

ETAT DU VALAIS

DTEE – SRCE

Section routes nationales Valais romand

Données thermo-physiques des revêtements

Autoroute du Rhône A9 à Ardon

Rapport d'étude

Margarita Rodriguez, ing. civile dipl. EPF

Patrick Rychen, ing. civil dipl. EPF

Décembre 2008

Mandat N° 3080

Laboratoire des voies de circulation



TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	1
1.1	GÉNÉRALITÉS.....	1
1.2	OBJECTIFS DU PROJET	1
1.3	PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE ET HISTOIRE DU REVÊTEMENT	1
1.4	DÉMARCHE.....	2
2	INSTRUMENTATION	3
3	ACQUISITION, VÉRIFICATION ET MISE EN FORME DES DONNÉES	3
4	ANALYSE GÉNÉRALE DES DONNÉES	3
4.1	ANALYSE GÉNÉRALES DES DONNÉES.....	3
4.2	ANALYSE GÉNÉRALES DES DONNÉES HIVERNALES.....	5
4.3	DÉFINITION DES HIVERS REPRÉSENTATIFS	7
4.4	ANALYSE GÉNÉRALE DES DONNÉES PROVENANT DES HIVERS REPRÉSENTATIFS	8
5	ANALYSE DES PÉRIODES TYPES	10
5.1	DÉFINITION DES PÉRIODES TYPES.....	10
5.1.1	Période de froid extrême	11
5.1.2	Période de froid prolongé	11
5.1.3	Période de variation rapide de la température.....	11
5.2	APERÇU GÉNÉRAL DES PÉRIODES TYPES	11
5.3	ANALYSE DES PÉRIODES DE FROID EXTRÊME.....	12
5.3.1	Exemple n° 01.....	13
5.3.2	Exemple n° 02.....	14
5.3.3	Exemple n° 03.....	16
5.3.4	Exemple n° 04.....	18
5.3.5	Remarques.....	20
5.4	ANALYSE DES PÉRIODES DE FROID PROLONGÉ	20
5.4.1	Exemple n° 01.....	22
5.4.2	Exemple n° 02.....	23
5.4.3	Exemple n° 03.....	25
5.4.4	Exemple n° 04.....	27
5.4.5	Remarques.....	29
5.5	ANALYSE DES PÉRIODES DE VARIATION RAPIDE DE LA TEMPÉRATURE	29
5.5.1	Exemple n° 01.....	30
5.5.2	Exemple n° 02.....	32
5.5.3	Exemple n° 03.....	34
5.5.4	Exemple n° 04.....	36
5.5.5	Remarques.....	38
6	RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION	38
7	BIBLIOGRAPHIE	41

8	ANNEXES	42
8.1	GRAPHES DES HIVERS 1992-2007	42
8.1.1	Hiver 1992/1993	42
8.1.2	Hiver 1993/1994	45
8.1.3	Hiver 1994/1995	48
8.1.4	Hiver 1995/1996	51
8.1.5	Hiver 1996/1997	54
8.1.6	Hiver 1997/1998	57
8.1.7	Hiver 1998/1999	60
8.1.8	Hiver 1999/2000	63
8.1.9	Hiver 2000/2001	66
8.1.10	Hiver 2001/2002	69
8.1.11	Hiver 2002/2003	72
8.1.12	Hiver 2003/2004	75
8.1.13	Hiver 2004/2005	77
8.1.14	Hiver 2005/2006	80
8.1.15	Hiver 2006/2007	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation du périmètre d'étude.	2
Figure 2: Evolution de la température de l'air entre 1992 et 2007.	4
Figure 3: Evolution du rayonnement entre 1992 et 2007.	4
Figure 4: Evolution de la température de surface entre 1992 et 2007.	5
Figure 5: Températures de l'air et de surface inférieures à 0°C entre 1992 et 2007.	6
Figure 6: Températures de l'air et de surface inférieures à 0°C pour les hivers représentatifs.	8
Figure 7: Rapport entre les heures avec des températures de l'air et de surface inférieures à 0°C pour les hivers représentatifs.	9
Figure 8: Températures moyennes de l'air, de la surface et du sol pour les hivers représentatifs – 1.	9
Figure 9: Températures moyennes de l'air, de la surface et du sol pour les hivers représentatifs – 2.	10
Figure 10: Comparaison entre le nombre total de périodes types.	12
Figure 11: Période de froid extrême – Exemple n° 01.	13
Figure 12: Période de froid extrême – Exemple n° 01 – Températures du sol.	14
Figure 13: Période de froid extrême – Exemple n° 02.	15
Figure 14: Période de froid extrême – Exemple n° 02 – Températures du sol.	16
Figure 15: Période de froid extrême – Exemple n° 03.	17
Figure 16: Période de froid extrême – Exemple n° 03 – Températures du sol.	18
Figure 17: Période de froid extrême – Exemple n° 04.	19
Figure 18: Période de froid extrême – Exemple n° 04 – Températures du sol.	20
Figure 19: Période de froid prolongé – Exemple n° 01.	22
Figure 20: Période de froid prolongé – Exemple n° 01 – Températures du sol.	23
Figure 21: Période de froid prolongé – Exemple n° 02.	24
Figure 22: Période de froid prolongé – Exemple n° 02 – Températures du sol.	25
Figure 23: Période de froid prolongé – Exemple n° 03.	26
Figure 24: Période de froid prolongé – Exemple n° 03 – Températures du sol.	27
Figure 25: Période de froid prolongé – Exemple n° 04.	28
Figure 26: Période de froid prolongé – Exemple n° 04 – Températures du sol.	29
Figure 27: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 01.	31
Figure 28: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 01 – Températures du sol.	32
Figure 29: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 02.	33
Figure 30: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 02 – Températures du sol.	34
Figure 31: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 03.	35
Figure 32: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 03 – Températures du sol.	36
Figure 33: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 04.	37
Figure 34: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 04 – Températures du sol.	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des hivers de 1992 à 2007.	6
Tableau 2: Aperçu des hivers de 1992 à 2007.	7
Tableau 3: Définition des périodes types.	11
Tableau 4: Exemples de périodes de froid extrême.	13
Tableau 5: Exemples de périodes de froid prolongé.	21
Tableau 6: Exemples de périodes de variation rapide de la température.	30

1 INTRODUCTION

1.1 GÉNÉRALITÉS

La viabilité hivernale du réseau routier en Suisse est une préoccupation majeure des gestionnaires et est aujourd'hui rendue difficile par l'augmentation constante du trafic et la diversité des revêtements rencontrés. Il est ainsi nécessaire de développer des stratégies d'intervention différenciées pour le service hivernal.

Les enrobés drainants sont très appréciés comme couche de roulement en conditions sèches ou mouillées. Par contre, leurs caractéristiques thermo-physiques semblent nécessiter de repenser le processus d'intervention pour les opérations de viabilité hivernale (voir à ce sujet la journée technique 2005 du LAVOC). Du fait de sa forte porosité, l'enrobé drainant se caractérise par une faible conductivité thermique et une sensibilité accrue aux transferts par convection. Il apparaît nécessaire de mieux maîtriser ce comportement afin d'adapter le mode opératoire lors d'événements hivernaux particuliers (gel, neige,...). Le LAVOC a entrepris une réflexion approfondie sur le sujet, notamment au travers de divers mandats sur l'étude de l'opportunité d'utiliser des stations automatiques de déverglçage sur ouvrages d'art.

Depuis 2002, le revêtement traditionnel aux abords du pont sur la Lizerne (Autoroute A9 à Ardon) a été remplacé par de l'enrobé drainant, ce qui permet de procéder à la comparaison des situations "avant" et "après" vis-à-vis du comportement thermo-physique entre un enrobé traditionnel (AC) et un enrobé drainant (PA) sur la partie hors pont. Les données récoltées ont été intégrées dans la phase de modélisation de la recherche AGB 2004/002 "Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales" afin de pouvoir mettre en parallèle les résultats du canton du Valais vers Ardon (Autoroute A9, pont sur la Lizerne) avec ceux obtenus dans le canton de Vaud vers Champagne (Autoroute A5, pont sur l'Arnon).

Le LAVOC a récolté les données thermo-physiques sur l'autoroute A9 à Ardon pour 2005-2007 en collaboration avec la société privée Etrelec en charge des mesures depuis 15 ans. Ces données météorologiques et les mesures des paramètres d'état de la chaussée ont avantageusement été analysées sur cette longue période.

Les mesures réalisées ont été traitées en complément au mandat de recherche "Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales" qu'a mené le LAVOC pour l'Office fédéral des routes (OFROU). L'ensemble a été analysé comparativement à une autre station de mesures installée sur l'A5 au niveau de la chaussée, à la fois sur le pont de l'Arnon et sur la partie hors pont.

1.2 OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif du projet est de :

- rassembler les mesures météo et thermiques réalisées depuis 15 ans sur le site d'Ardon (A9)
- analyser ces données sur l'ensemble de la période afin d'identifier quelques événements majeurs (froid extrême, de froid prolongé, de variations rapides des températures) pour une analyse plus détaillée,
- utiliser ces données pour compléter et renforcer les analyses menées dans le cadre du mandat "Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales" concernant le site de l'Arnon sur l'autoroute A5 [1].

1.3 PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE ET HISTOIRE DU REVÊTEMENT

Le périmètre d'étude (Figure 1) se situe sur l'autoroute du Rhône A9 entre St. Maurice et Brigue au droit de la section 3 (Riddes – Sion). La station de mesures des sollicitations climatiques se trouve à environ 20 mètres avant le pont sur La Lizerne à proximité d'Ardon.

En 2002, le revêtement traditionnel (AC) a été remplacé par un revêtement drainant (PA) de 4cm d'épaisseur.



Figure 1: Situation du périmètre d'étude.

1.4 DÉMARCHE

Les données météorologiques et de températures sont relevées à une vingtaine de mètres avant le pont sur la Lizerne (VS) depuis 1989. Ces mesures très utiles pour l'expérience menée sur ce tronçon de comparaison de bitumes modifiés se sont poursuivies. Les capteurs donnent depuis cette date des données très complètes et la société privée Etrelec a toujours été mandatée pour procéder à l'acquisition et la fourniture de ces données.

Comme pour le site de l'Arnon (VD), le LAVOC a fait un bilan des mesures thermo-physiques relevées sur le site d'Ardon (VS), et identifié des événements climatiques extrêmes. Le programme prévu s'est déroulé selon les étapes suivantes:

Etape 1: Acquisition des données

Reprise des acquisitions et mise à disposition des données par la société Etrelec mandatée jusqu'à ce jour.

Etape 2: Analyse des données

Mise en forme, analyse des données et identification de quelques événements majeurs pour une analyse plus détaillée. On identifiera des périodes de froid extrême, de froid prolongé, et les variations rapides des températures.

Etape 3: Modélisation

Introduction des caractéristiques spécifiques du site dans le modèle thermo-physique du projet AGB 2004/002 "Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales". Application sur les périodes retenues à l'étape 2. Analyse comparative de ces situations en particulier vis-à-vis du type de revêtement.

Etape 4: Recommandations

Une évaluation des particularités de l'enrobé drainant par rapport à un revêtement classique fermé a permis d'élaborer des recommandations incluses dans le rapport AGB 2004/002.

