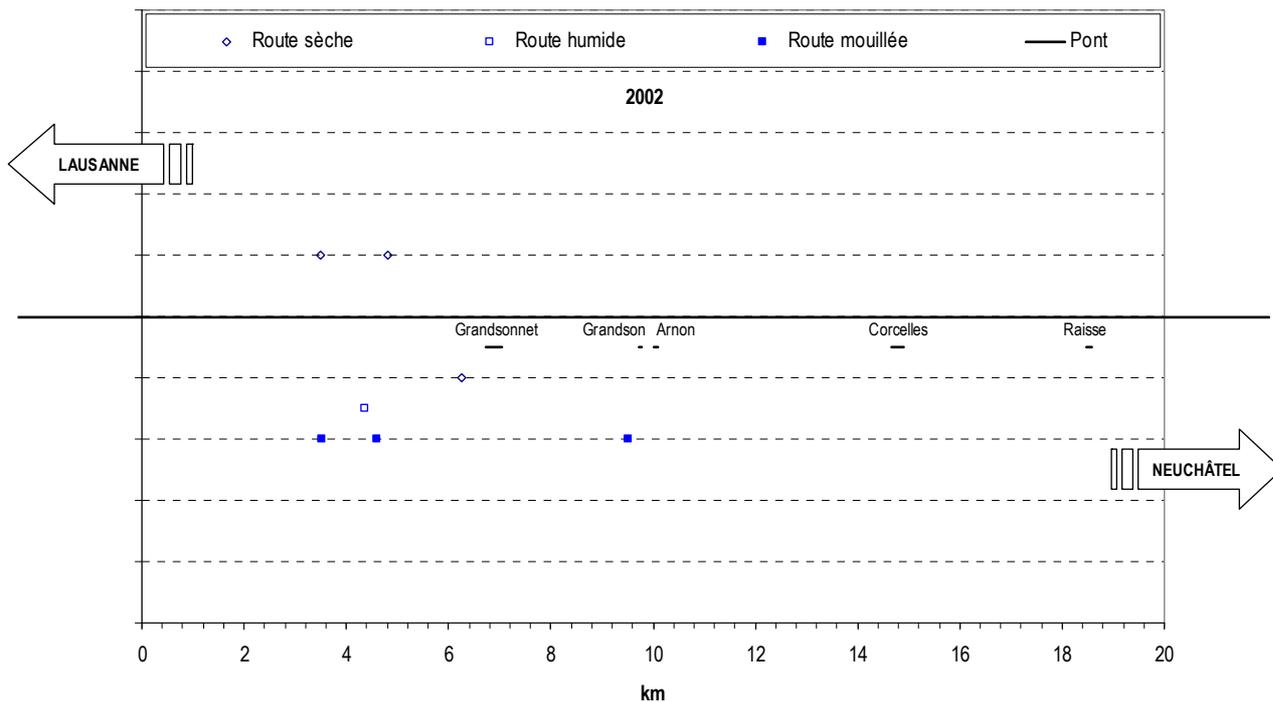


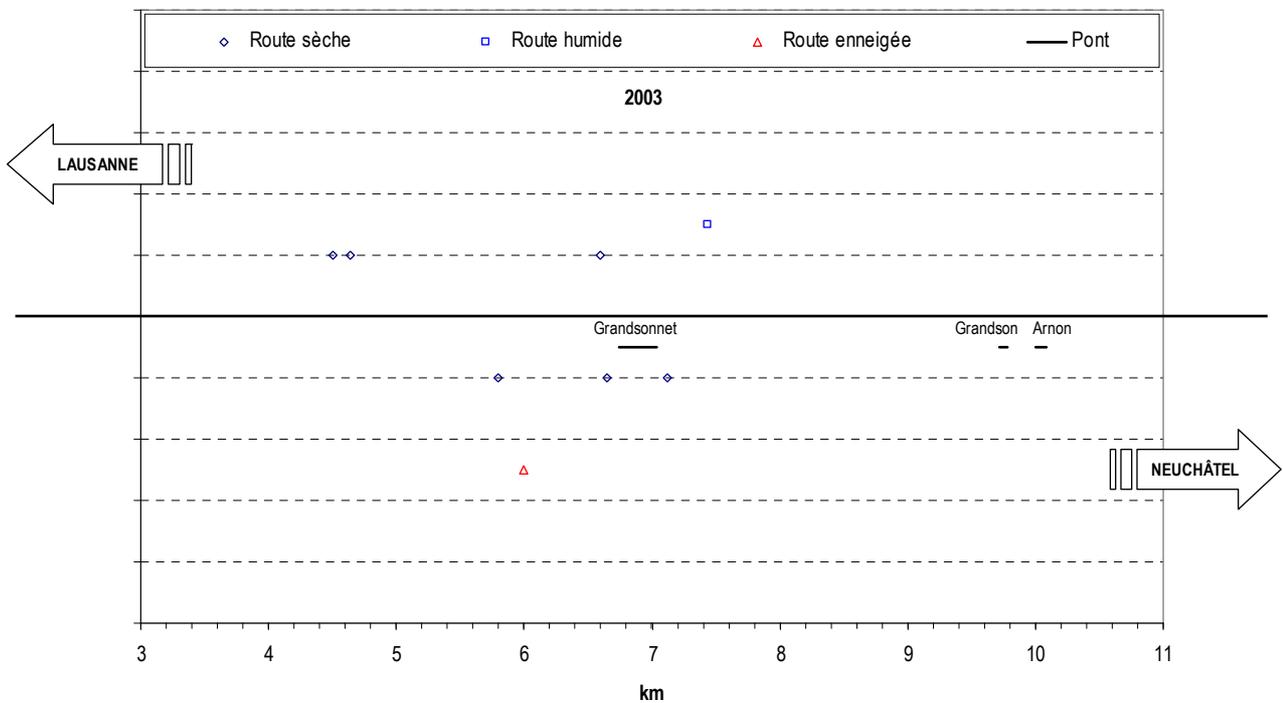
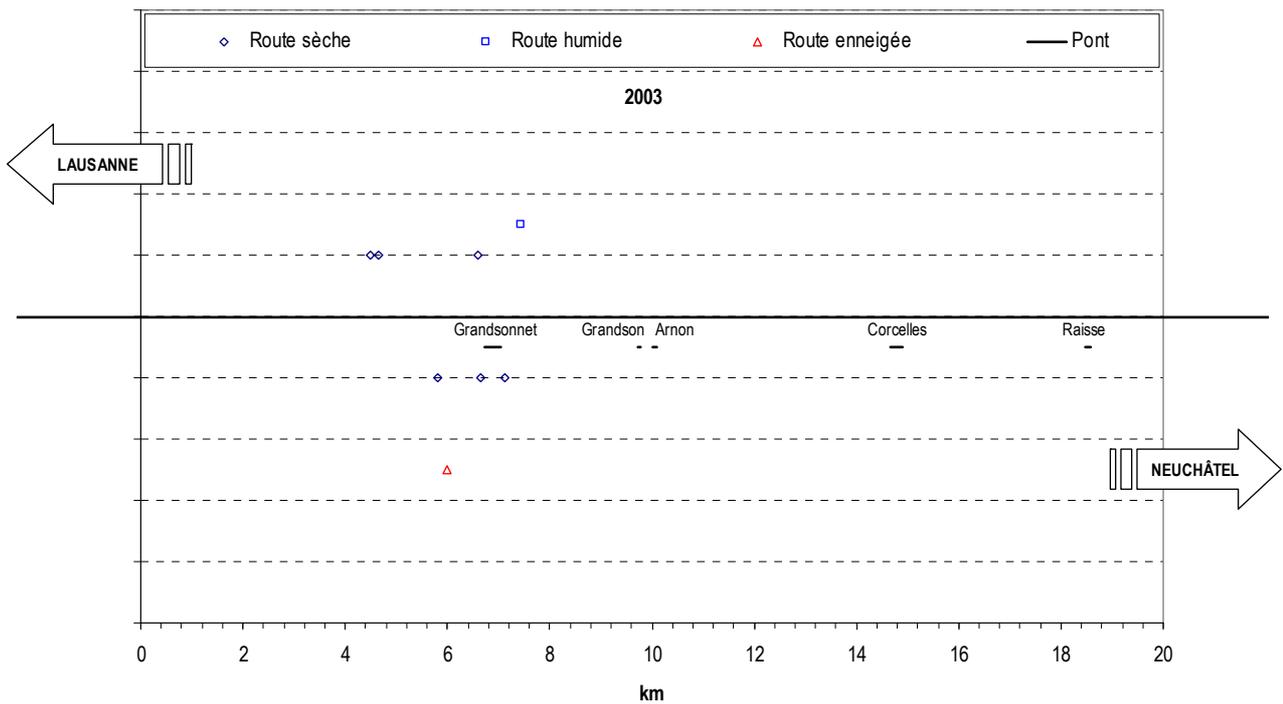


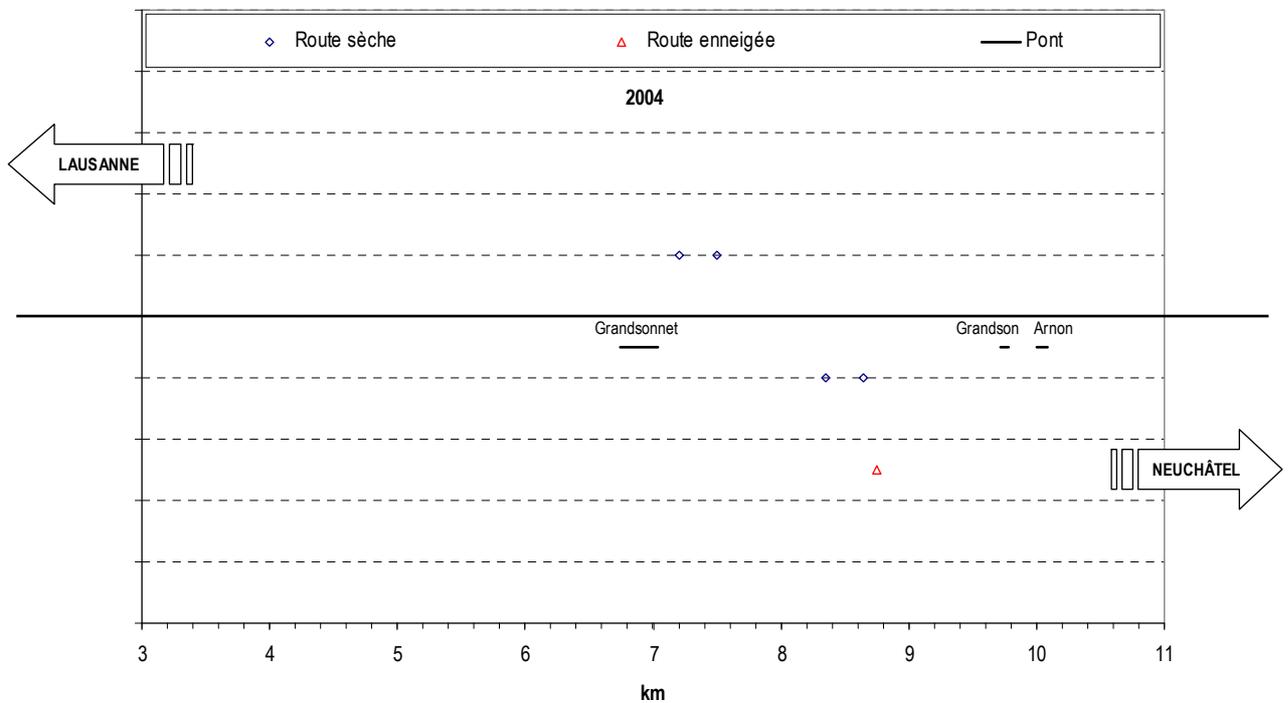
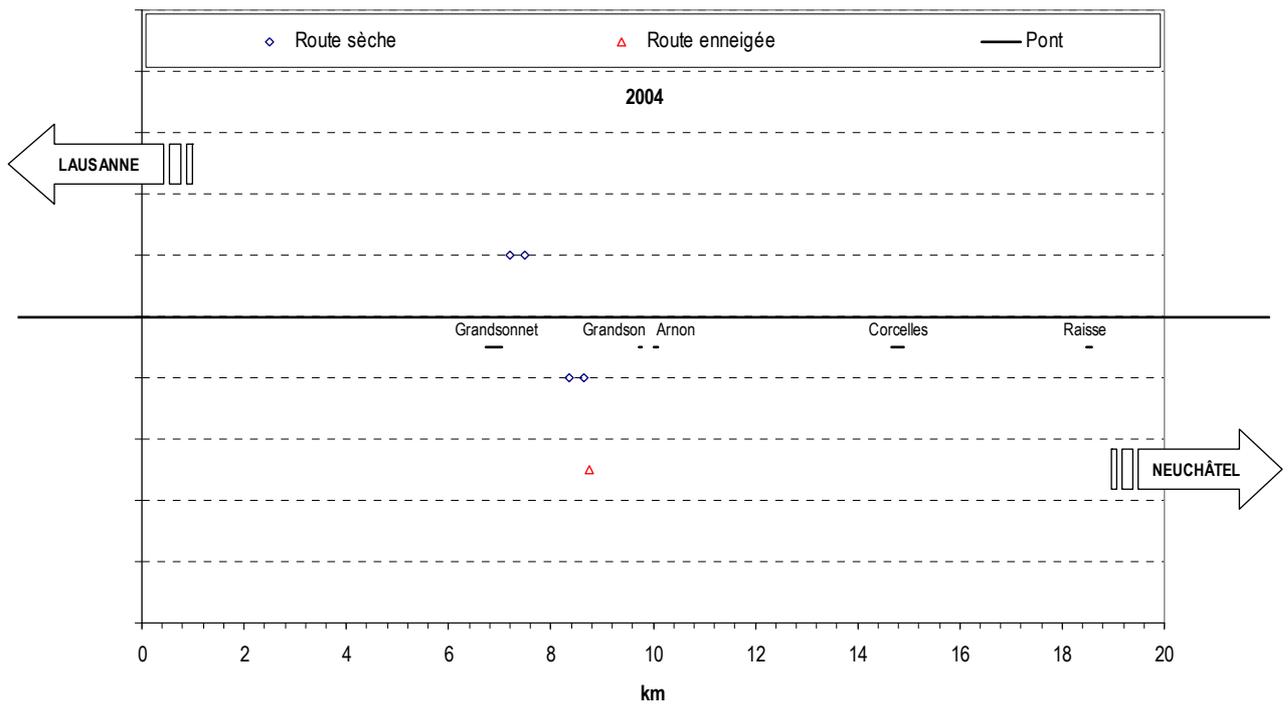






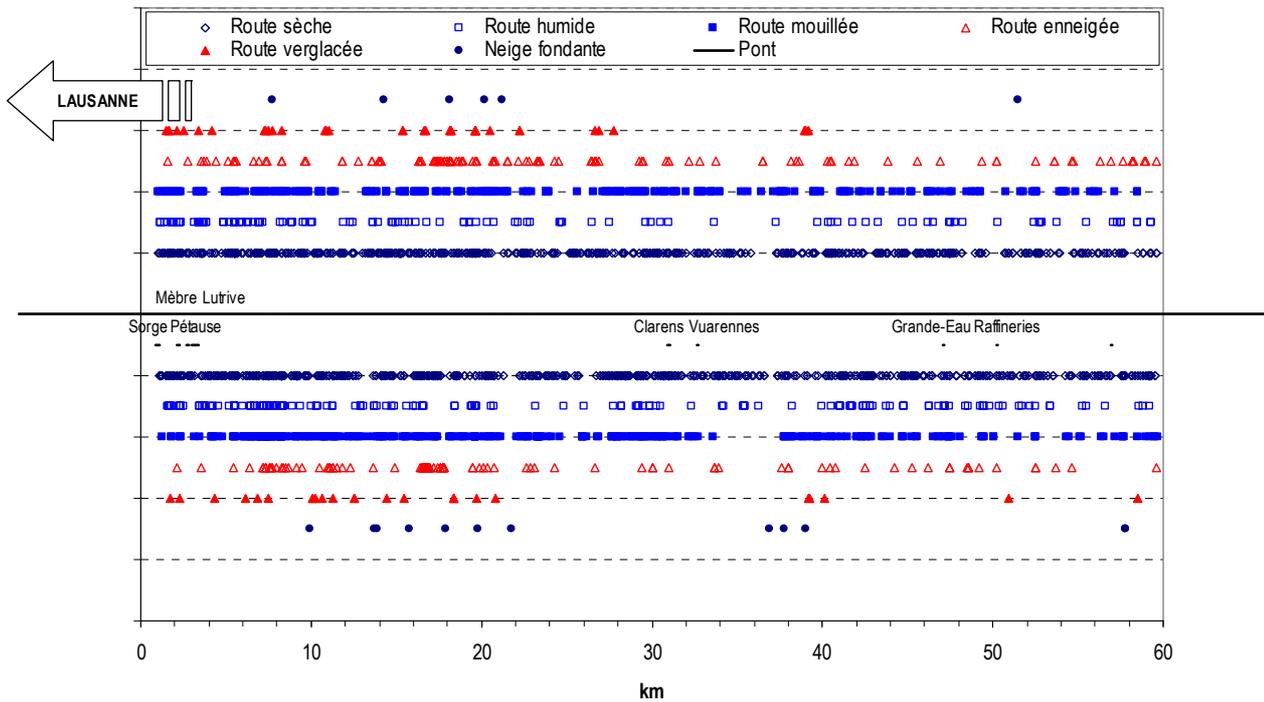




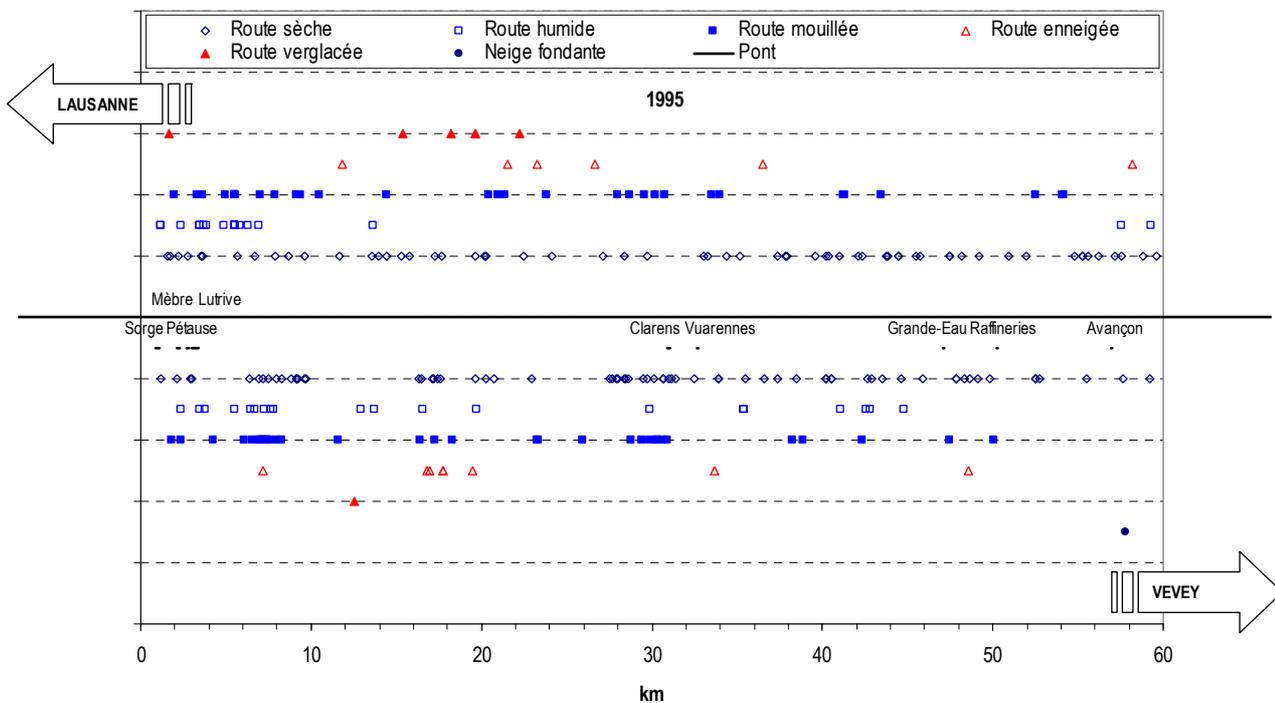


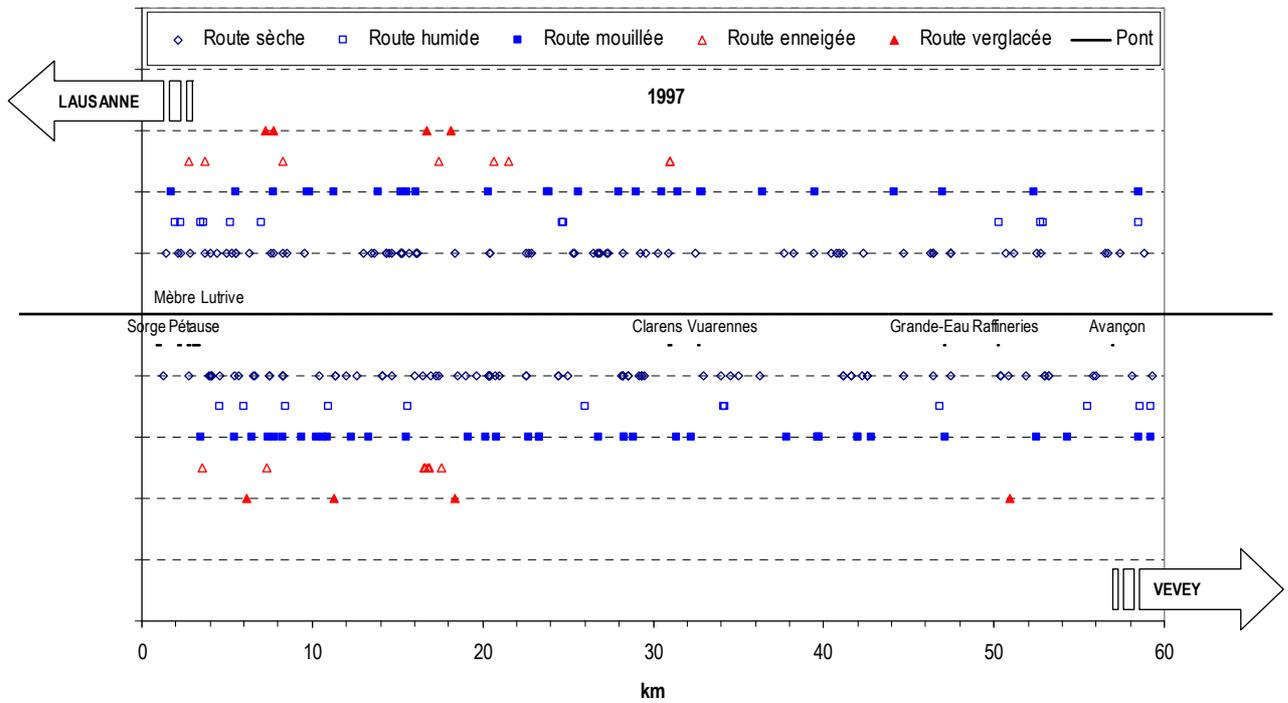
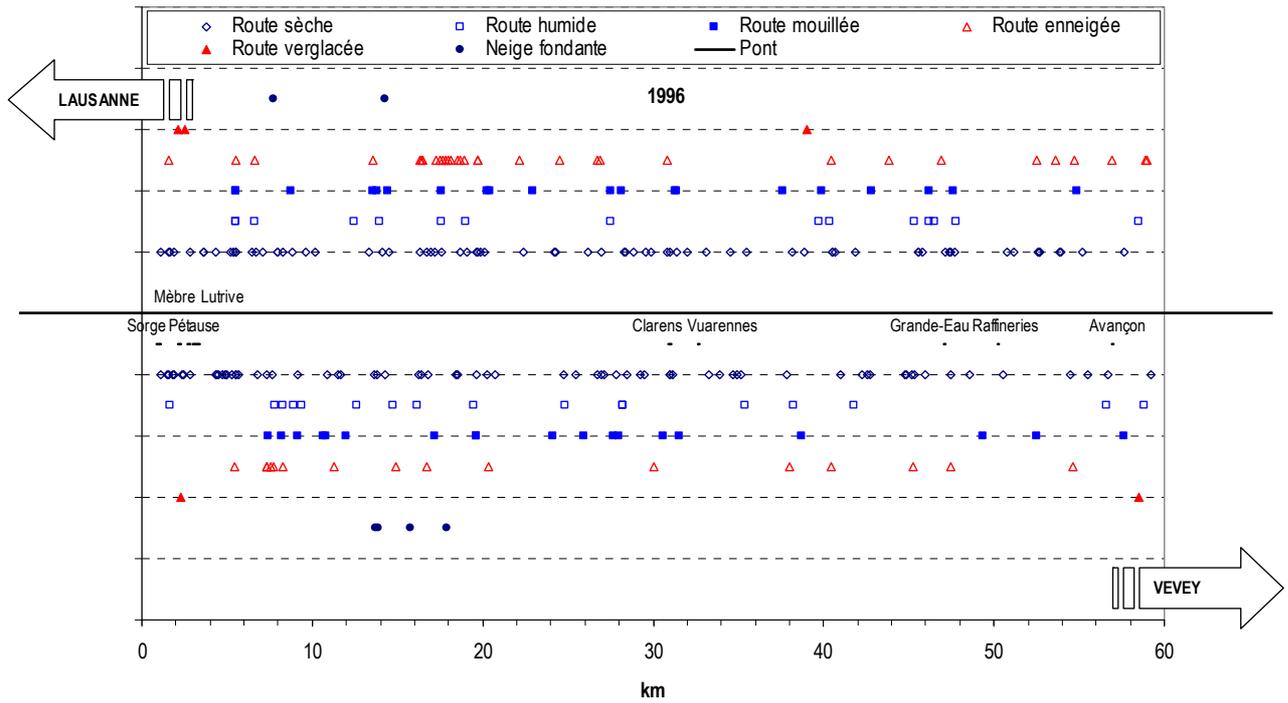
### 9.1.3 Autoroute A9 – Vaud

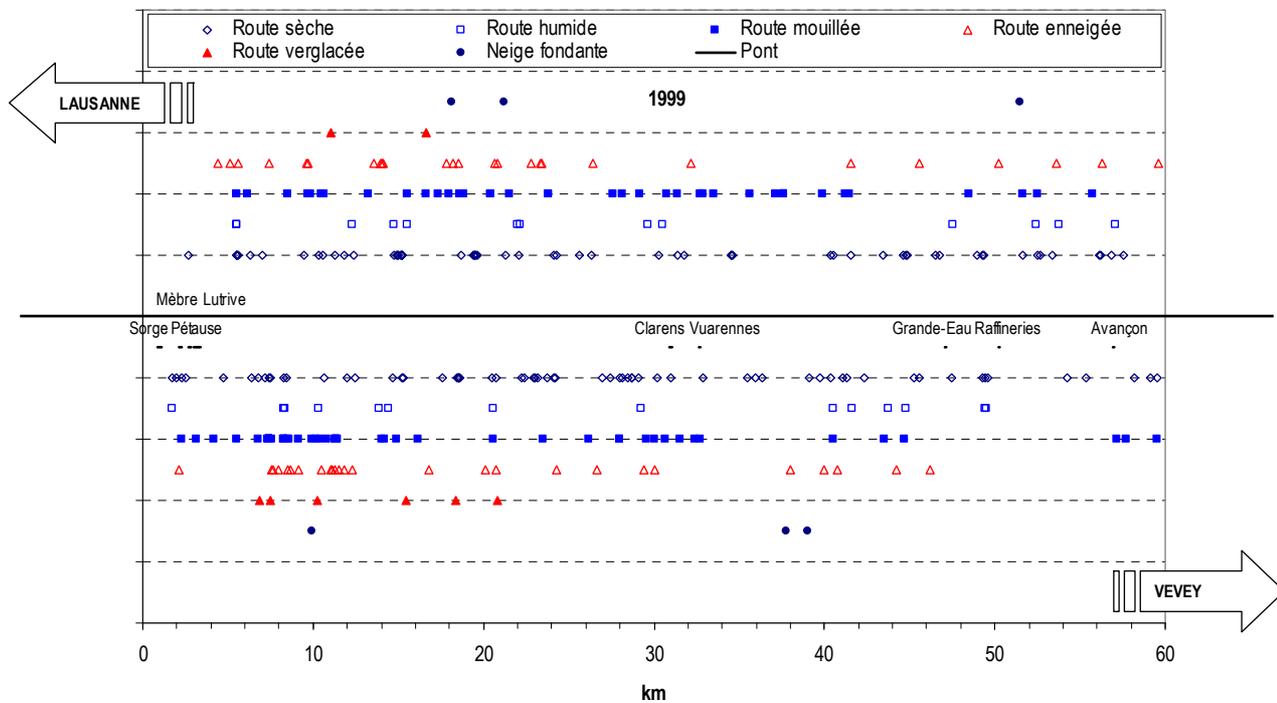
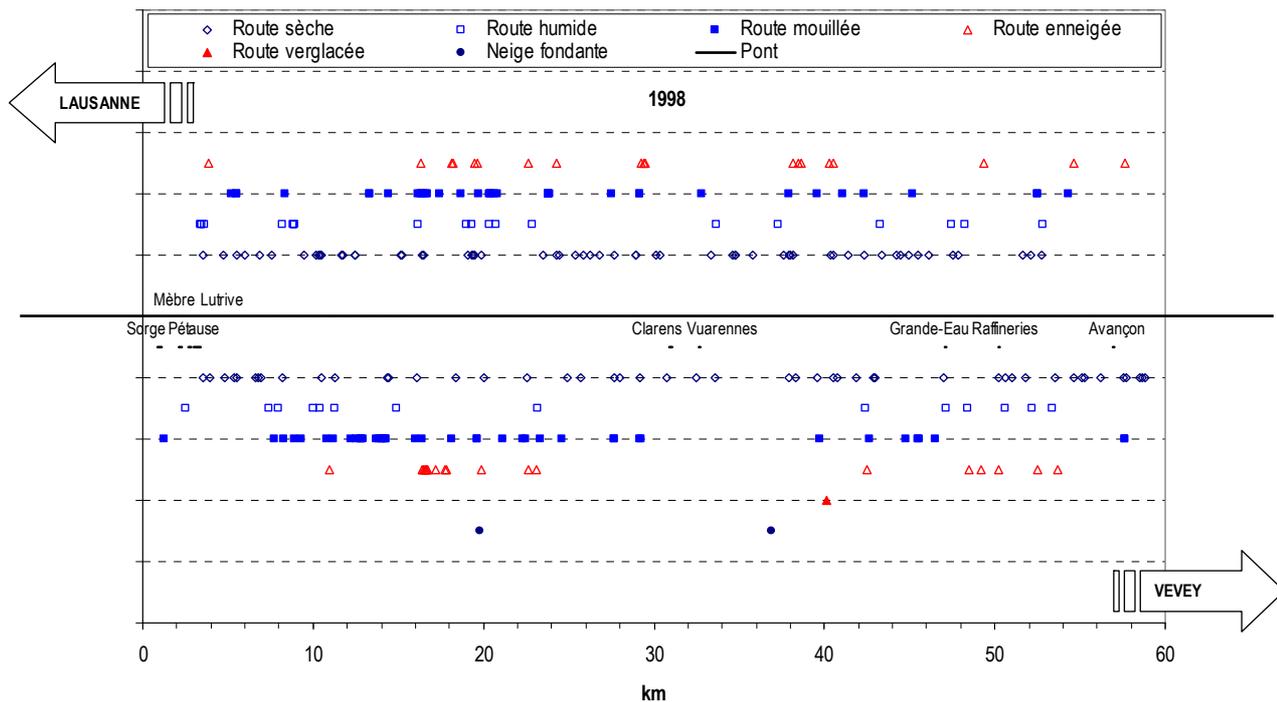
#### 9.1.3.1 Tronçon complet

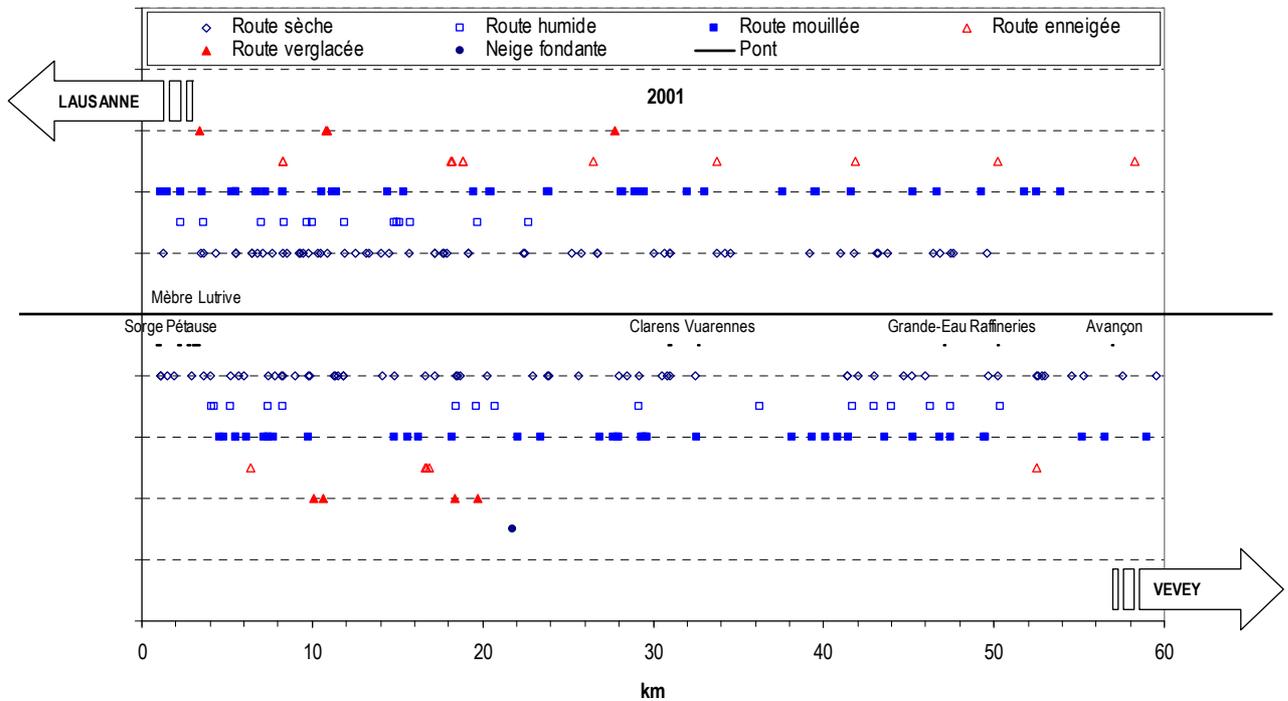
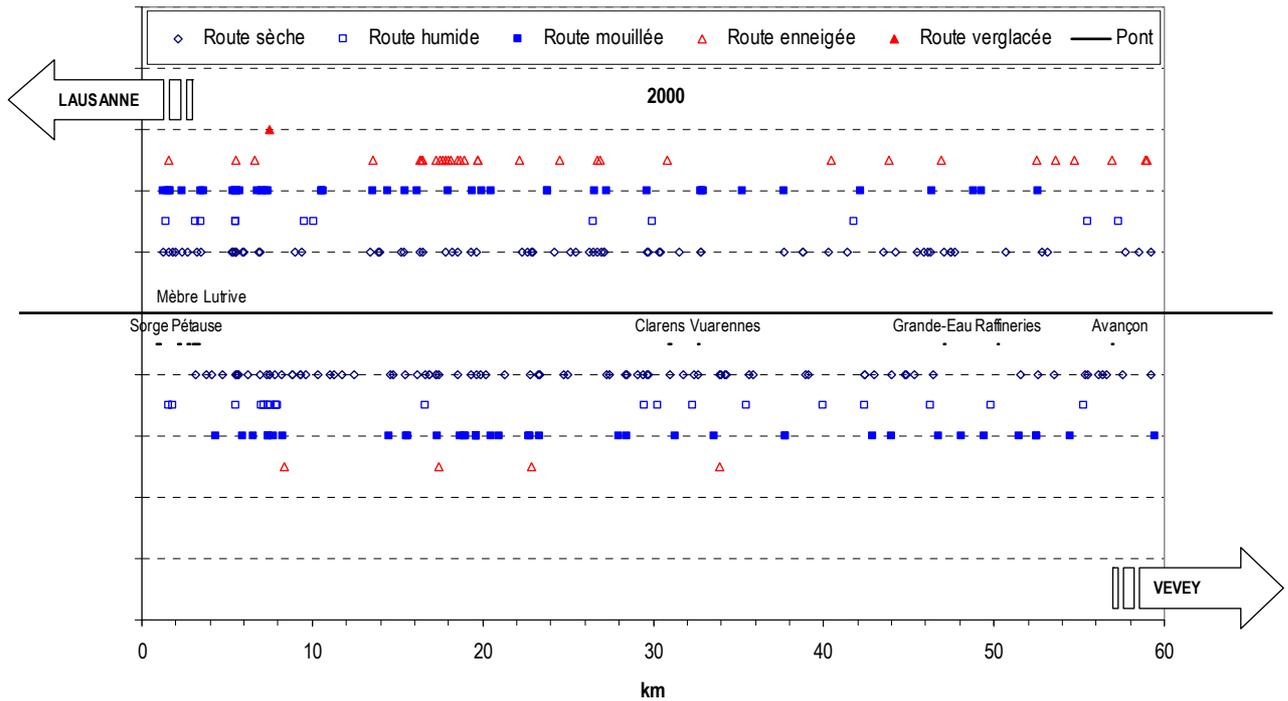


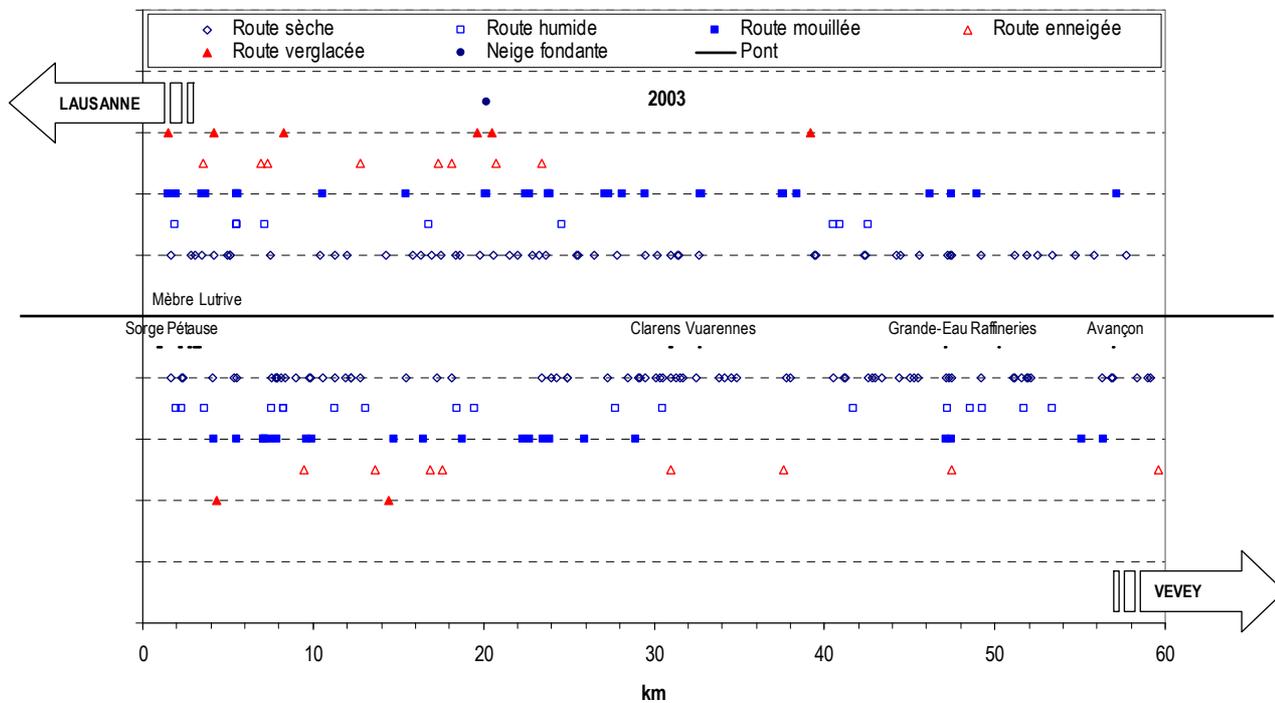
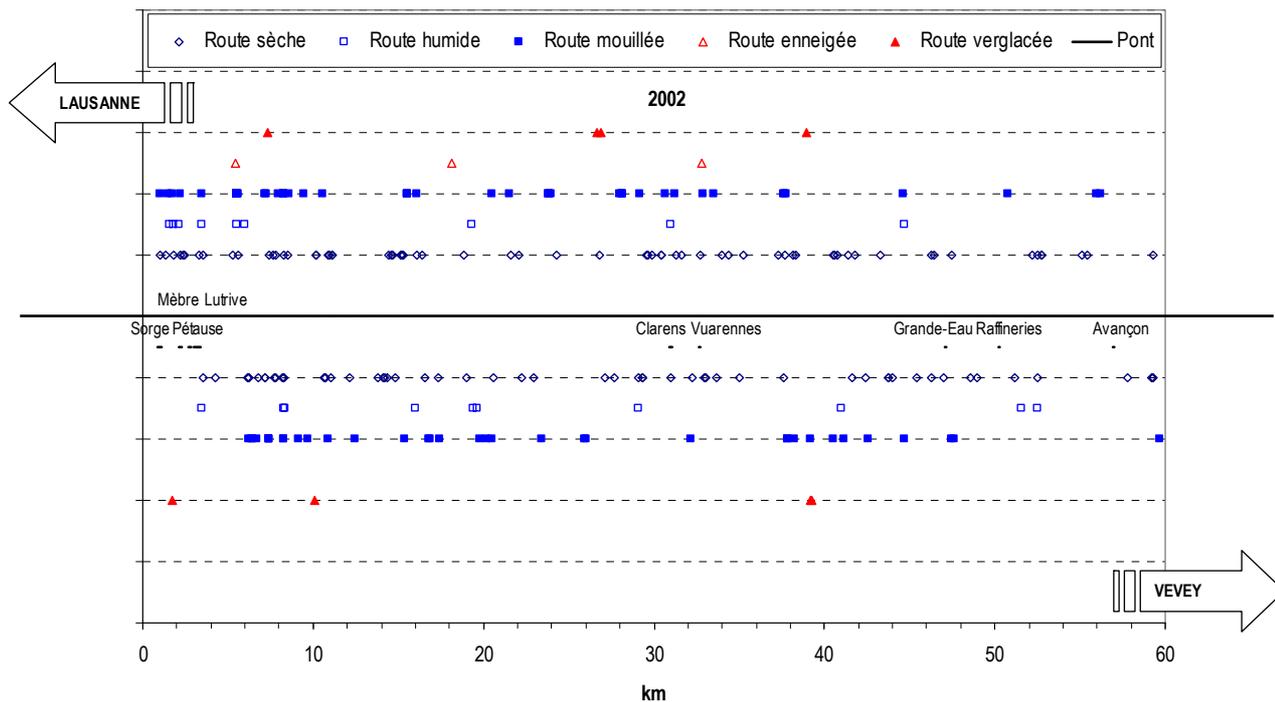
#### 9.1.3.2 Statistiques par année