2 INSTRUMENTATION

L'instrumentation mise en place sur la station de mesure possède un appareillage pour la mesure du rayonnement solaire du ciel et du sol ainsi que du rayonnement infrarouge du ciel et du sol. Elle récolte également la température de l'air, l'humidité relative et la température de la chaussée mesurée à plusieurs niveaux, à savoir -5, -10, -20, -30, -35 cm.

Les mesures existent depuis le 1^{er} octobre 1992 jusqu'au 22 avril 2007. Elles ont été interrompues suite au changement de revêtement entre le 6 juillet 2003 et le 10 février 2005. Depuis 2 décembre 2006, les mesures sont enregistrées toutes les 10 minutes.

3 ACQUISITION, VÉRIFICATION ET MISE EN FORME DES DONNÉES

La société Etrelec/MADD Technologies a fourni les données brutes au LAVOC qui s'est chargé de mettre en forme la totalité des données récoltées puis de focaliser l'observation sur les périodes hivernales de chaque année. La période hivernale considérée se situe entre le 1^{er} octobre d'une année et le 30 avril de l'année suivante. Les graphes relevant les paramètres mesurés durant chaque période hivernale de 1992 à 2007 sont répertoriés en annexe (chapitre 8.1). On y trouve les données suivantes:

- température de l'air
- température de surface à -5 cm
- température de chaussée aux différentes profondeurs (-10, -20, -30, -35 cm)
- l'humidité relative
- le rayonnement

Les données avant 1992 n'ont pas pu être analysées du fait qu'elles se présentent sous un format non pris en compte.

4 ANALYSE GÉNÉRALE DES DONNÉES

Une brève analyse générale des données sur toute la période de mesure entre 1992 et 2007 a été réalisée. Tout d'abord les conditions météorologiques générales ont été analysées, puis une attention particulière a été portée sur les hivers représentatifs. Ces derniers ont été utilisés par la suite pour l'analyse des périodes types (chapitre 5).

4.1 ANALYSE GÉNÉRALES DES DONNÉES

Les données récoltées s'étendent sur une période totale de 16 ans (1992-2007) avec certains intervalles vides. Une analyse générale des conditions météorologiques a montré les cycles annuels qui se produisent, que ce soit au niveau de la température de l'air ou du rayonnement.

L'évolution de la température de l'air pendant la période de récolte des données a indiqué une stabilité évidente. En effet, la température moyenne est restée constante à environ 10°C sur toute la période (Figure 2). Le rayonnement est aussi resté très stable sur la période 1992-2007. La moyenne annuelle est à environ 130W/m² (Figure 3).

Température journalière moyenne de l'air 1992-2007

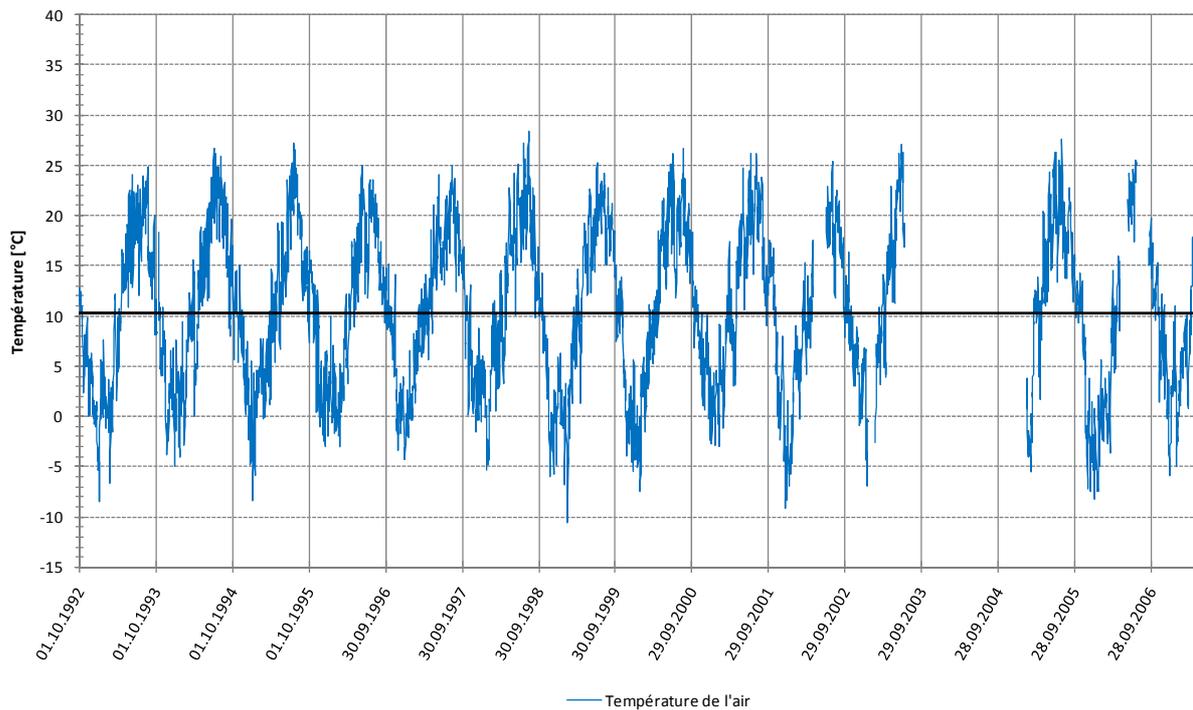


Figure 2: Evolution de la température de l'air entre 1992 et 2007.

Rayonnement moyen 1992-2007

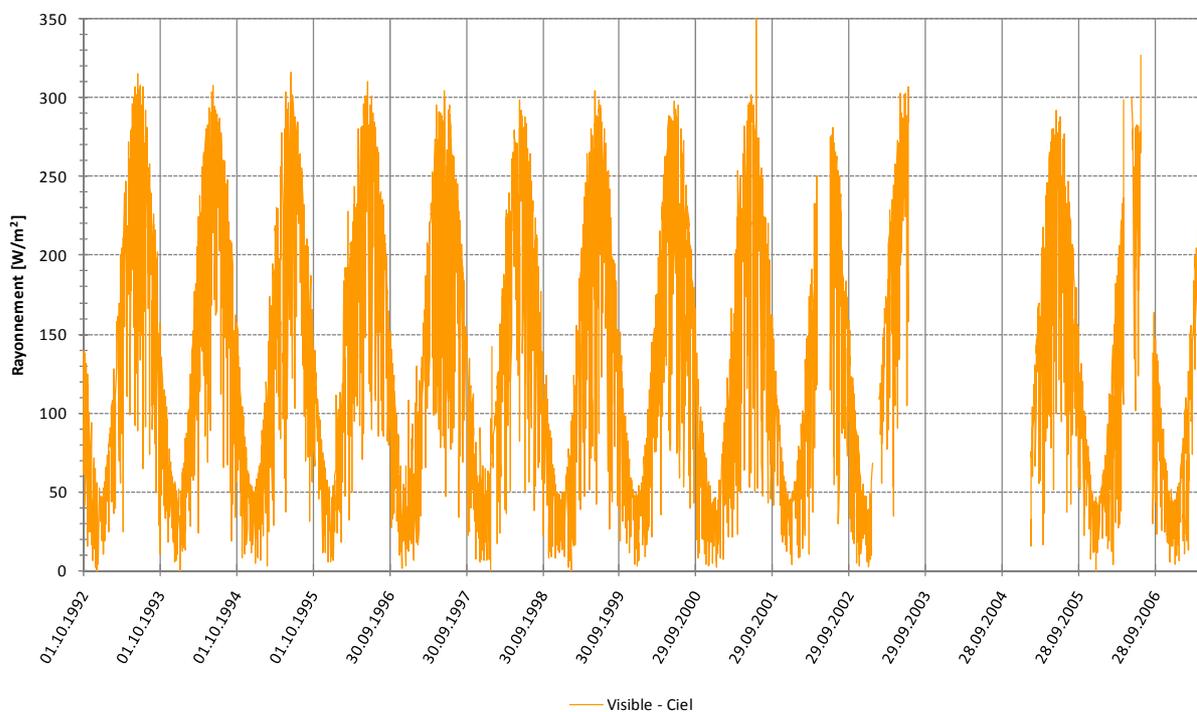


Figure 3: Evolution du rayonnement entre 1992 et 2007.

L'humidité relative a également présenté une stabilité évidente pour la période 1992-2007. La moyenne annuelle est à environ 65%.

Les données de surface de la chaussée ont aussi été récoltées sur une période de 16 ans (Figure 4). La température moyenne sur la période 1992-2002, période où l'enrobé traditionnel était en place, est à environ 14.8°C. La période 2003-2007, période où l'enrobé drainant était en place, n'a pas fourni assez de données de mesure pour parvenir à en déduire une moyenne correcte.

Température journalière moyenne de la surface 1992-2007

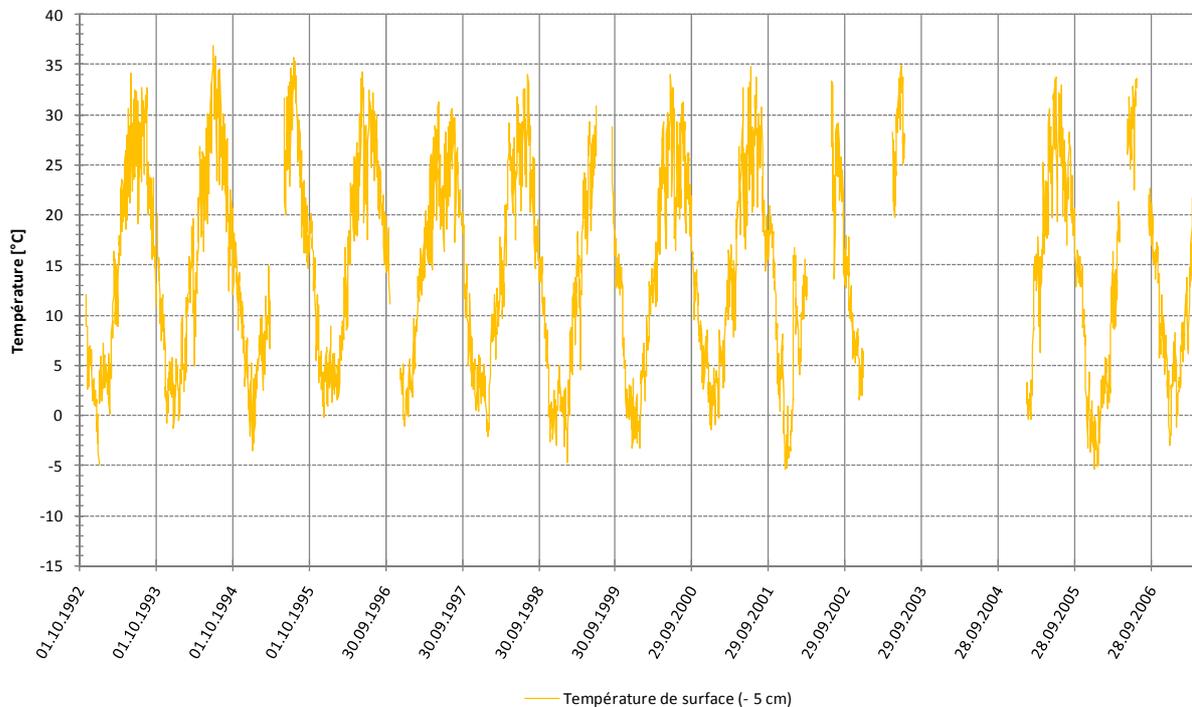


Figure 4: Evolution de la température de surface entre 1992 et 2007.