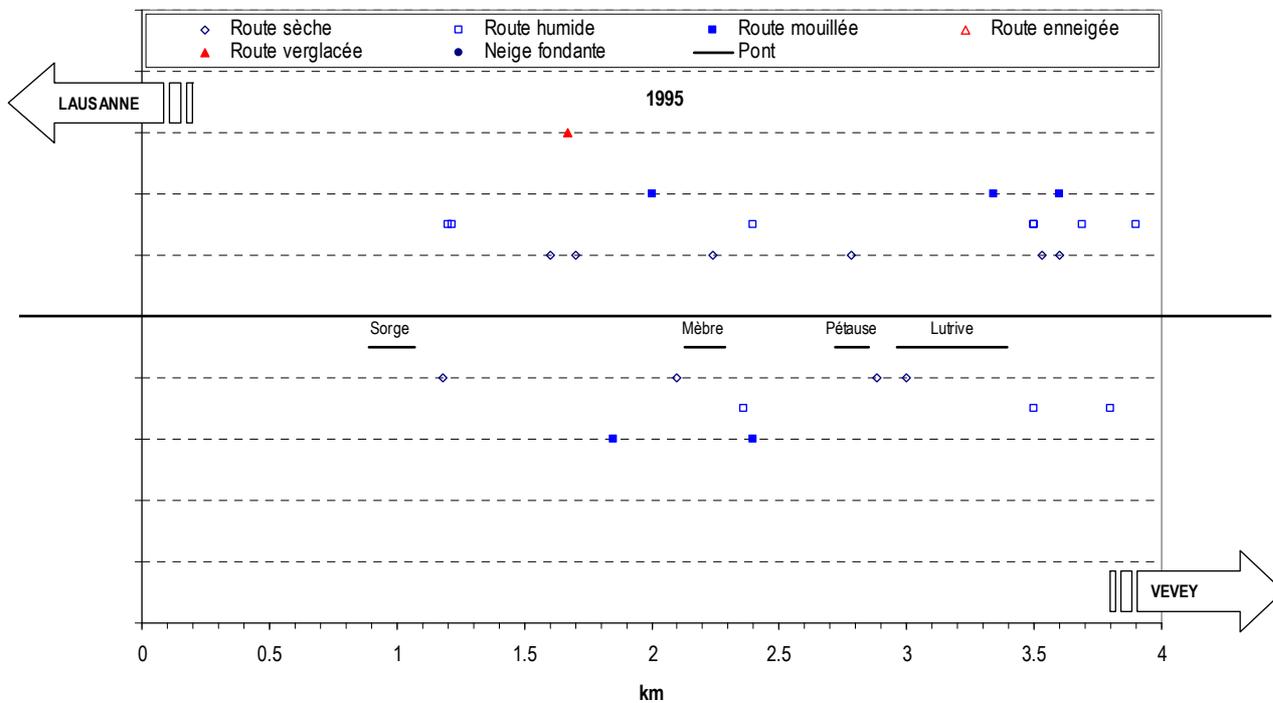
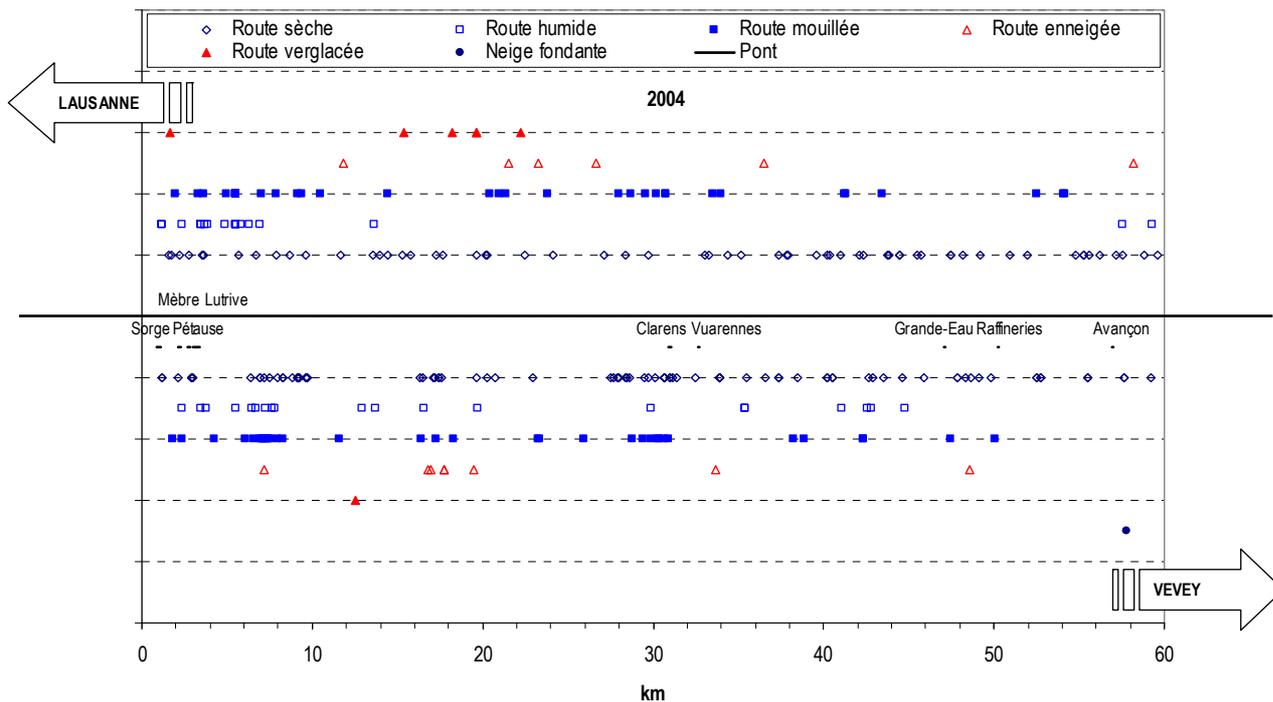


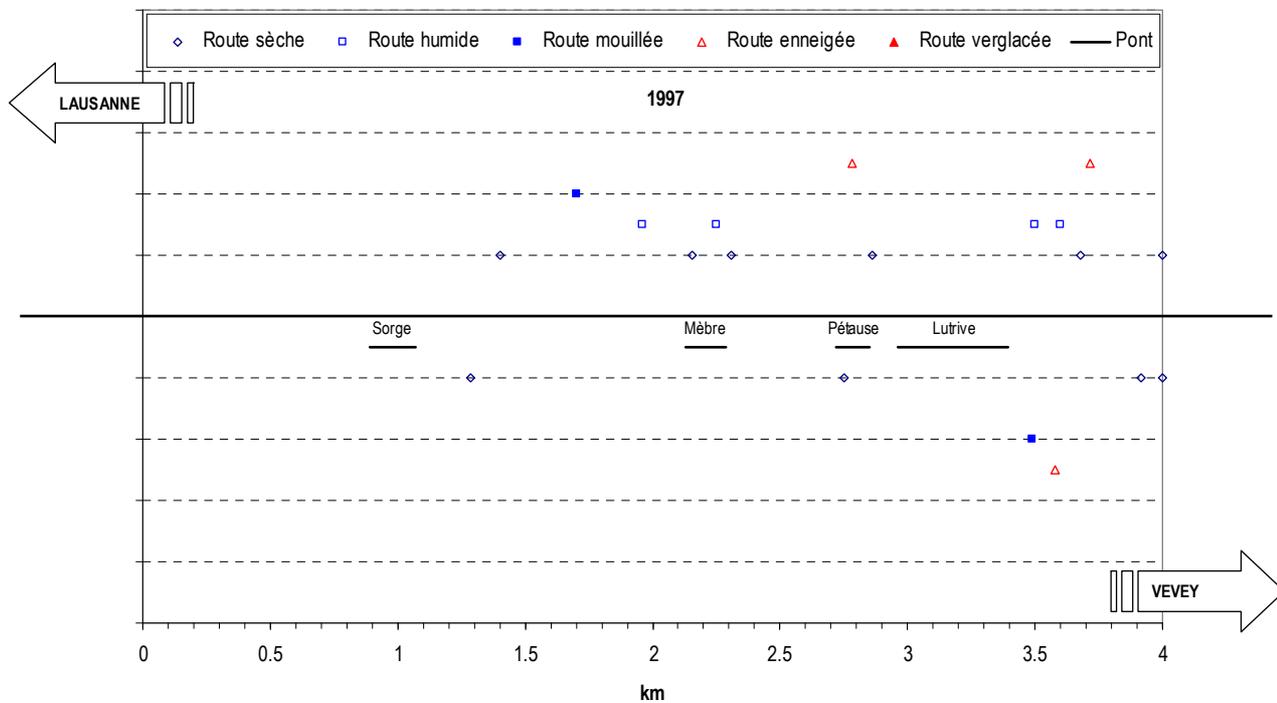
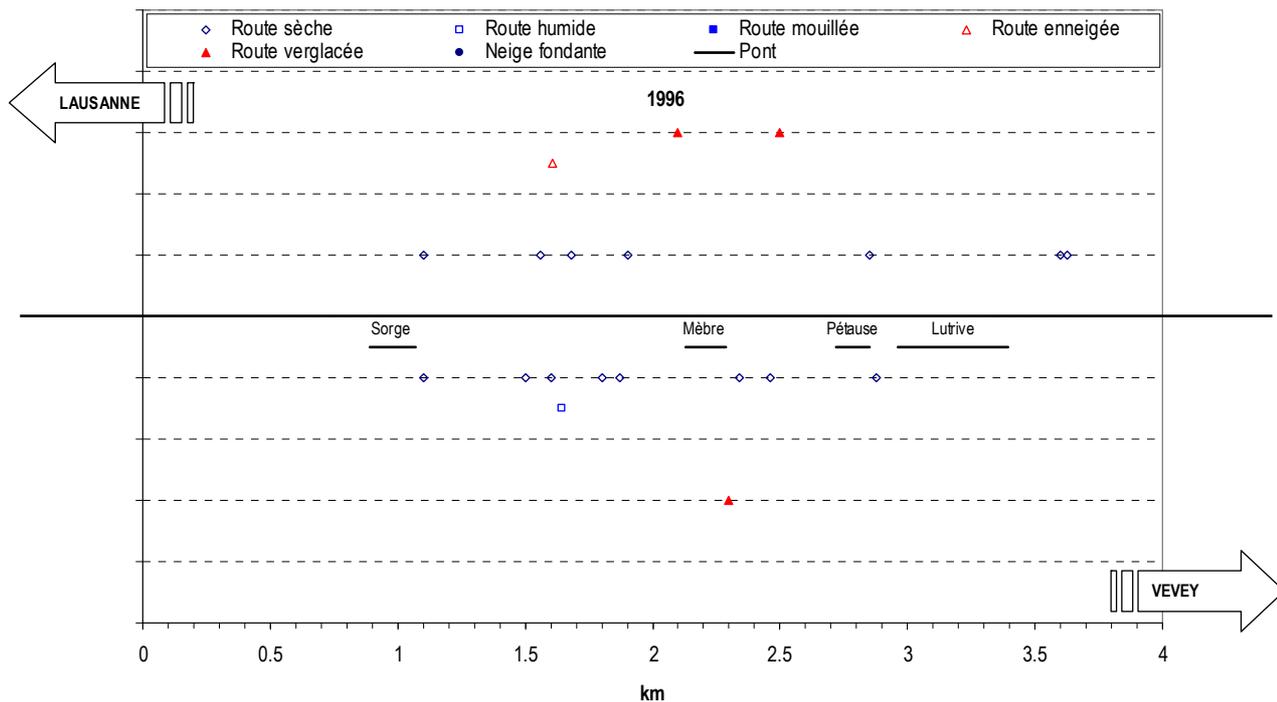


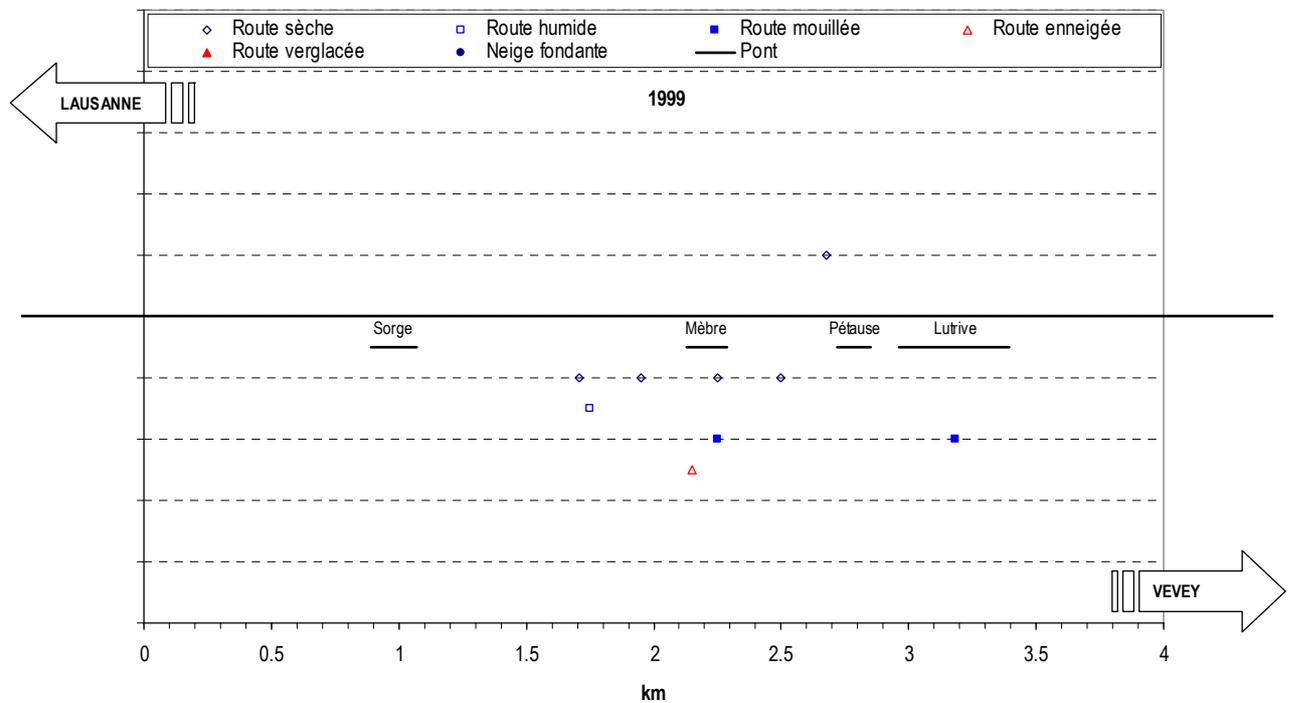
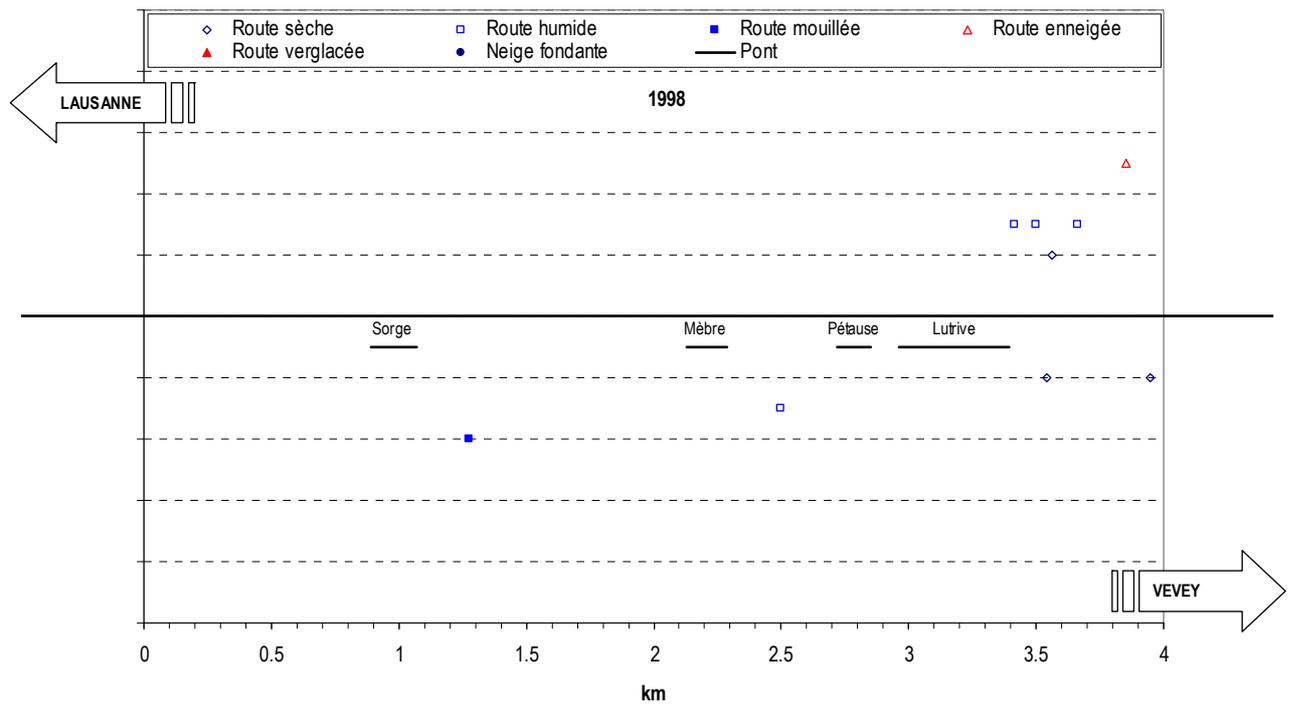


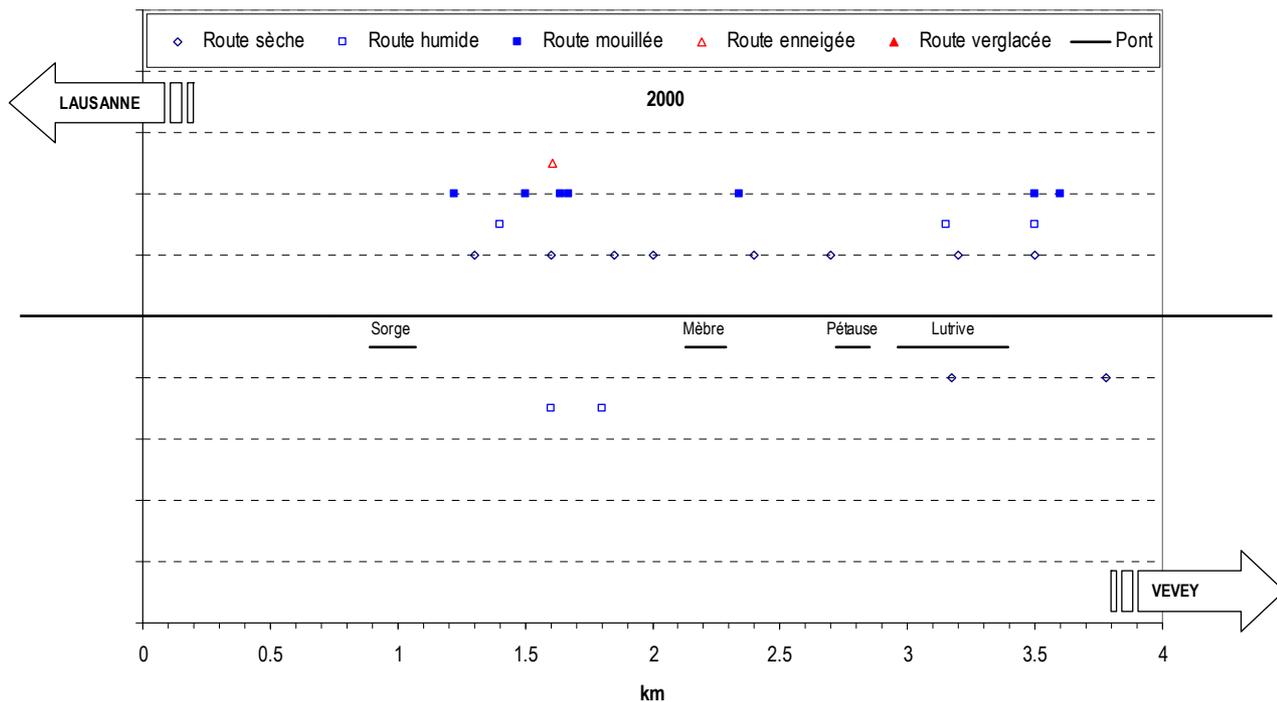


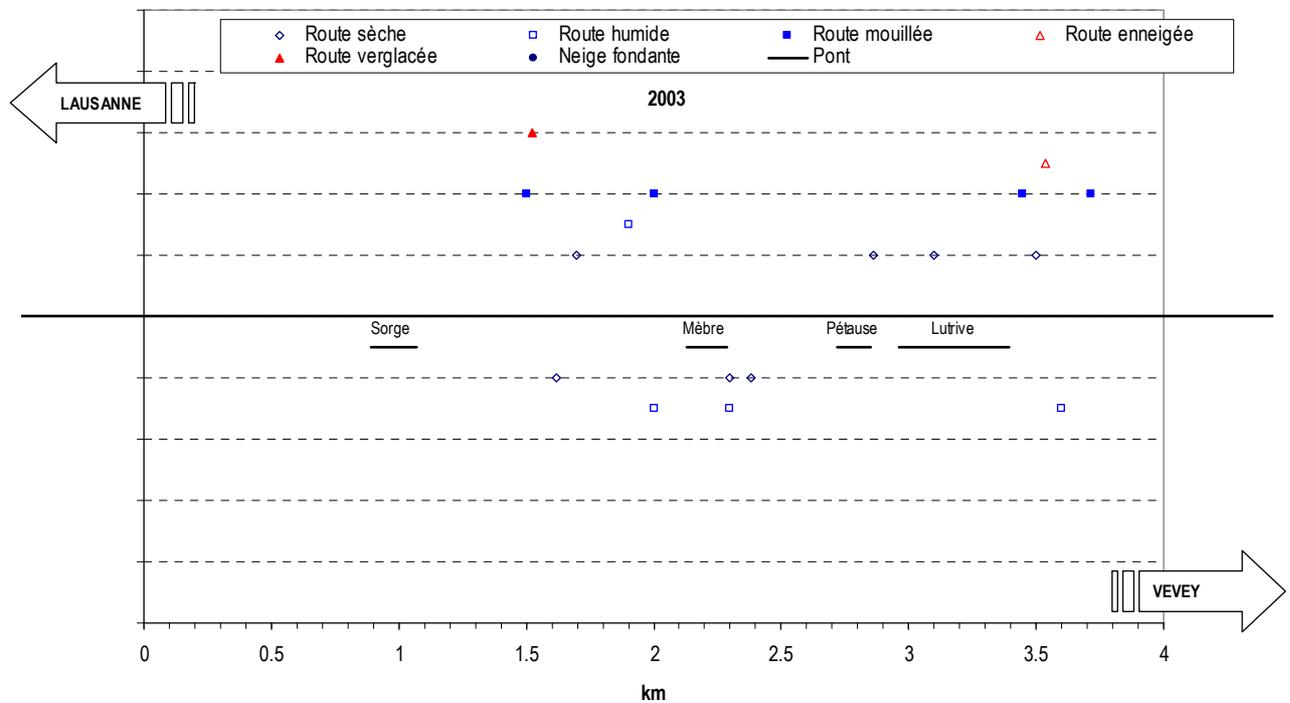
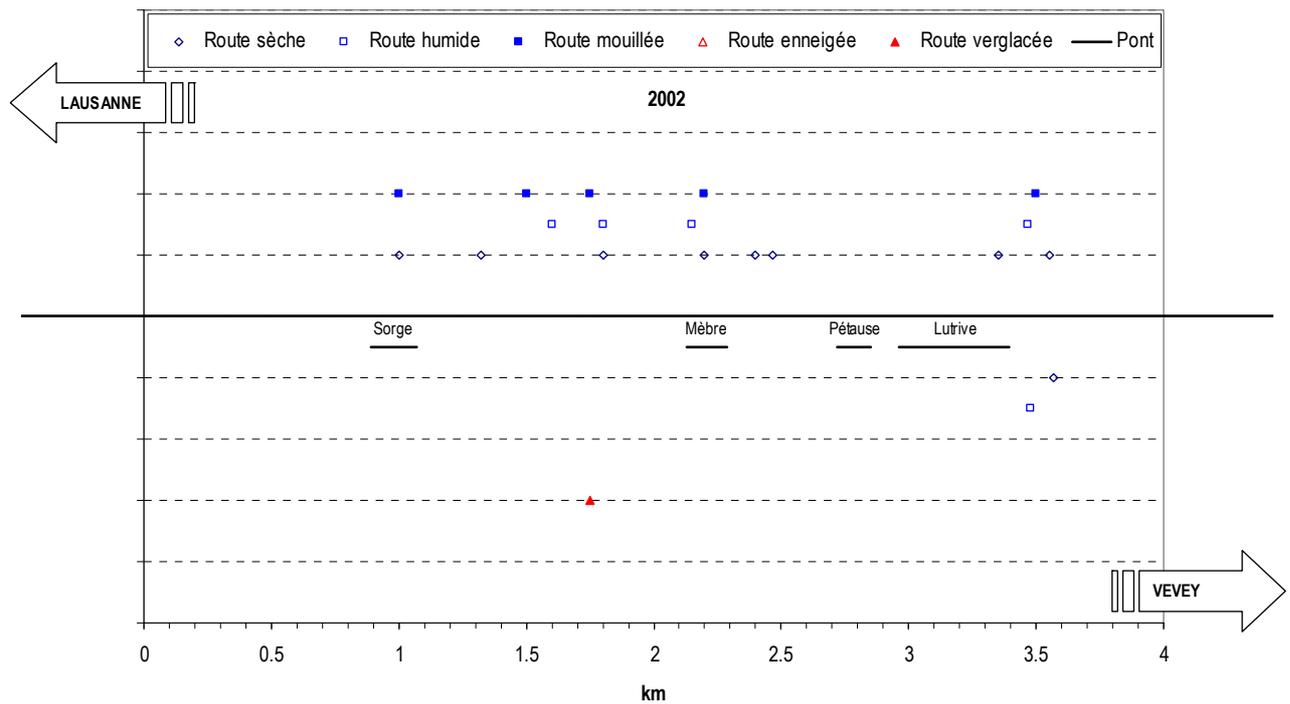


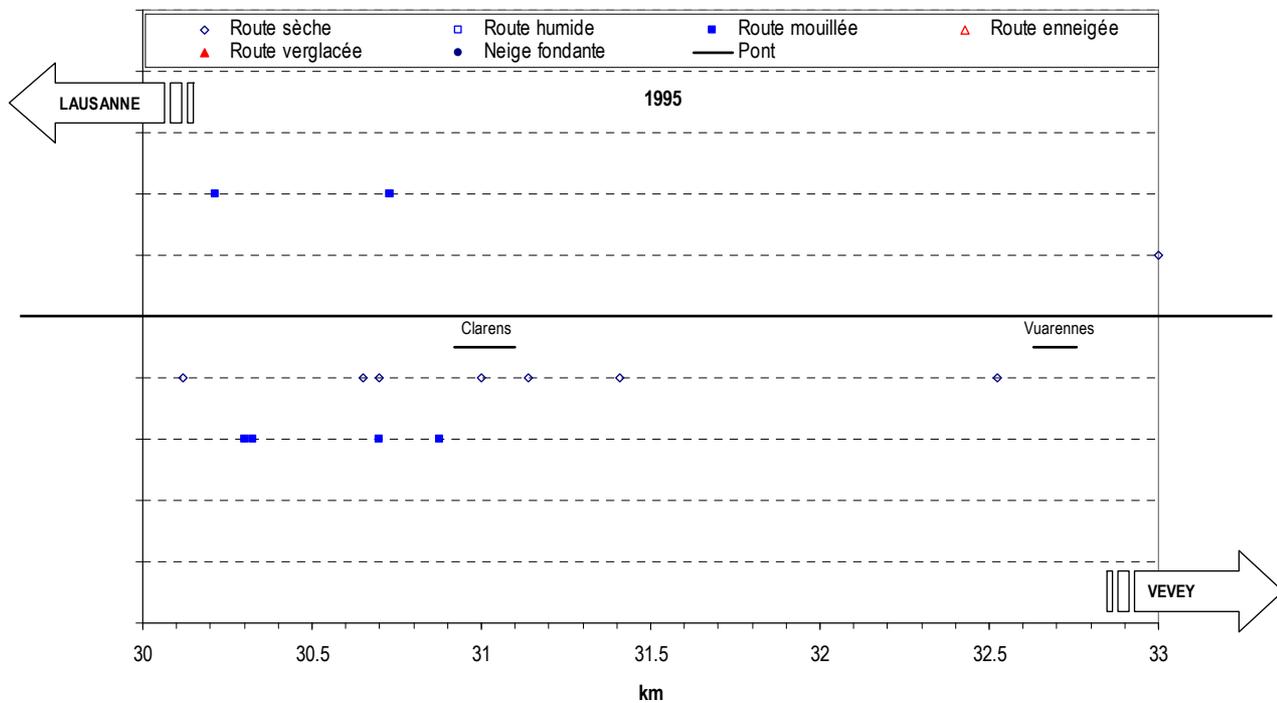
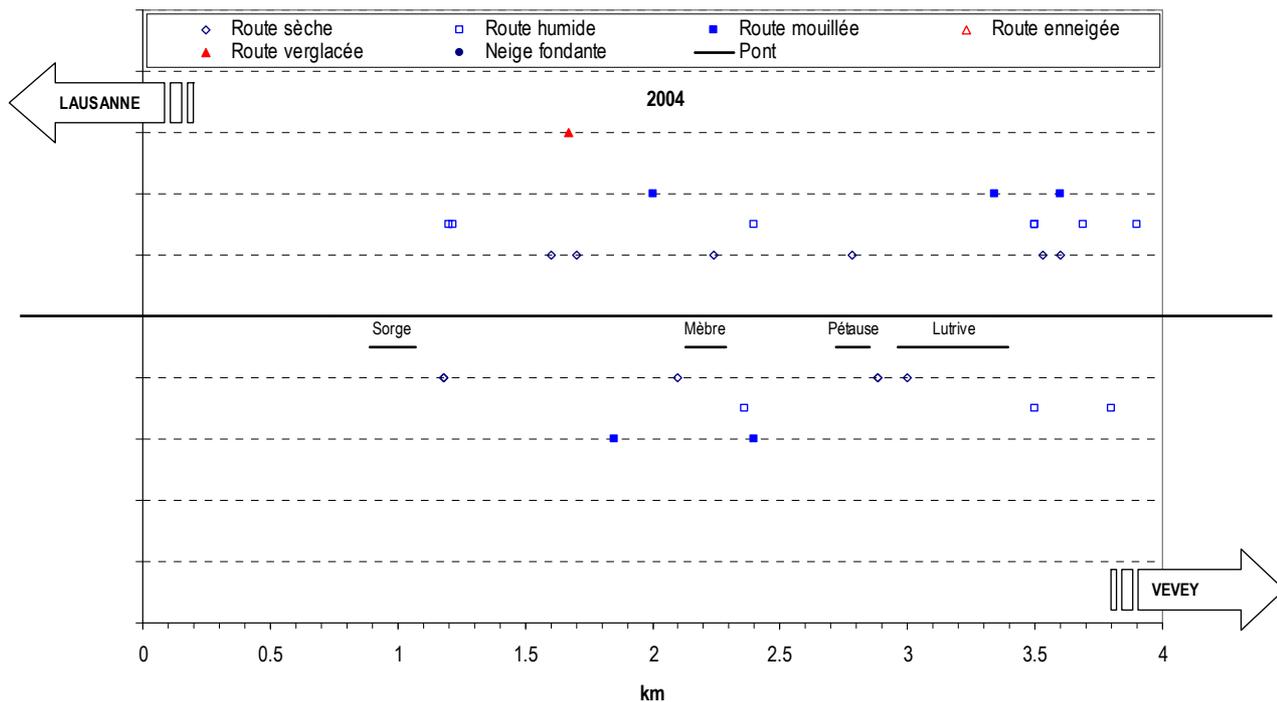


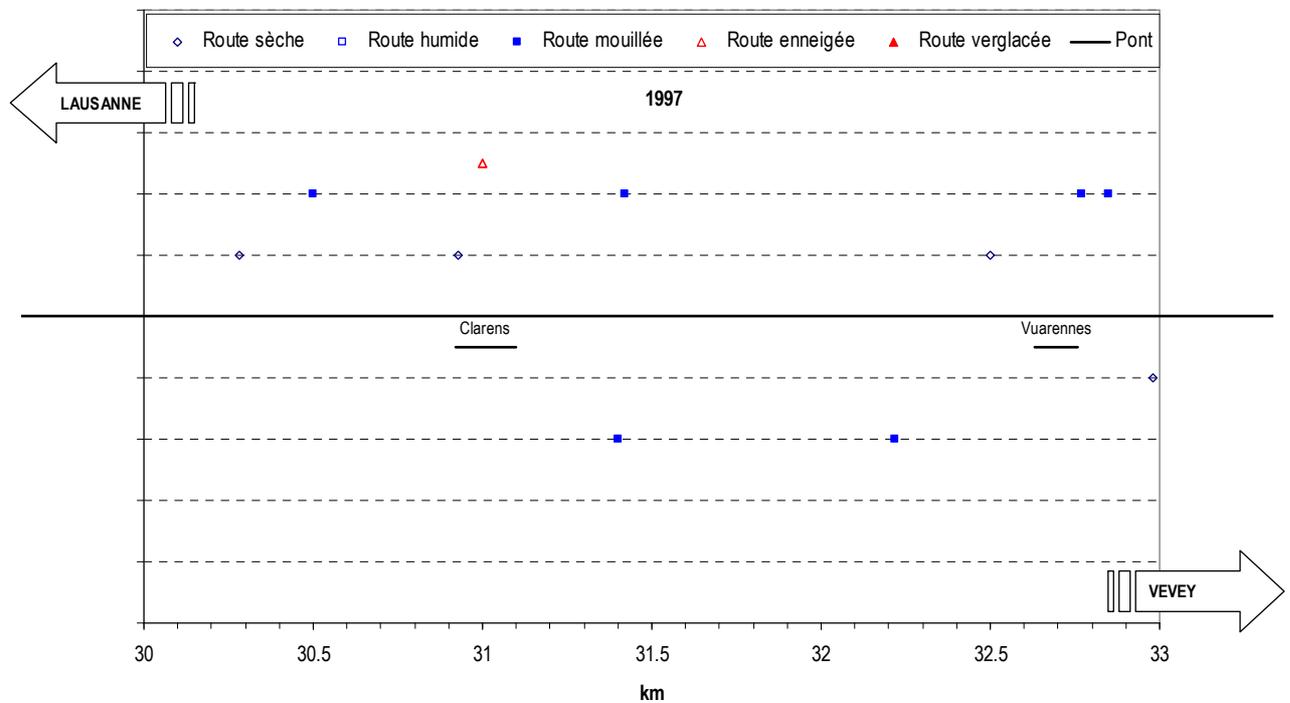
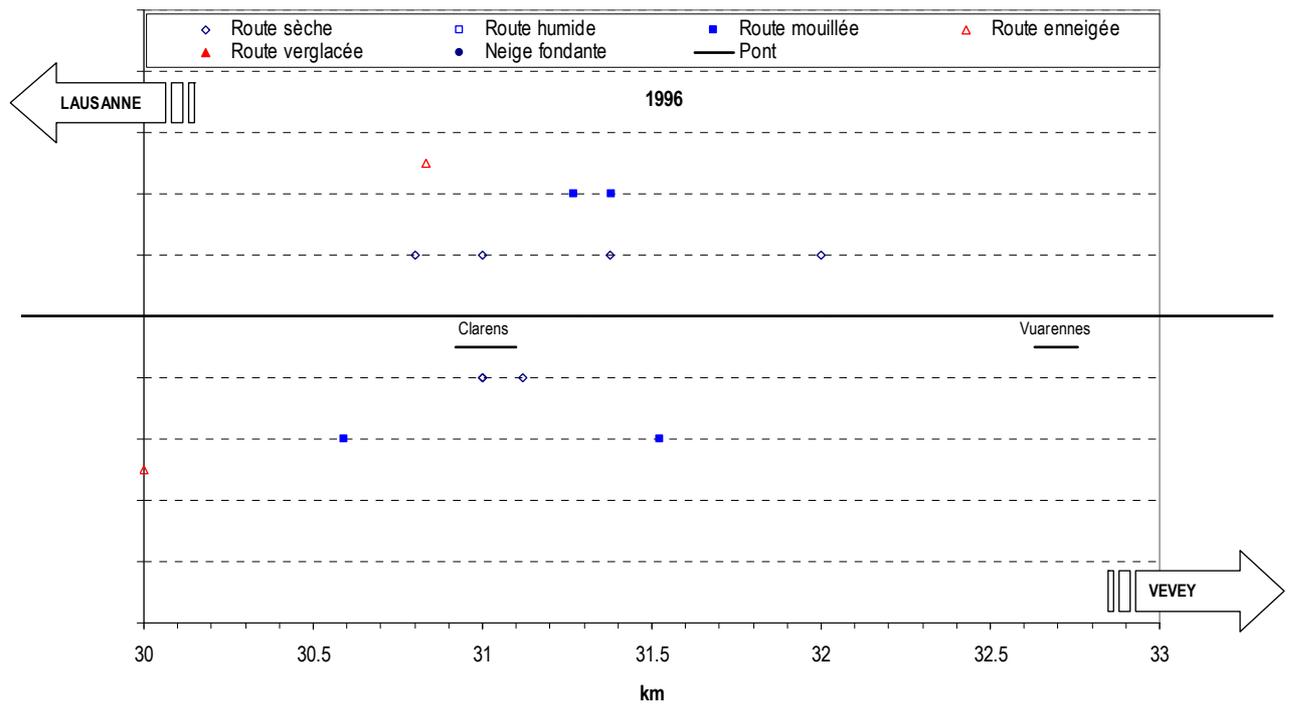


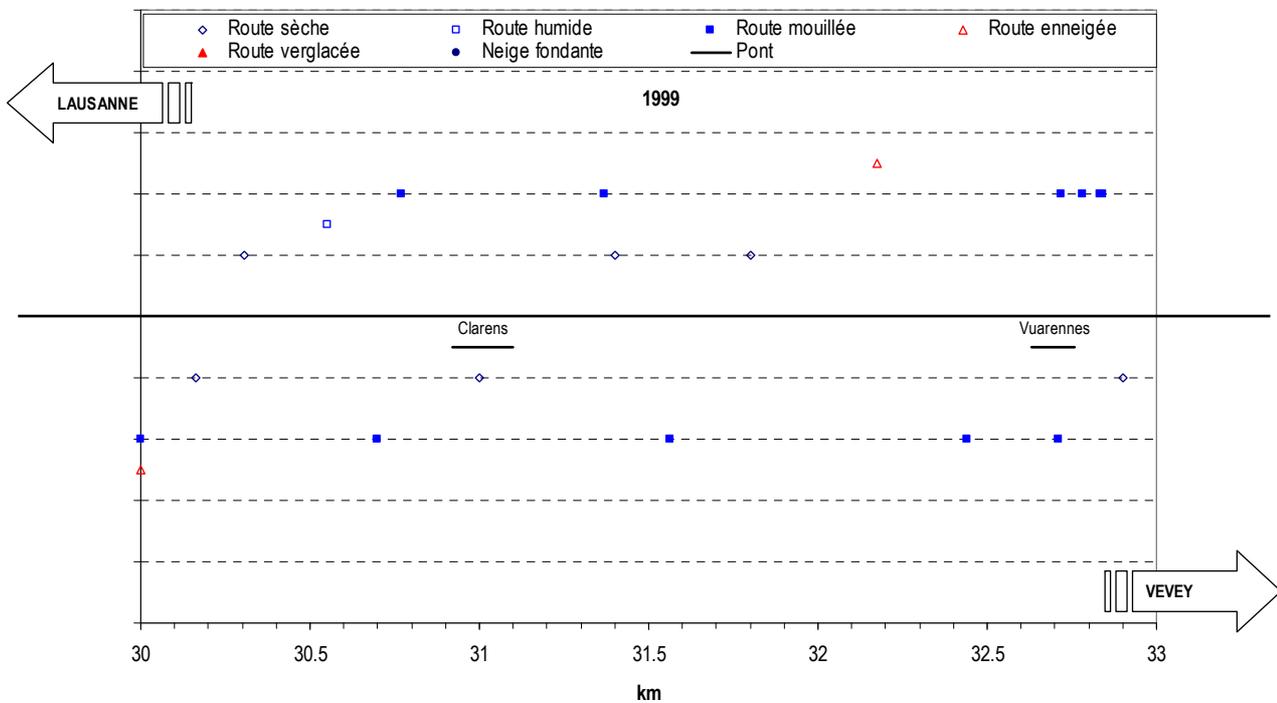
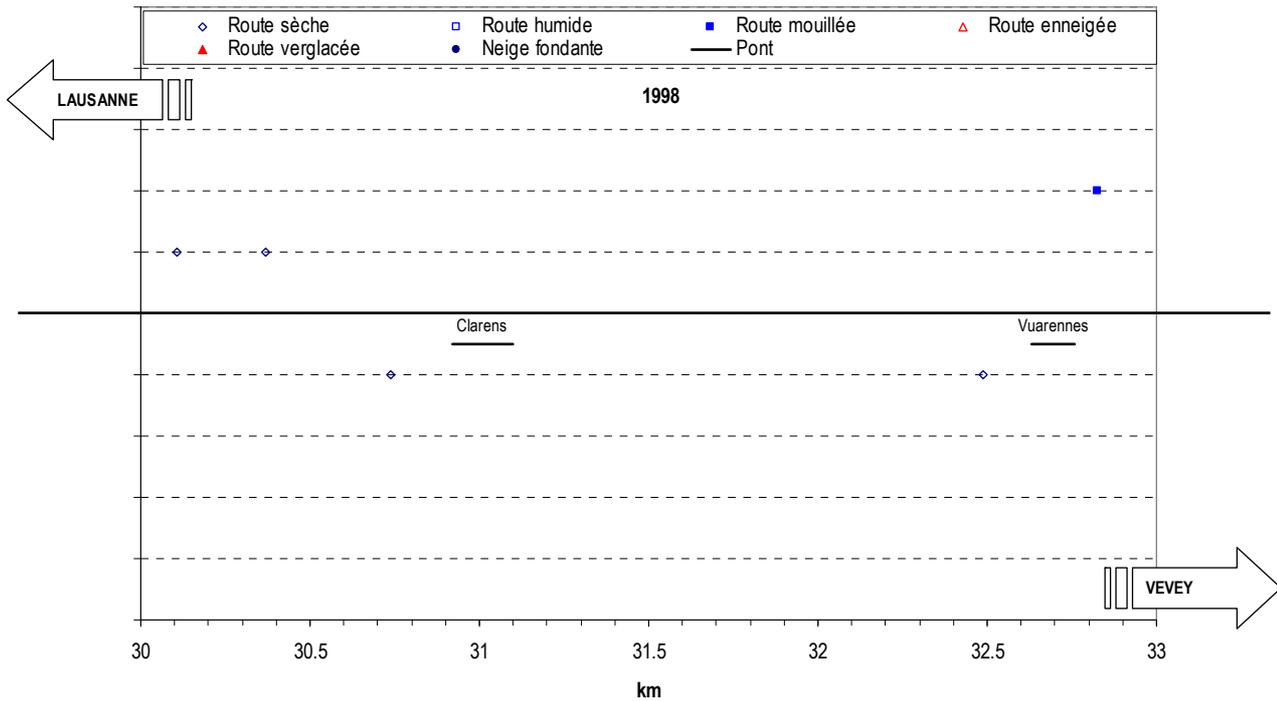