4.2 ANALYSE GÉNÉRALES DES DONNÉES HIVERNALES

Les caractéristiques météorologiques ainsi que les caractéristiques de chaussée des différents hivers sont données dans le tableau ci-après (Tableau 1).

hiver (1.10. au 30.40)	Moyennes							
	t _{air} [°C]	Humidité relative [%]	Ensoleil- lement [W/m ²]	t _{surf} (-5 cm) [°C]	t _{sol1} (-10 cm) [°C]	t _{sol2} (-20 cm) [°C]	t _{sol3} (-30 cm) [°C]	t _{sol4} (-35 cm) [°C]
1992/1993*	4.17	69.92	86.91	6.96	6.80	6.93	6.96	6.94
1993/1994*	4.97	70.69	86.02	8.29	7.94	8.09	10.36	8.38
1994/1995*	5.36	72.62	90.07	7.51	14.27	9.29	9.00	9.01
1995/1996*	5.91	64.98	94.68	9.45	9.20	14.30	9.35	9.45
1996/1997*	5.74	60.40	96.16	10.11	8.72	8.35	9.95	10.57
1997/1998*	5.75	61.74	88.69	8.11	8.36	8.88	8.27	10.17
1998/1999*	4.06	72.21	78.19	6.30	4.87	6.70	6.26	6.87
1999/2000*	4.64	73.27	82.21	7.31	17.73	7.47	6.48	13.23
2000/2001*	5.86	75.78	73.58	7.92	9.25	8.39	12.27	10.87
2001/2002*	5.42	71.66	84.54	10.51	15.45	8.91	8.24	-
2002/2003 ^{*/**}	6.88	72.58	91.09	8.63	-	10.10	8.30	12.69
2003/2004 ^{**}	-	-	-	-	-	-	-	-
2004/2005 ^{**}	5.93	63.94	129.93	9.68	9.31	9.27	8.97	7.21
2005/2006 ^{**}	3.46	73.24	80.92	6.17	5.93	6.37	6.48	4.29
2006/2007 ^{**}	6.43	71.61	82.99	8.96	8.64	9.02	8.94	6.36

* Enrobé AC

** Enrobé drainant

Tableau 1: Caractéristiques des hivers de 1992 à 2007.

Le graphe ci-après indique bien les différences qui existent entre les divers hivers de 1992 à 2007. L'hiver le plus froid a eu lieu en 2005/2006 avec une température moyenne de l'air de 3.5°C, et l'hiver le plus chaud a eu lieu en 2002/2003 avec une température moyenne de l'air de 6.9°C. Néanmoins pendant ce dernier hiver, les mesures n'ont pas pu être récoltées pour une grande partie de l'hiver. Les valeurs du graphe doivent donc être traitées avec attention, car elles présentent des moyennes annuelles alors que pour plusieurs hivers, les données sont incomplètes. C'est pourquoi la notion d'hiver représentatif a été employée (voir 4.3).

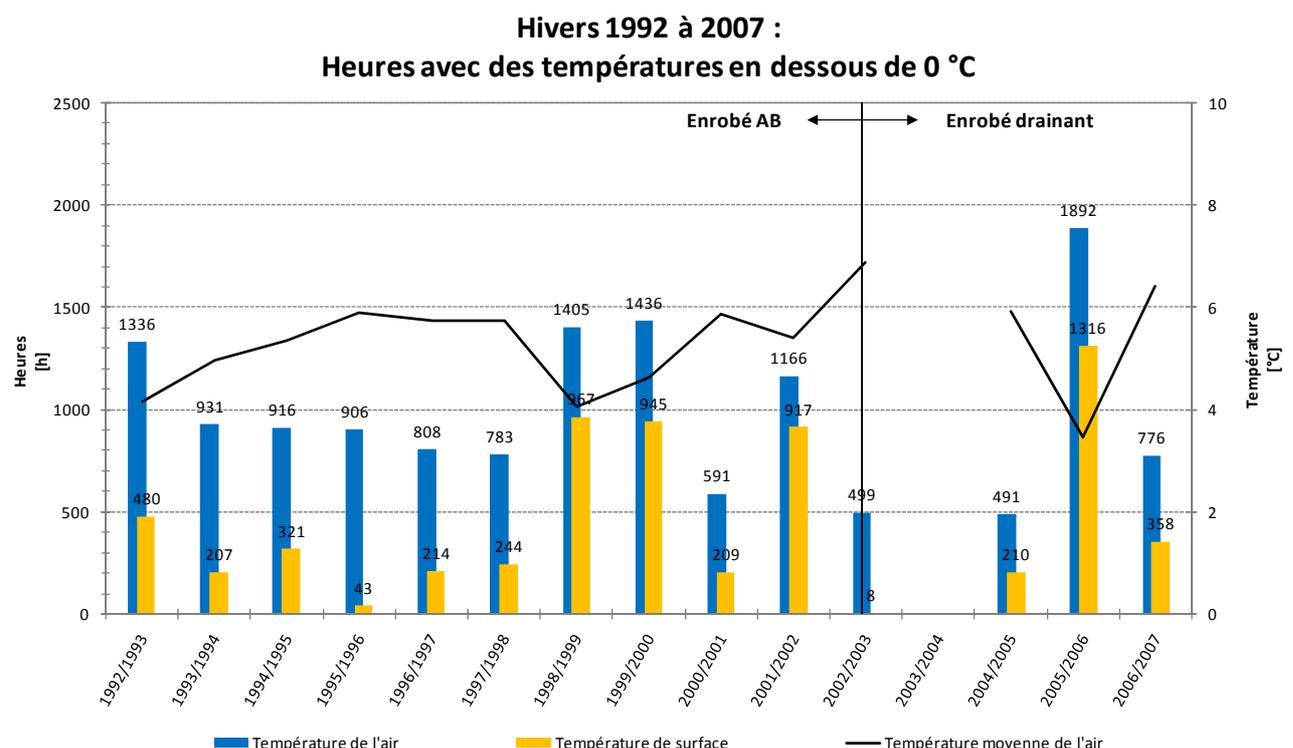


Figure 5: Températures de l'air et de surface inférieures à 0°C entre 1992 et 2007.

4.3 DÉFINITION DES HIVERS REPRÉSENTATIFS

Afin de comparer le comportement d'un enrobé traditionnel avec celui d'un enrobé drainant, les données de mesure des périodes hivernales ont été analysées. A l'aide des données récoltées, la période du 1^{er} octobre au 30 avril de l'année suivante a été choisie comme période hivernale. Ainsi une analyse plus détaillée a été possible et les dernières mesures erronées ont pu être écartées ou corrigées.

La récolte des données s'est faite sur 15 hivers consécutifs, de 1992/1993 à 2006/2007. Certaines périodes lors de ces hivers n'ont pas fournies de mesure pour différentes raisons : dysfonctionnement ou panne des appareils de mesure, travaux sur le tronçon autoroutier, etc. Par exemple après la mise en place de l'enrobé drainant en 2002, il y a eu un long intervalle où aucune mesure n'a été prise (du 27.12.2002 au 11.02.2005).

La notion de "hiver représentatif" a été adoptée pour ce travail afin de comparer le comportement hivernal des deux types d'enrobé. Un hiver représentatif correspond à :

- Un hiver (01.10 au 30.04) dont les données de mesure sont disponibles à tout moment,
- ou, un hiver (01.10 au 30.04) dont les données de mesure sont disponibles pendant toutes les périodes intéressantes (température de l'air basse, condition hivernale, ...).

7 hivers représentatifs ont été détecté (en gris dans Tableau 2), dont 5 avant et 2 après le changement du revêtement. Ainsi, la réalisation d'une analyse générale des données de mesure provenant des hivers représentatifs a été rendue possible (chapitre 4.4).

hiver (1.10. au 30.04)	Périodes pendant lesquelles les données ne sont pas disponibles			Hiver représentatif
	Température de surface indisponible pendant ...	Température de l'air indisponible pendant ...	Périodes froides lors de l'indisponibilité des données	
1992/1993*	928h	2h	oui	non
1993/1994*	189h		non	oui
1994/1995*	686h		non	oui
1995/1996*	289h		oui	non
1996/1997*	1274h	13h	oui	non
1997/1998*	182h		oui	non
1997/1998*	188h		oui	non
1998/1999*	9h	-	non	oui
1999/2000*	-		non	oui
2000/2001*	24h		non	oui
2001/2002*	106h	-	oui	non
2002/2003 ^{*/**}	2999h	842h	oui	non
2003/2004 ^{**}	du 1.10.03 au 30.4.04		oui	non
2004/2005 ^{**}	du 1.10.04 au 10.2.05		oui	non
2005/2006 ^{**}	-		non	oui
2006/2007 ^{**}	-		non	oui

* Enrobé AC

** Enrobé drainant

Tableau 2: Aperçu des hivers de 1992 à 2007.

4.4 ANALYSE GÉNÉRALE DES DONNÉES PROVENANT DES HIVERS REPRÉSENTATIFS

L'analyse générale des données de mesure provenant des hivers représentatifs s'est basée sur 5 hivers avec l'enrobé AC (1993/1994, 1994/1995, 1998/1999, 1999/2000 et 2000/2001) et 2 hivers avec l'enrobé drainant (2005/2006 et 2006/2007). La comparaison entre les températures de l'air et de surface dans le graphe ci-après indique clairement la difficulté rencontrée à trouver des hivers semblables. En effet, trois hivers peuvent être décrits comme "rudes", dont un avec enrobé drainant, et 4 hivers peuvent être décrits comme "doux", dont également un avec enrobé drainant. Le graphe ci-après montre le nombre d'heures où les températures de l'air, respectivement de surface, ont été inférieures à 0°C (Figure 6).

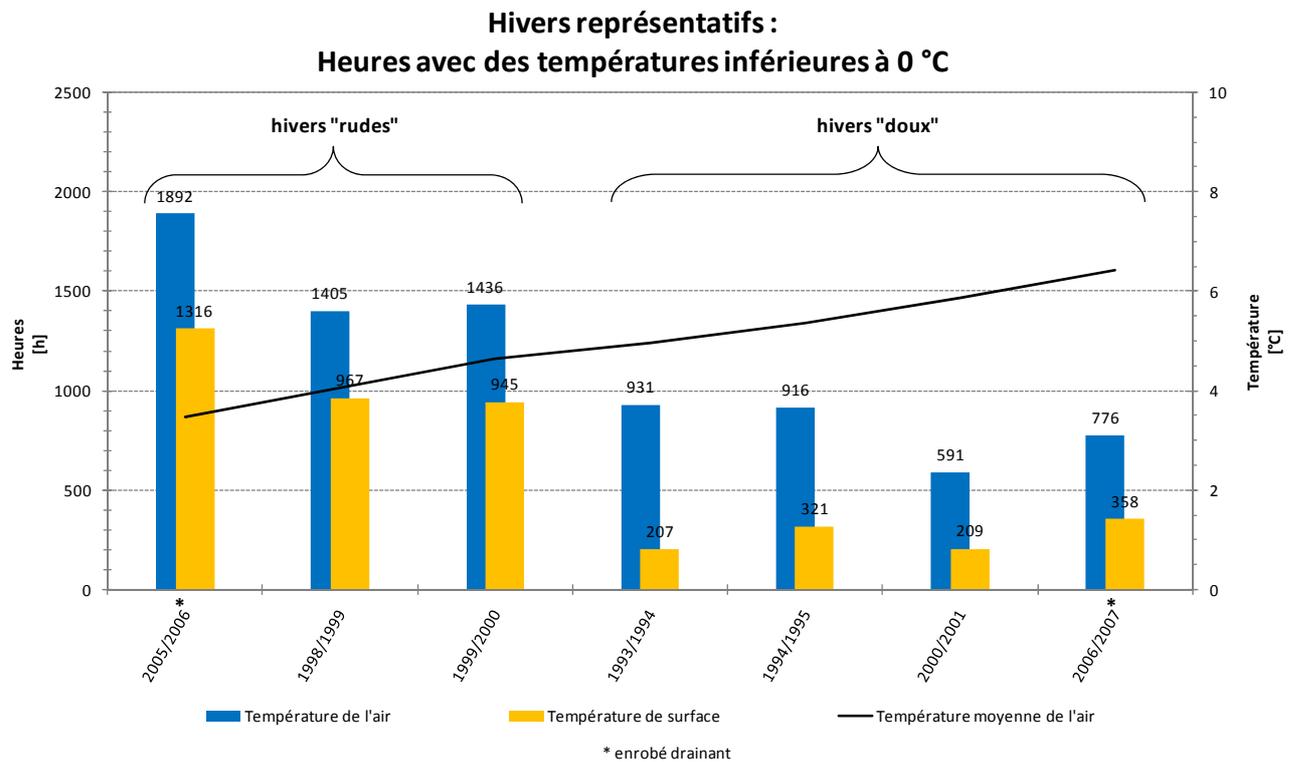


Figure 6: Températures de l'air et de surface inférieures à 0°C pour les hivers représentatifs.

En analysant le rapport entre les heures avec des températures de l'air inférieures à 0°C et les heures avec des températures de surface inférieures à 0°C, l'on constate que les hivers "rudes" présentent un rapport assez constant quel que soit le type d'enrobé (Figure 7). Alors que pour les hivers "doux" ce rapport peut varier entre 2.2 et 4.5. Ici, l'enrobé drainant présente la valeur la plus basse, ce qui veut dire que la température de surface est proportionnellement plus souvent inférieure à 0°C que la température de surface de l'enrobé traditionnel. Par rapport à cette comparaison, il existe donc un risque plus élevé lié au comportement hivernal de l'enrobé drainant.

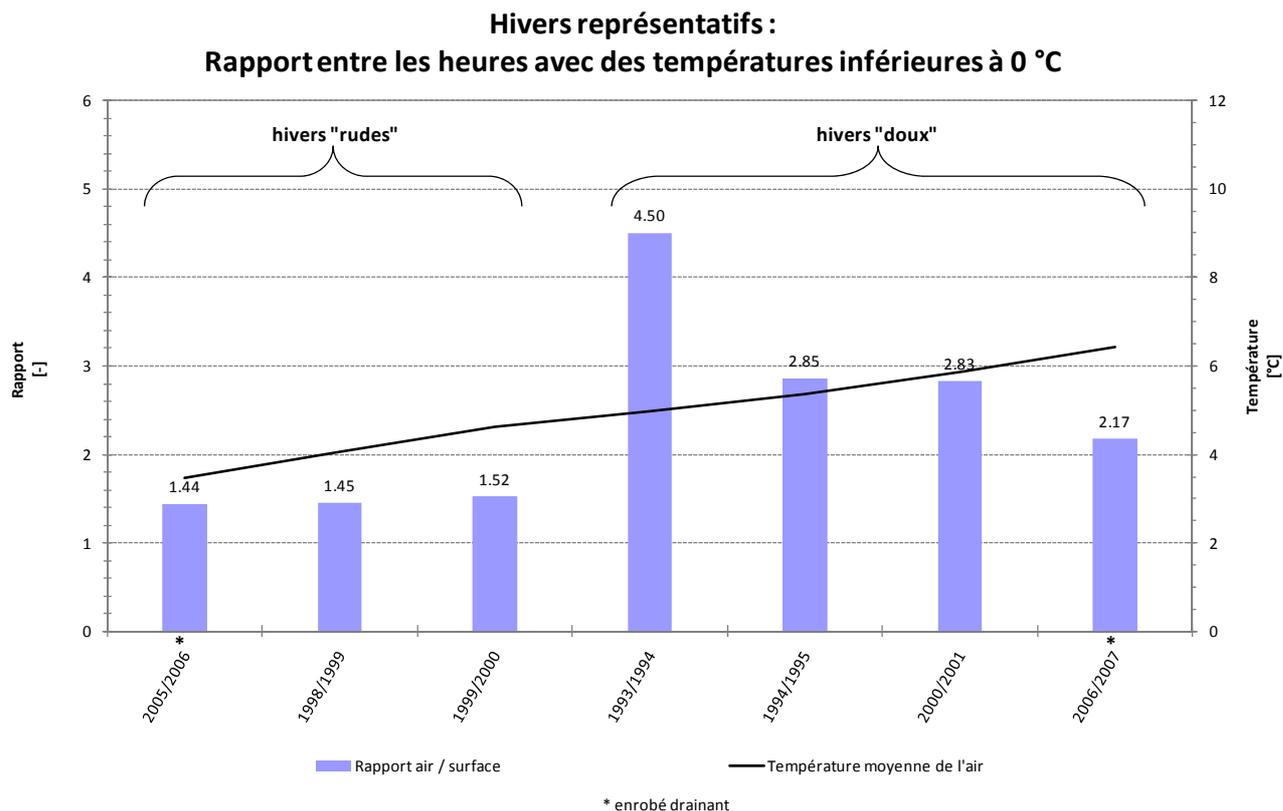


Figure 7: Rapport entre les heures avec des températures de l'air et de surface inférieures à 0°C pour les hivers représentatifs.

Une comparaison directe entre les moyennes hivernales des températures de l'air, de la surface et du sol à différentes profondeurs n'a pu être réalisée que de manière sommaire car la manifestation de nombreux intervalles avec des données de mesure manquantes a été répertoriée (Figure 8).

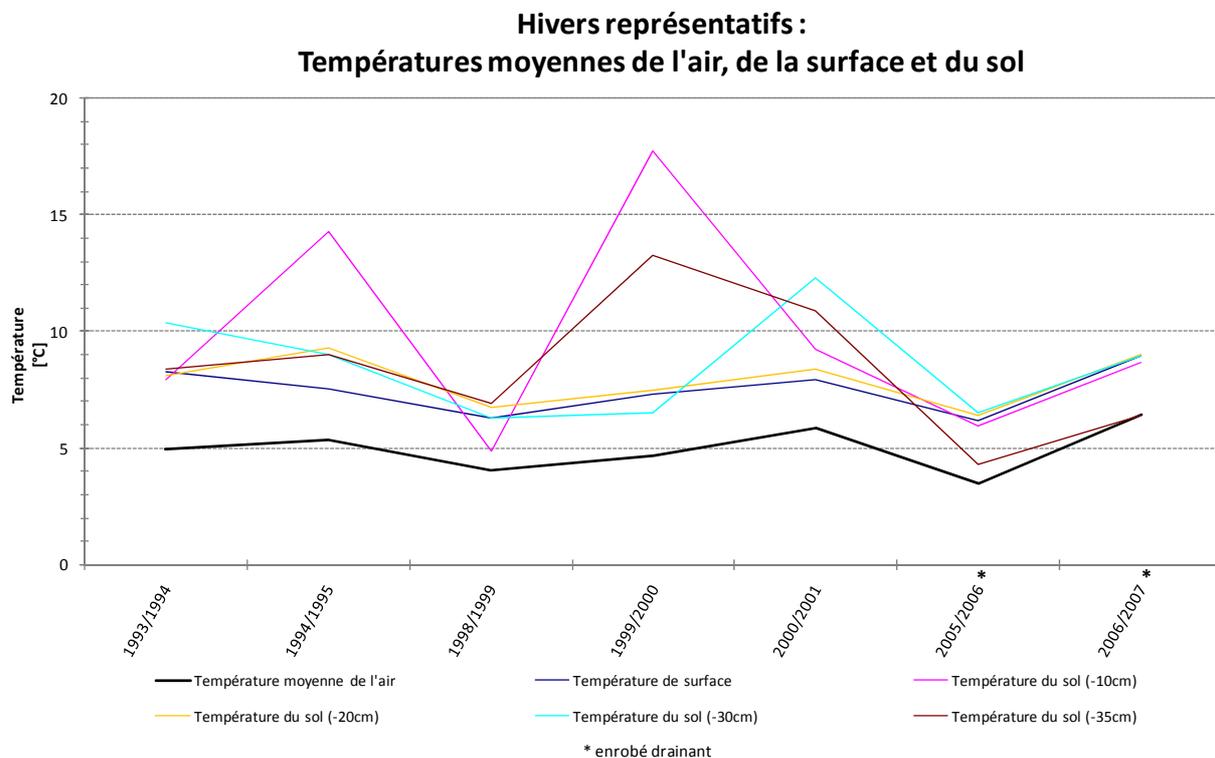


Figure 8: Températures moyennes de l'air, de la surface et du sol pour les hivers représentatifs – 1.

Lorsque les capteurs défectueux sont écartés, il peut être constaté que les moyennes hivernales des températures de l'air sont en tous moments inférieures aux températures de surface et de sol. Cette différence se situe entre 2.1°C et 3.6°C. Les moyennes hivernales des températures de surface et des températures du sol sont par contre très proches.