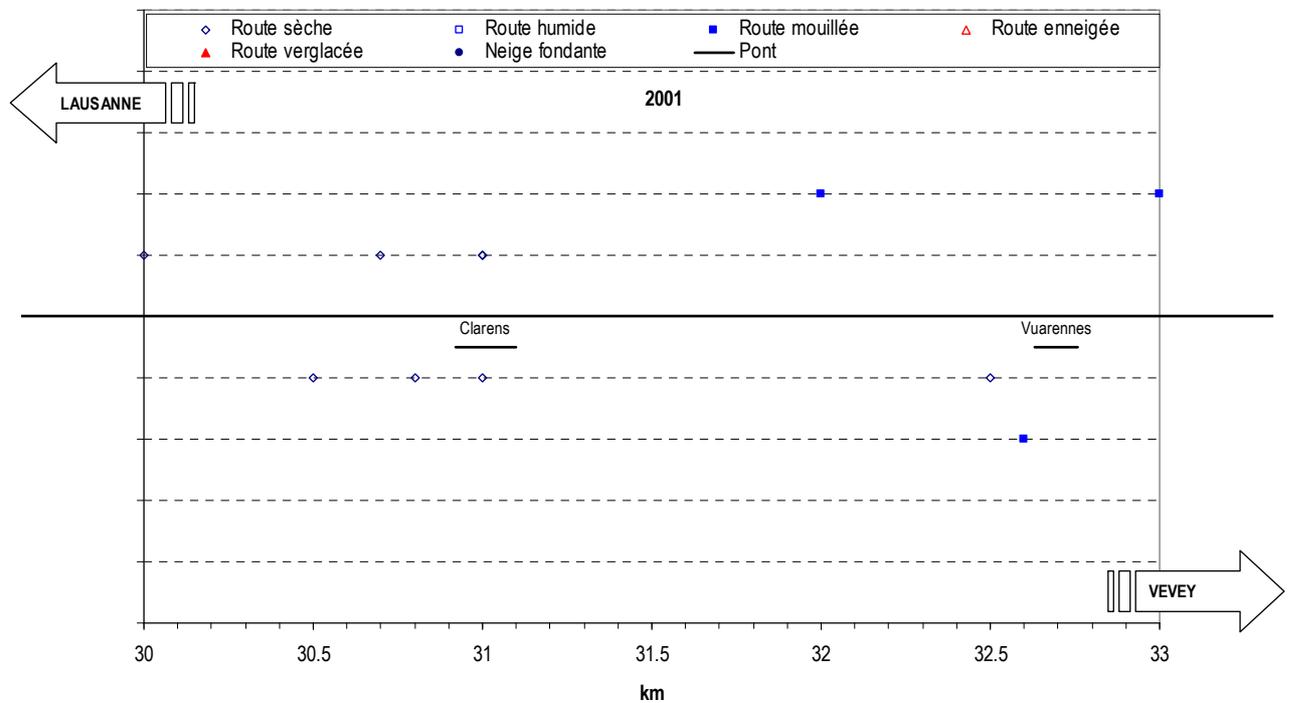
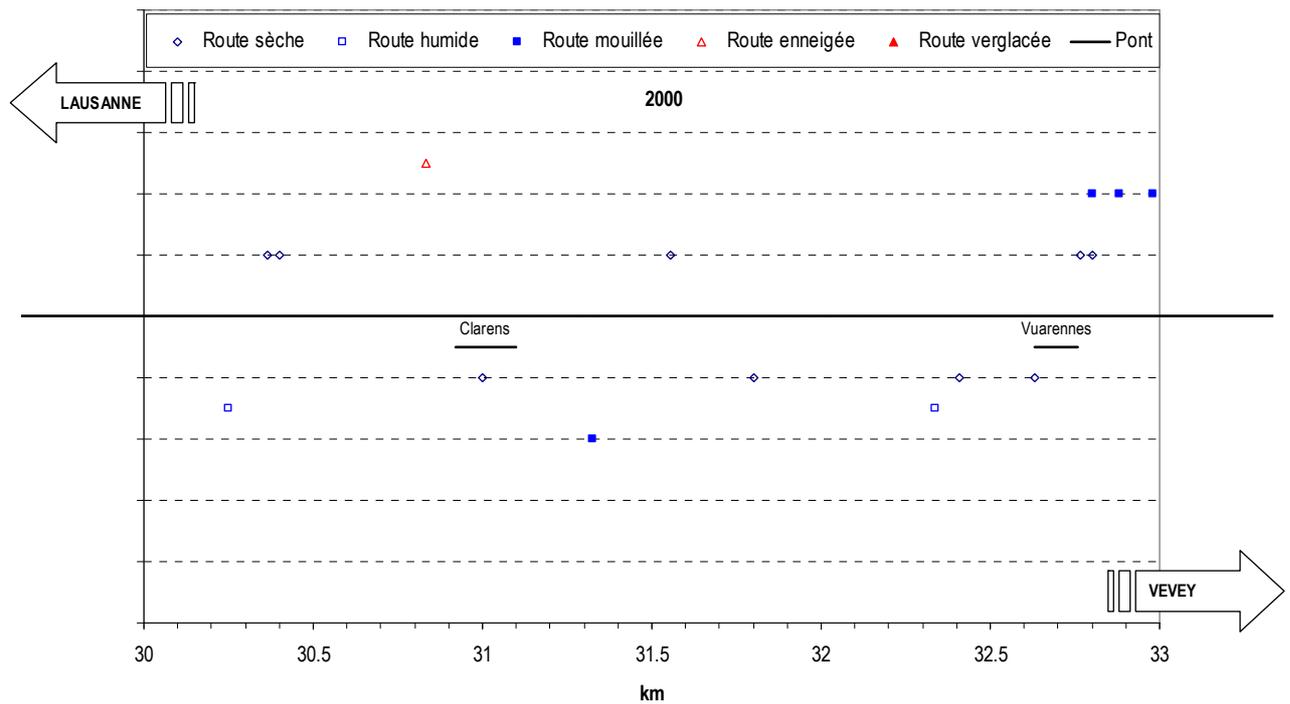


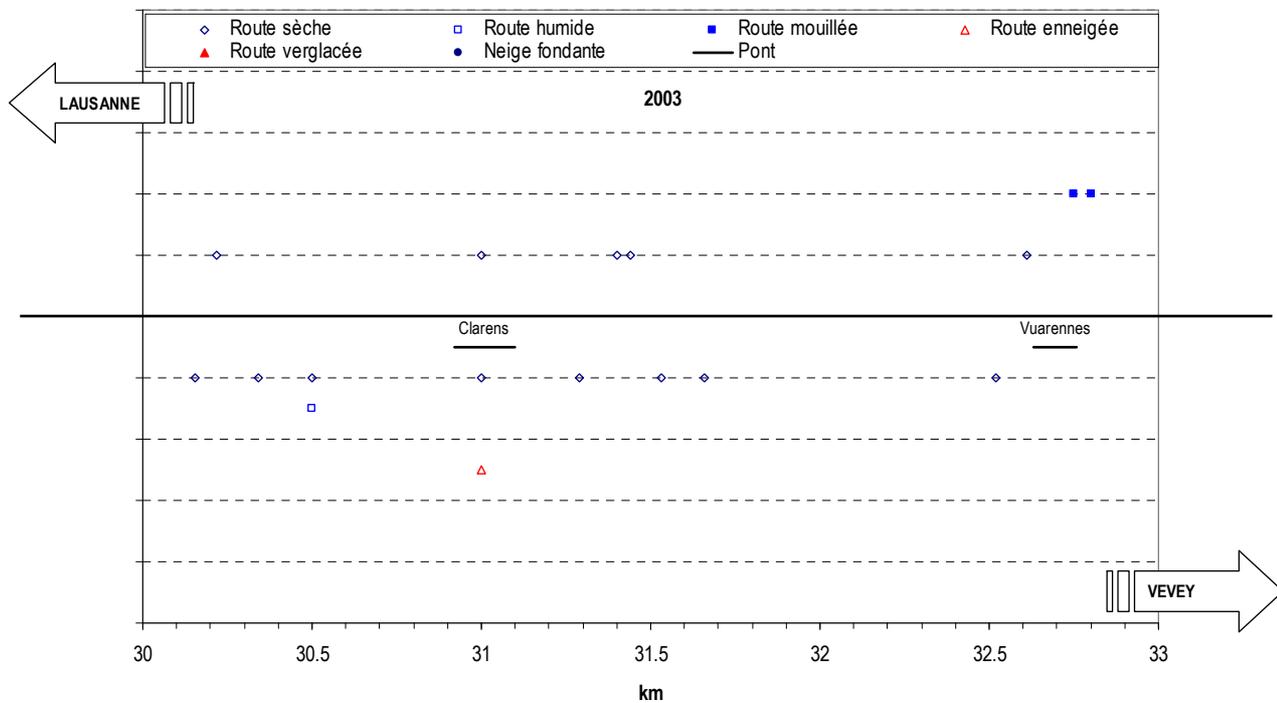
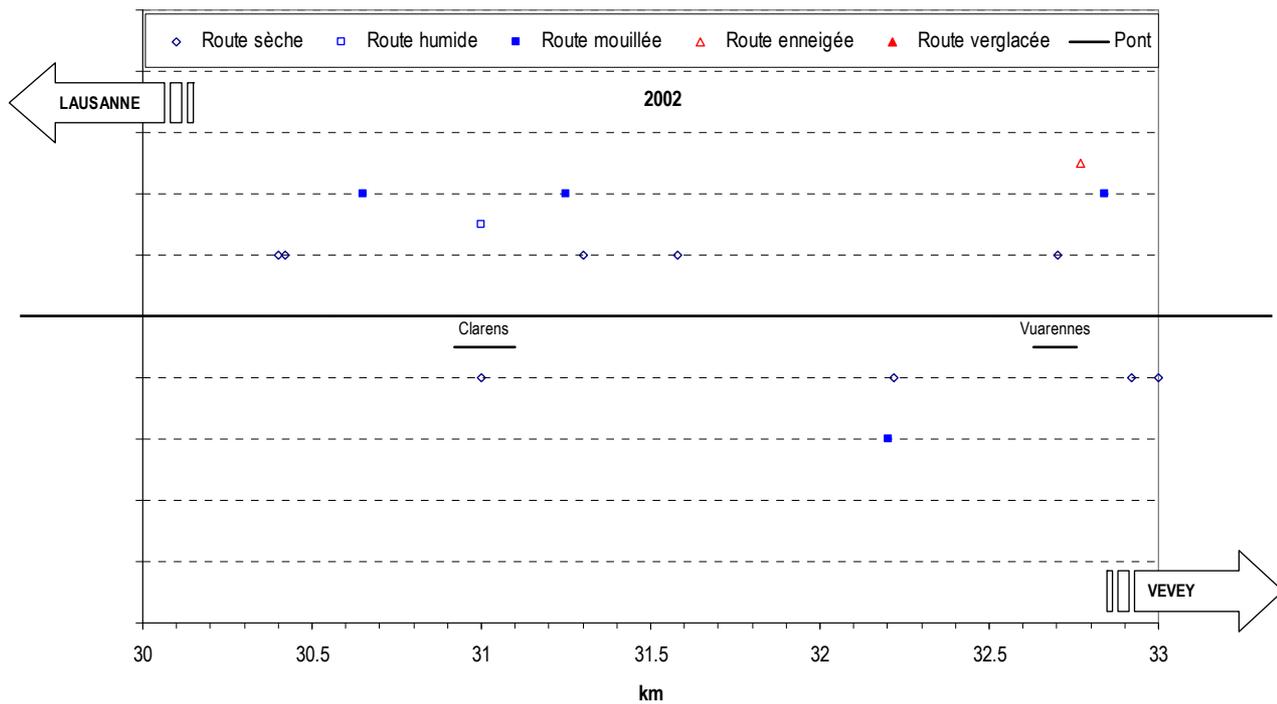


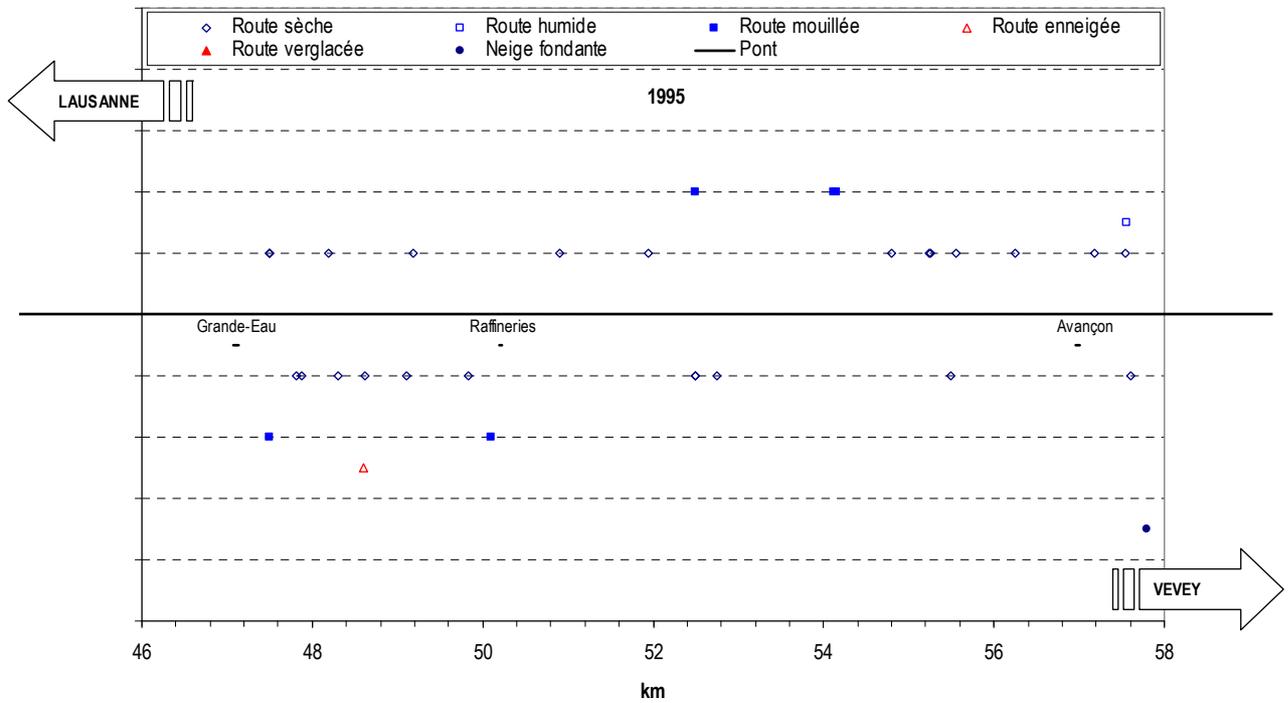
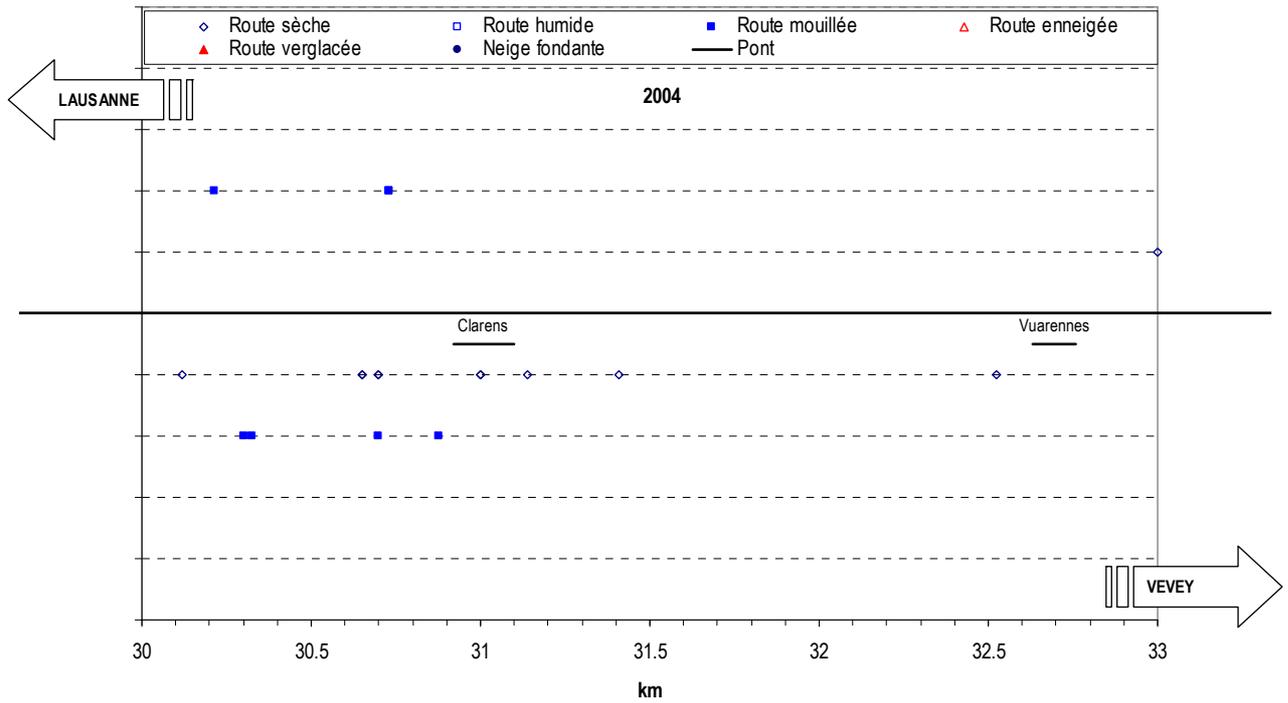


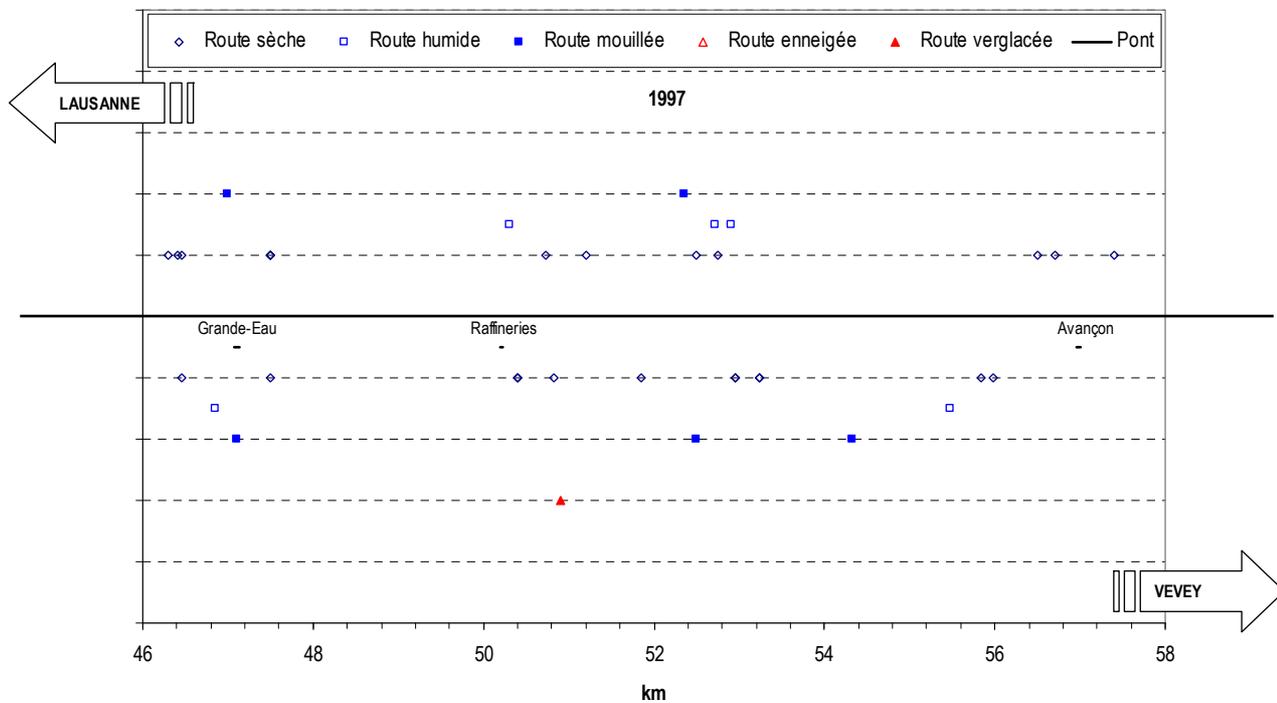
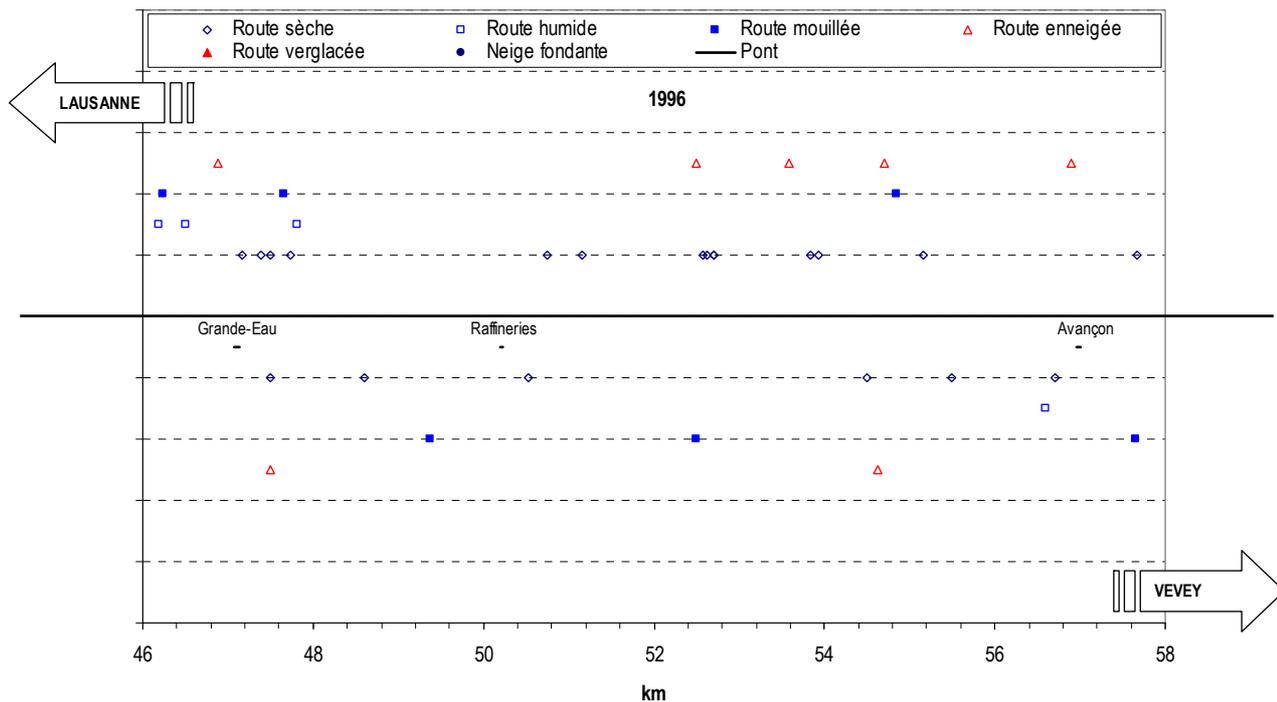


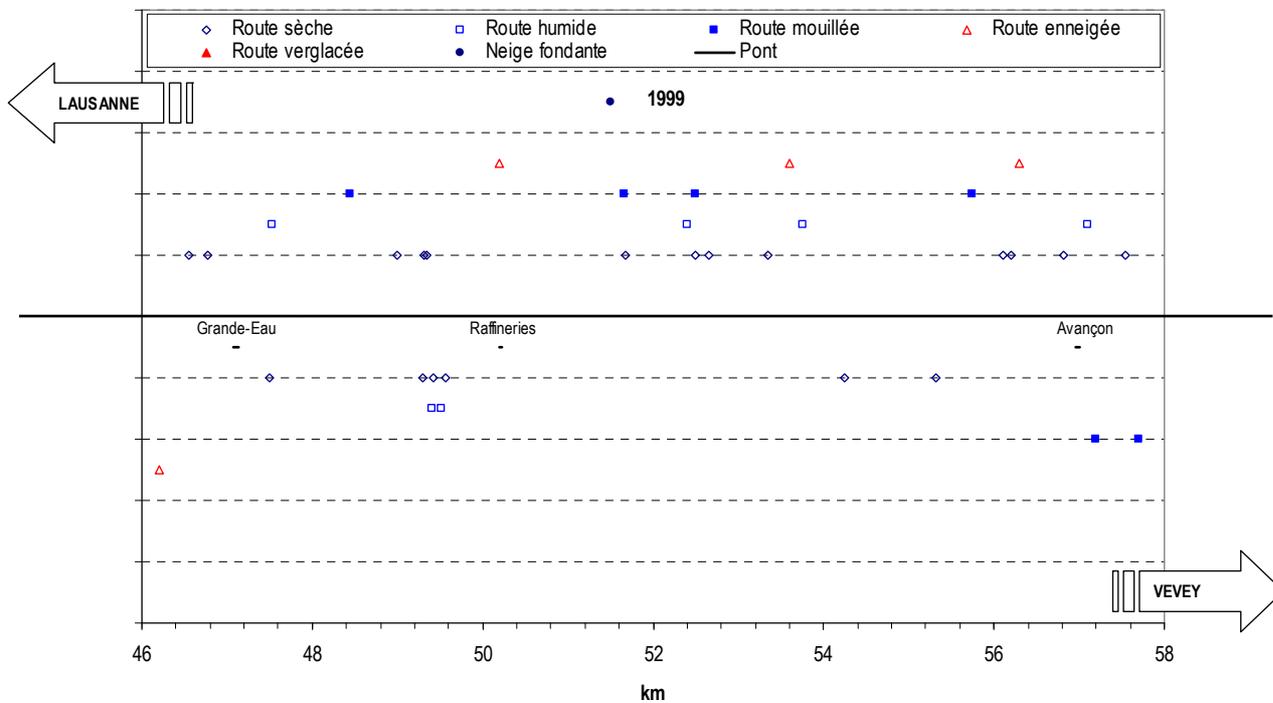
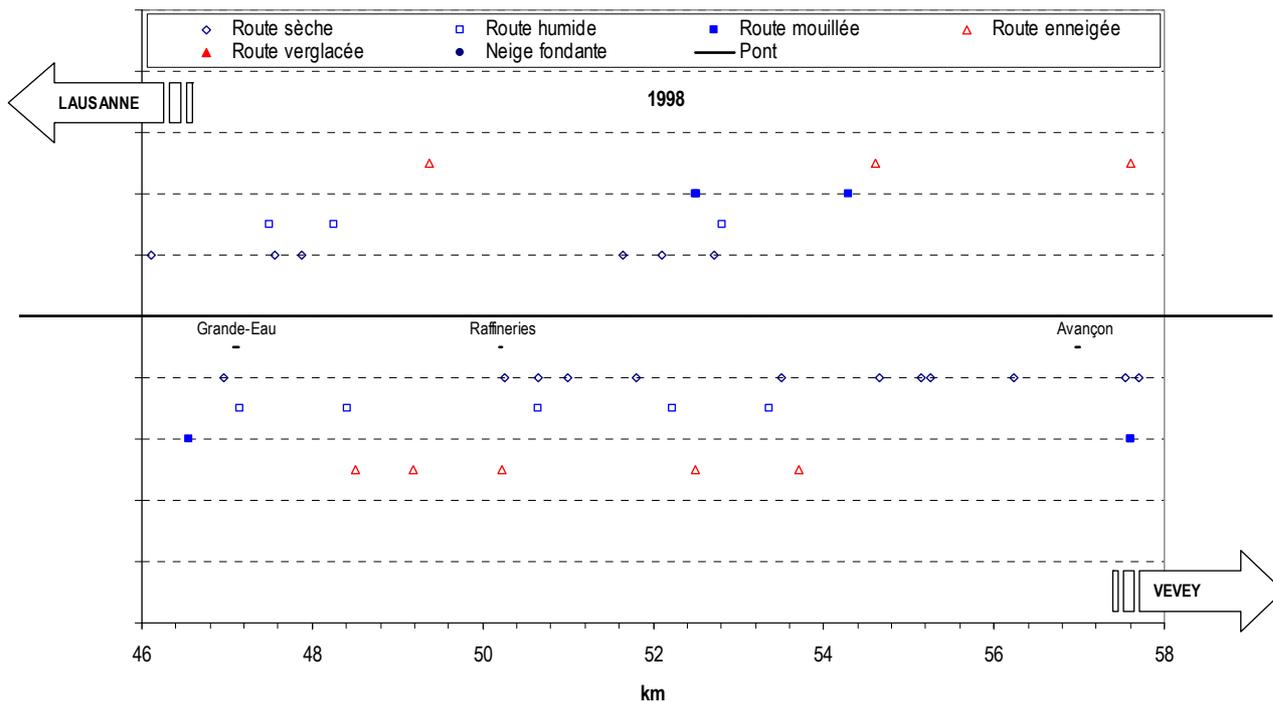


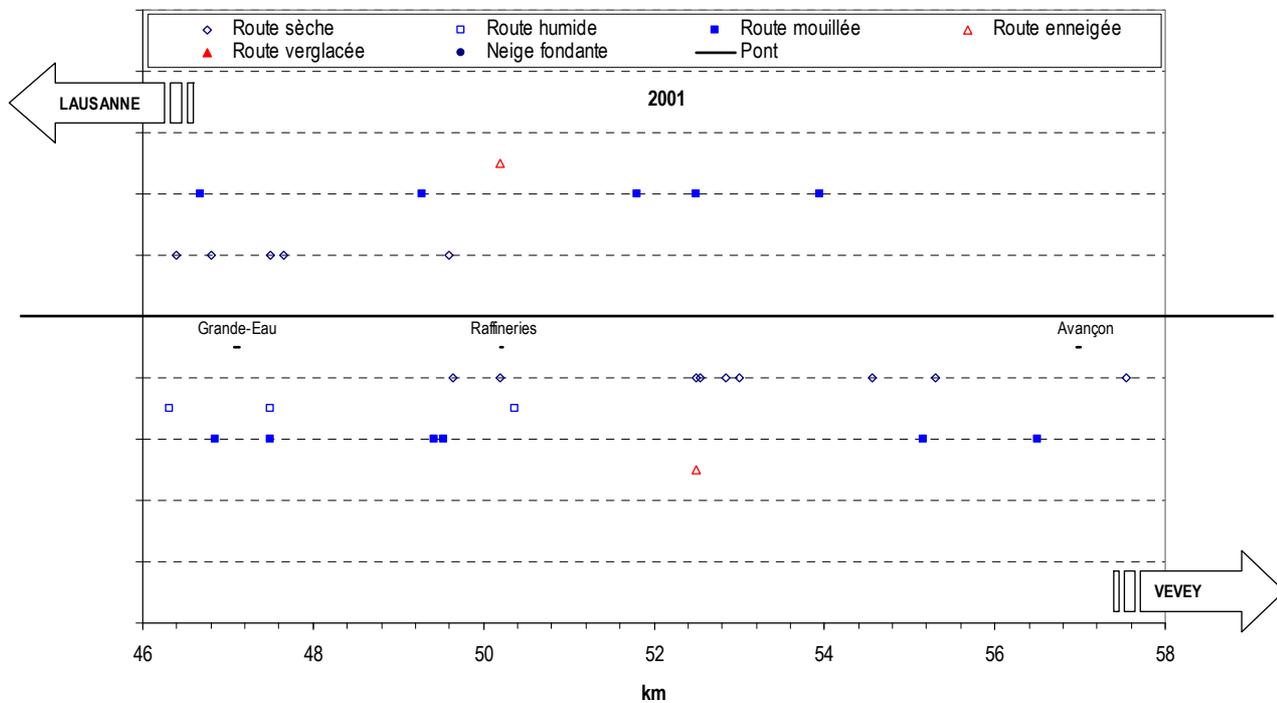
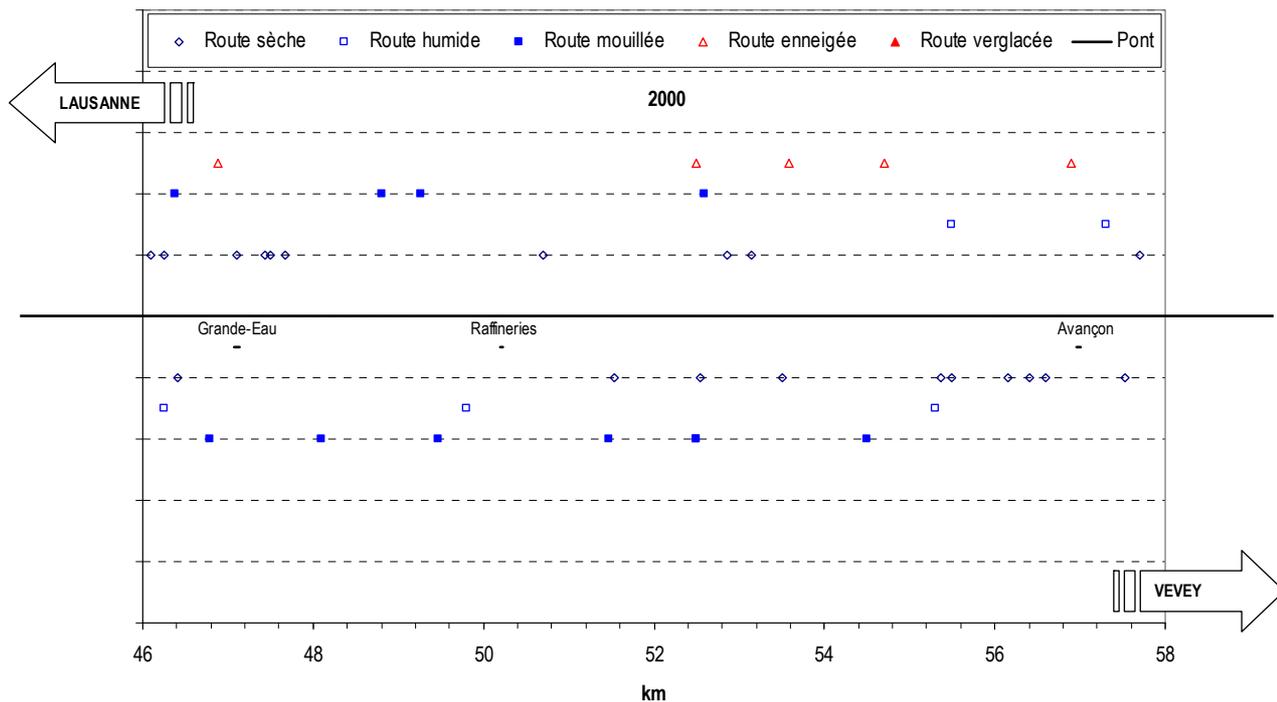


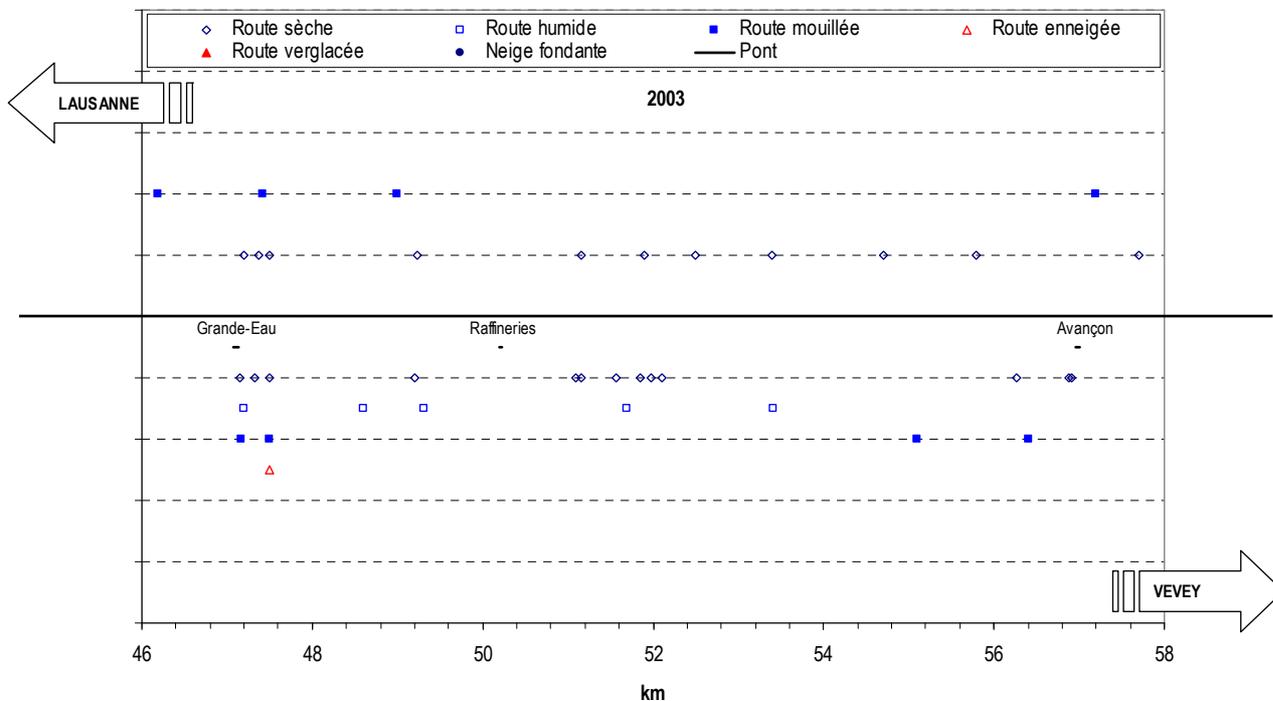
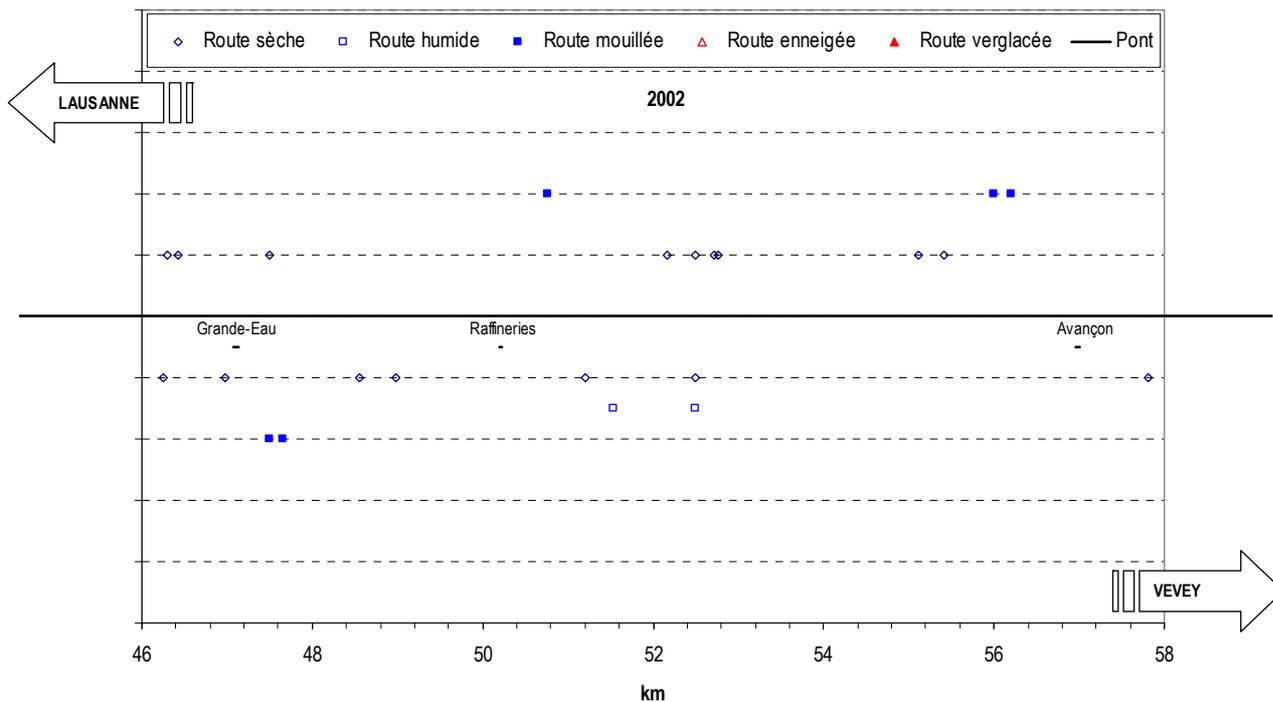