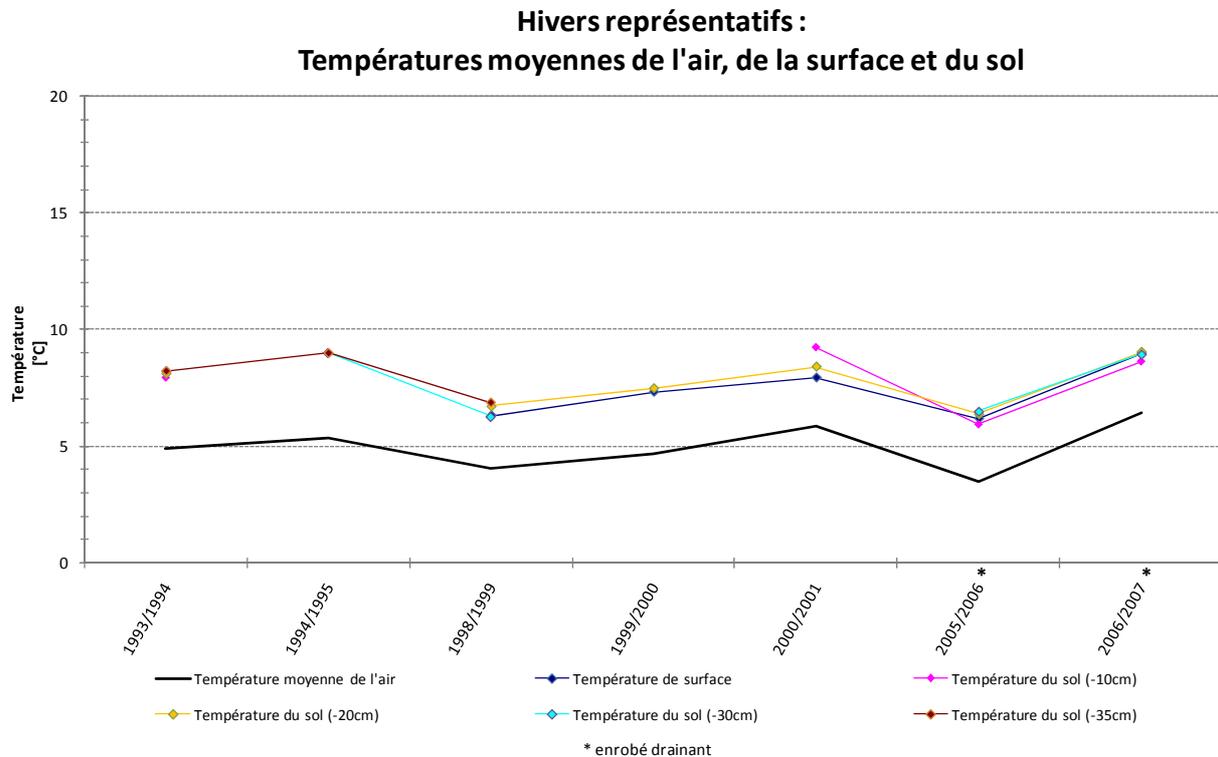


Figure 9: Températures moyennes de l'air, de la surface et du sol pour les hivers représentatifs – 2.

5 ANALYSE DES PÉRIODES TYPES

Une analyse par périodes types a été effectuée dans le but de comparer le comportement de la chaussée à Ardon avant et après le changement du type de revêtement. Dans un premier temps, les périodes types ont été définies à l'aide des données météorologiques récoltées. Ces périodes, au nombre de trois, ont permis par la suite d'identifier quelques événements majeurs pour une analyse plus détaillée. Les trois périodes types en question sont les périodes de froid extrême, les périodes de froid prolongé et les périodes de variation rapide de la température.

L'analyse des événements majeurs a permis de comparer concrètement des périodes avec des conditions météorologiques proches avant et après le changement du type de revêtement. De cette manière, il a été possible de confronter le comportement d'un revêtement AC avec celui d'un revêtement drainant lors d'événements particuliers.

Dans ce chapitre, les périodes types sont tout d'abord définies, puis une analyse plus générale est réalisée par rapport à la période de récolte des données. Ensuite, le comportement des deux types de revêtement lors de ces trois périodes types est examiné plus en détail en s'appuyant sur des exemples concrets.

5.1 DÉFINITION DES PÉRIODES TYPES

Trois périodes types liées aux conditions météorologiques hivernales ont été définies pour le cadre de ce travail. Il s'agit d'une part de périodes de froid extrême, caractérisées par des températures de l'air très basses, de périodes de froid prolongé, caractérisées par des températures de l'air basses pendant une période prolongée, et de périodes de variation rapide de la température, caractérisées par des chutes ou hausses de température de l'air rapides pendant un court intervalle.

L'étape de définition des périodes types a été réalisée à l'aide d'une analyse préliminaire des données récoltées afin de déterminer les valeurs concrètes utilisées pour les définitions. Un aperçu de la définition de ces périodes est donné dans la figure ci-après (Tableau 3).

Nom	Abréviation	Définition
"Froid extrême"	FE	Température horaire 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 consécutives
"Variation rapide de température"	VT	Différence d'au moins 10 °C entre le maximum et le minimum de la température de l'air sur une période de 24h ; température minimale inférieure ou égale à -5 °C

Tableau 3: Définition des périodes types.

5.1.1 Période de froid extrême

Une période de froid extrême (FE) correspond à une journée dont au minimum une température horaire moyenne de l'air est égale ou inférieure à -10°C.

5.1.2 Période de froid prolongé

Une période de froid prolongé (FP) correspond à une période se composant d'au moins 5 journées consécutives dont les températures journalières moyennes de l'air sont inférieures à 0°C.

5.1.3 Période de variation rapide de la température

Une période de variation rapide de la température (VT) correspond à une période de maximum 24h dont la différence entre le maximum et le minimum de la température de l'air est supérieure ou égale à 10°C et dont la température minimale de l'air est inférieure ou égale à -5°C. Il peut aussi bien s'agir de chutes que de hausses rapides de la température de l'air.

5.2 APERÇU GENERAL DES PERIODES TYPES

Toutes les périodes types pour les hivers entre 1992 et 2007 ont été examinées, mais l'analyse détaillée de ces périodes s'est limitée aux hivers représentatifs déjà définies dans le chapitre précédent (chapitre 4). Une comparaison du nombre des différentes périodes types qui se sont produites lors des hivers représentatifs est donnée dans la figure ci-après (Figure 10). Il est à noter que les unités utilisées dans cette figure sont des journées équivalentes. Le nombre de journée équivalente correspond à :

- FE : nombre de journées présentant des périodes de froid extrême.
- FP : nombre de journées composant les périodes de froid prolongé ; une période de froid prolongé correspond donc à au moins 5 journées équivalentes.
- VT : nombre de périodes de variation rapide de la température ; une période de variation rapide de la température peut se dérouler sur deux journées, mais ne correspond donc qu'à une journée équivalente.

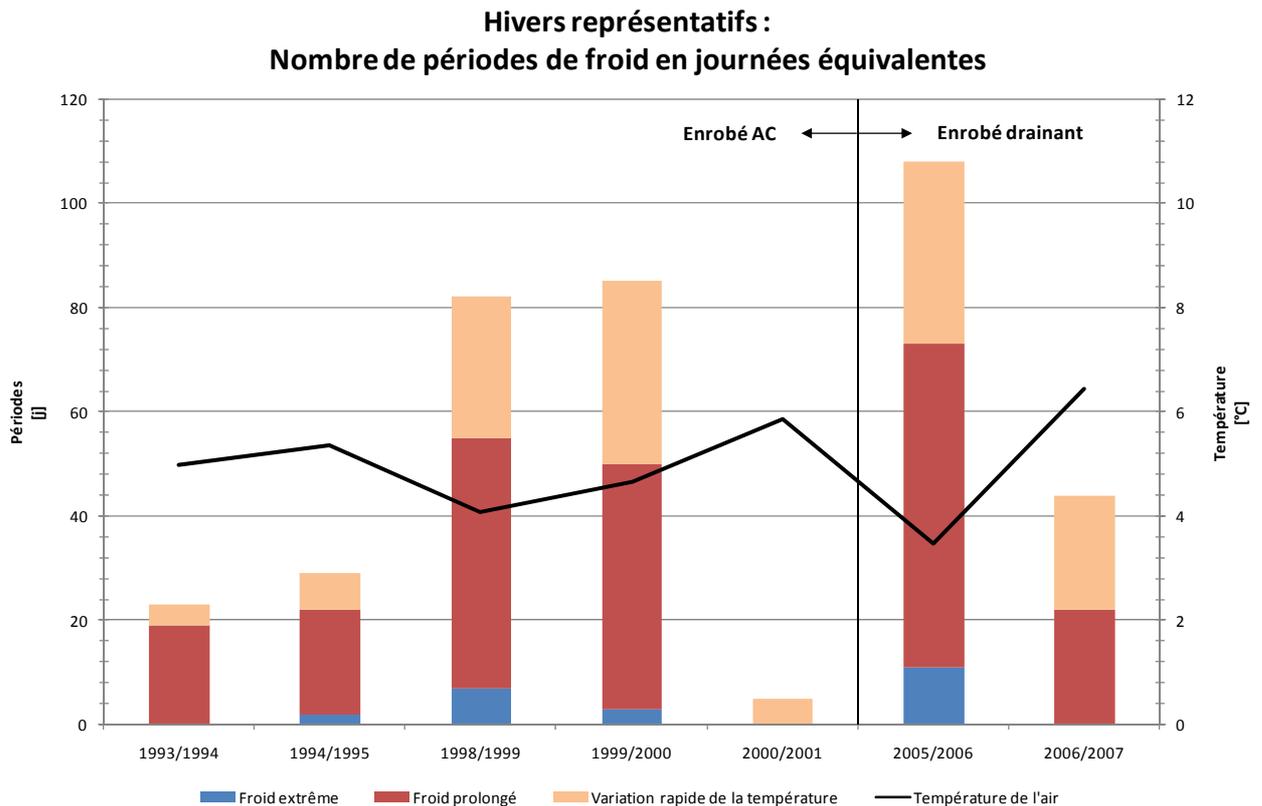


Figure 10: Comparaison entre le nombre total de périodes types.

Il est très difficile d'aboutir à une comparaison générale entre les données de mesure des différents hivers vu les conditions météorologiques très variées d'une année à l'autre. Les hivers les plus froids (2005/2006, 1999/2000 et 1998/1999) présentent le plus de périodes types, par contre l'hiver le plus chaud (2006/2007) présente également un nombre élevé de périodes types. Cette comparaison n'étant basée que sur les températures de l'air, aucune conclusion ne peut évidemment être tirée par rapport aux deux types de revêtement analysés.

Pour aboutir à une analyse détaillée du comportement des revêtements, des événements semblables d'un point de vue météorologique (température de l'air, ensoleillement, humidité relative) ont été recherchés et analysés. Ainsi pour les trois périodes types et pour les hivers représentatifs il est possible de comparer directement à l'aide de certains exemples le comportement d'un enrobé traditionnel avec celui d'un enrobé drainant. Pour ce travail, quatre exemples par périodes types ont été choisis d'après leurs caractéristiques, et seront décrits en détail dans les chapitres suivants (chapitres 5.3, 5.4 et 5.5).

5.3 ANALYSE DES PÉRIODES DE FROID EXTRÊME

Sur les 7 hivers représentatifs, 23 périodes de froid extrême ont été dénombrées, dont 12 avant et 11 après le changement du revêtement en 2002. Les 11 périodes après le changement du revêtement se sont toutes produites lors de l'hiver 2005/2006 qui correspond à l'hiver le plus froid sur toute la période de récolte des données.

La recherche de situations avant/après semblables d'un point de vue météorologique a abouti à l'analyse de plusieurs cas représentatifs dont quatre ont été choisis comme exemples. Leurs caractéristiques sont données dans la figure ci-après (Tableau 4).

hiver (1.10. au 30.40)	date	t _{air}			t _{surf} (- 5 cm)			Moyennes journalières		Exemple
		t _{moy} [°C]	t _{min} [°C]	t _{max} [°C]	t _{moy} [°C]	t _{min} [°C]	t _{max} [°C]	Humidité relative [%]	Ensoleillement [W/m ²]	
1998/1999	23.11.1998	-5.7	-10.0	1.0	-2.5	-5.1	-0.2	70.8	57	01
1999/2000	26.01.2000	-7.6	-11.2	-1.1	-3.0	-5.8	-0.2	70.3	70	02
	27.01.2000	-6.8	-11.2	0.2	-3.2	-6.2	0.1	72.3	72	03
	28.01.2000	-5.7	-10.5	1.1	-2.9	-5.6	0.0	70.7	57	04
2005/2006*	11.01.2006	-7.5	-12.0	-0.8	-4.9	-7.4	-1.5	77.6	52	02
	13.01.2006	-5.9	-10.6	1.6	-4.1	-6.8	-1.0	76.2	52	01 / 04
	14.01.2006	-7.0	-11.3	0.2	-4.5	-7.2	-1.3	79.0	53	03

* Enrobé drainant

Tableau 4: Exemples de périodes de froid extrême.

5.3.1 Exemple n° 01

Les caractéristiques météorologiques de l'exemple n° 01 sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Journée du 23.11.1998 avec une température moyenne de l'air de -5.7°C et des températures max, respectivement min, de 1°C, respectivement -10°C. La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 1 heure (6h à 7h). L'humidité relative journalière moyenne est de 71%, l'humidité max de 84% (5h à 6h) et l'humidité min de 41% (15h à 16h). L'ensoleillement moyen est de 145W/m² entre 9h et 18h.
- Enrobé drainant : Journée du 13.01.2006 avec une température moyenne de l'air de -5.9°C et des températures max, respectivement min, de 1.6°C, respectivement -10.6°C. La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 5 heures (5h à 7h et 8h à 11h), mais reste toujours très proche de cette limite. L'humidité relative journalière moyenne est de 76%, l'humidité max de 94% (8h à 9h) et l'humidité min de 42% (16h à 17h). L'ensoleillement moyen est également de 145W/m² entre 9h et 18h.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 01**

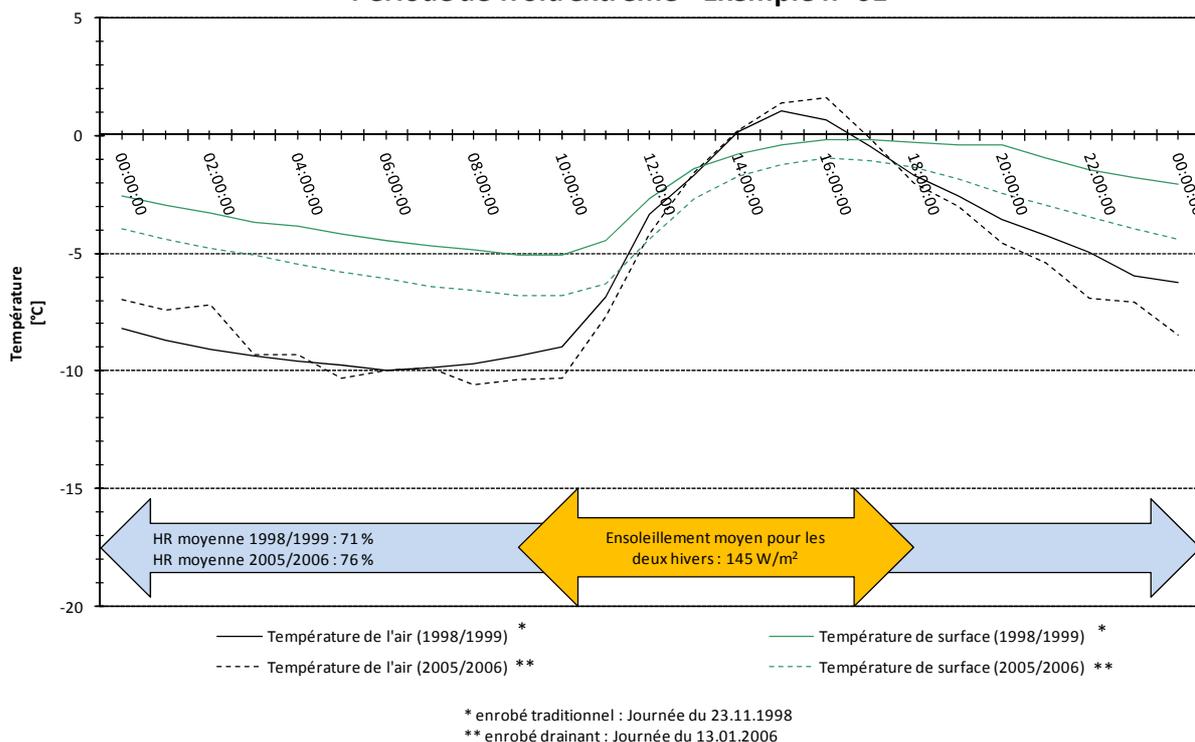


Figure 11: Période de froid extrême – Exemple n° 01.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées sont quasiment identiques. Au niveau du comportement des revêtements il peut être constaté que la température de surface de l'enrobé drainant est toujours inférieure à la température de l'enrobé traditionnel. Cette différence se situe entre 1 et 2°C. Lorsqu'il y a ensoleillement, l'enrobé drainant se réchauffe plus vite, mais n'arrive cependant pas à atteindre les mêmes valeurs que l'enrobé traditionnel.

Les températures du sol indiquent une plus grande différence : avec l'augmentation de la profondeur, la différence entre les températures des deux cas devient plus importante. La température du sol pour l'enrobé traditionnel est supérieure à 0°C, alors que celle pour l'enrobé drainant se situe entre -2 et -3°C. Ce phénomène peut expliquer la différence des températures de surface, le sol jouant un rôle de réservoir de chaleur. La réactivité thermique moins marquée pour les températures à profondeur élevée peut aussi être mentionnée.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
Période de froid extrême - Exemple n° 01**

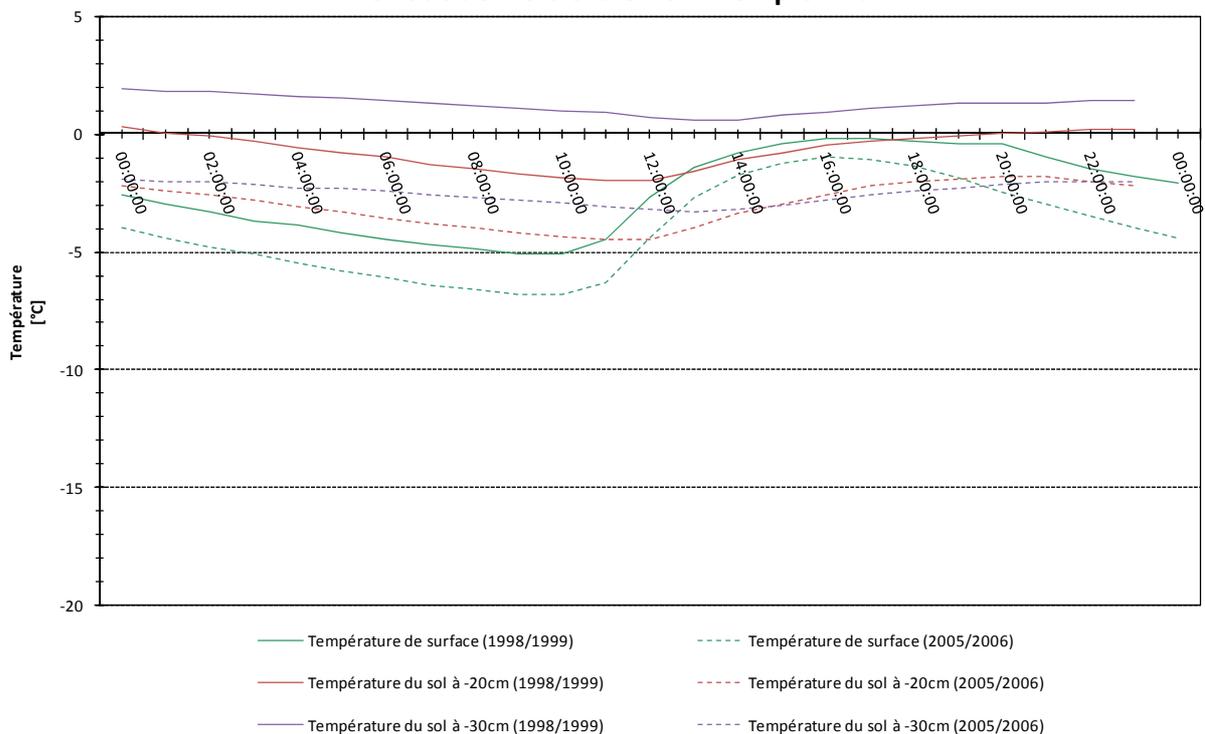


Figure 12: Période de froid extrême – Exemple n° 01 – Températures du sol.

5.3.2 Exemple n° 02

Les caractéristiques météorologiques de l'exemple n° 02 sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Journée du 26.01.2000 avec une température moyenne de l'air de -7.6°C et des températures max, respectivement min, de -1.1°C, respectivement -11.2°C. La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 10 heures consécutives (2h à 12h). L'humidité relative journalière moyenne est de 70%, l'humidité max de 87% (3h à 4h) et l'humidité min de 39% (15h à 16h). L'ensoleillement moyen est de 190W/m² entre 9h et 18h.
- Enrobé drainant : Journée du 11.01.2006 avec une température moyenne de l'air de -7.5°C et des températures max, respectivement min, de -0.8°C, respectivement -12°C. La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 9 heures consécutives (2h à 11h). L'humidité relative journalière moyenne est de 78%, l'humidité max de 95% (6h à 7h) et l'humidité min de 51% (15h à 16h). L'ensoleillement moyen est de 140W/m² entre 9h et 18h.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 02**

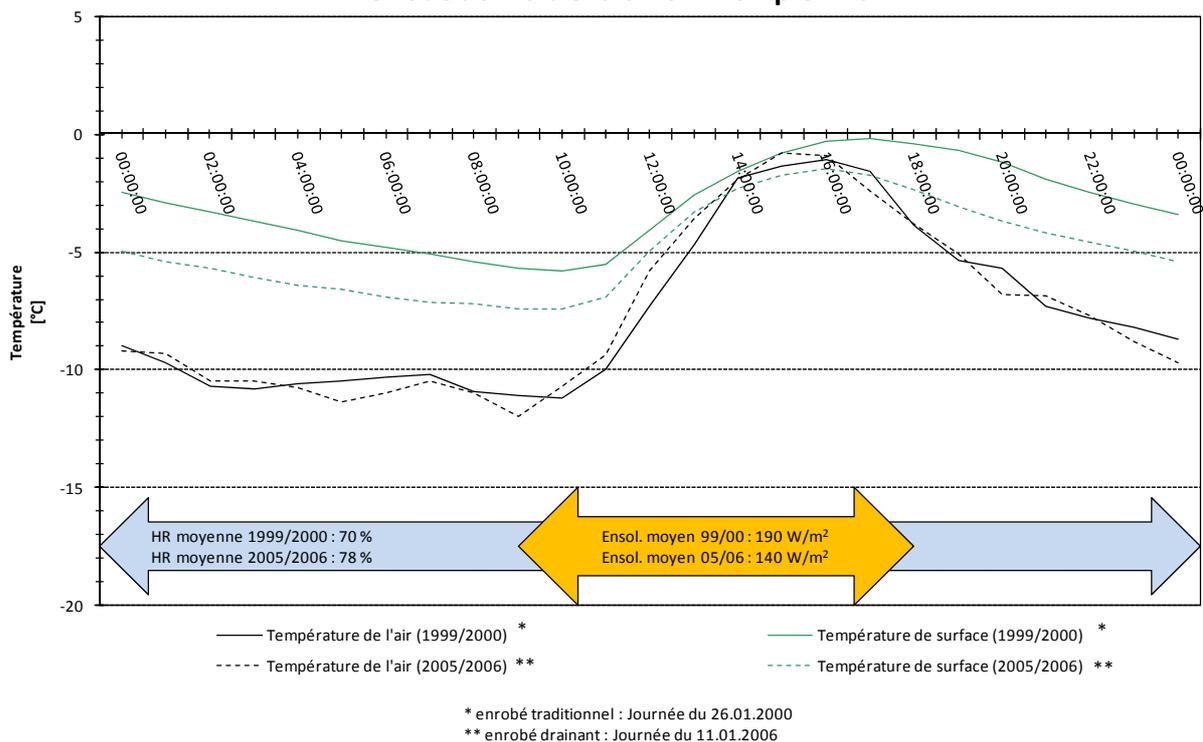


Figure 13: Période de froid extrême – Exemple n° 02.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées se distinguent uniquement au niveau de l'ensoleillement. Pour cet exemple, la température de l'air reste toujours inférieure à 0°C. La température de surface de l'enrobé drainant est toujours inférieure à la température de l'enrobé traditionnel. Cette différence se situe entre environ 1 et 2.5°C. Lorsqu'il y a ensoleillement, l'enrobé drainant se réchauffe de nouveau plus vite, mais n'arrive cependant pas à atteindre les mêmes valeurs que l'enrobé traditionnel.