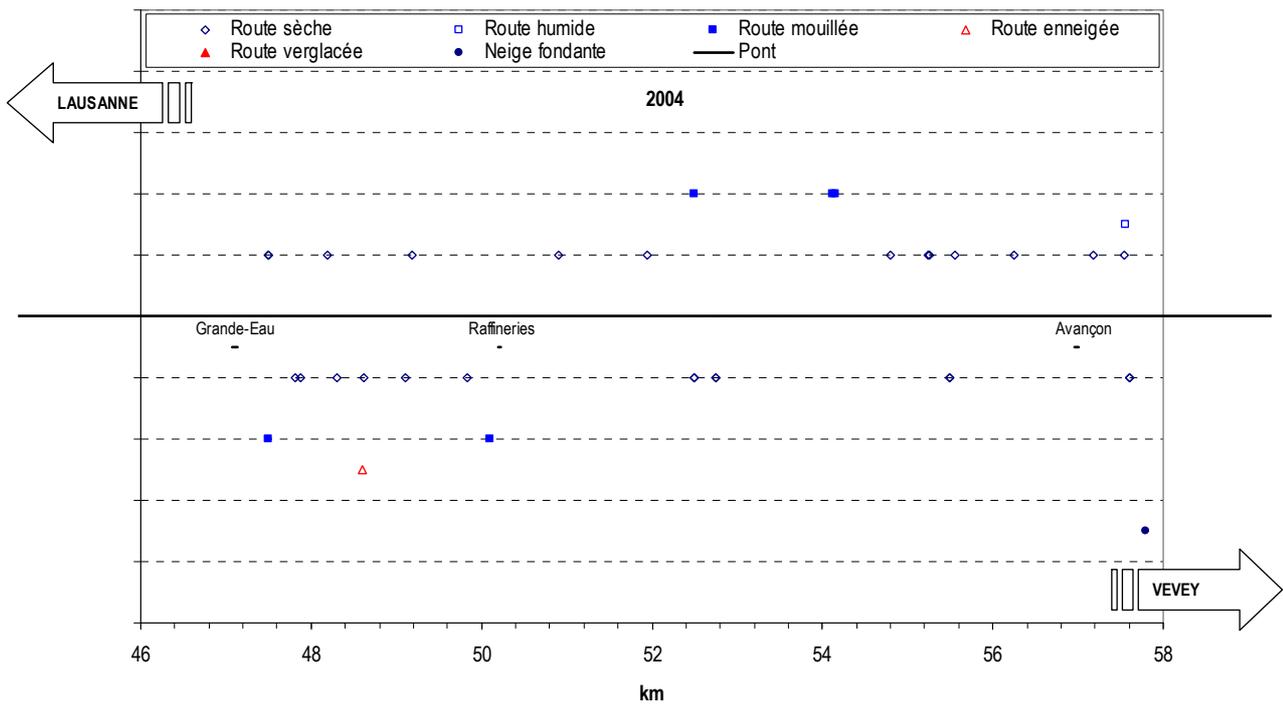








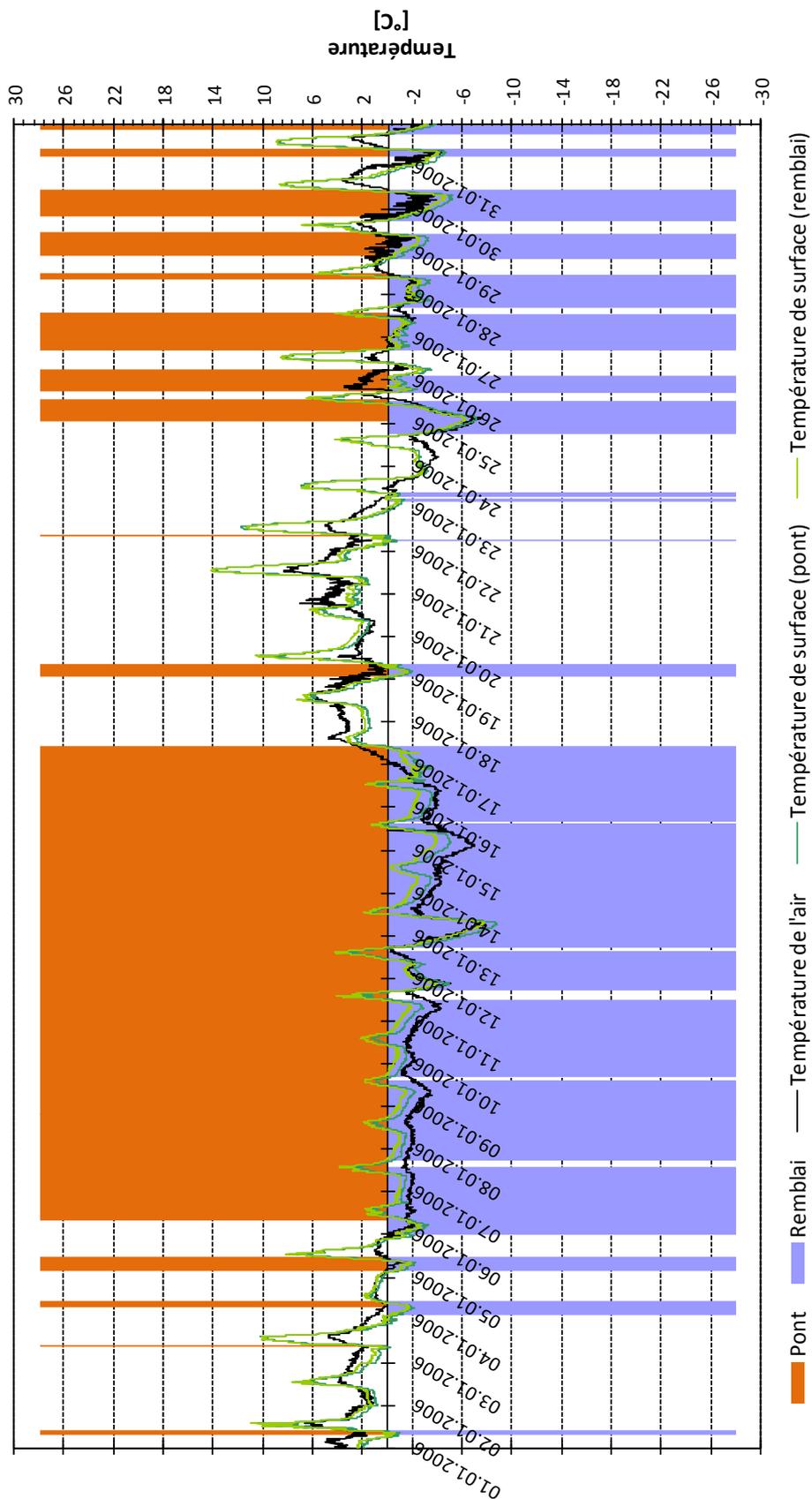




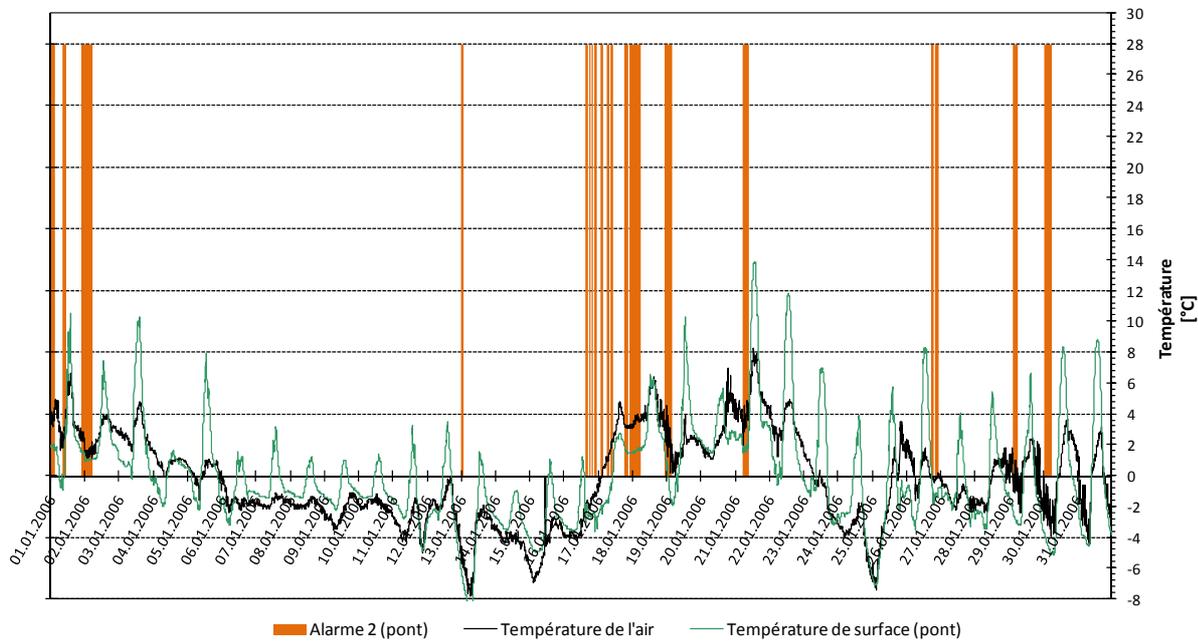
## 9.2 REPRESENTATIONS DES DIVERSES SITUATIONS D'ALARME