Les températures du sol indiquent toujours une différence, mais celle-ci est moins marquée que pour le premier exemple. La différence de température à une profondeur de 30cm est d'environ 2°C.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 02**

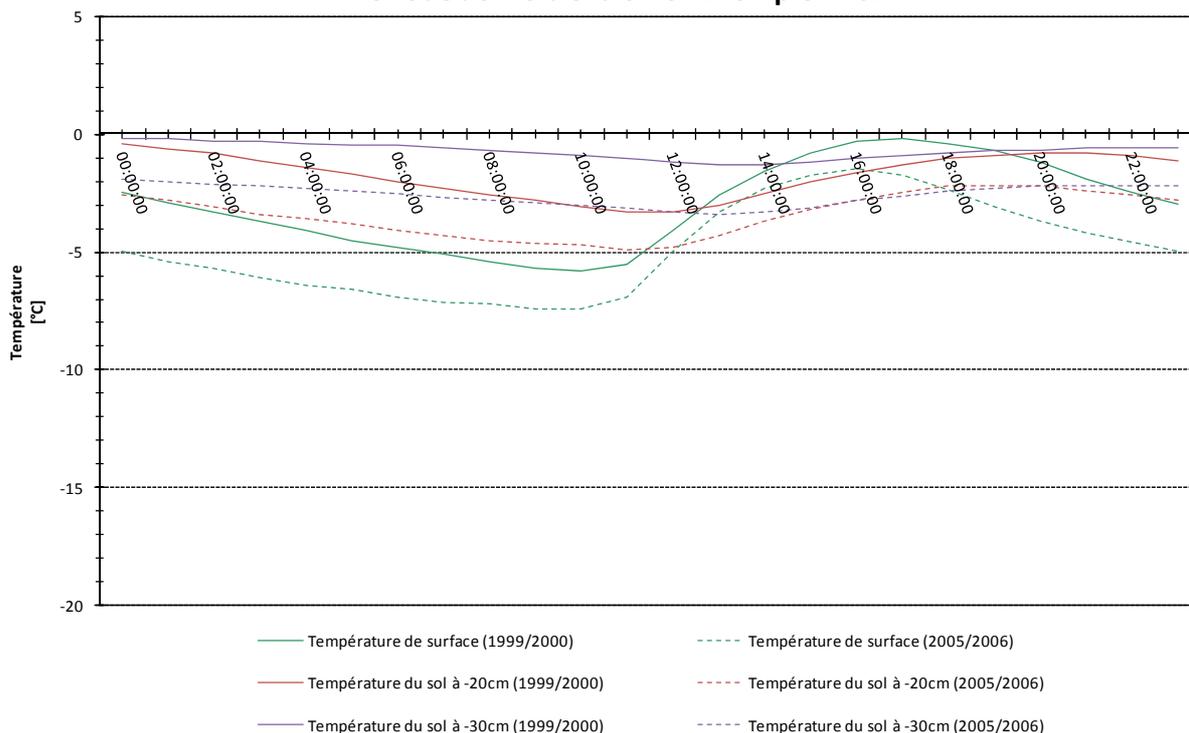


Figure 14: Période de froid extrême – Exemple n° 02 – Températures du sol.

5.3.3 Exemple n° 03

Les caractéristiques météorologiques de l'exemple n° 03 sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Journée du 27.01.2000 avec une température moyenne de l'air de -6.8°C et des températures max, respectivement min, de 0.2°C, respectivement -11.2°C. La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 7 heures consécutives (3h à 10h). L'humidité relative journalière moyenne est de 72%, l'humidité max de 85% (6h à 7h) et l'humidité min de 49% (15h à 16h). L'ensoleillement moyen est de 190W/m² entre 9h et 18h.
- Enrobé drainant : Journée du 14.01.2006 avec une température moyenne de l'air de -7.0°C et des températures max, respectivement min, de 0.2°C, respectivement -11.3°C. La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 6 heures (4h à 5h et 6h à 11h). L'humidité relative journalière moyenne est de 79%, l'humidité max de 95% (4h à 5h) et l'humidité min de 51% (15h à 16h). L'ensoleillement moyen est de 140W/m² entre 9h et 18h.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 03**

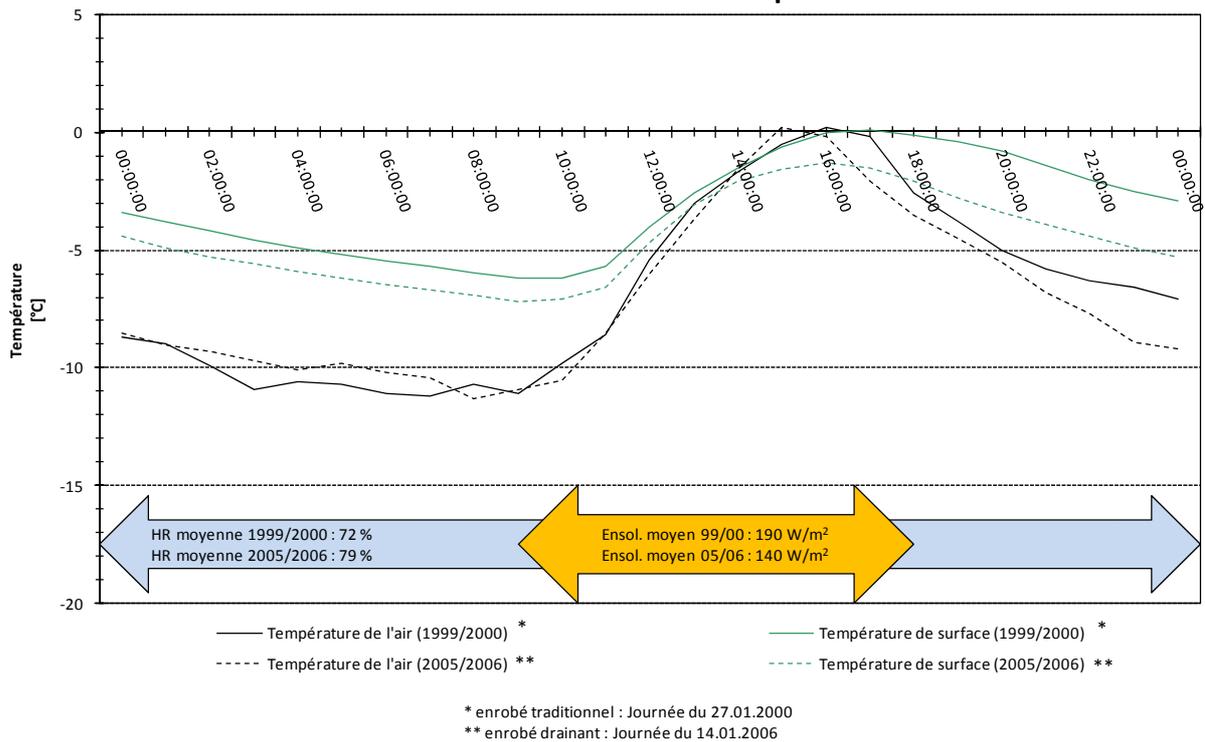


Figure 15: Période de froid extrême – Exemple n° 03.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées se distinguent uniquement au niveau de l'ensoleillement. La température de surface de l'enrobé drainant est toujours inférieure à la température de l'enrobé traditionnel. Cette différence se situe entre environ 0.5 et 2.5°C. Lorsqu'il y a ensoleillement, les deux enrobés se réchauffent de manière identique, et l'enrobé traditionnel continue à se réchauffer grâce à l'ensoleillement plus marqué tandis que l'enrobé drainant commence à se refroidir plus rapidement. Il peut être mentionnée que l'ensoleillement joue un rôle important pour les deux types d'enrobé.

Les températures du sol indiquent toujours une différence, mais encore moins marquée que pour les deux premiers exemples. La différence de température à une profondeur de 30cm est d'environ 1.5°C, avec une température de l'enrobé traditionnel supérieure.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 03**

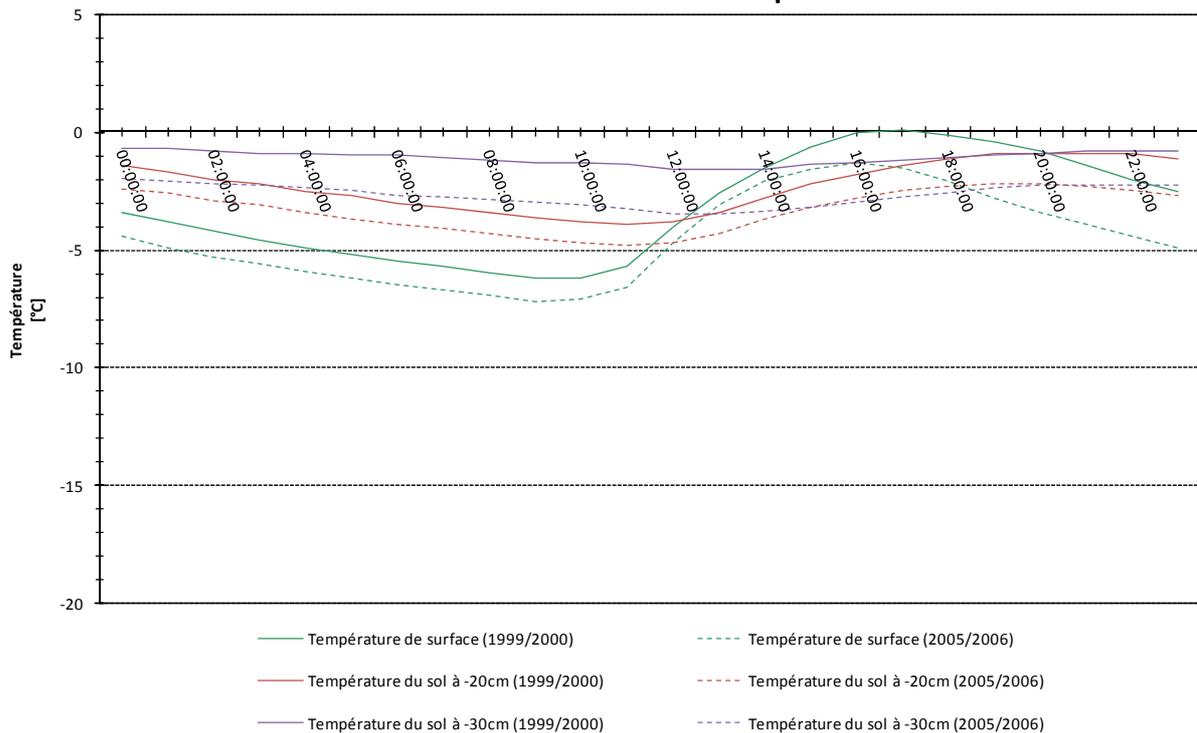


Figure 16: Période de froid extrême – Exemple n° 03 – Températures du sol.