### 9.2.1 Janvier 2006

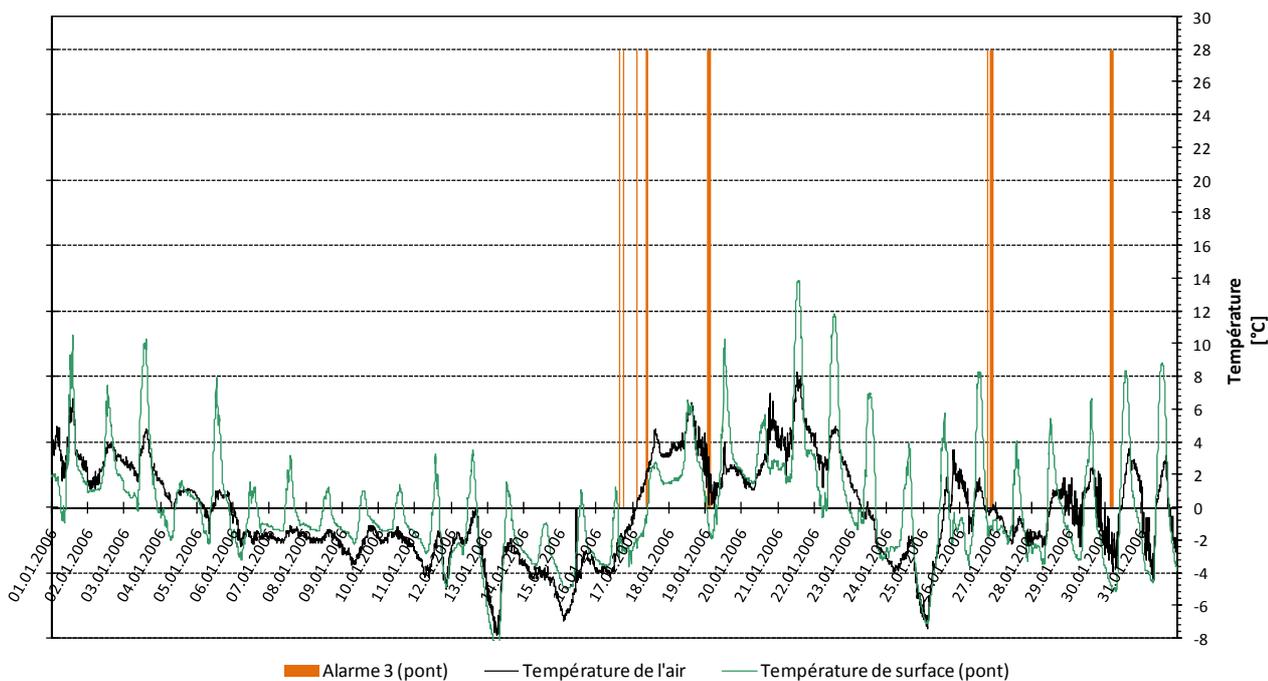
#### Alarme 1 - Janvier 06



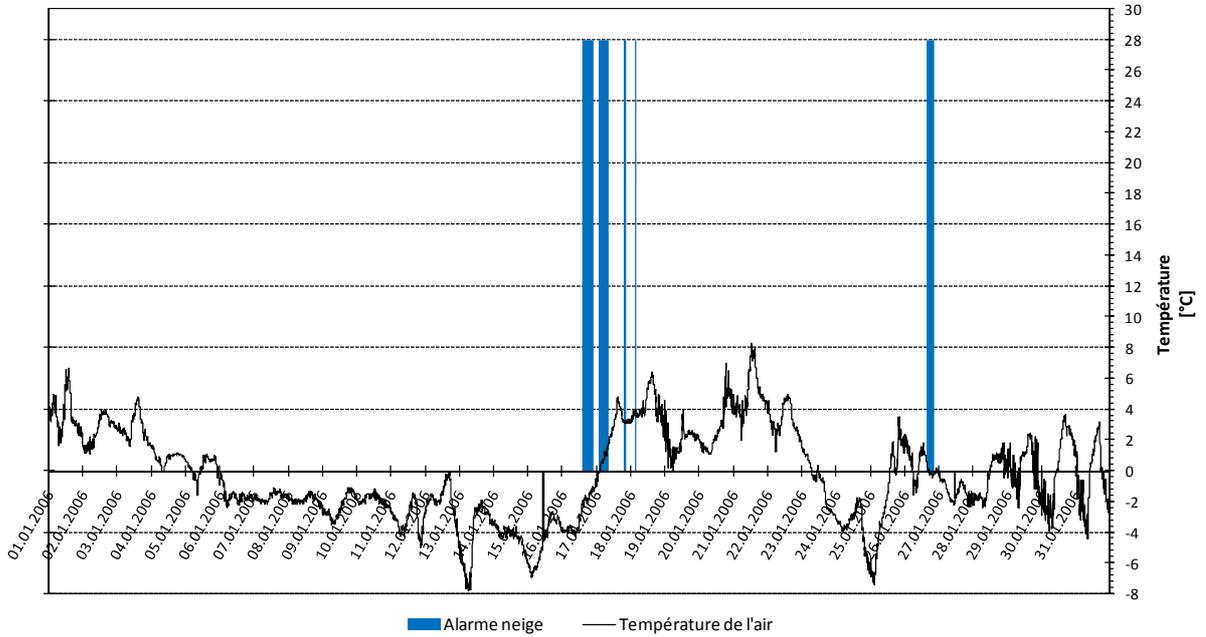
### Alarme 2 - Janvier 06



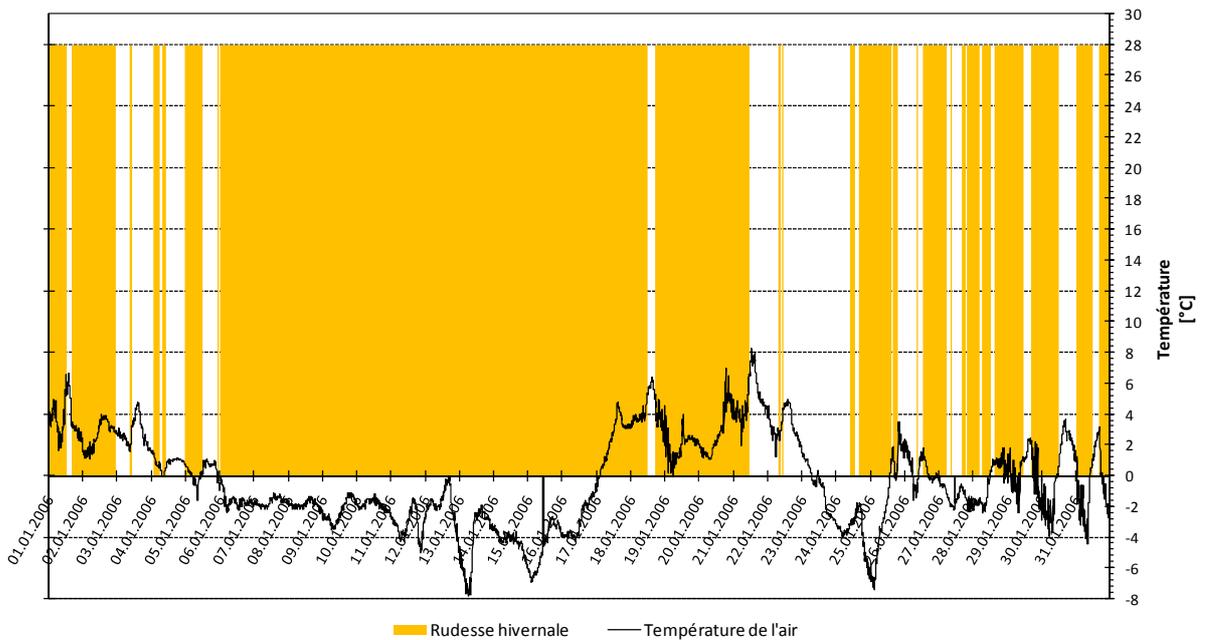
### Alarme 3 - Janvier 06



### Alarme neige - Janvier 06

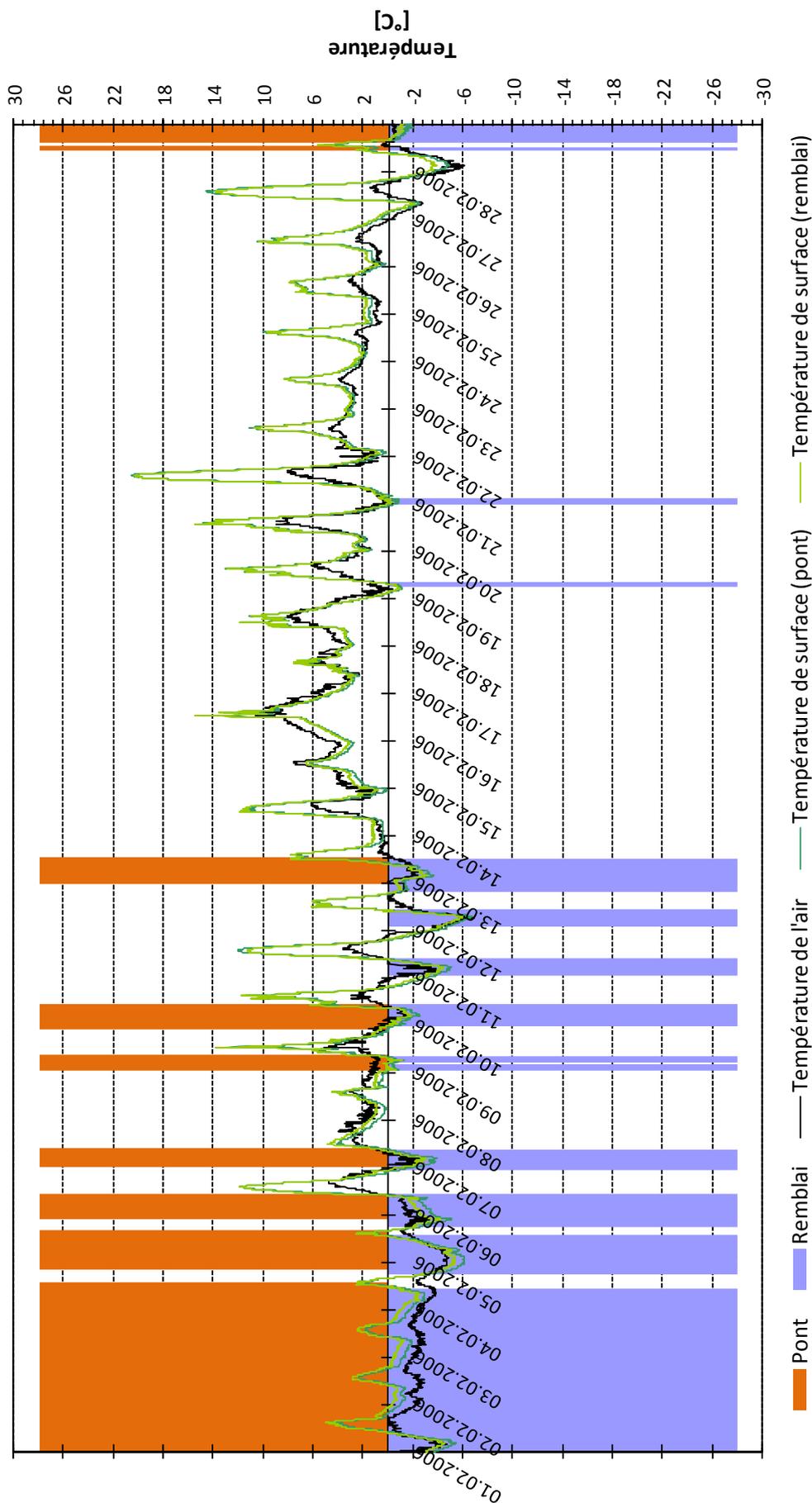


### Rudesse hivernale - Janvier 06

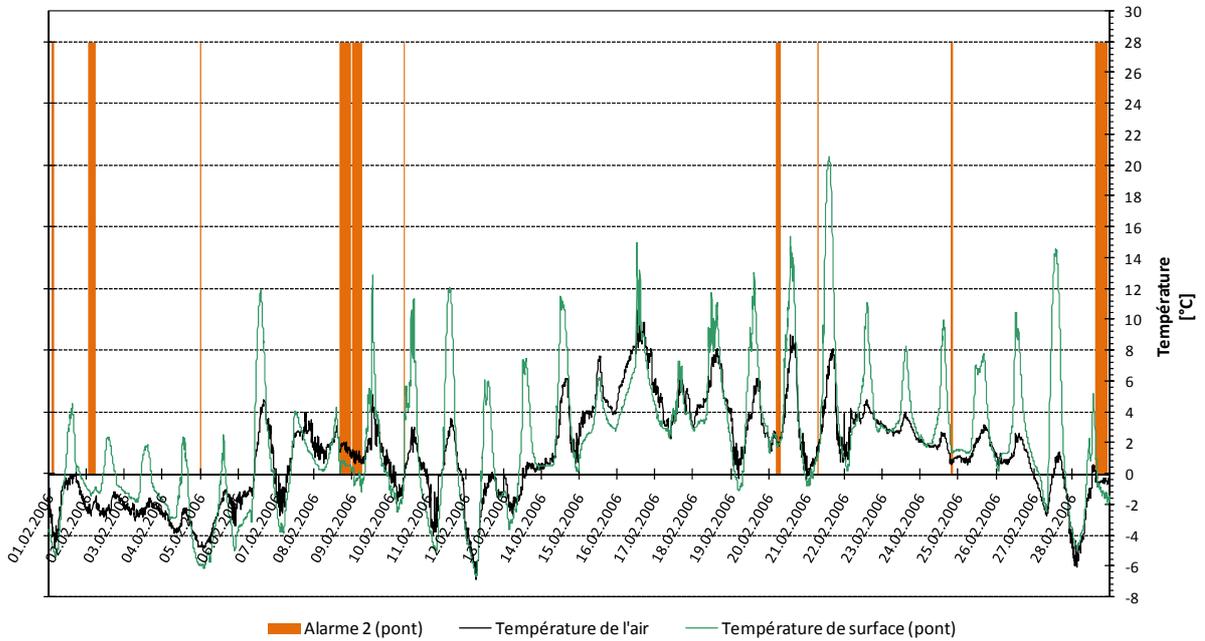


9.2.2 Février 2006

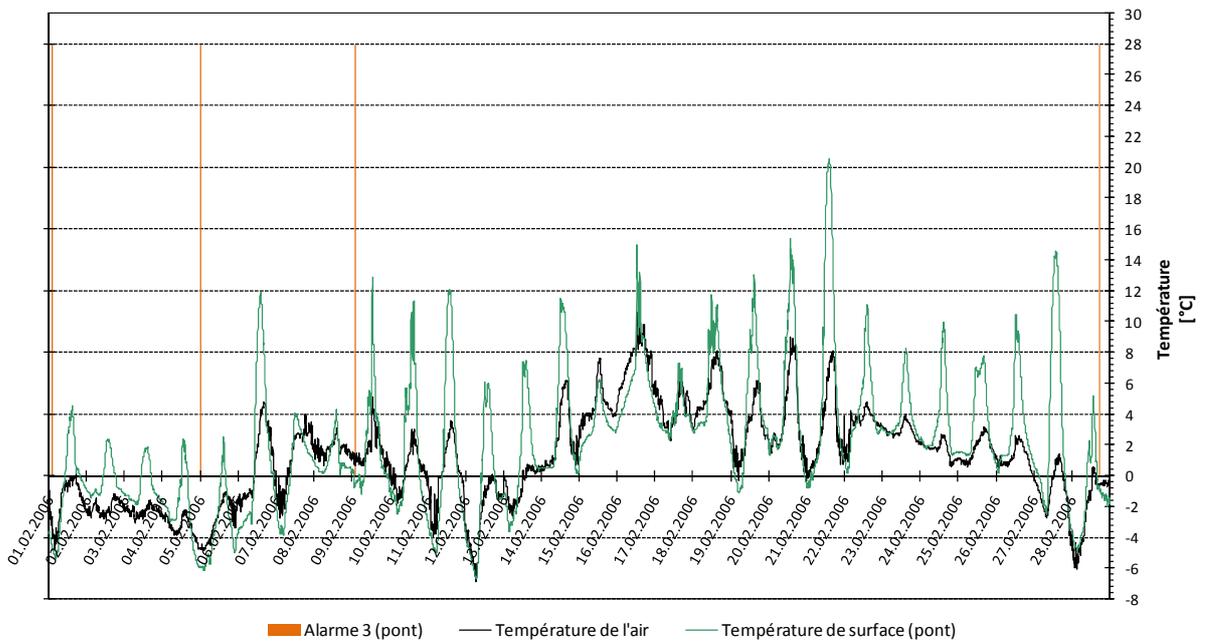
Alarme 1 - Février 06



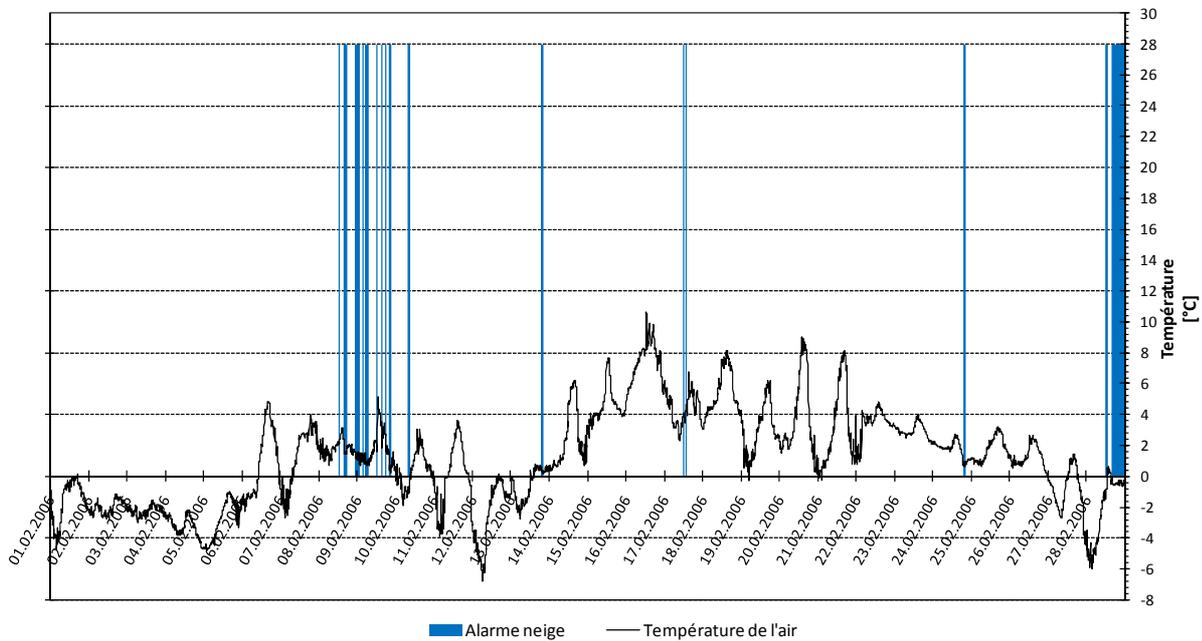
### Alarme 2 - Février 06



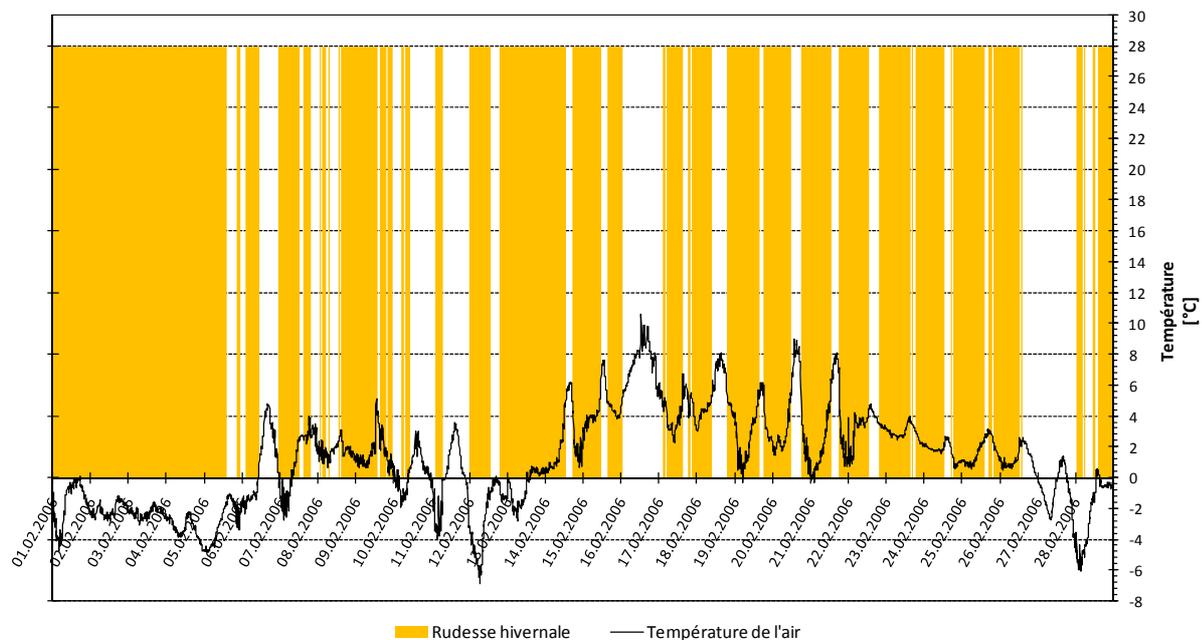
### Alarme 3 - Février 06



### Alarme neige - Février 06

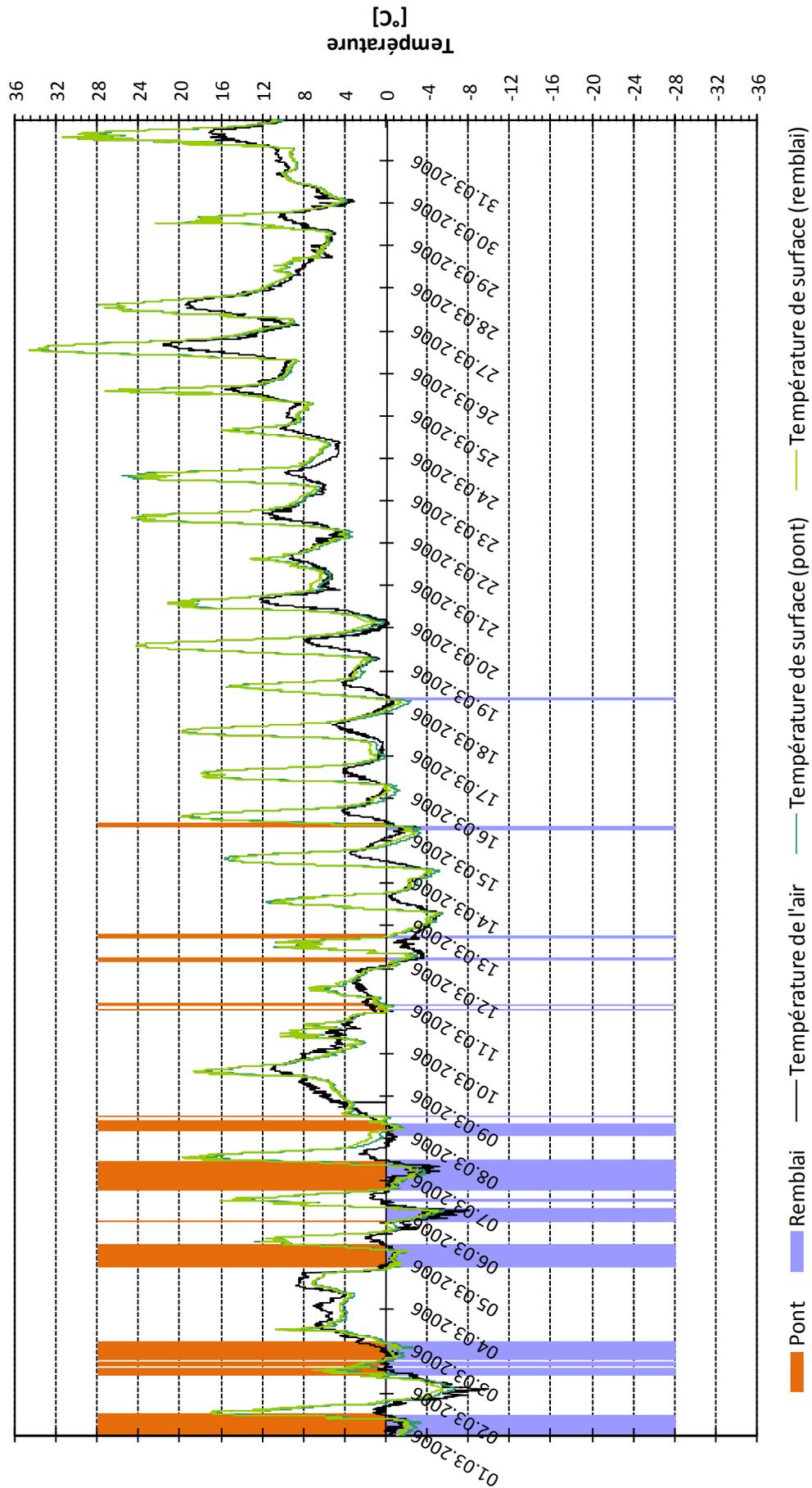


### Rudesse hivernale - Février 06

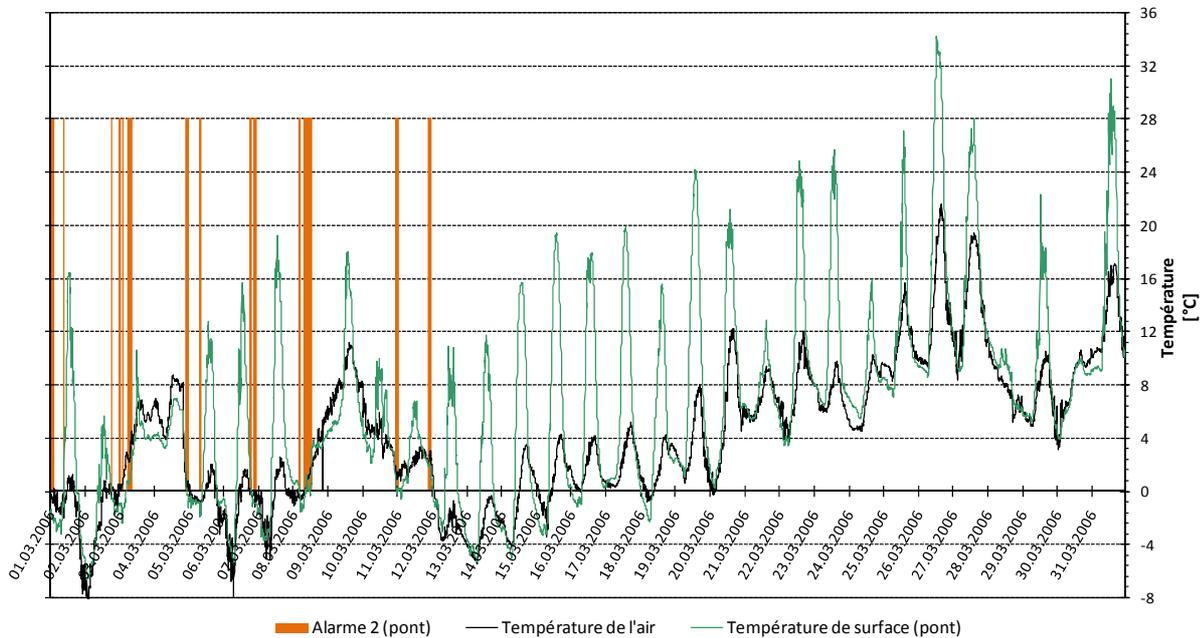


9.2.3 Mars 2006

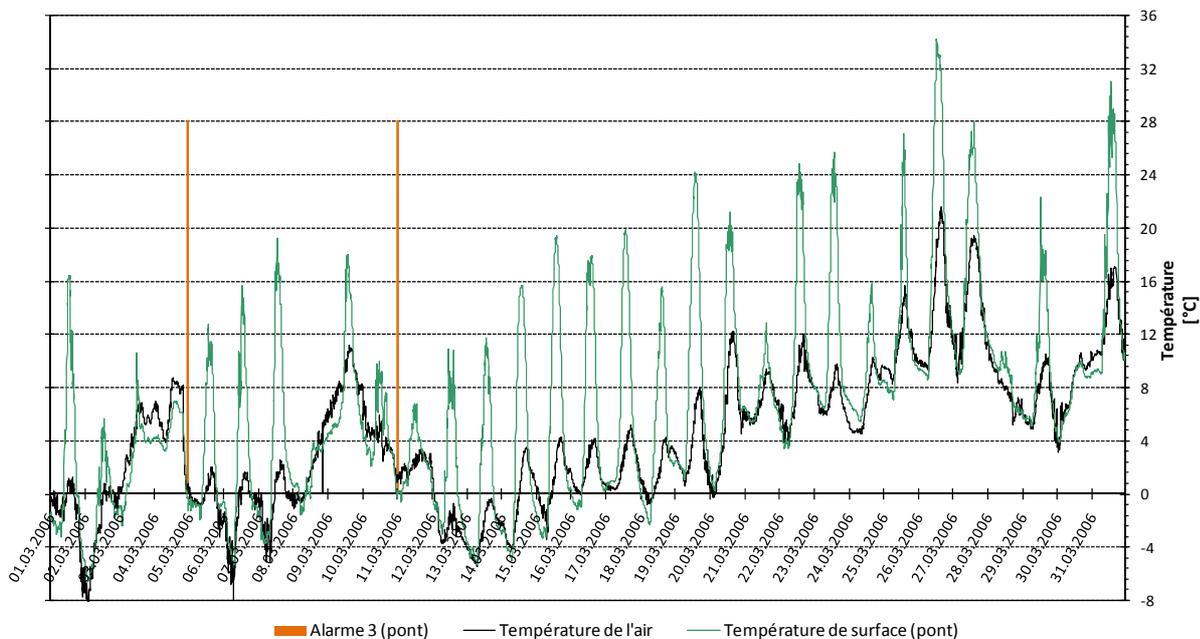
Alarme 1 - Mars 06



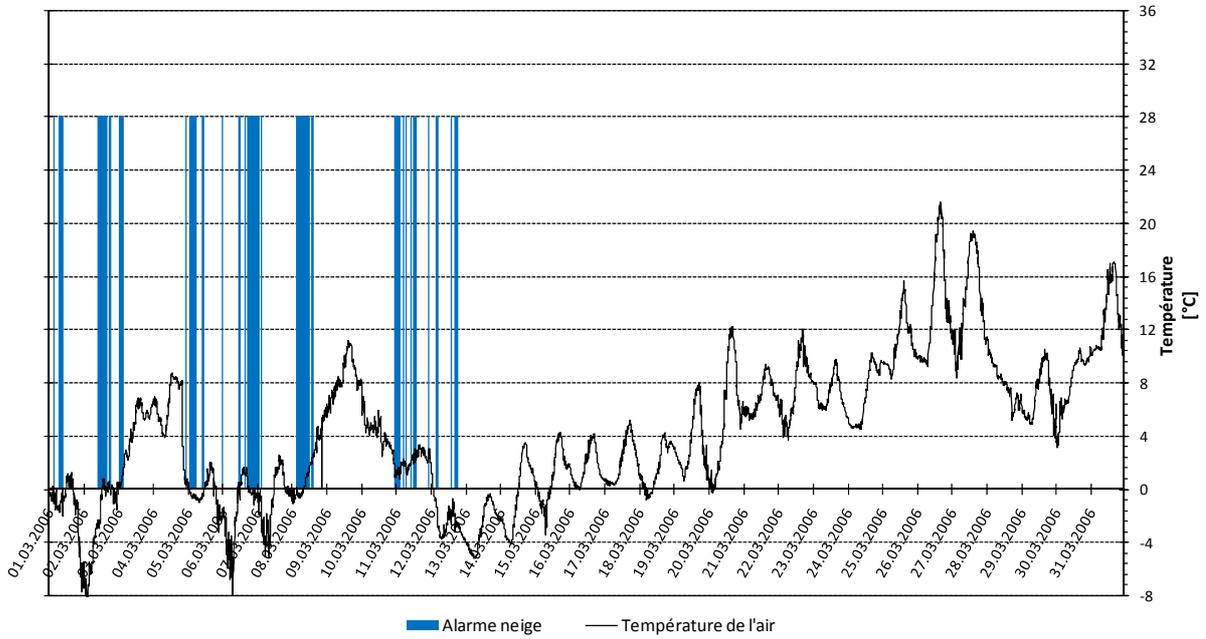
### Alarme 2 - Mars 06



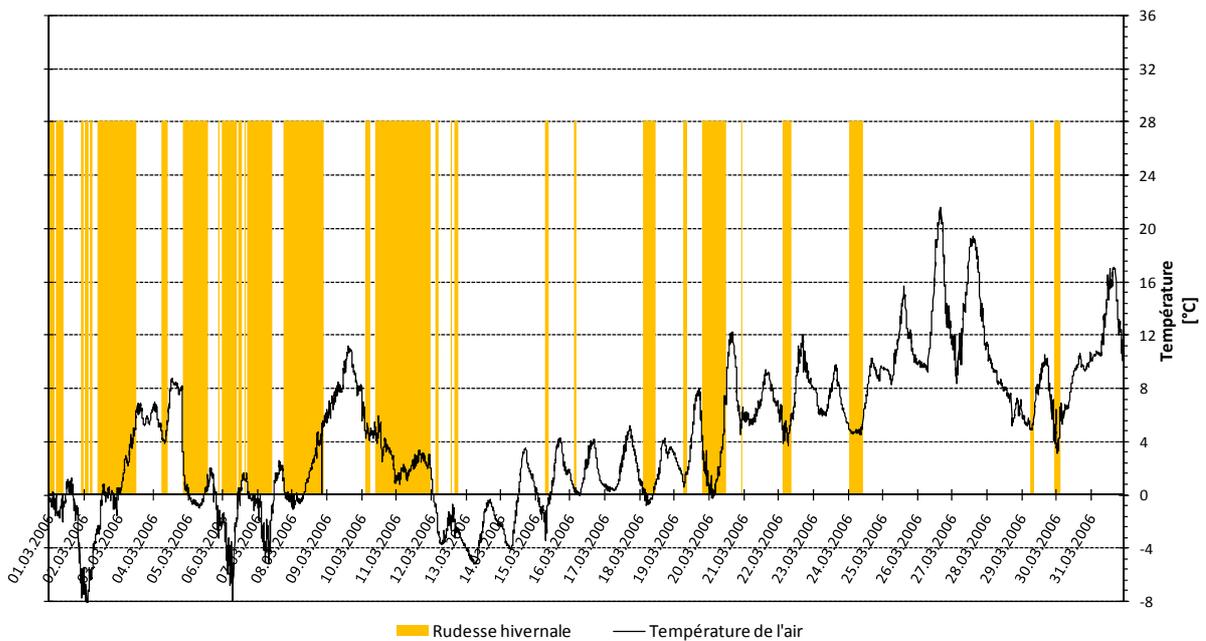
### Alarme 3 - Mars 06



### Alarme neige - Mars 06

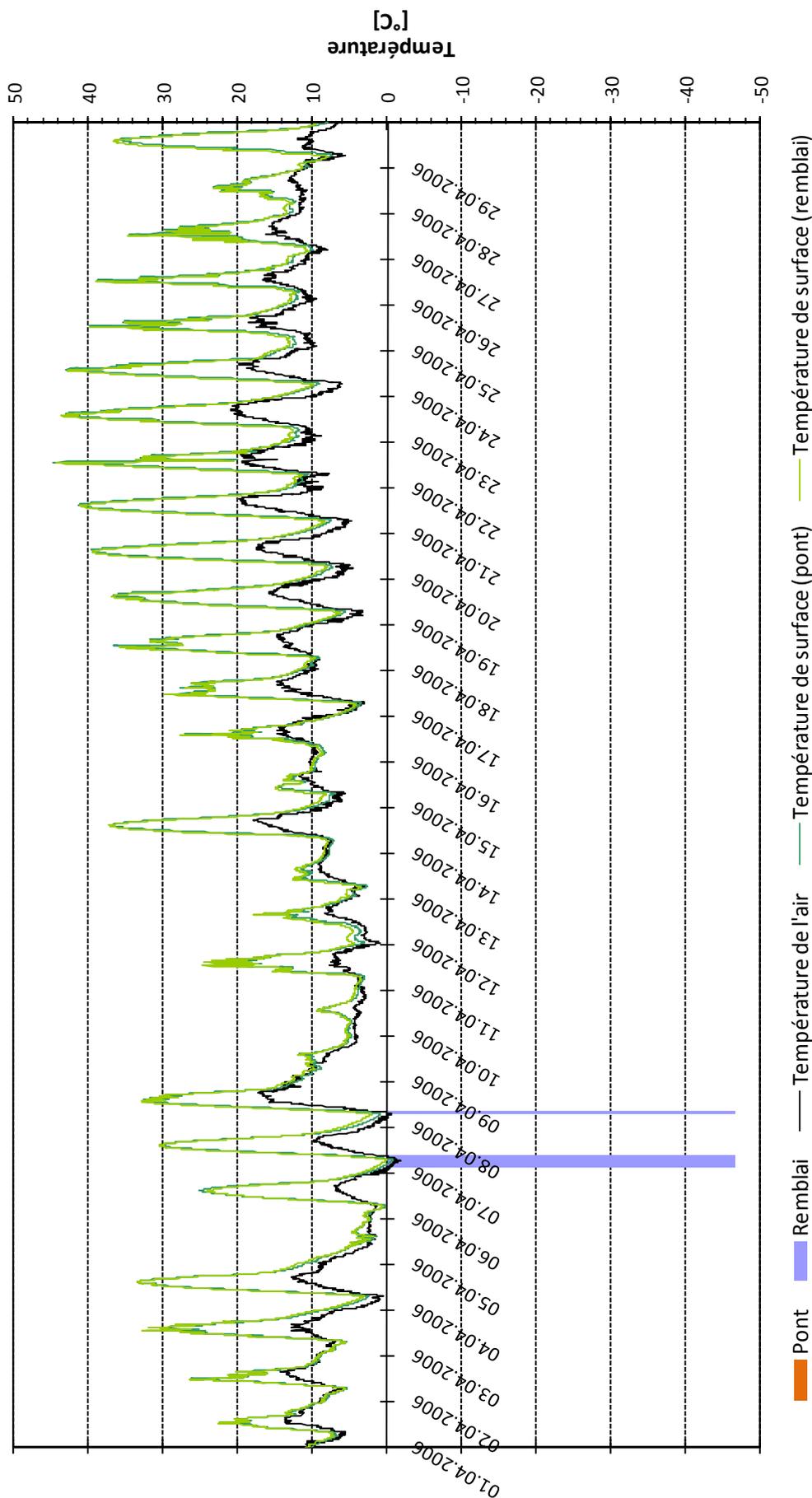


### Rudesse hivernale - Mars 06

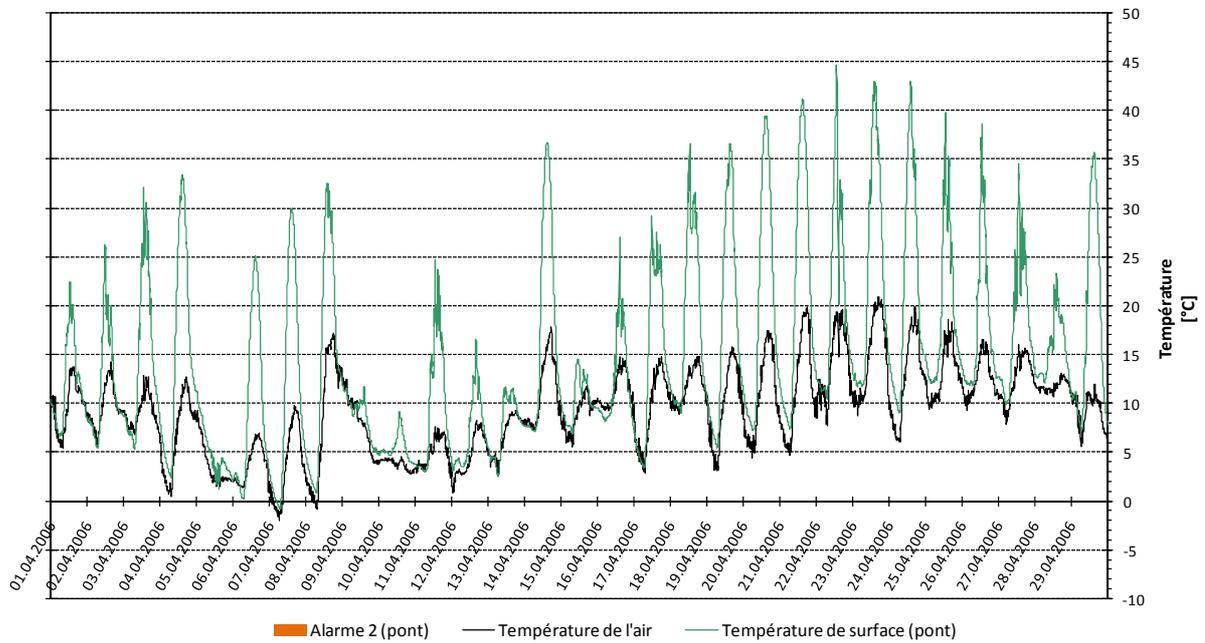


9.2.4 Avril 2006

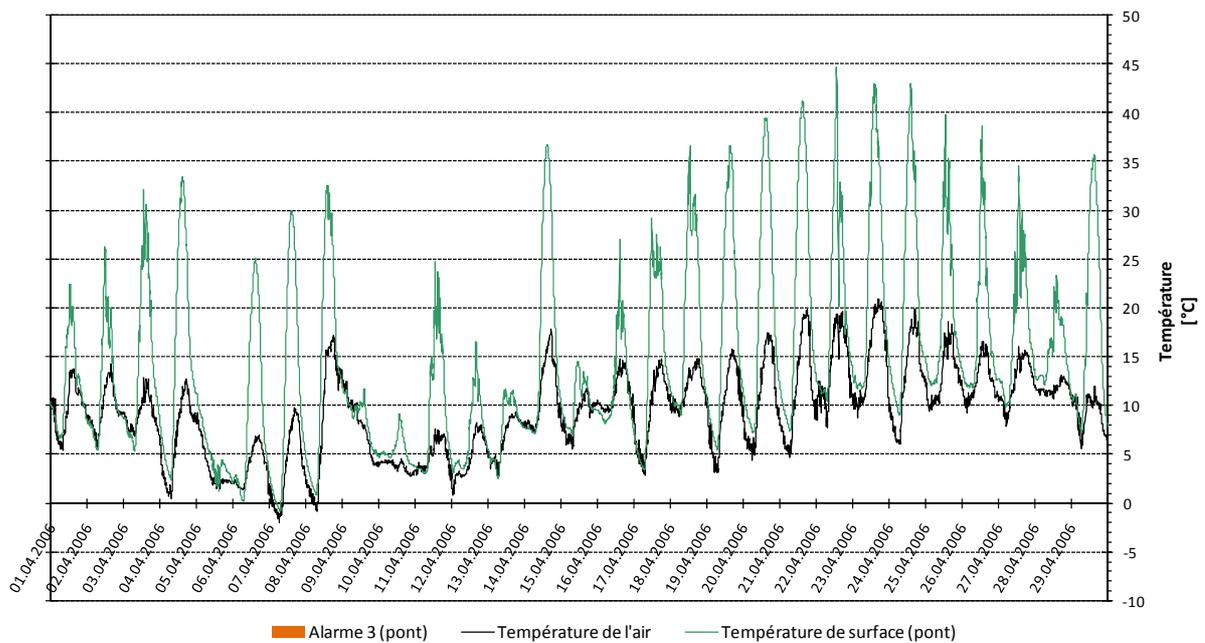
Alarme 1 - Avril 06



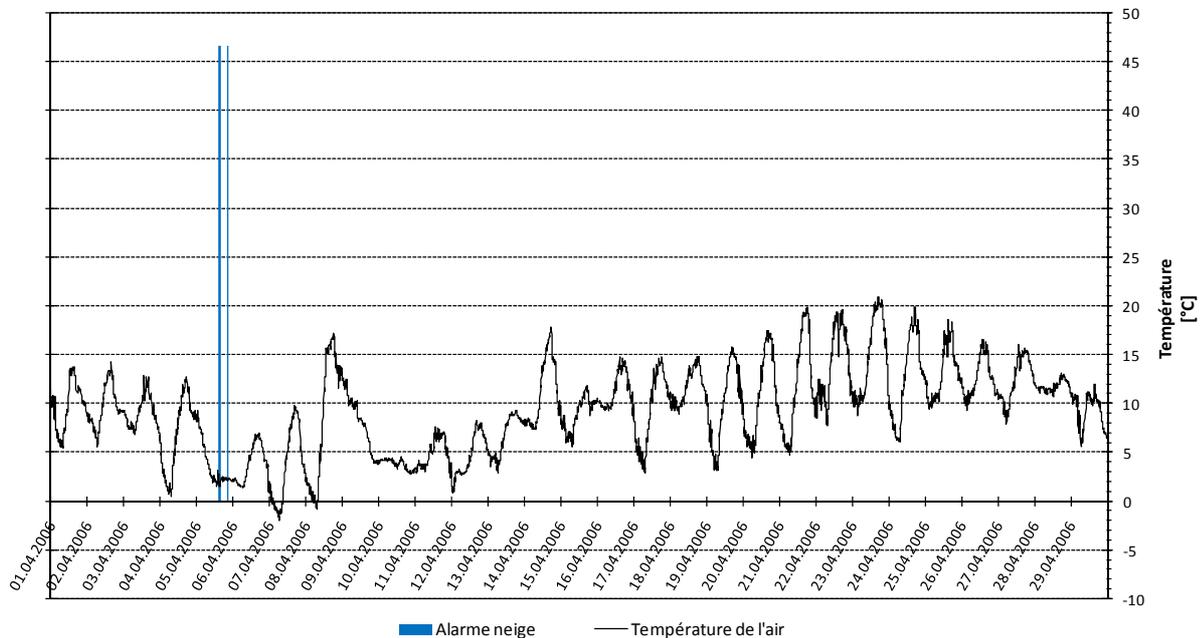
### Alarme 2 - Avril 06



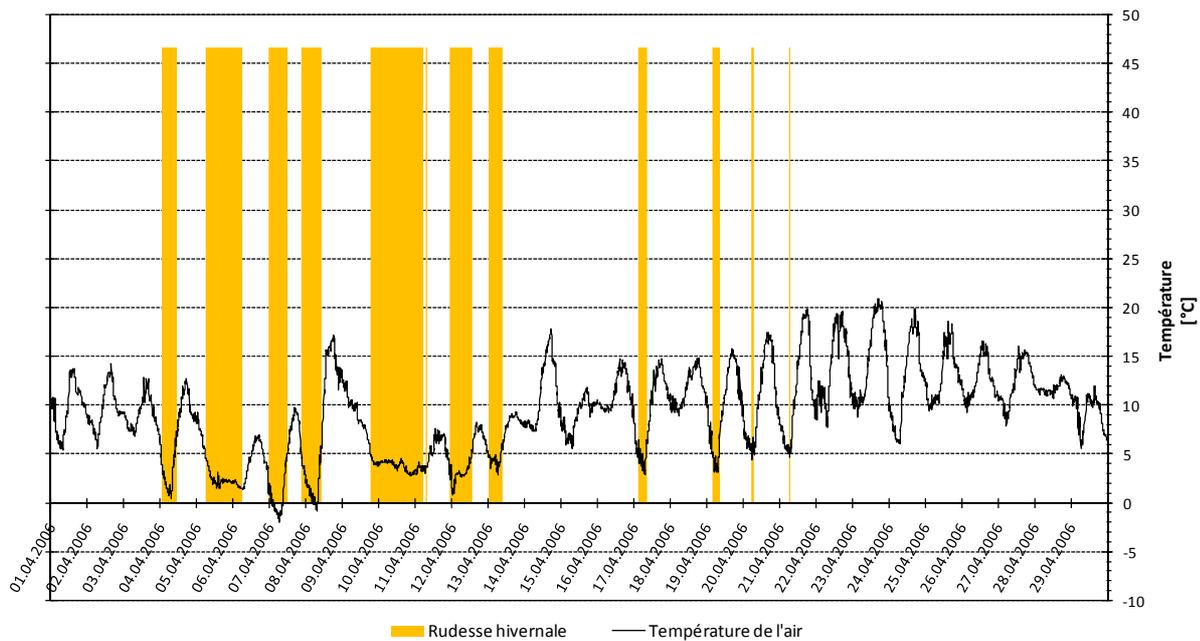
### Alarme 3 - Avril 06



### Alarme neige - Avril 06

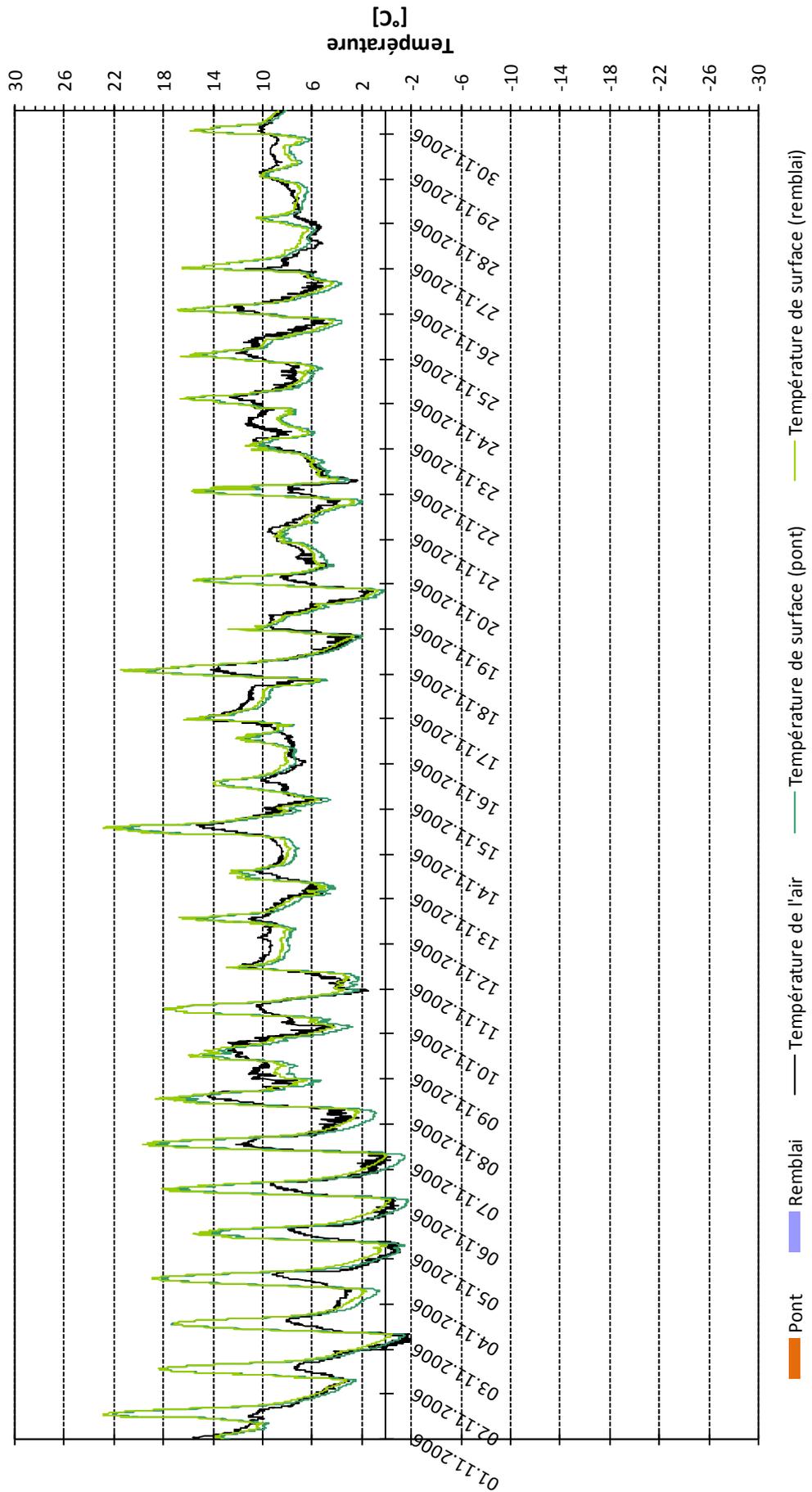


### Rudesse hivernale - Avril 06

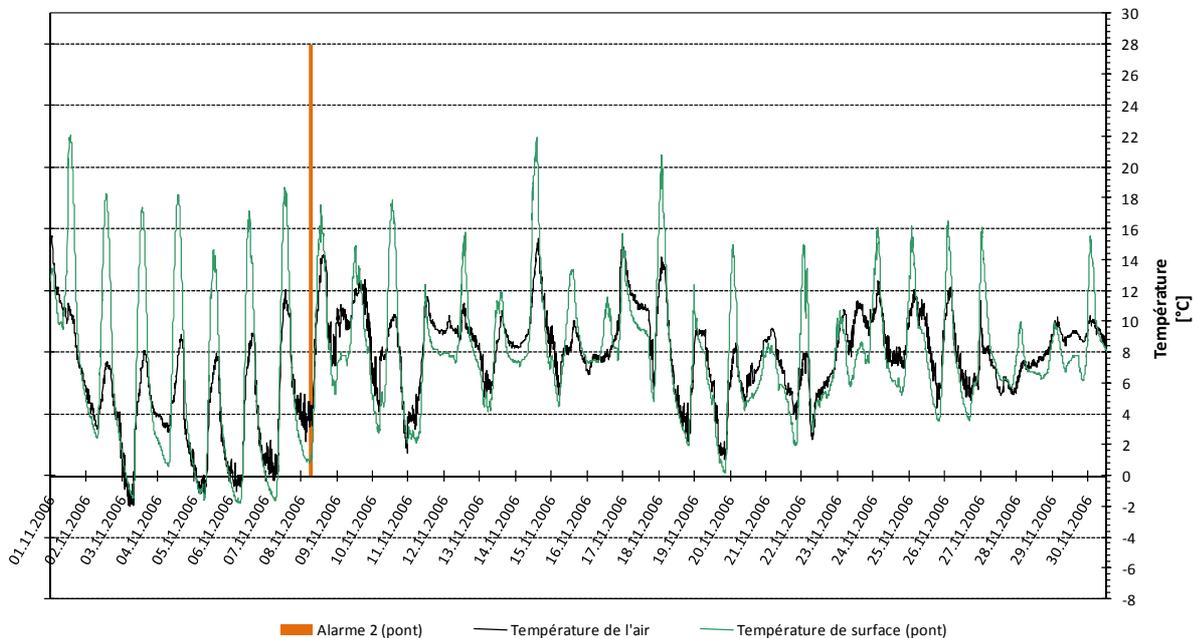


9.2.5 Novembre 2006

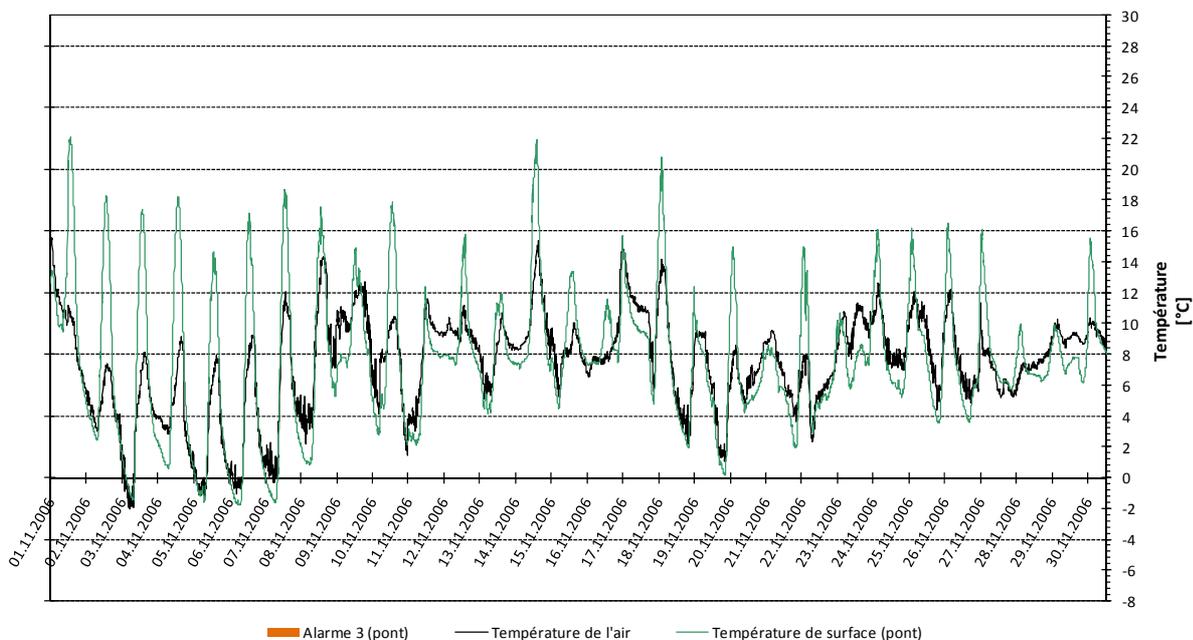
Alarme 1 - Novembre 06



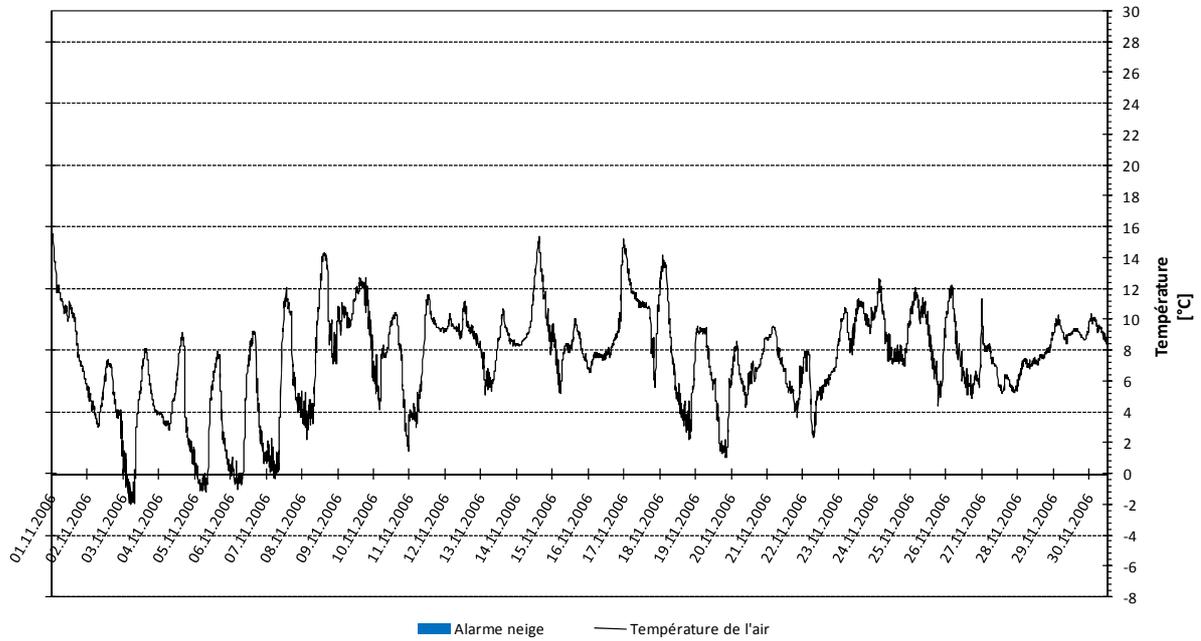
### Alarme 2 - Novembre 06



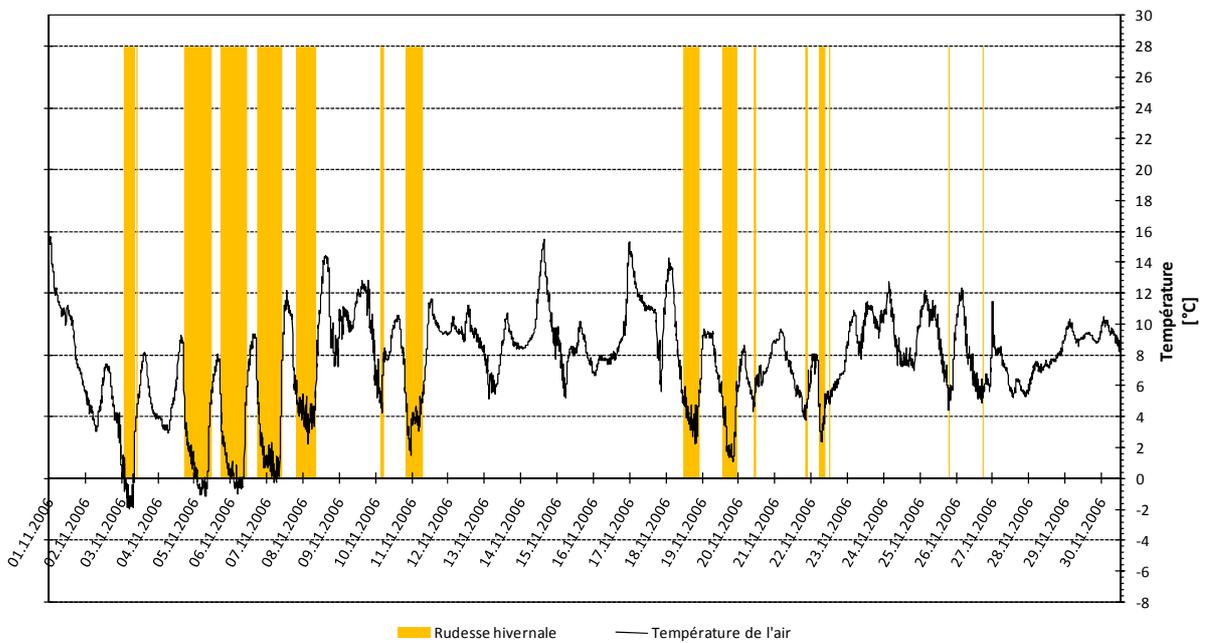
### Alarme 3 - Novembre 06



### Alarme neige - Novembre 06

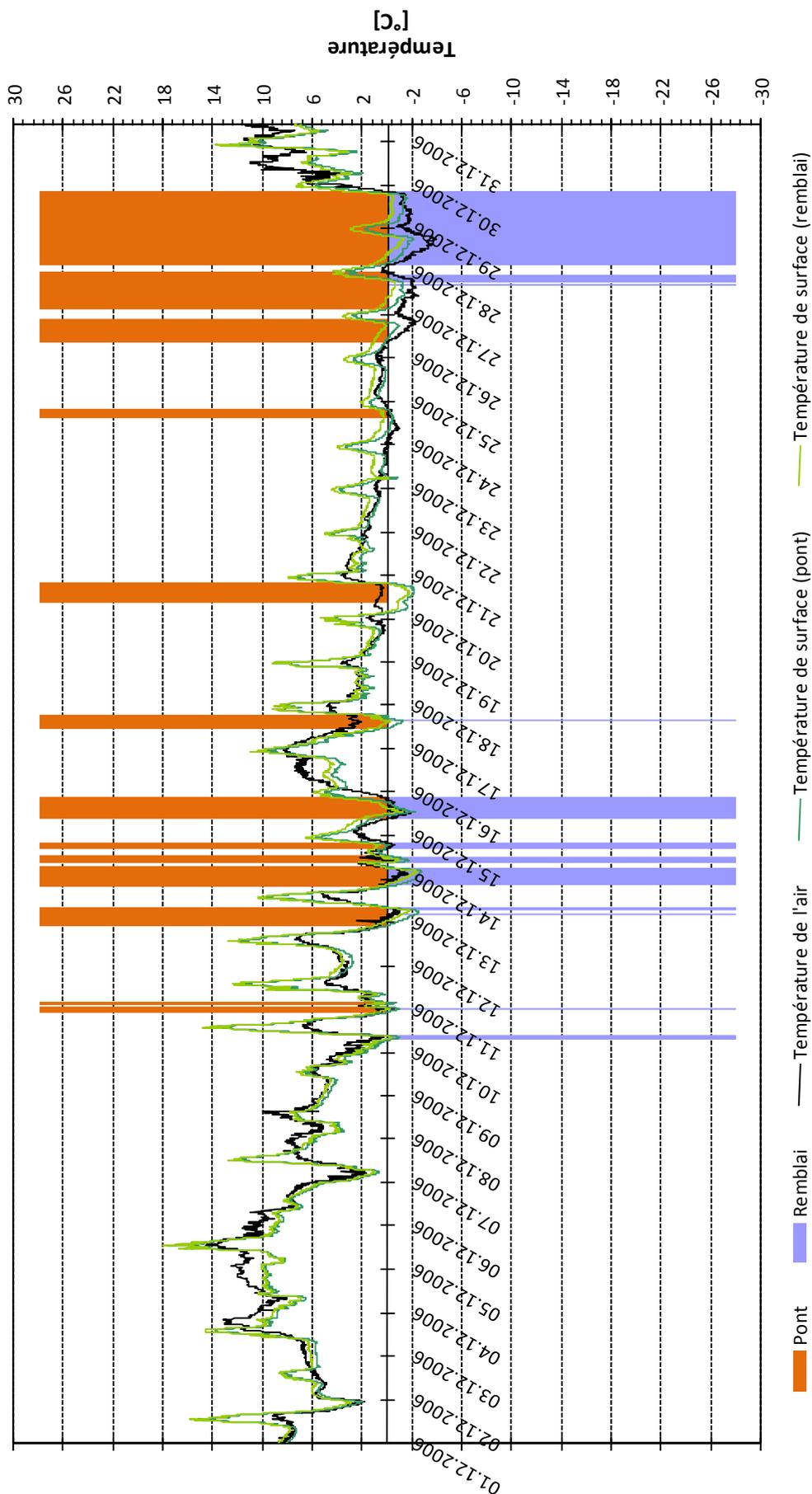


### Rudesse hivernale - Novembre 06

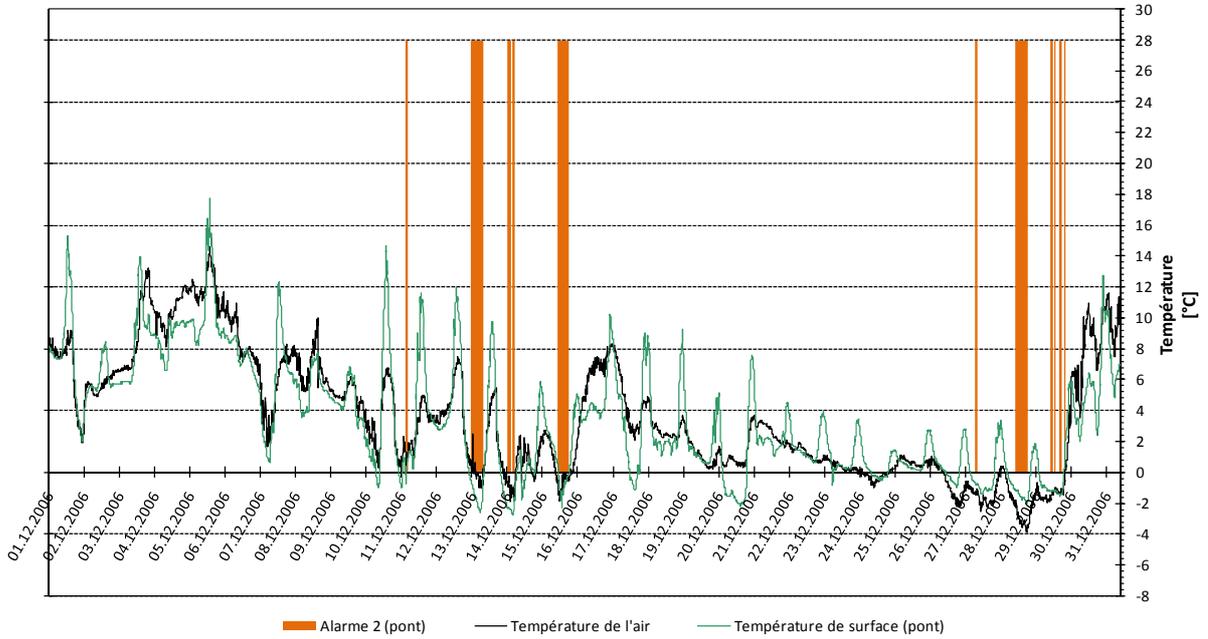


9.2.6 Décembre 2006

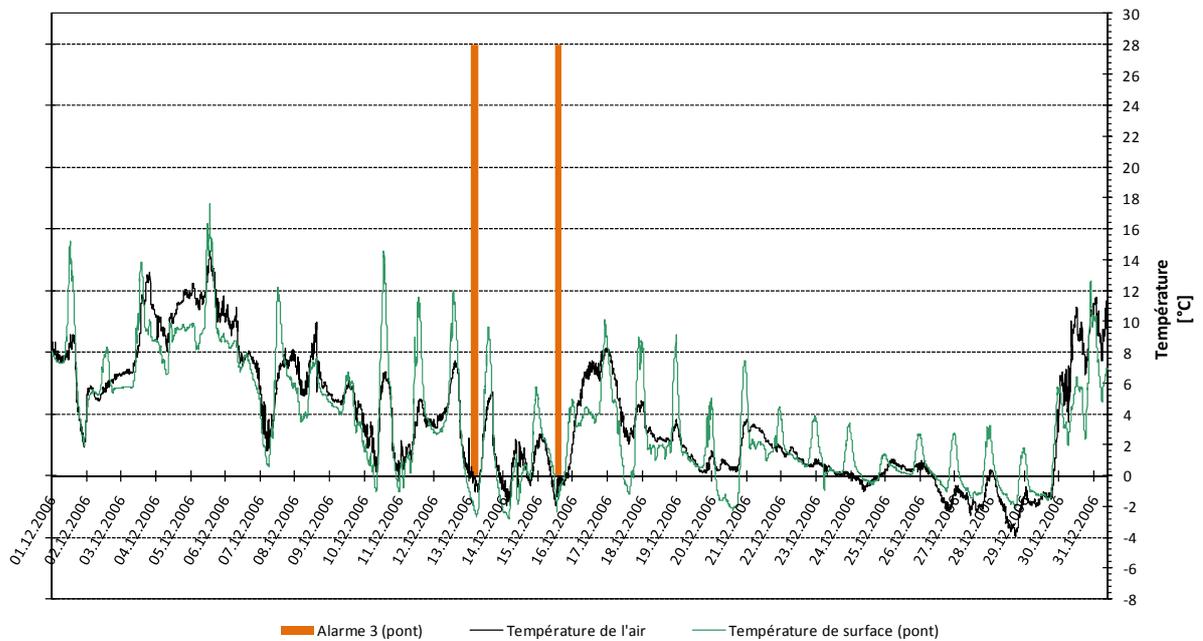
Alarme 1 - Décembre 06



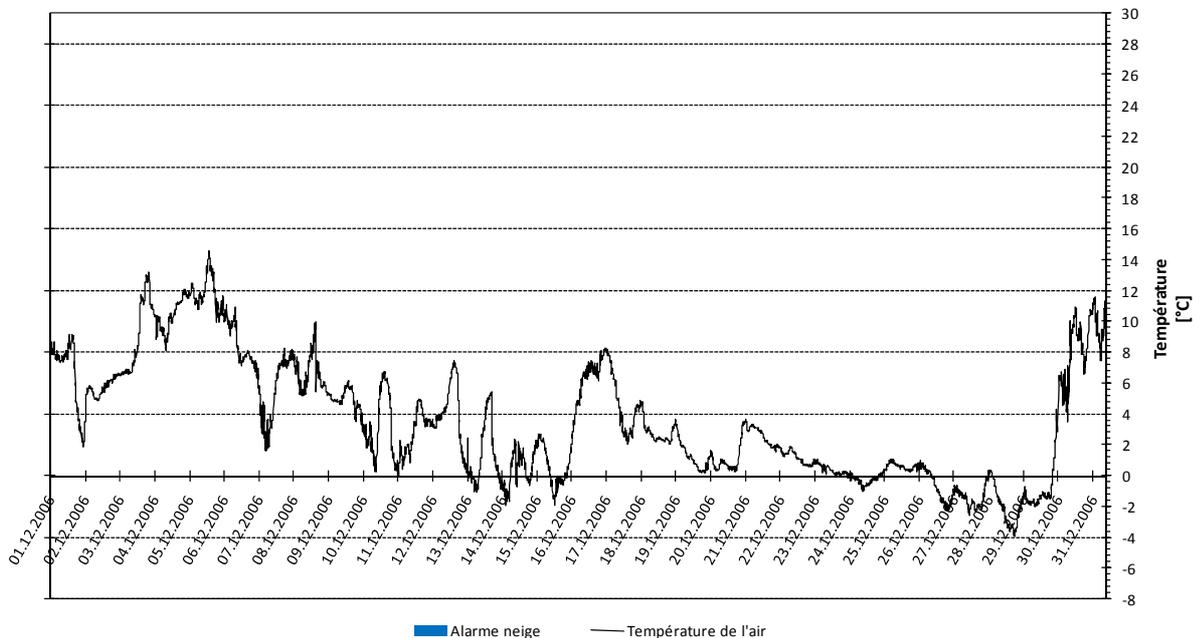
### Alarme 2 - Décembre 06



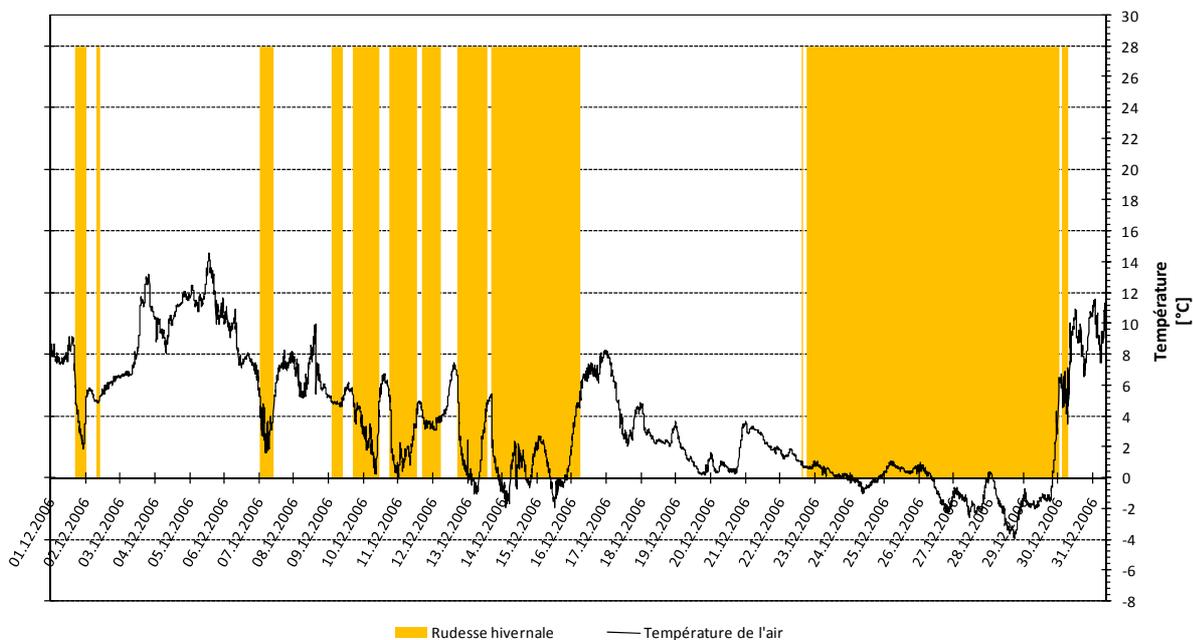
### Alarme 3 - Décembre 06



### Alarme neige - Décembre 06

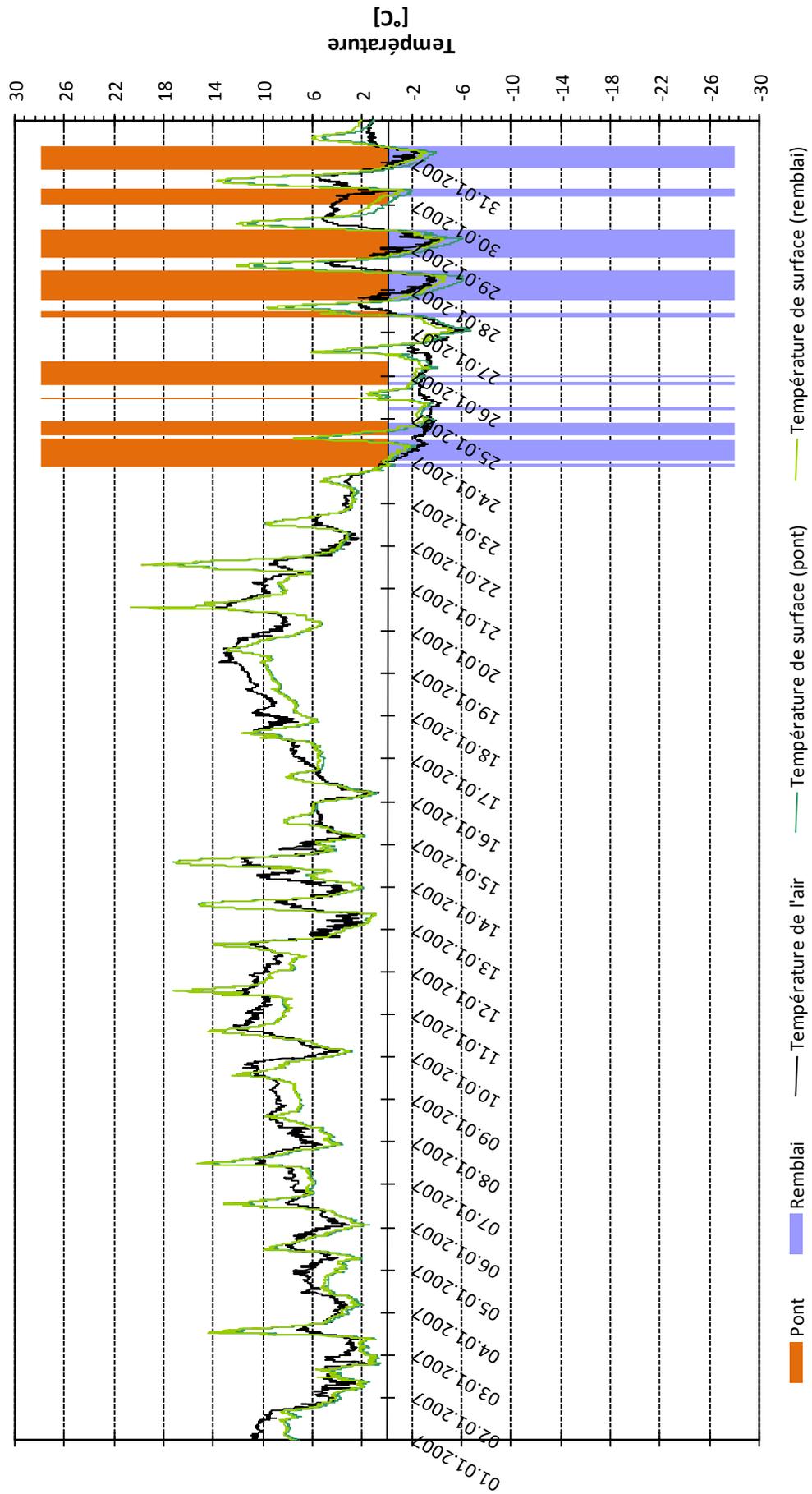


### Rudesse hivernale - Décembre 06

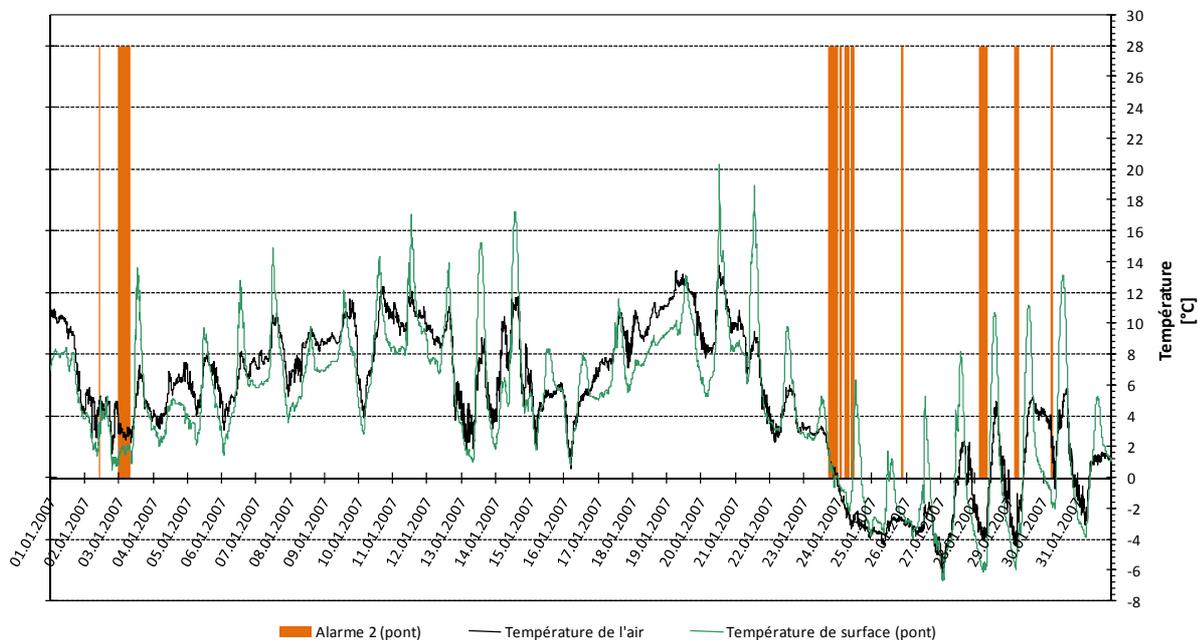


9.2.7 Janvier 2007

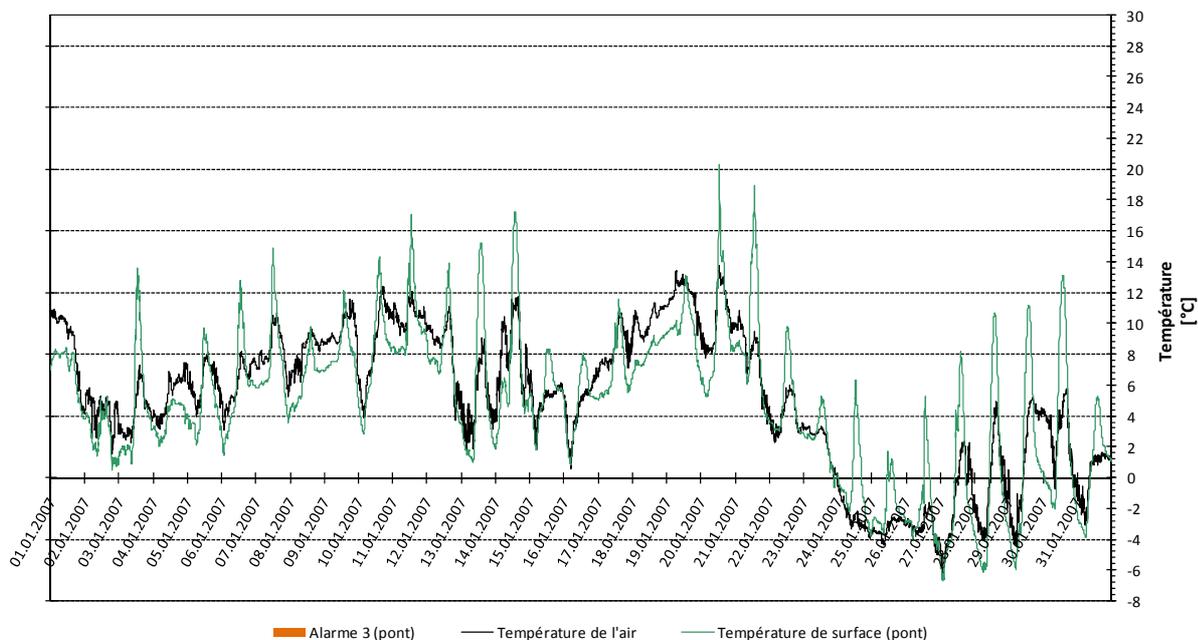
Alarme 1 - Janvier 07



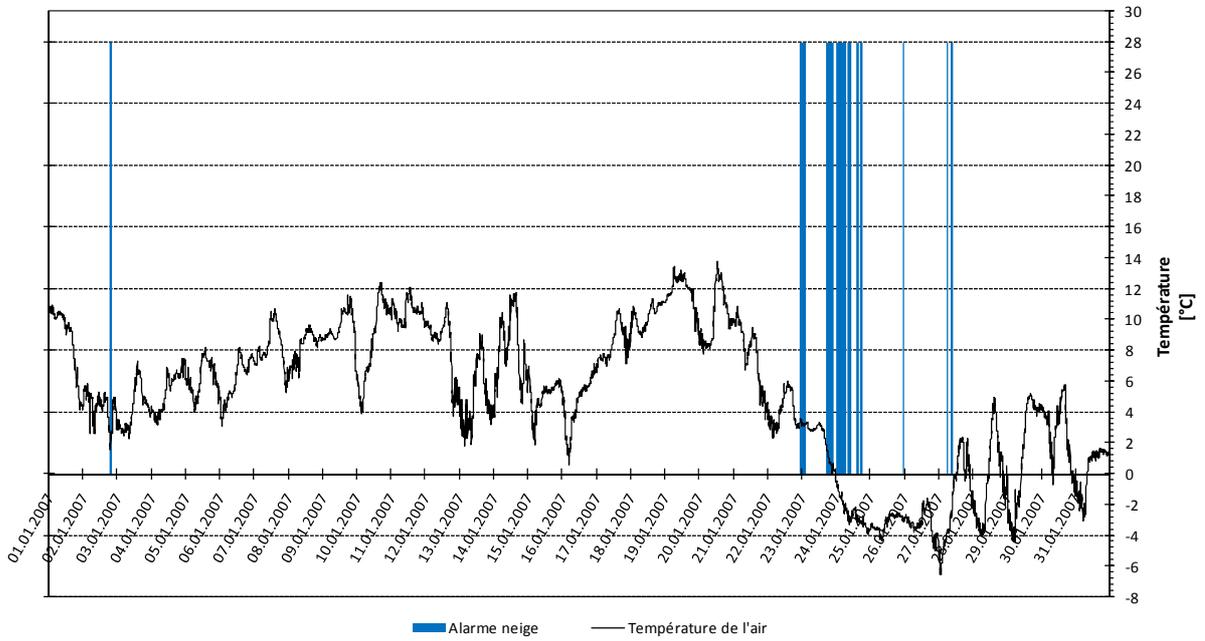
### Alarme 2 - Janvier 07



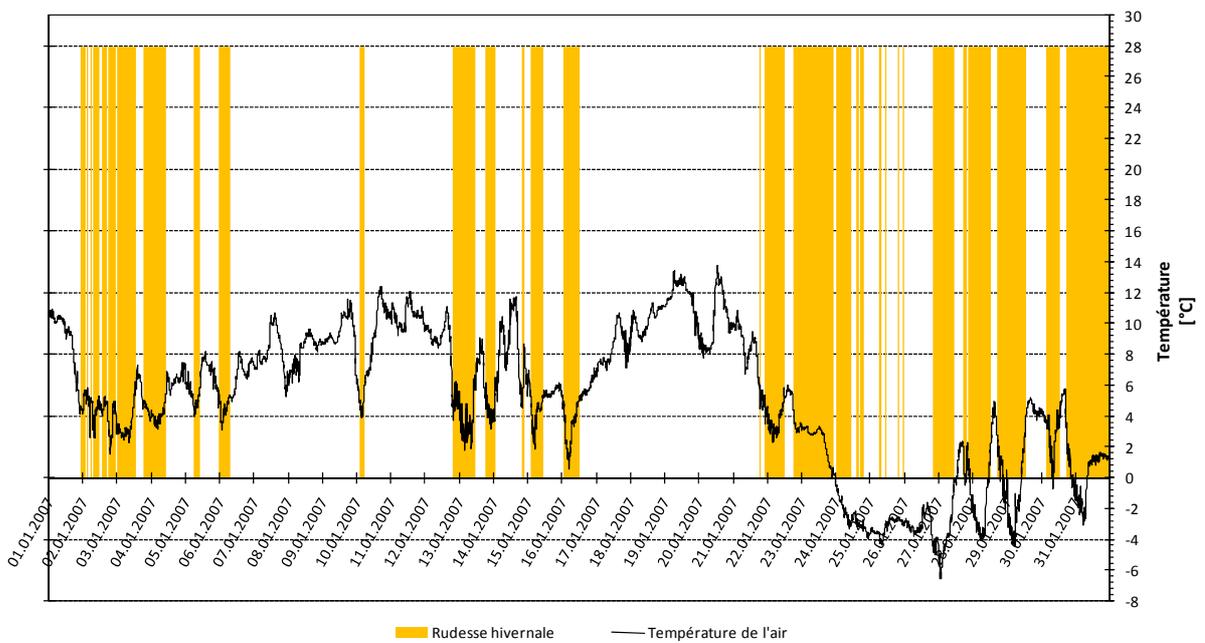
### Alarme 3 - Janvier 07



### Alarme neige - Janvier 07

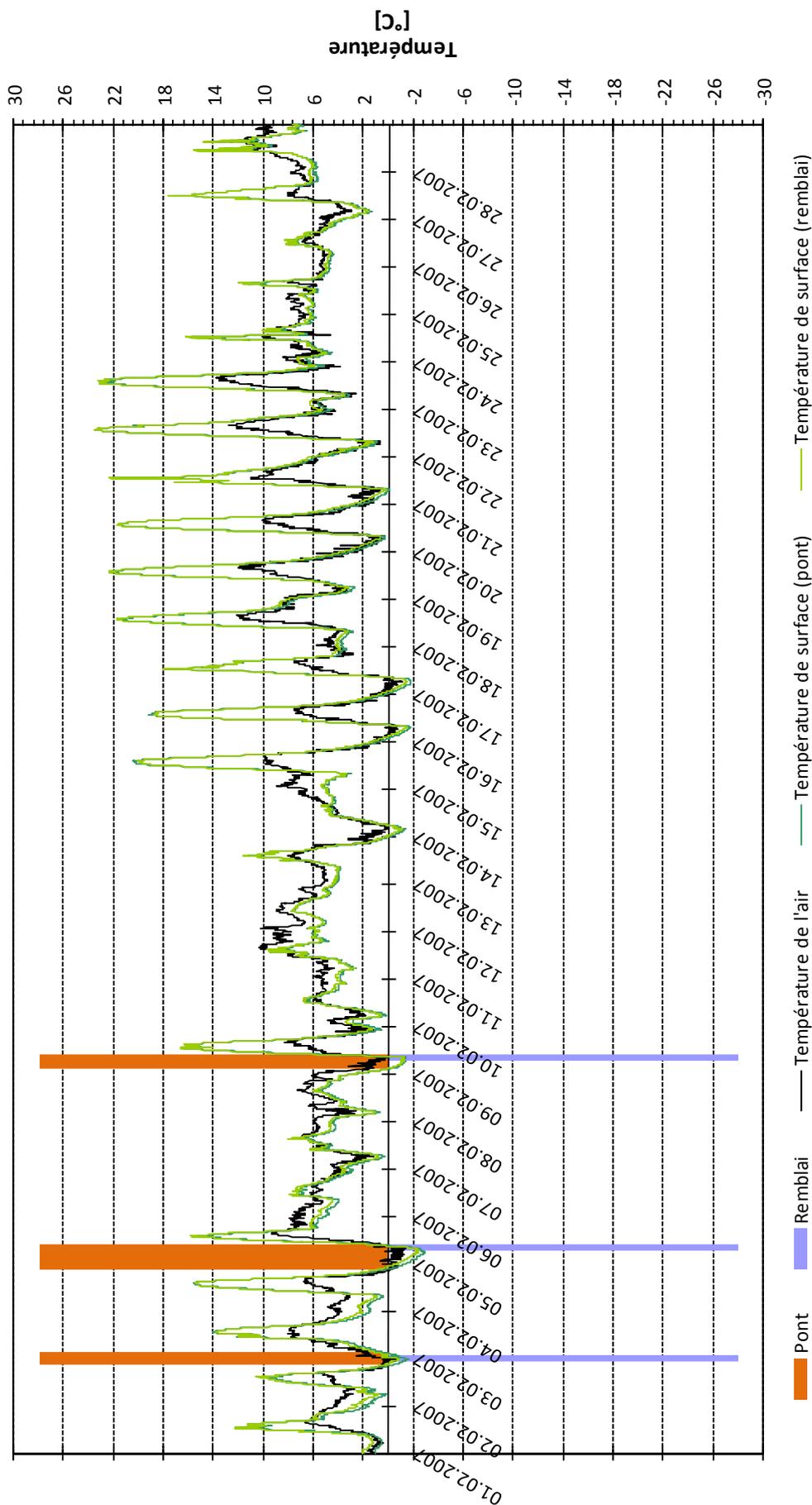


### Rudesse hivernale - Janvier 07

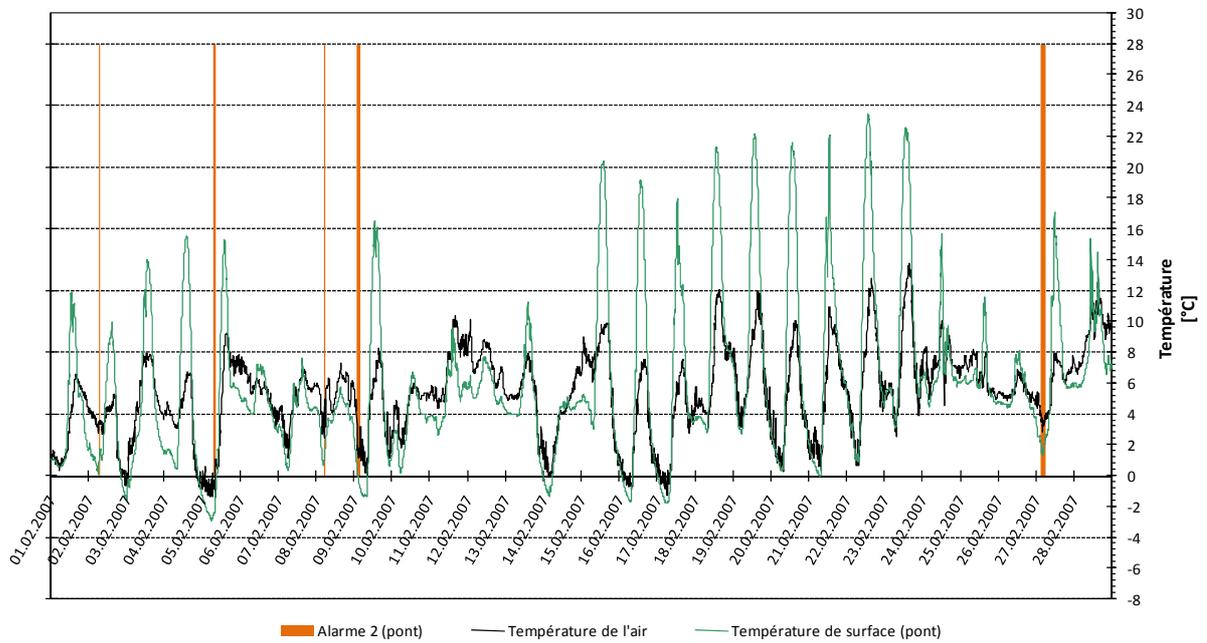


9.2.8 Février 2007

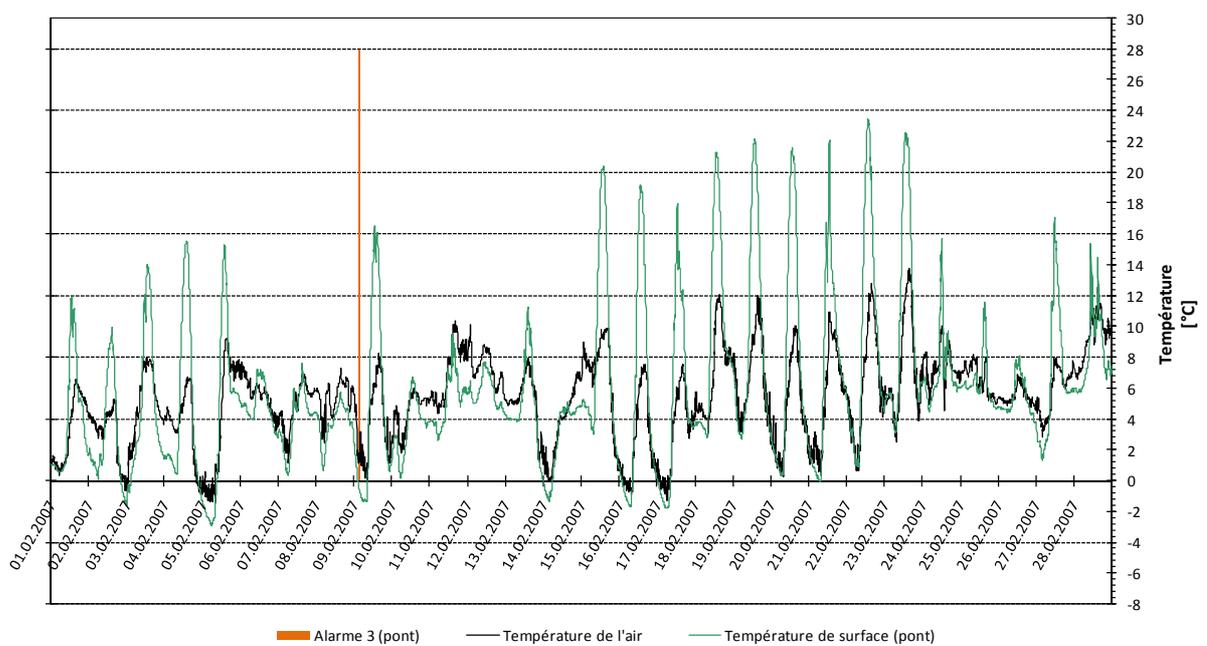
Alarme 1 - Février 07



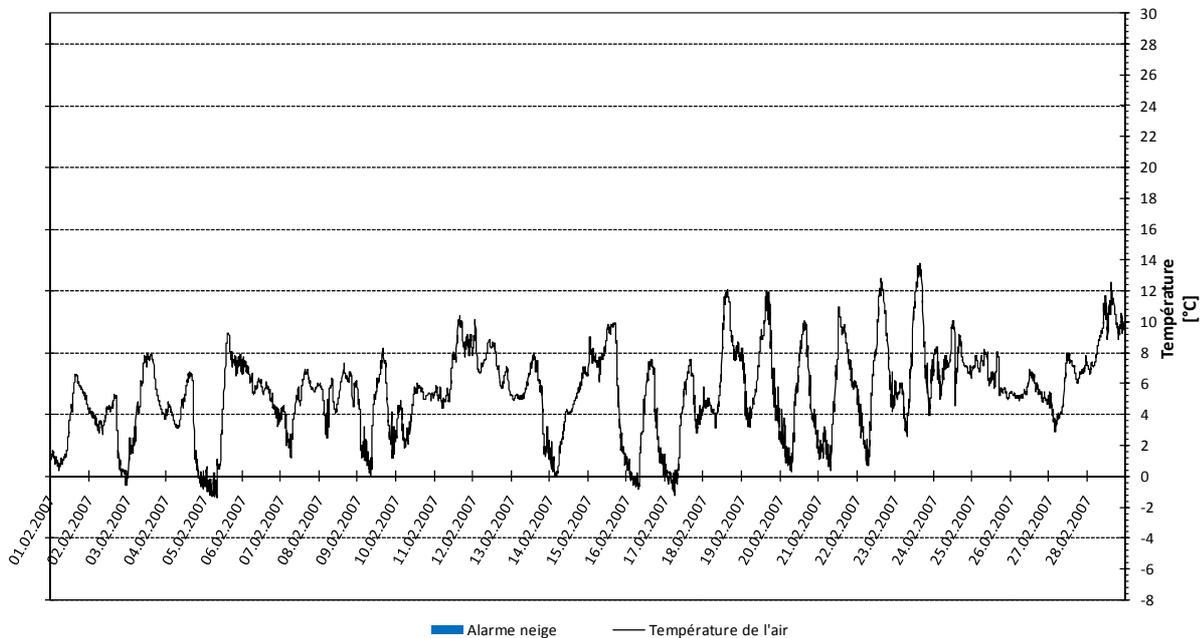
### Alarme 2 - Février 07



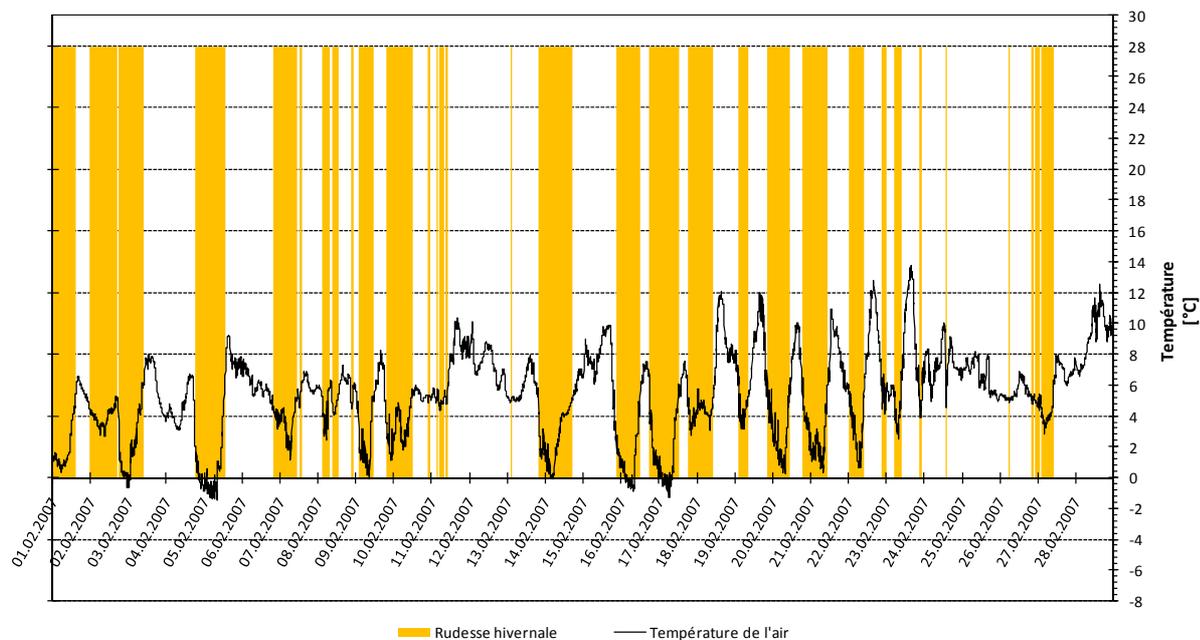
### Alarme 3 - Février 07



### Alarme neige - Février 07

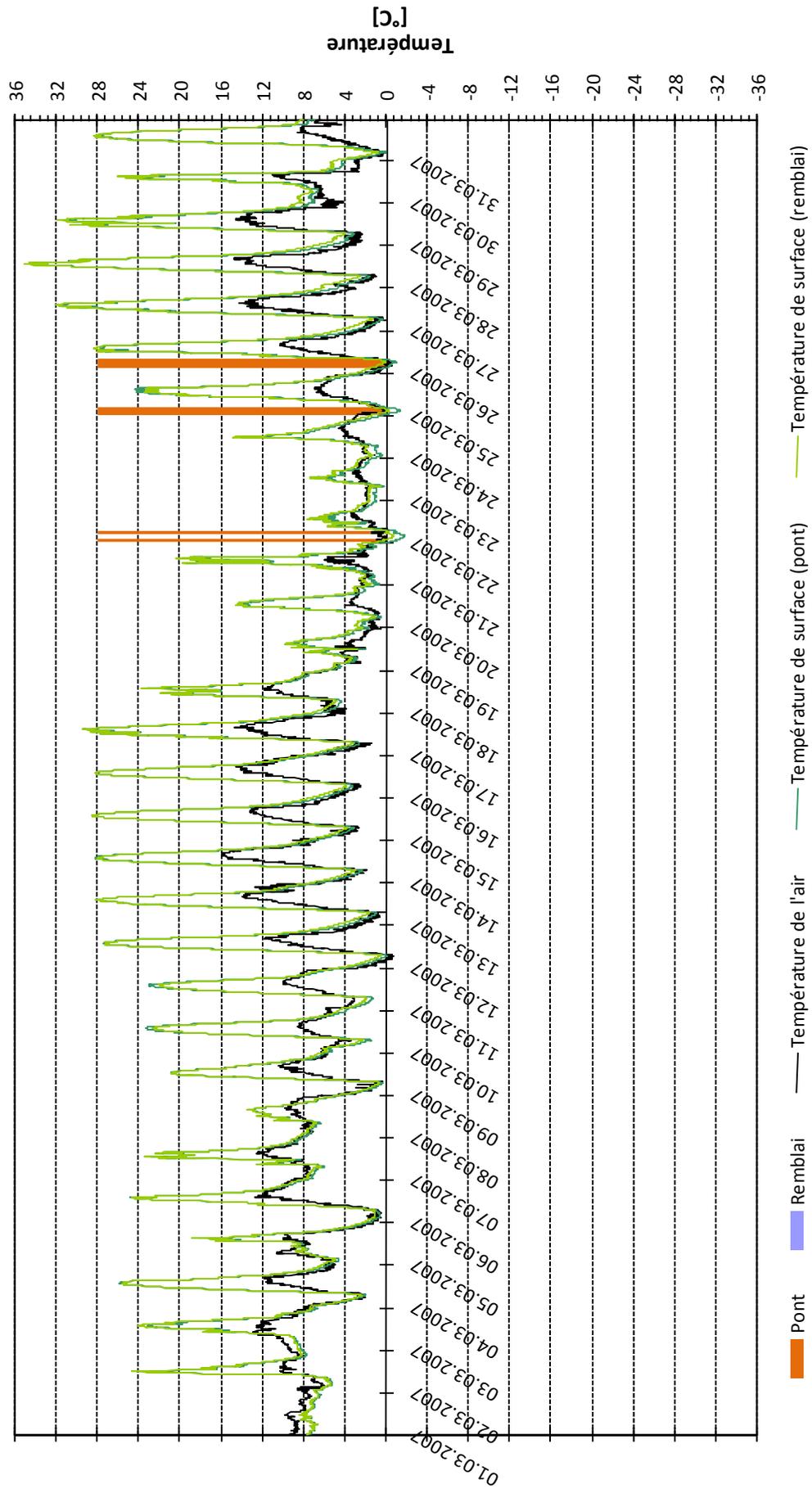


### Rudesse hivernale - Février 07

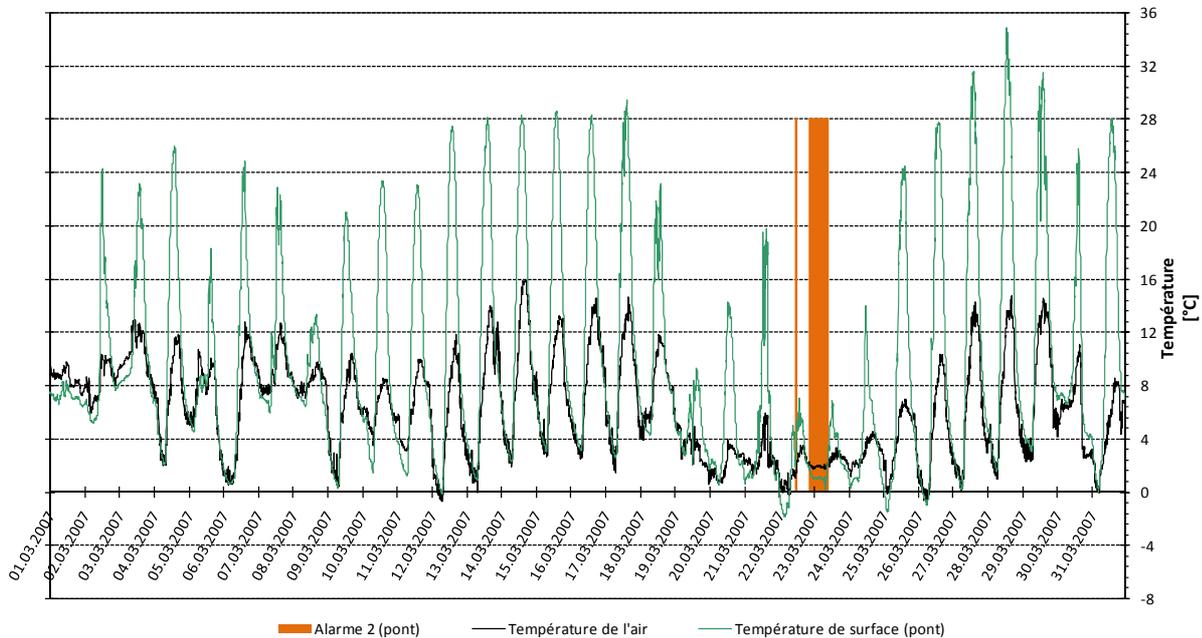


9.2.9 Mars 2007

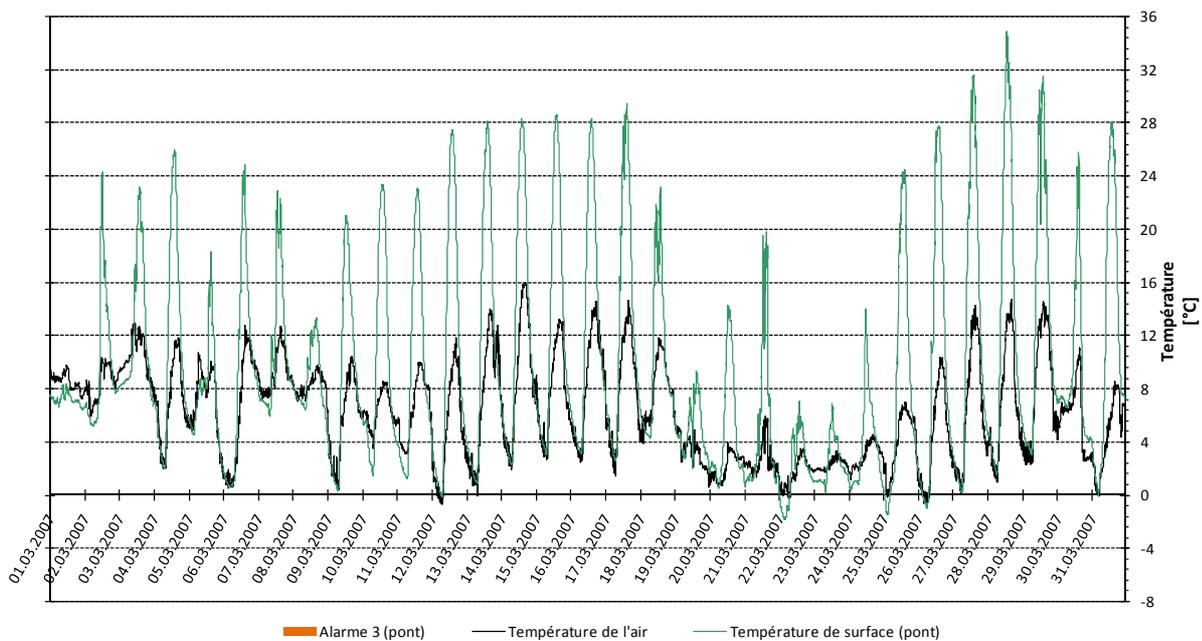
Alarme 1 - Mars 07



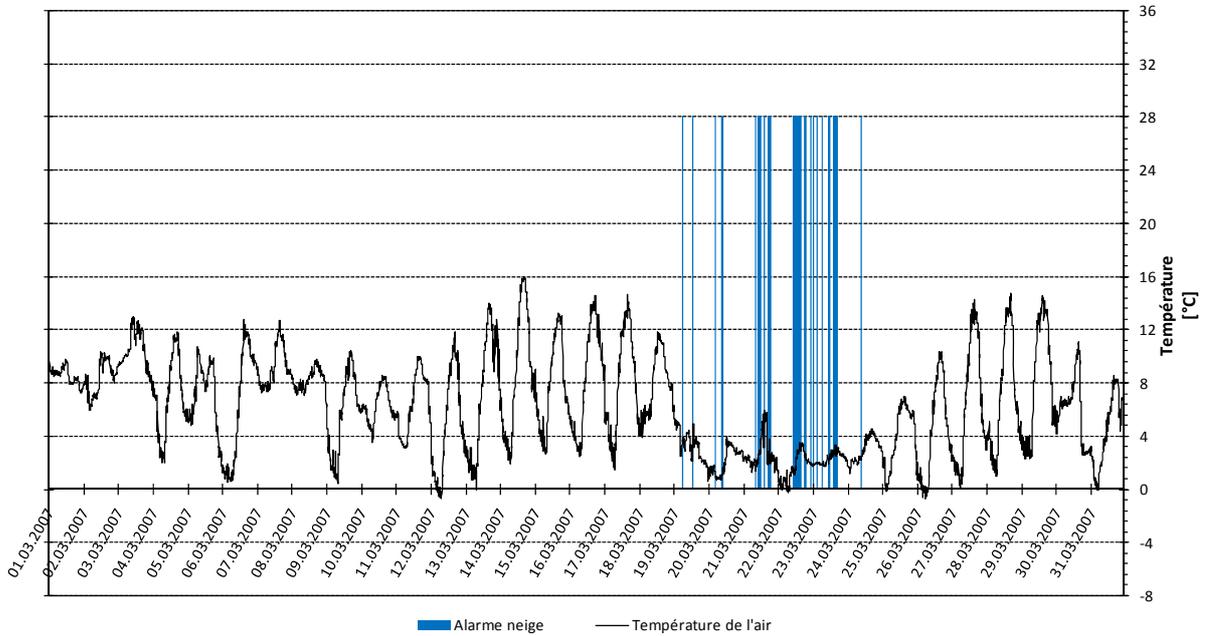
### Alarme 2 - Mars 07



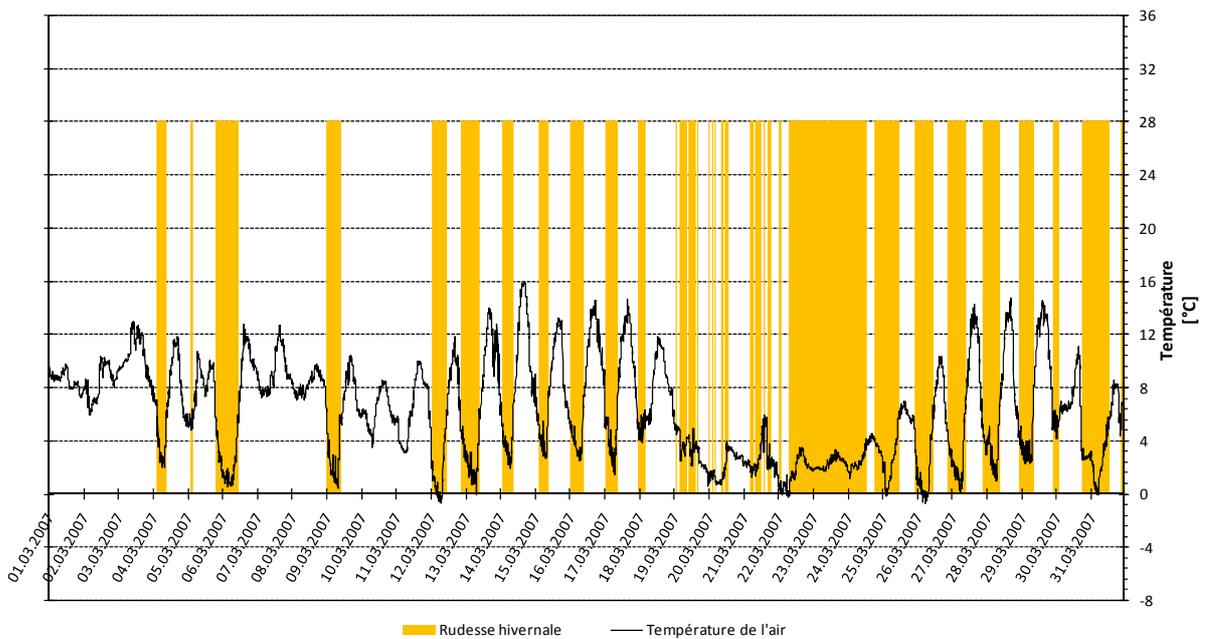
### Alarme 3 - Mars 07



### Alarme neige - Mars 07

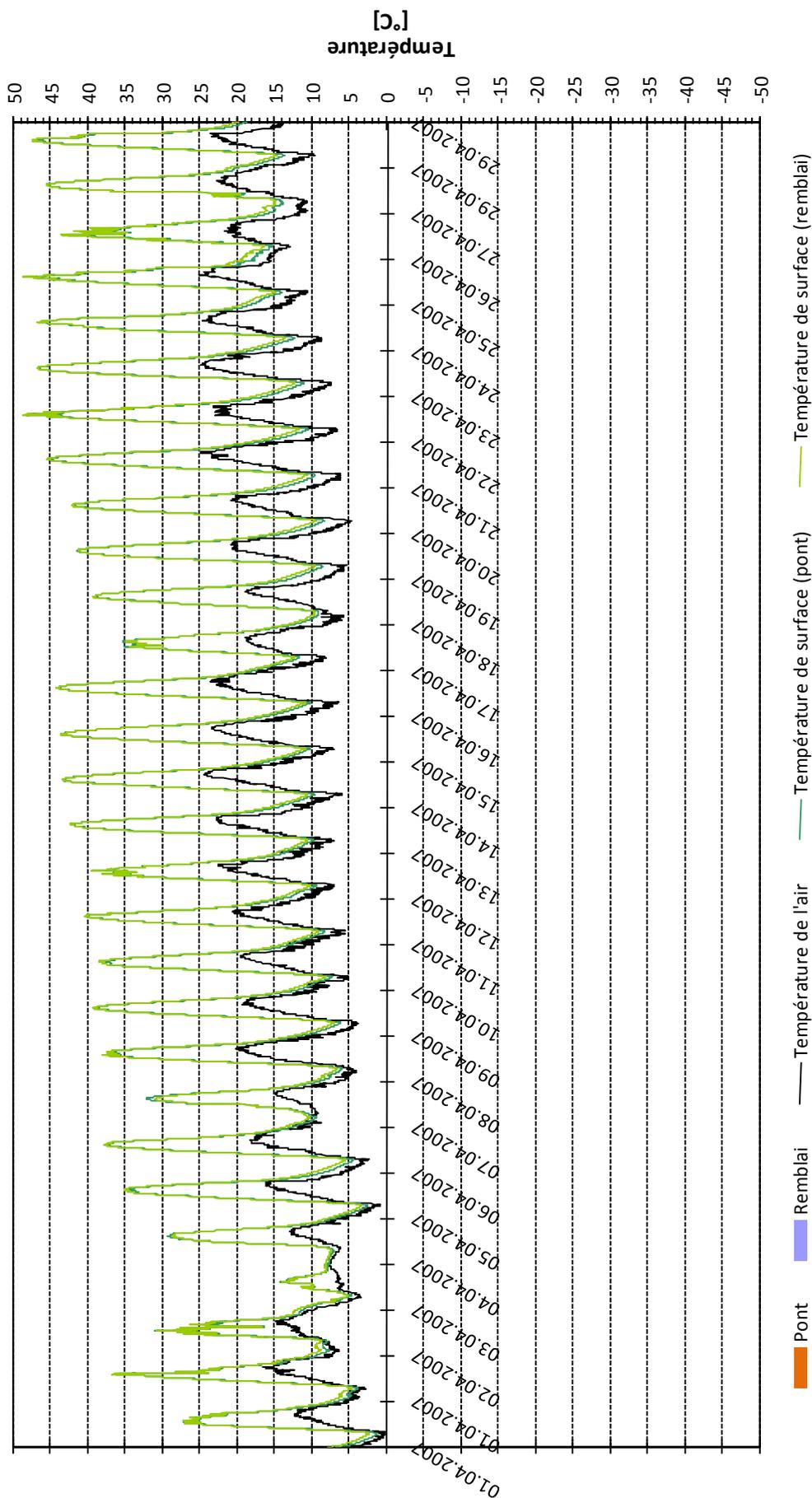


### Rudesse hivernale - Mars 07

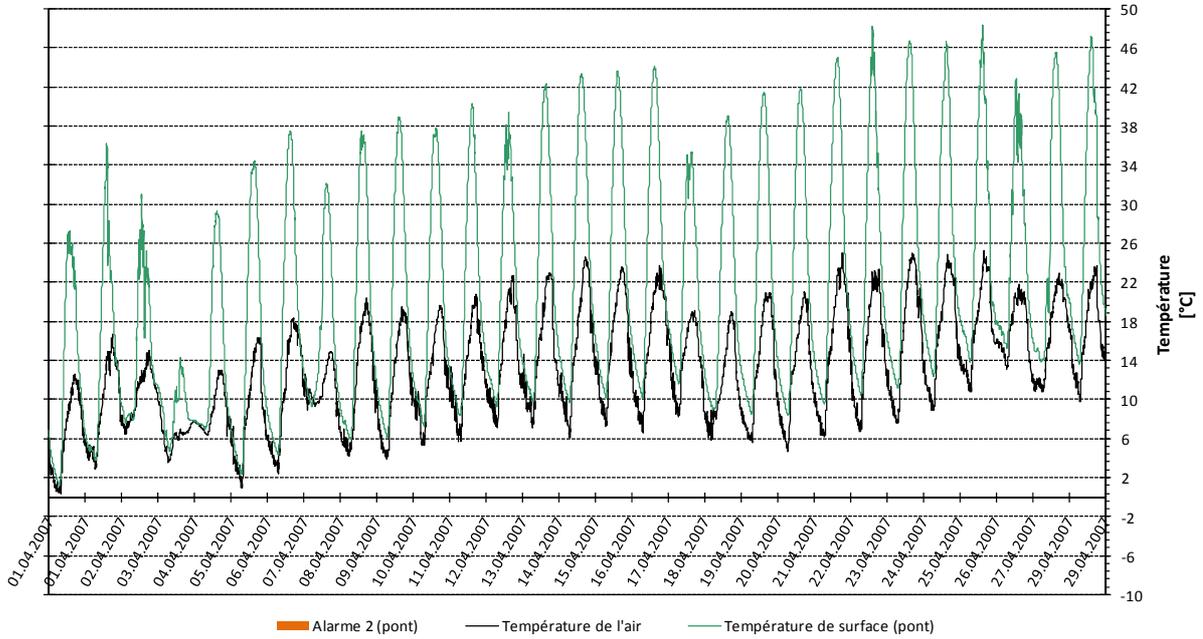


9.2.10 Avril 2007

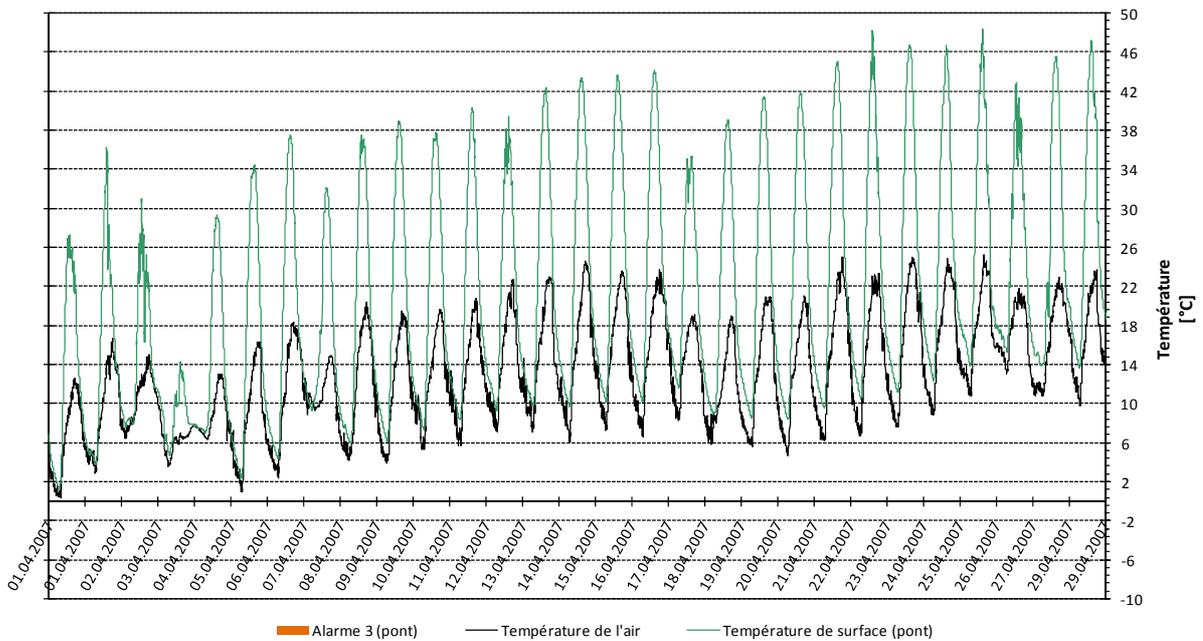
### Alarme 1 - Avril 07



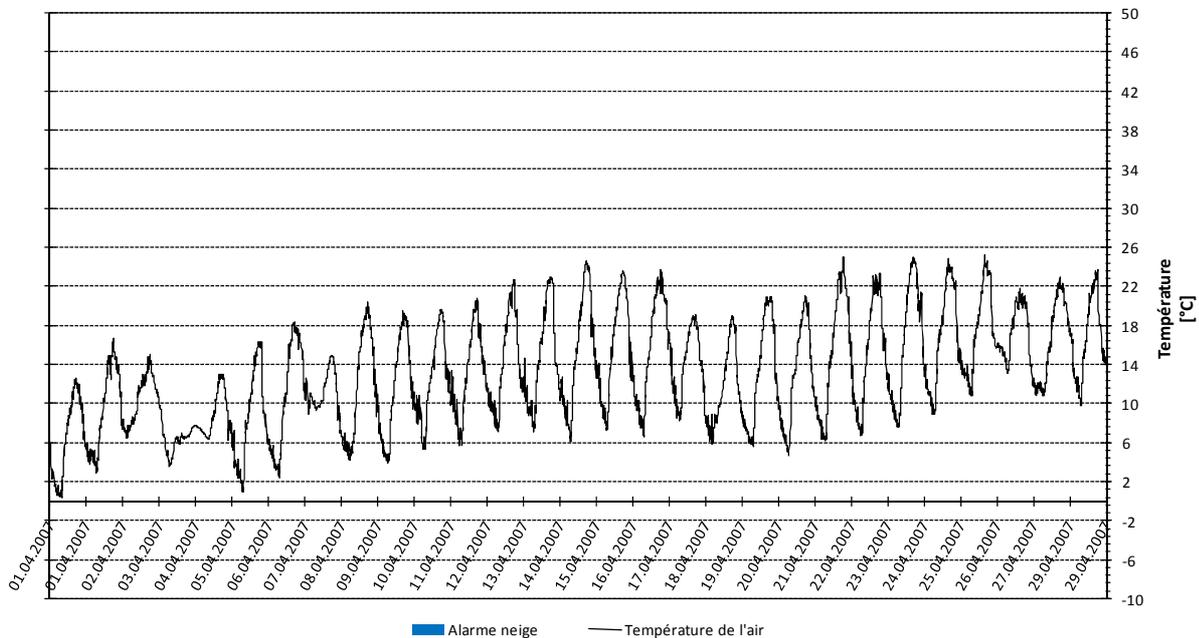
### Alarme 2 - Avril 07



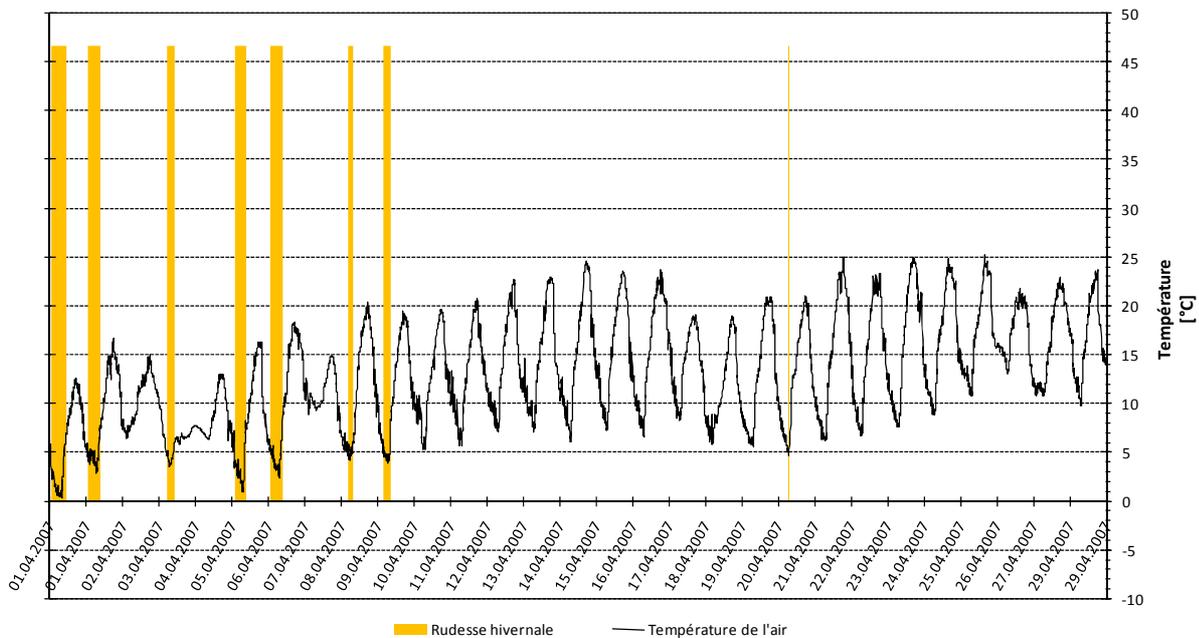
### Alarme 3 - Avril 07



### Alarme neige - Avril 07



### Rudesse hivernale - Avril 07



### **9.3 RAPPORT DE L'EMPA SUR LES MESURES THERMOGRAPHIQUES**



# 1 Thermographie infrarouge

Dans ce qui suit, les termes de thermographie infrarouge et de thermographie sont utilisés comme synonymes.

## 1.1 But

Le but poursuivi avec ces mesures thermographiques était le suivant:

- Vérifier dans quelle proportion des mesures thermographiques stationnaires ponctuelles sont représentatives de la totalité du pont.
- Extrapolation des mesures ponctuelles stationnaires à l'ensemble du pont
- Comparaison entre les températures sur le pont et en dehors du pont au cours d'une chute de température extérieure d'une température supérieure à zéro à une température inférieure à zéro

## 1.2 Principe de mesure

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu de  $-273.15^{\circ}\text{C}$  émet un rayonnement électromagnétique. On désigne par infrarouge le domaine situé entre environ  $10^{11}$  Hz et  $10^{14}$  Hz (figure 1). L'intensité du rayonnement émis par un corps dépend entre autres de sa température et de son facteur d'émission. Ce dernier a une valeur située entre zéro et un et décrit le rayonnement du corps en question par rapport au rayonnement du corps noir qui possède un facteur d'émission de 1. La connaissance du facteur d'émission est indispensable pour la conversion du rayonnement infrarouge en température superficielle.

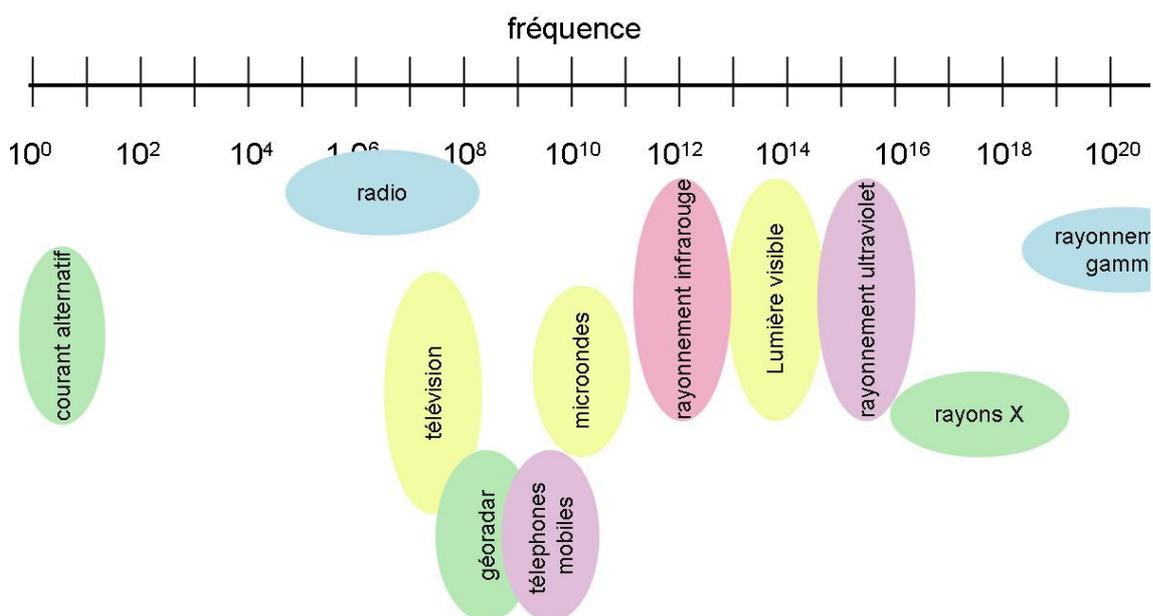
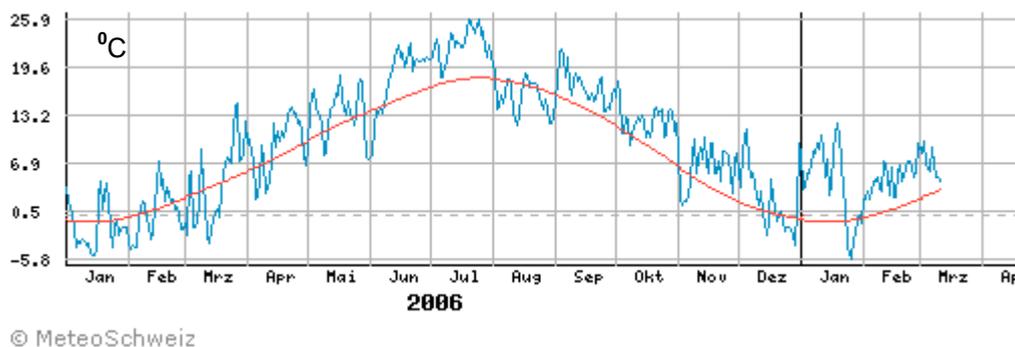


Figure 1: Spectre électromagnétique

### 1.3 Conditions marginales

Le mois de février 2007 avait été prévu pour la campagne de mesure. Il s'agissait de mesurer au cours de cette période durant 24 heures la température superficielle d'un revêtement bitumineux drainant sur un pont lors d'une chute de la température extérieure de valeurs supérieures à zéro à des valeurs nettement inférieures à zéro. Toutefois comme il a régné durant tout le mois de février des températures nettement plus chaude qu'en moyenne, (figure 2), il a été décidé de procéder aux mesures les 21 et 22 février, cela bien que les conditions ne correspondaient pas à ce qui avait été initialement prévu.



© MeteoSchweiz

Figure 2: Données de température pour Payerne (source: Meteosuisse), bleu: moyenne journalière, rouge: moyenne à long terme

### 1.4 Mesures

Les mesures ont été réalisées entre le 21 février 2007 à 16.00 heures et le 22 février à 12.00 heures. Chaque heure, un passage avec l'installation thermographique de l'Empa a été effectué à deux reprises sur la voie de dépassement en direction Neuchâtel. Ces deux passages ont été rendu nécessaires par le fait que la largeur du thermogramme est de 1.21 m et que l'on désirait avoir un enregistrement sur toute la largeur de la voie de dépassement.

La figure 3 montre l'installation de thermographie mobile de l'Empa. La caméra thermographique (flèche rouge) se trouve à une hauteur de 3.11 m, ce qui conduit à une image d'une surface de 2.40 x 1.21 m de la surface de la route. Le contrôle de position a été effectué par GPS; l'antenne GPS est indiquée d'une flèche jaune sur la figure 3. Les données GPS ont été enregistrées en mode RTK (real time kinematic) avec correction en temps réel par une station de base située à proximité et atteignent ainsi une précision meilleure que 0.01 m. La synchronisation de ces deux flux de données (thermographie et GPS) a été réalisée après les mesures sur la base du temps.

Tableau 1: Appareils utilisés

Caméra thermographique	Agema THV 900LW
Domaine de mesure	8 – 12 $\mu\text{m}$
Pixel	36992
Nombre maximal d'images par seconde	30
Résolution en température	0.08°C à 30°C
GPS-Rover	Trimble 5700
Station de base GPS	Trimble 5700



Figure 3: Installation de thermographie mobile de l'Empa et surface enregistrée par image, flèche rouge = caméra infrarouge, flèche jaune = antenne GPS

La figure 4 montre les points de mesure enregistrés lors d'un double passage. En plus de cela les deux joints de chaussée du pont sont marqués. Pour toutes les lignes de mesure, la mesure a aussi été effectuée quelques mètres avant et après le pont pour permettre une comparaison entre le pont et la route. Les deux lignes ont été choisies de manière à obtenir un enregistrement de la voie de dépassement dans toute sa largeur.

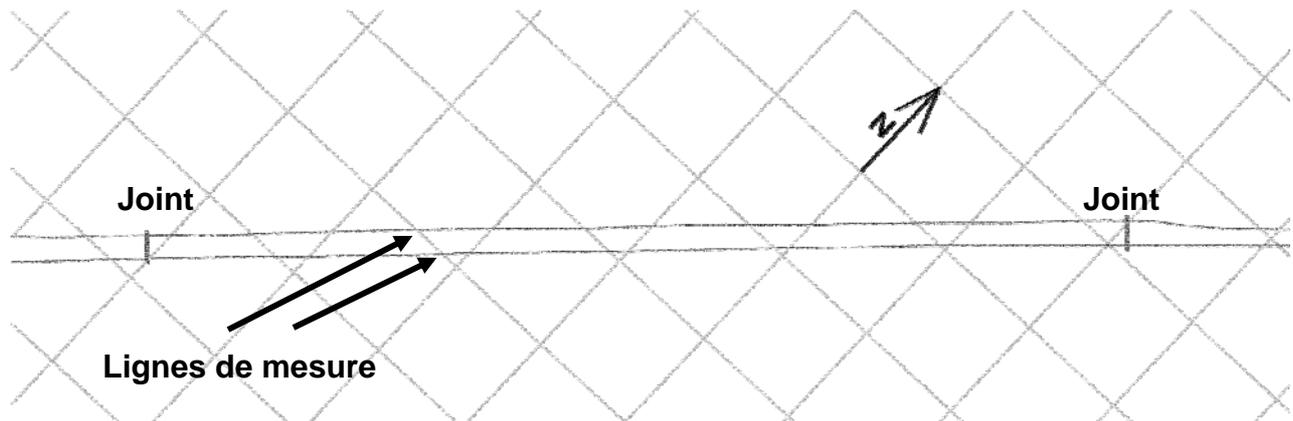


Figure 4: Mesure GPS (détail) d'un double

En plus des mesure réalisées en déplacement on a aussi procédé à l'enregistrement de quelques images fixes et ceci au voisinage des capteurs installés à demeure sur le pont ainsi qu'en quelques endroits visiblement humides (figure 5).



Figure 5: Endroit humide sur le pont

## 1.5 Résultats

La figure 6 donne la courbe de la température de l'air avant, pendant et après les mesures thermographiques. Au cours des mesures, la température de l'air s'est abaissée de 9.7°C à 0.9°C pour remonter ensuite jusqu'à 7.8°C.

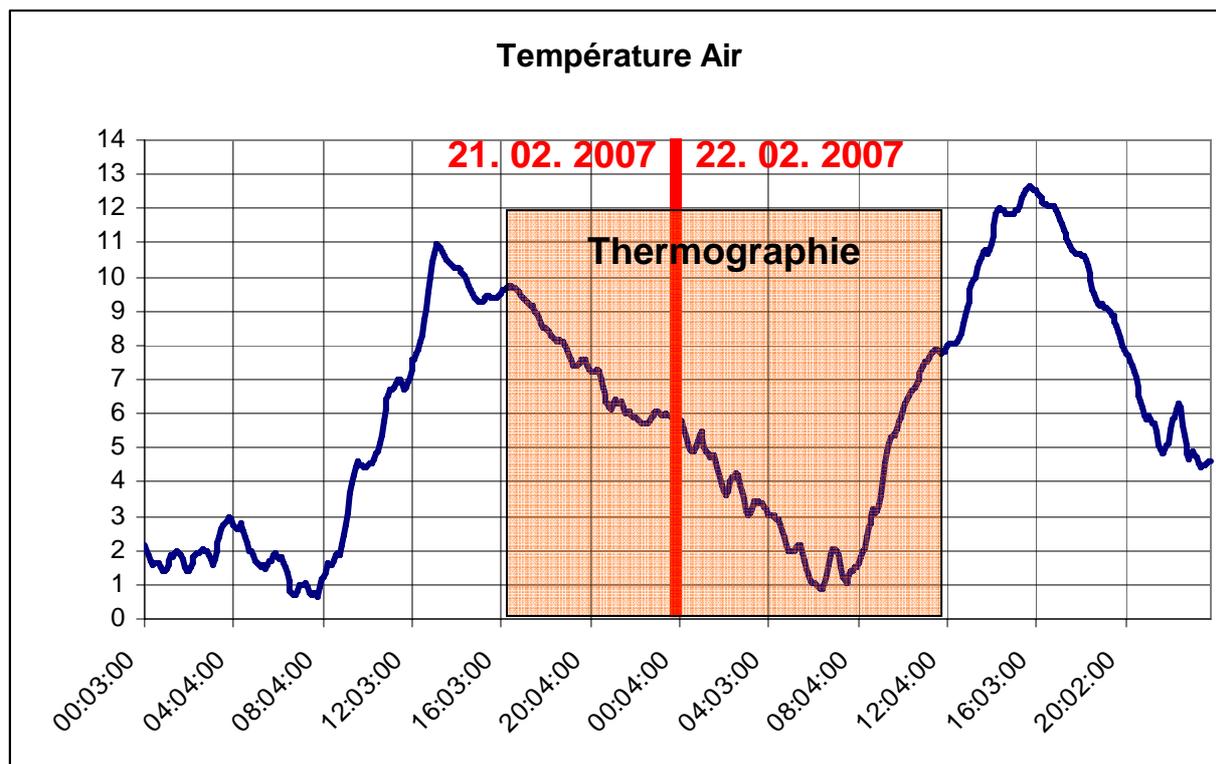


Figure 6: Température de l'air mesurée sur la station météo Boschung

### Influence des capteurs incorporés dans le revêtement sur leur environnement

Les capteurs exercent une influence faible mais mesurable sur leur environnement. Les figures 7 et 8 montrent les capteurs BOSO et UT-1 avec leur environnement immédiat. Dans une zone de quelques centimètres autour de ces capteurs, la température est environ 0.5°C plus basse qu'à une distance plus grande des capteurs. Cet effet est probablement dû au fait que la surface des capteurs (laiton ou bitume) reflètent davantage la chaleur que le revêtement bitumineux drainant.

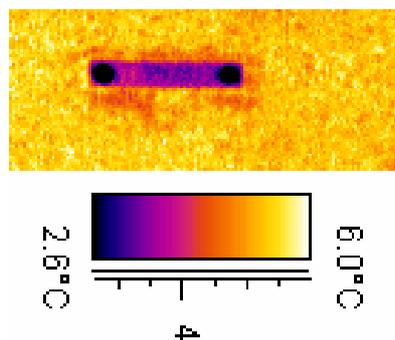


Figure 7: Zone du capteur Boso, 9:00 heures

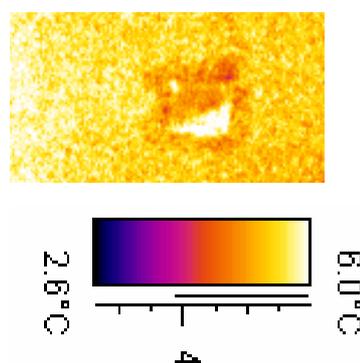


Figure 8: Zone du capteur UT-1 , 9:00 heures

### Calibration du facteur d'émission

Le facteur d'émission de la surface du revêtement a été déterminé par comparaison entre les données infrarouges et les sondes de températures présentes sur le pont. Ceci posait un problème dans la mesure où la thermographie infrarouge mesure le rayonnement de la surface du revêtement alors que les capteurs thermiques en place mesurent soit la température de l'air à proximité immédiate de la surface du revêtement (capteur BOSO) soit la température du revêtement à une profondeur d'environ 10 mm (capteur UT-1). La question qui se posait était de savoir lequel des deux types de capteurs utiliser pour l'étalonnage, en particulier parce qu'il existait des différences de température importante entre les deux (figure 9) et que la courbe des différences de température entre les deux types de capteurs n'est pas connue. Le capteur UT-2 dont les valeurs de mesure sont aussi reprises dans le tableau se trouve à une profondeur de 50 mm dans le revêtement du pont et n'a pas été utilisé pour la calibration.

Au cours des 21 et 22 février, les courbes de température des deux capteurs se croisent en tout quatre fois, deux fois pendant et immédiatement avant les mesures thermographiques. Au point A (tableau 2), on a enregistré des images thermographiques fixes au voisinage des capteurs avant que les critères de température ne soient remplis, les points B et C ont été couverts lors des mesures horaires

La comparaison entre les données thermographiques et les données fournies par les capteurs, nous a permis de déterminer un facteur d'émission de 0.95 qui a été utilisé pour toutes les évaluations.

Tableau 2: Comparaison des températures

Désignation	Date, heure	air	BOSO	UT-1	UT-2
A	21.02.2007 15:30	9.5	12.8	13.1	11.8
B	21.02.2007 16:03	9.5	12.4	12.8	11.6
C	22.02.2007 08:58	3	4.3	4.4	3.5

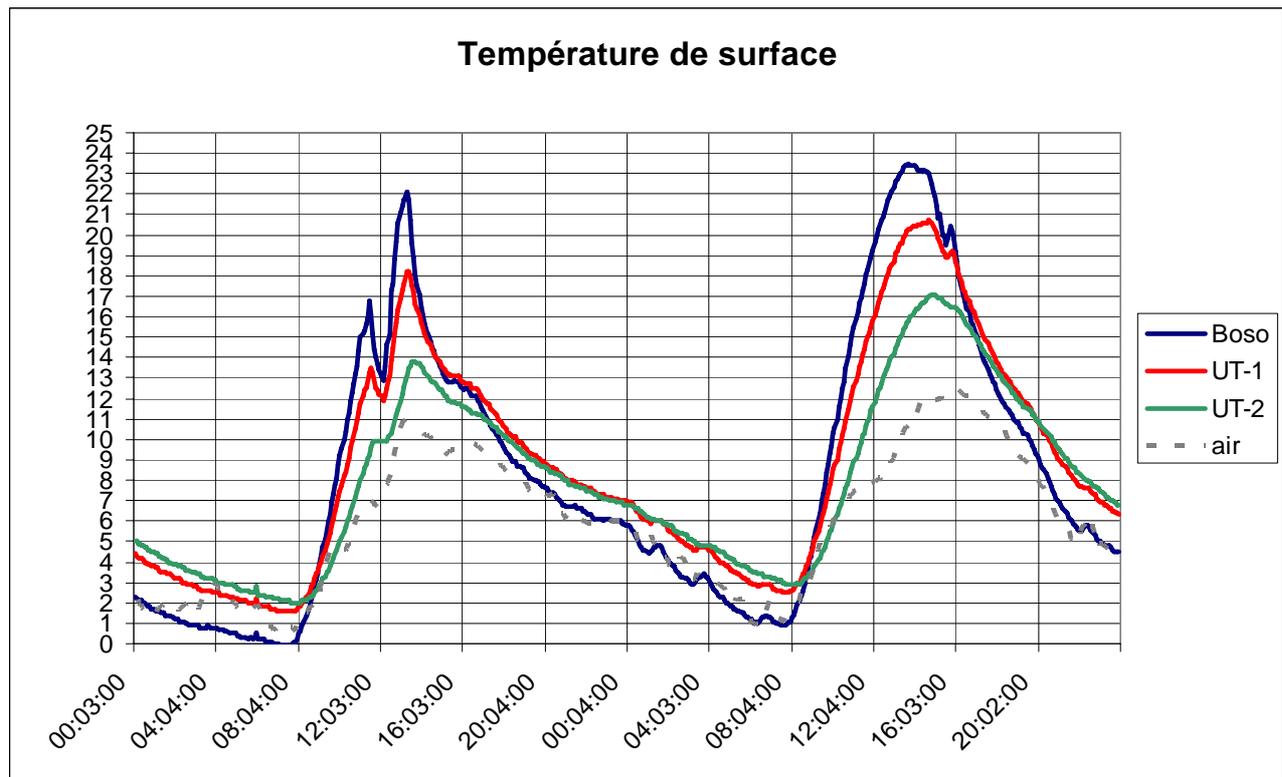


Figure 9: Température superficielle

### Plans des températures

Les plans de température sont représentés en *Figure 10* avec un rythme de deux heures. On reconnaît bien la chute de température entre 16.00 et 08.00 heures et la remontée de température qui suit. Suivant la période du jour, différentes structures sont plus ou moins visibles. La figure 11 reproduit un détail de la zone du joint de chaussée côté Yverdon du plan de 16 heures. A ce moment aussi bien le joint de chaussée que le marquage latéral (flèche B) sont nettement visibles.

Dans le plan de température 04.00 heures les images thermographiques des deux lignes de mesure ne se recouvrent pas de sorte qu'il reste un espace entre elles (flèche A) pour lequel il n'y a pas de données de température. A cette heure, on distingue aussi les capteurs montés sur le pont (flèche B)

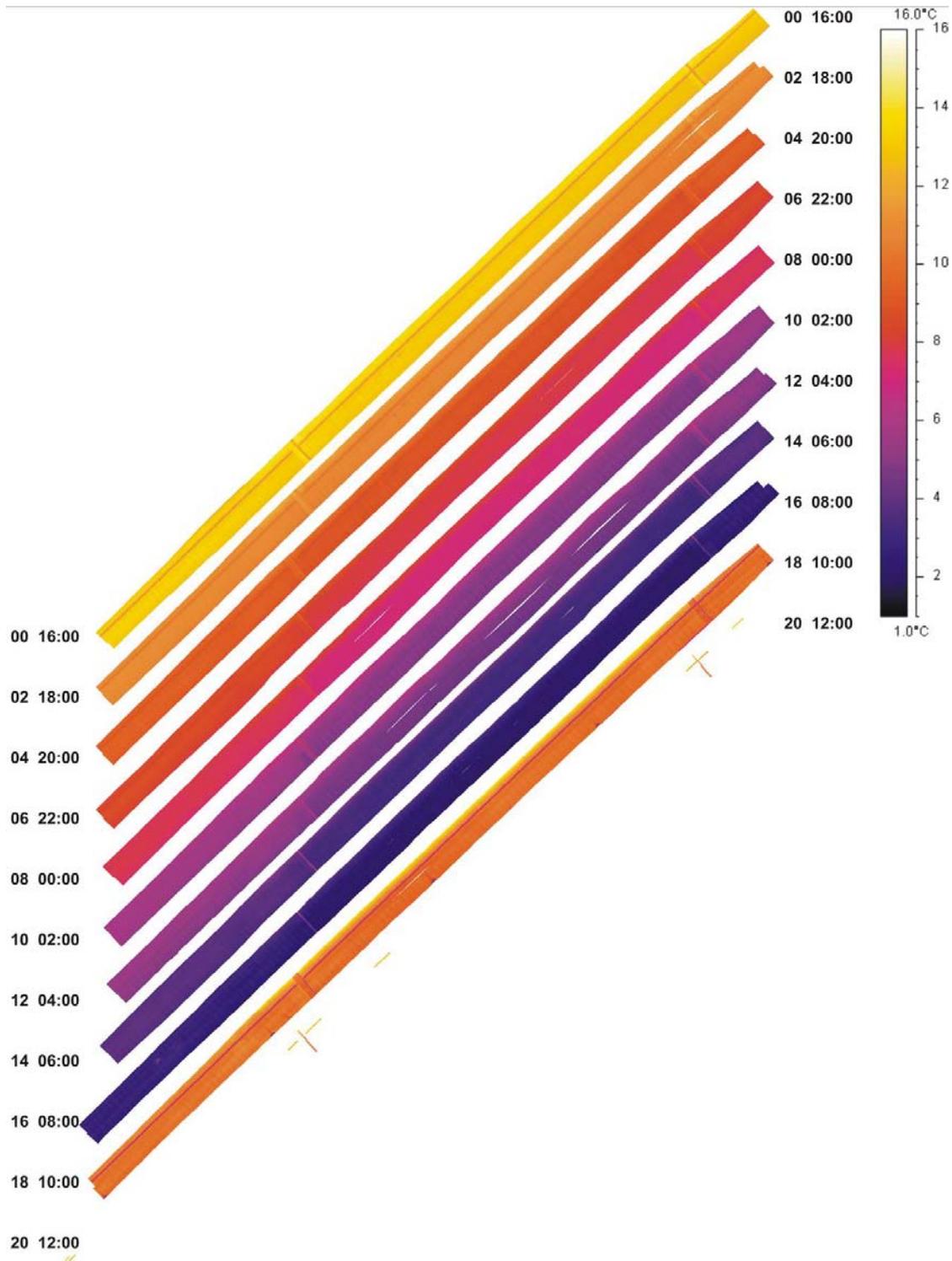


Figure 10: Plans de température à un rythme de 2 heures avec échelle de température

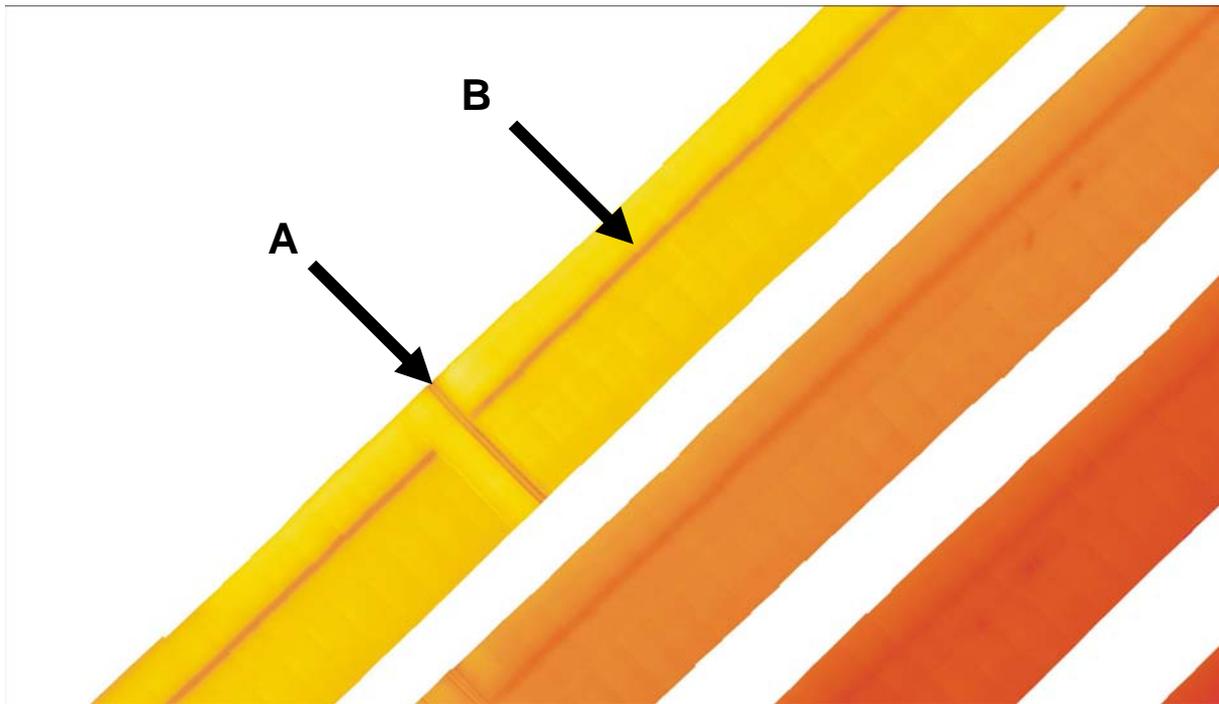


Figure 11: Détail du plan de température 16.00 heures, zone du joint de chaussée, côté Yverdon

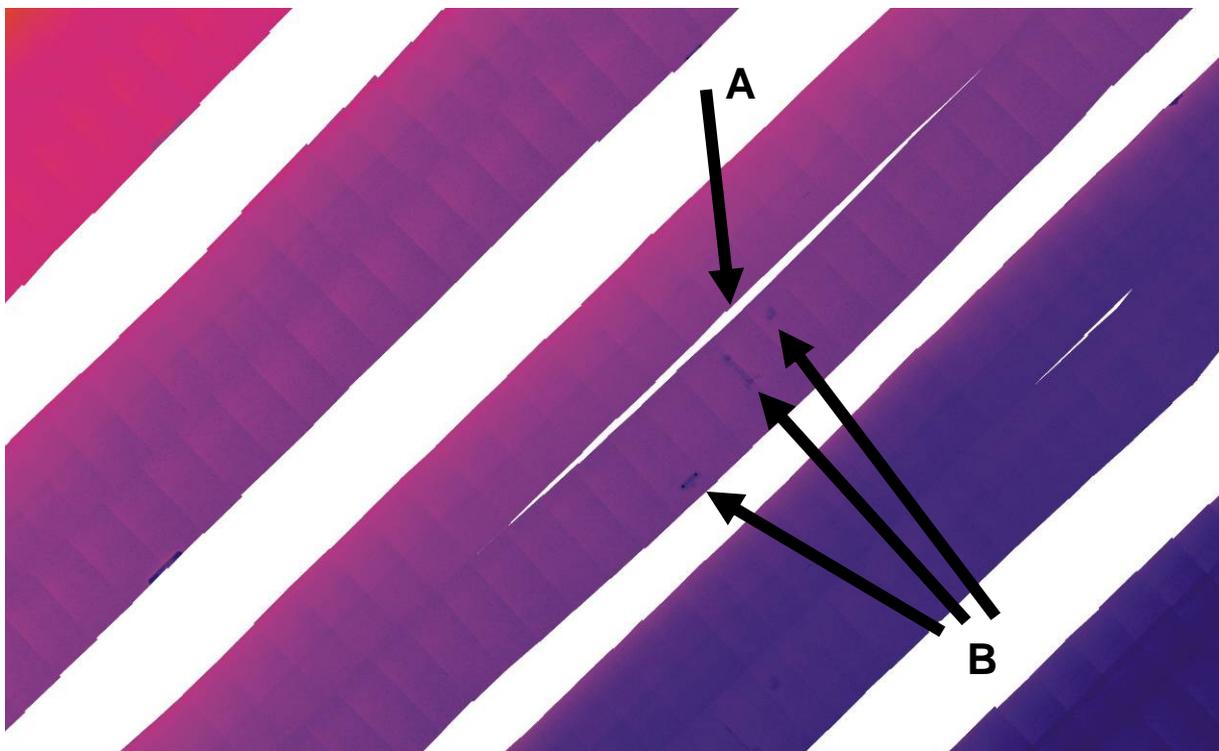


Figure 12: Détail du plan de température 04.00 heures

### Représentativité des sondes de température stationnaires

Sur la figure 10, on reconnaît déjà à vue d'oeil que la température du revêtement est dans une large mesure homogène et cela aussi bien sur le pont que sur la portion de route voisine et qu'ainsi les températures en différents points du pont sont très semblables. Quelques particularités seront discutées plus bas. La figure 13 donne la courbe de la température superficielle du revêtement sur la totalité de la longueur mesurée du trajet de mesure 04.00 heures. Dans la zone des deux joints de chaussée (marquées en bleu) les indications de température ne sont pas correctes car on n'a pas tenu compte du facteur d'émission différent à ces endroits. Ces zones ont été exclues dans les calculs des valeurs minimales, moyennes et maximales. Les valeurs minimales maximales et moyennes sur la route et le pont sont données dans le tableau 3. Sur le pont l'étendue des différences de température n'atteint que 0.27°C et sur la route 0.47°C. L'endroit exact où l'on mesure est ainsi sans importance et les températures mesurées par les sondes sont représentatives de la route et du pont. Lors de la mesure 17.00 heures l'étendue des différences de température n'atteint que 0.29°C, respectivement 0.2°C, ce qui confirme la conclusion ci-dessus.

*Tableau 3: Températures superficielles du revêtement, voie de dépassement, 04:00 heures*

	<b>Route</b>	<b>Pont</b>
Min, degrés C	4.71	4.34
Max degrés C	5.18	4.61
Moyenne degrés C	4.96	4.48

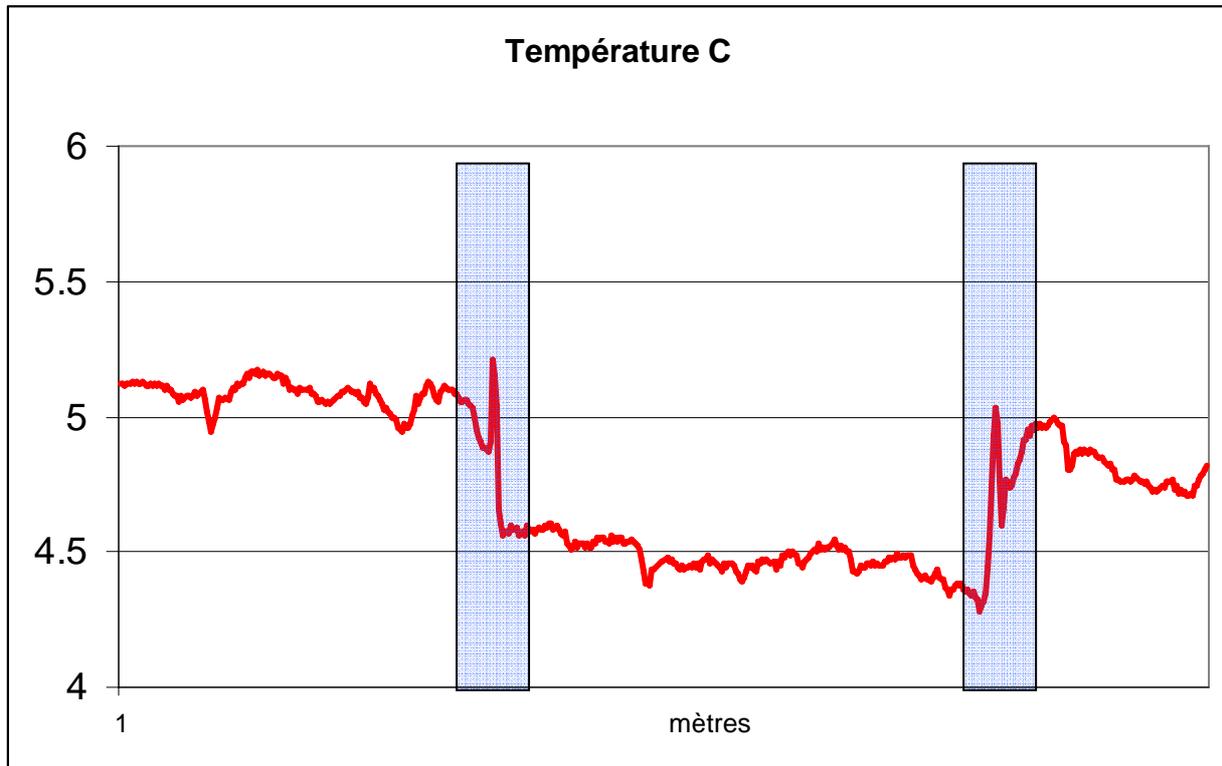


Figure 13: Courbe de température en direction longitudinale; voie de dépassement centrale 04:00 heures

Tableau 4: Températures superficielles du revêtement, voie de dépassement, 17:00 heures

	Route	Pont
Min, degrés C	12.07	11.92
Max degrés C	12.27	12.21
Moyenne degrés C	12.16	12.04

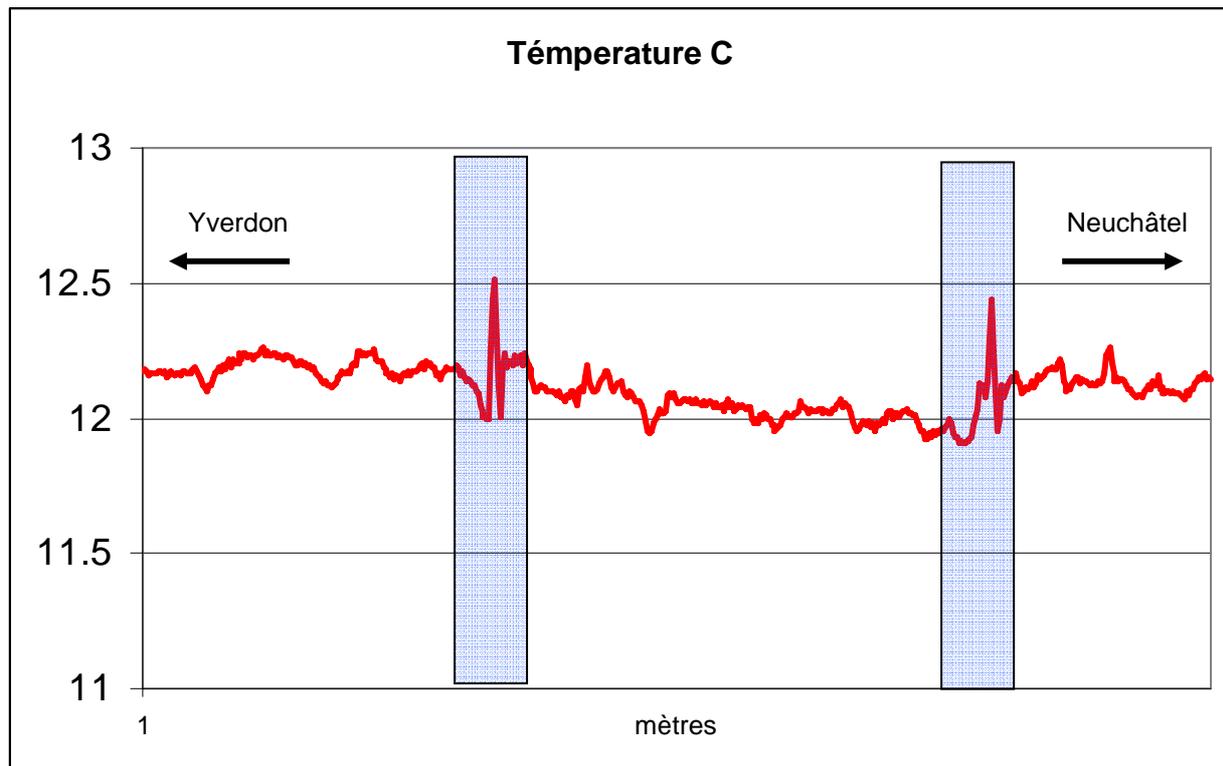


Figure 14: Courbe de température en direction longitudinale; voie de dépassement, 017:00 heures

### Particularités

Comme déjà mentionné plus haut la température superficielle du revêtement est en majeure partie homogène. Dans les données de mesure on ne trouve que quelques rares endroits où il existe des différences significatives. Deux endroits humides visibles à l'examen visuel sont aussi discernables sur les plans de température de 16.00 heures et de 18.00 heures. Les détails correspondants de ces plans sont reproduits sur les figures 15 et 16. Sur tous les autres plans de température, ces deux endroits disparaissent, mais ils peuvent toutefois être rendus en partie à nouveau visibles en adaptant l'échelle de couleur.

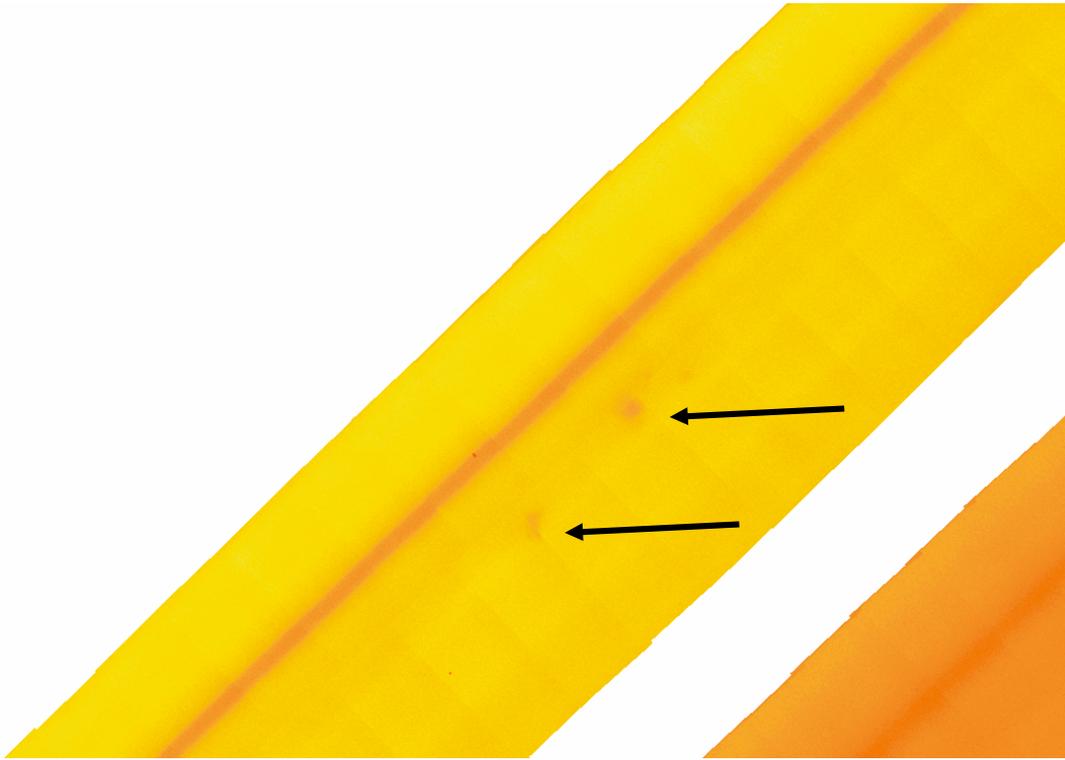


Figure 15: Détail du plan de température 16 heures, endroits humides (flèches)

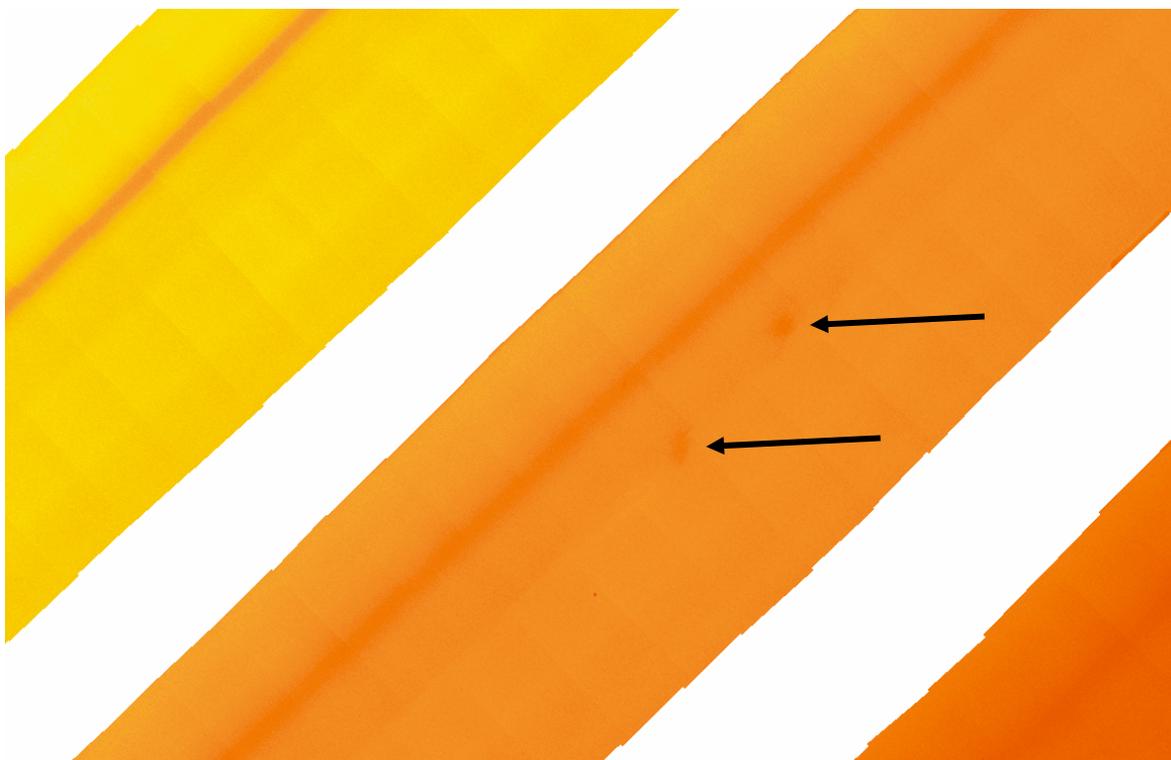


Figure 16: Détail du plan de température 18.00 heures, endroits humides (flèches)

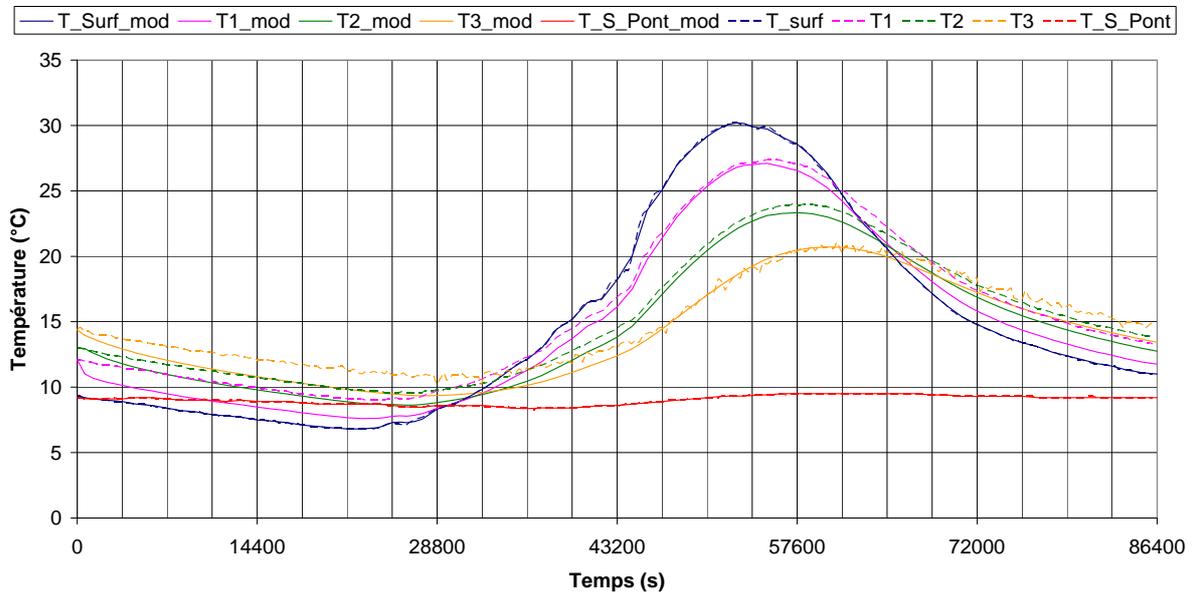
## 1.6 Conclusions

- Les sondes de mesure stationnaires n'exercent qu'une faible influence sur la température du revêtement dans leur voisinage immédiat. Lors de la campagne de mesure thermographique, cette influence n'atteignait au maximum que 0.5 degrés C.
- La température superficielle du revêtement est dans une large mesure homogène aussi bien sur le pont qu'à distance de ce dernier. En particulier, on ne discerne aucune influence des éléments de construction tels que par exemple les poutres longitudinales. Ainsi les températures mesurées par les sondes stationnaires sont représentatives.
- Les endroits humides visibles à l'oeil nu se distinguent en partie sur les plans de température. Cet effet pourrait éventuellement s'utiliser dans l'avenir pour évaluer la capacité de drainage des revêtements bitumineux drainants. Ce point demanderait des éclaircissements supplémentaires.

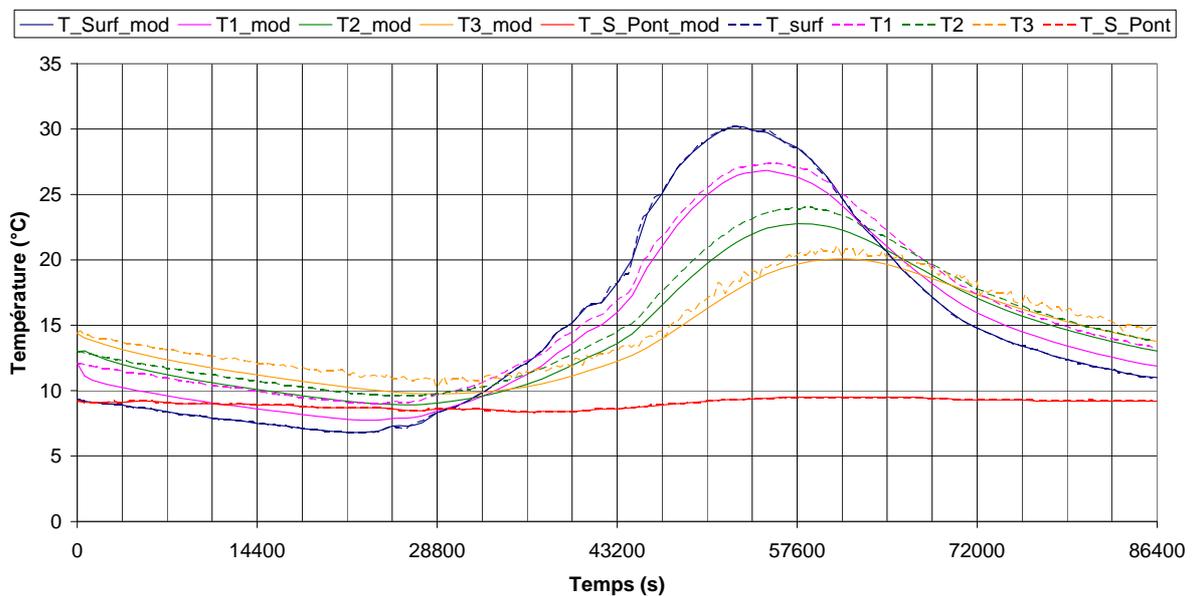
## 9.4 RESULTATS DE LA SIMULATION

### 9.4.1 Résultat de la simulation avec la conduction seule

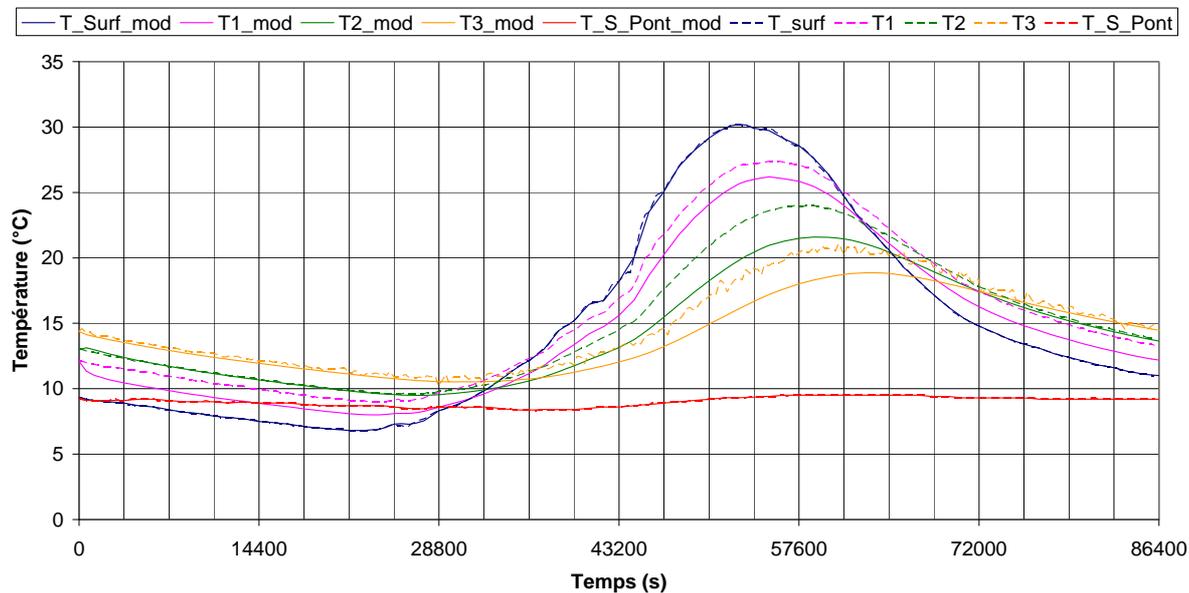
CAS N° 32



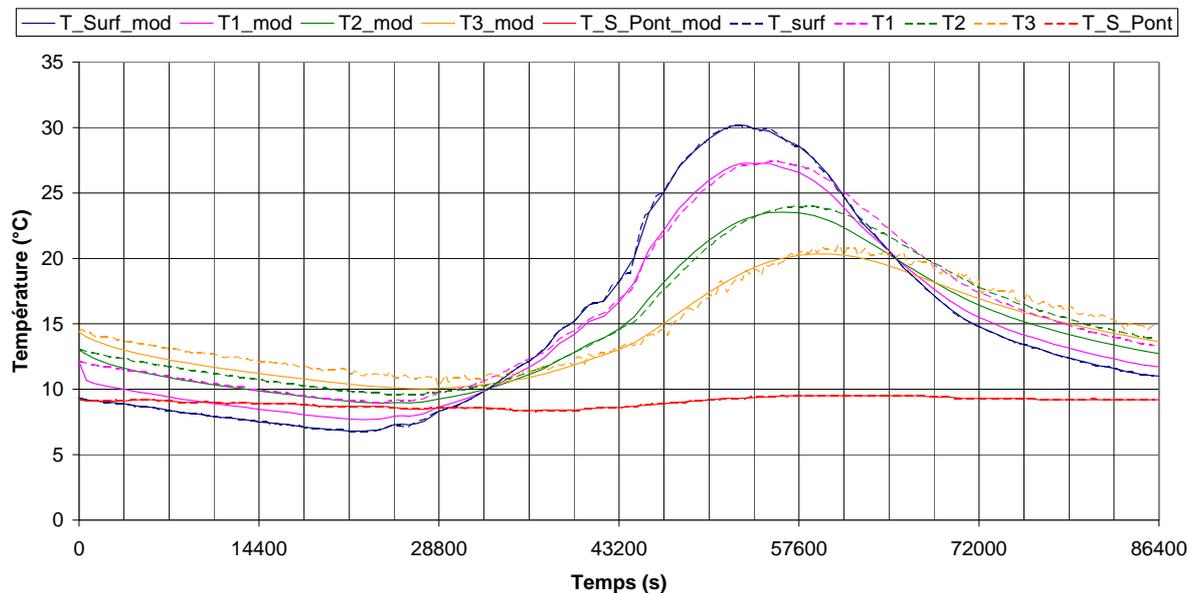
CAS N° 33



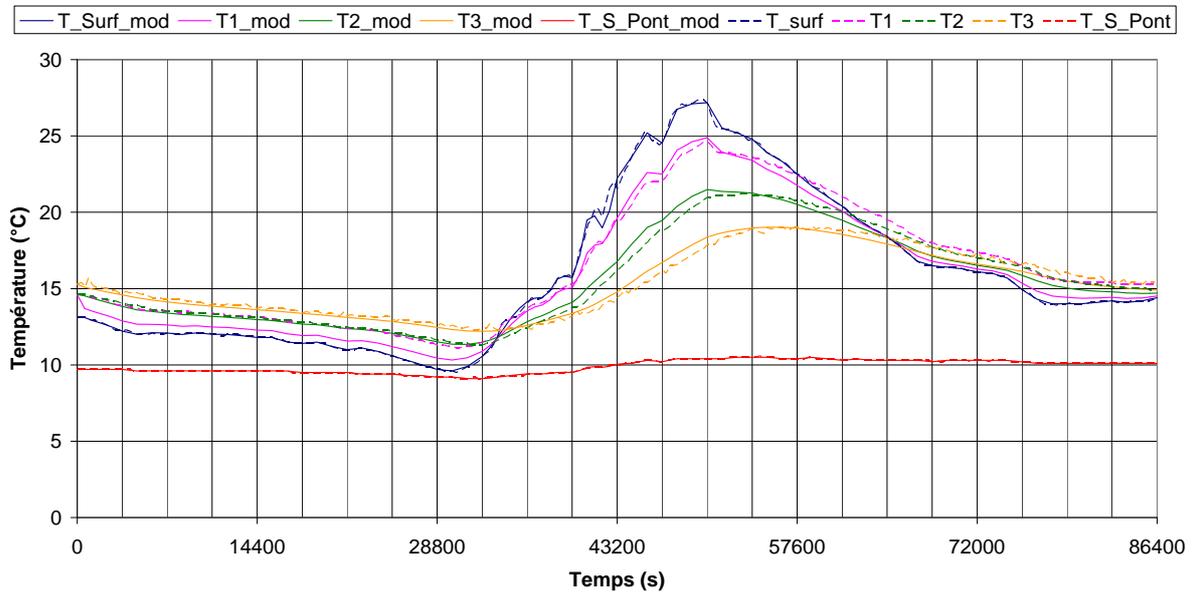
CAS N° 34



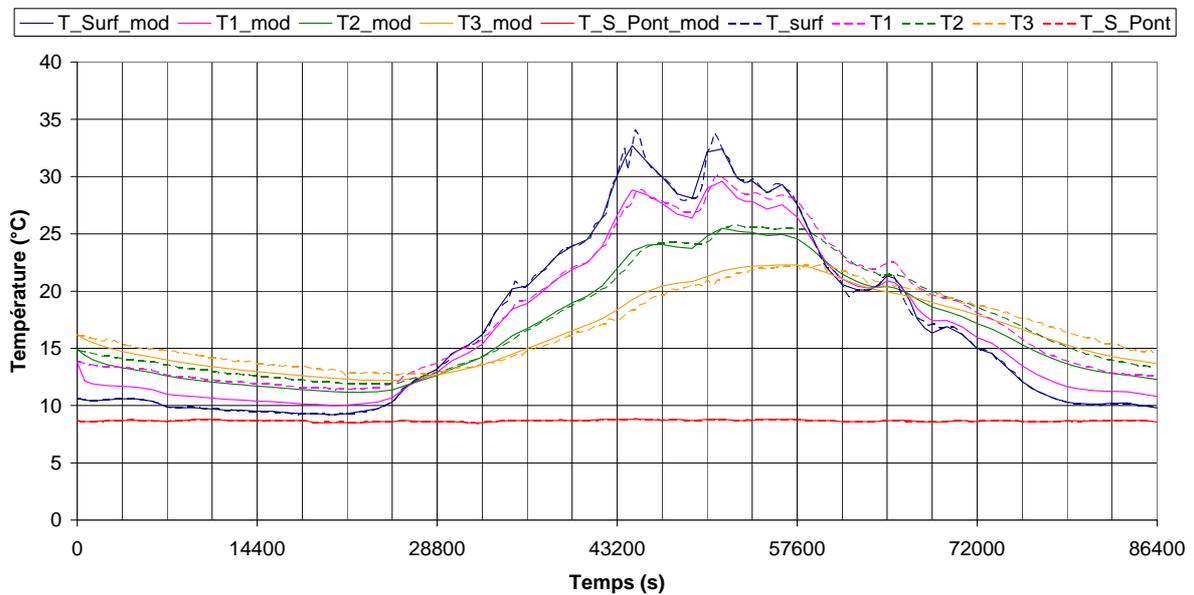
CAS N° 35



CAS N° 36

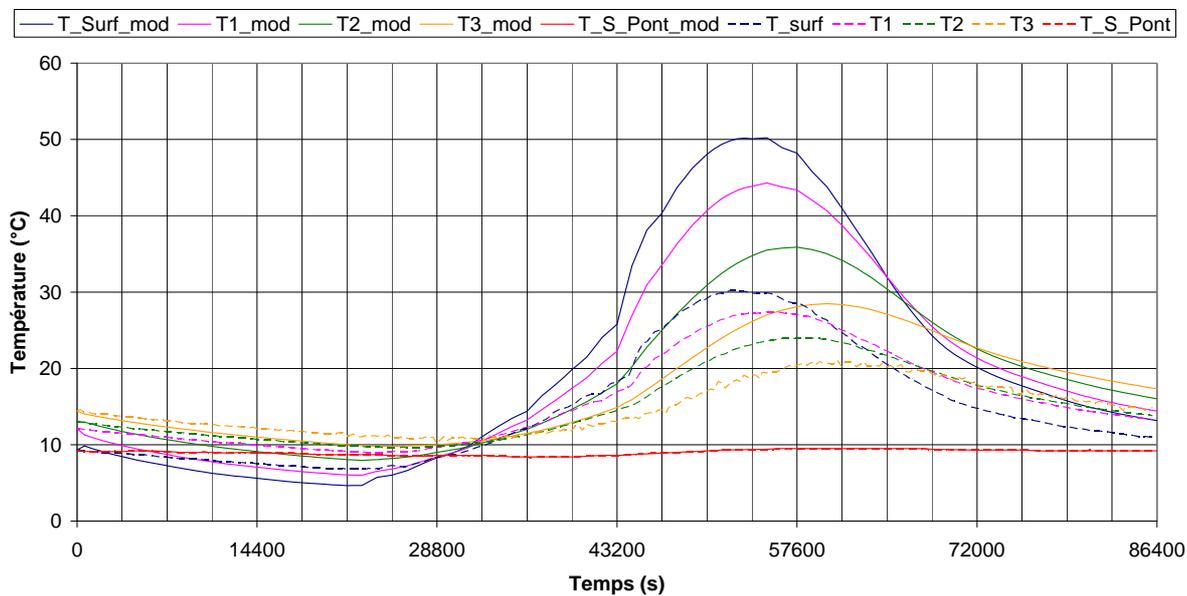


CAS N° 37



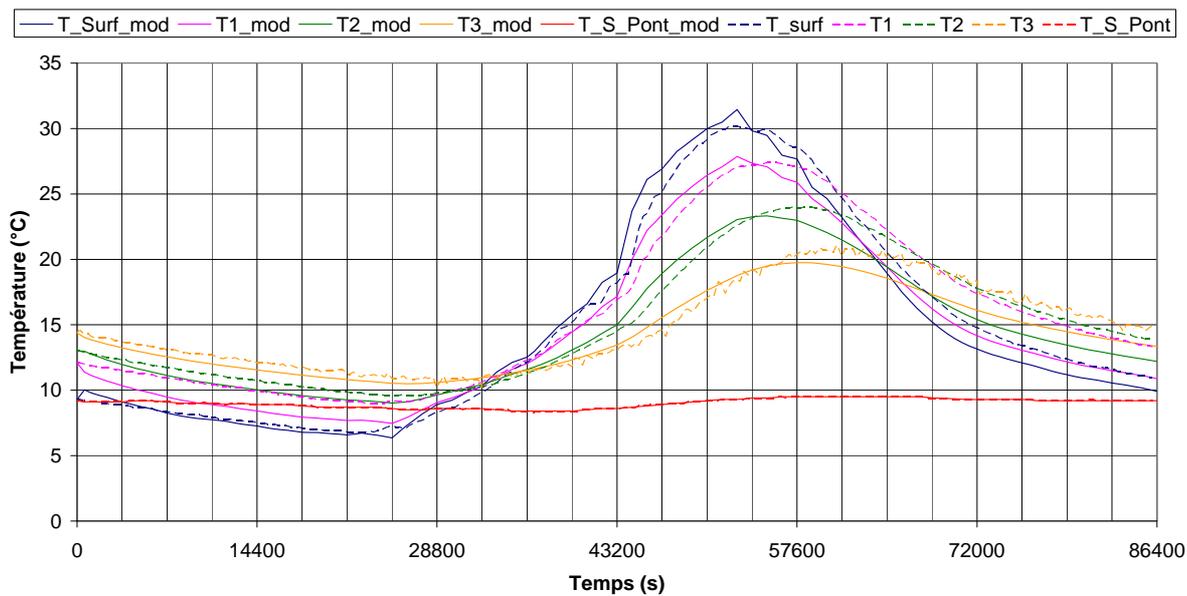
### 9.4.2 Résultat de la simulation avec conduction + rayonnement

CAS N° 38

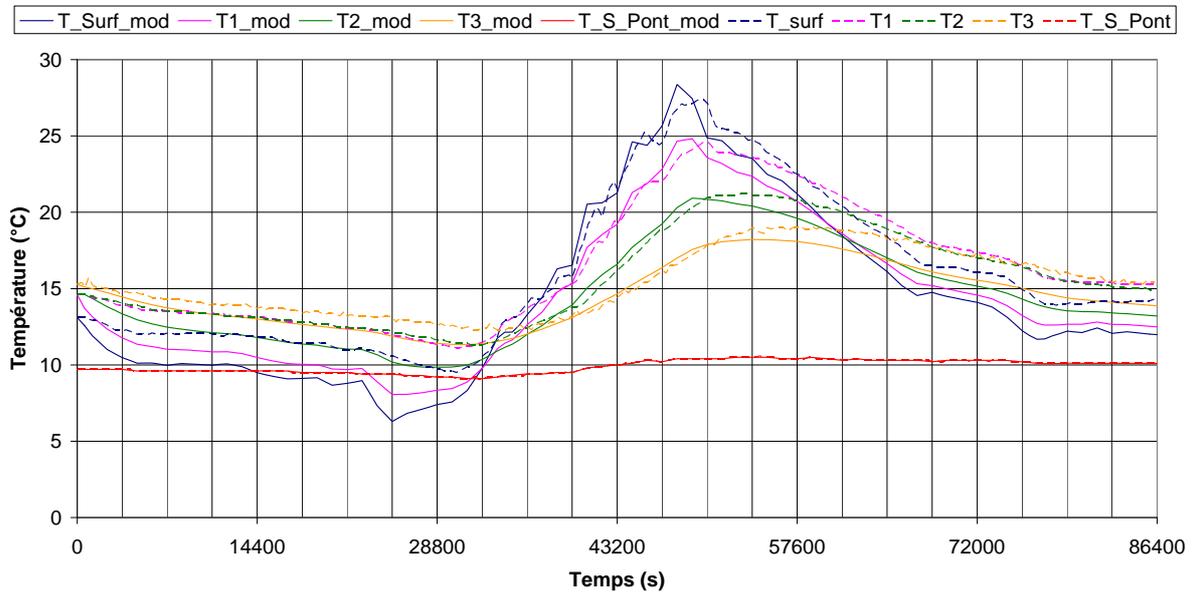


### 9.4.3 Résultat de la simulation avec conduction + rayonnement + convection

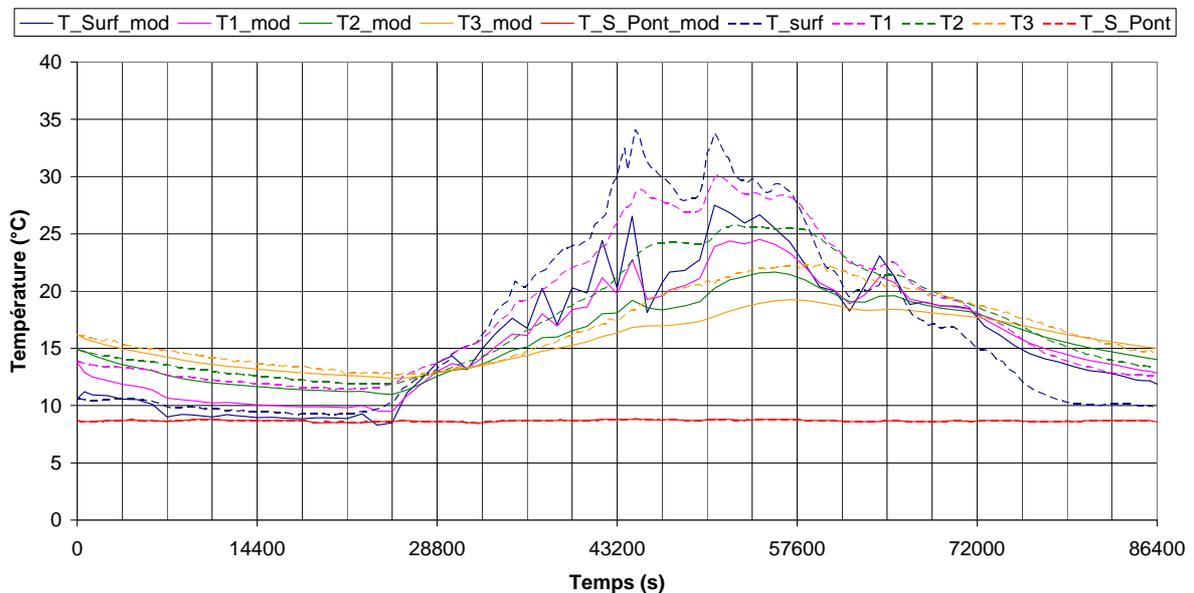
CAS N° 39



CAS N° 40

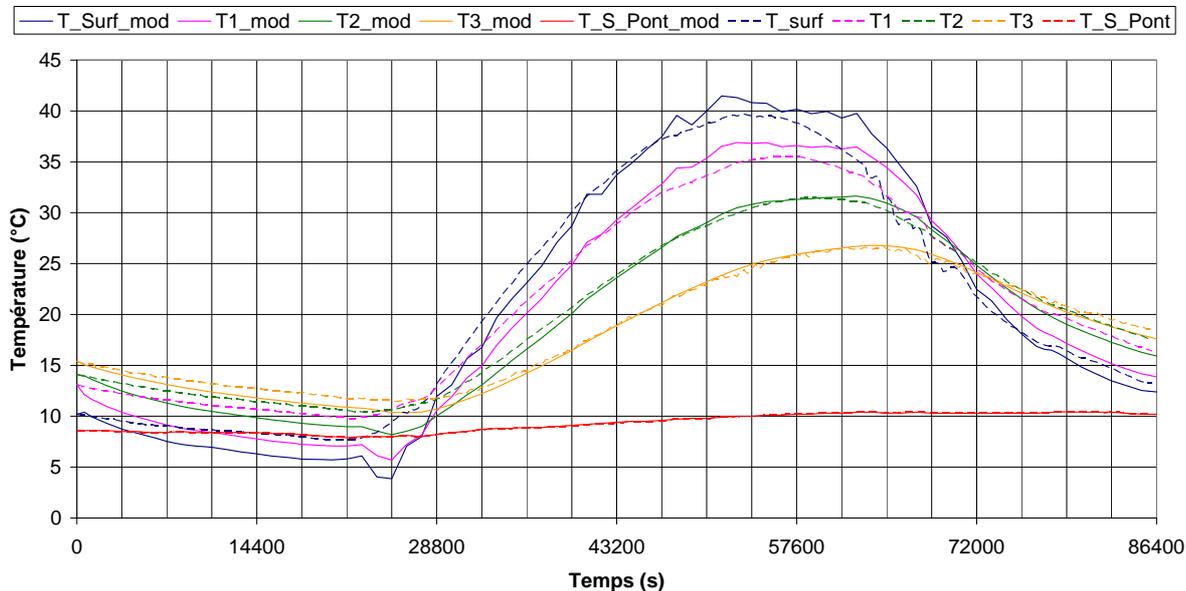


CAS N° 41



9.4.4 Résultat de la simulation avec conduction + rayonnement + convection avec vent fort

CAS N° 42



CAS N° 43