5.3.4 Exemple n° 04

Les caractéristiques météorologiques de l'exemple n° 04 sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Journée du 28.01.2000 avec une température moyenne de l'air de -5.7°C et des températures max, respectivement min, de 1.1°C , respectivement -10.5°C . La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 2 heures (6h à 7h et 9h à 10h), mais reste toujours très proche de cette limite. L'humidité relative journalière moyenne est de 71%, l'humidité max de 85% (9h à 10h) et l'humidité min de 46% (17h à 18h). L'ensoleillement moyen est de $150\text{W}/\text{m}^2$ entre 9h et 18h.
- Enrobé drainant : Journée du 13.01.2006 avec une température moyenne de l'air de -5.9°C et des températures max, respectivement min, de 1.6°C , respectivement -10.6°C . La température est inférieure ou égale à -10°C pendant 5 heures (5h à 7h et 8h à 11h), mais reste toujours très proche de cette limite. L'humidité relative journalière moyenne est de 76%, l'humidité max de 94% (8h à 9h) et l'humidité min de 42% (16h à 17h). L'ensoleillement moyen est de $145\text{W}/\text{m}^2$ entre 9h et 18h.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 04**

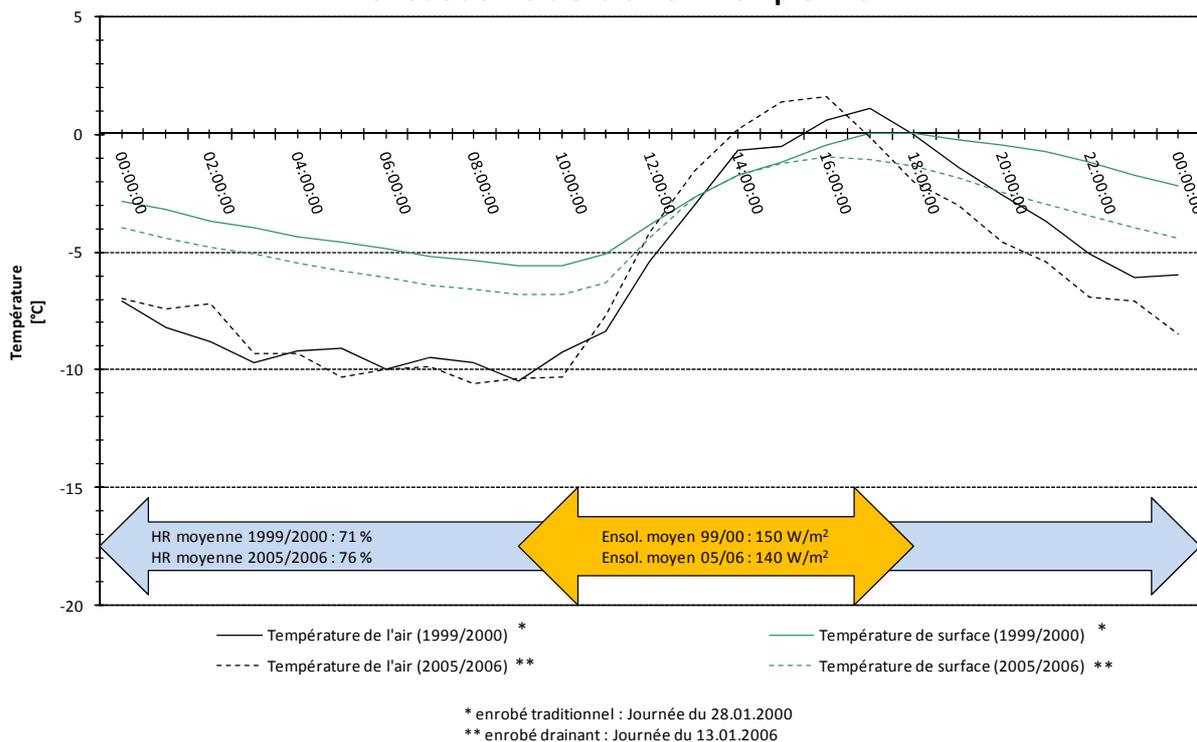


Figure 17: Période de froid extrême – Exemple n° 04.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées sont quasiment identiques. La température de surface de l'enrobé drainant est soit inférieure, soit égale à la température de surface de l'enrobé traditionnel. La différence se situe entre 0 et 2°C. Lorsqu'il y a ensoleillement, l'enrobé drainant se réchauffe beaucoup plus vite et atteint les mêmes valeurs que l'enrobé traditionnel. Le refroidissement de l'enrobé drainant se fait par contre également plus rapidement par la suite.

La différence des températures du sol à une profondeur de 30cm n'est plus que d'environ 1°C, avec toujours la température de l'enrobé traditionnel supérieure à celle de l'enrobé drainant.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid extrême - Exemple n° 04**

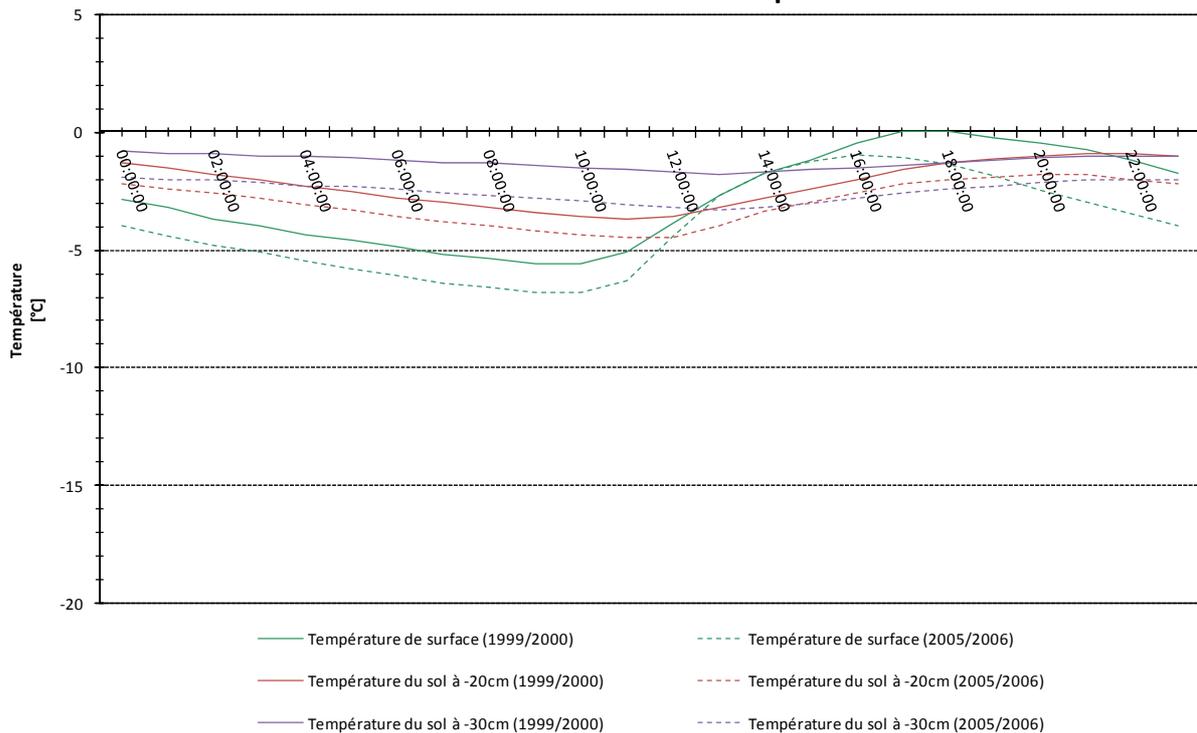


Figure 18: Période de froid extrême – Exemple n° 04 – Températures du sol.

5.3.5 Remarques

Les enrobés drainants présentent une sensibilité thermique accrue comparés aux enrobés traditionnels. Le réchauffement, mais aussi le refroidissement, de la surface d'un enrobé drainant est plus marqué que pour les enrobés de type AC. De même les températures extrêmes engendrent une température de surface inférieure pour les enrobés drainants.

Les variations journalières de la température de surface sont très marquées, tandis que les variations des températures du sol le sont de moins en moins lorsque la profondeur augmente. Le sol peut jouer un rôle de réservoir de chaleur et influence de cette manière la température de surface lorsque l'ensoleillement est nul. Ce phénomène se produit pour les deux types d'enrobés.

5.4 ANALYSE DES PÉRIODES DE FROID PROLONGÉ

Sur les 7 hivers représentatifs, 26 périodes de froid prolongé ont été dénombrées, dont 18 avant et 8 après le changement du revêtement en 2002. Les périodes ont des durées très variables pouvant aller de 5 jusqu'à 18 journées consécutives où la température journalière moyenne de l'air reste inférieure à 0°C.

La recherche de situations avant/après semblables d'un point de vue météorologique a abouti à la l'analyse de plusieurs cas représentatifs dont quatre ont été choisis comme exemples. Leurs caractéristiques sont données dans la figure ci-après (Tableau 5).

hiver (1.10. au 30.40)	date		t _{air}			t _{surf} (-5 cm)			Moyennes journalières		Exemple
	jour	longueur période (j)	t _{moy} [°C]	t _{min} [°C]	t _{max} [°C]	t _{moy} [°C]	t _{min} [°C]	t _{max} [°C]	Humidité relative [%]	Ensoleillement [W/m ²]	
1994/1995	22.12.1994	6	-2.1	-4.5	0.7	1.0	-0.6	4.1	65.9	50	01
	23.12.1994		-4.4	-7.6	0.8	-1.1	-3.3	1.7	74.3	48	
	24.12.1994		-4.9	-8.4	0.2	-1.7	-4.0	0.7	81.7	45	
	25.12.1994		-4.9	-8.2	0.3	-2.0	-4.4	0.7	83.2	45	
	26.12.1994		-4.6	-7.6	-0.3	-2.0	-4.1	0.2	82.1	39	
27.12.1994	-0.6	-3.0	1.9	0.3	-0.8	1.7	79.9	21			
1999/1999	25.11.1999	7	-2.8	-6.2	2.2	0.5	-1.6	3.8	81.9	57	02
	26.11.1999		-2.7	-6.3	3.3	-0.1	-2.3	3.3	79.1	57	
	27.11.1999		-2.5	-7.0	4.6	-0.2	-2.6	3.2	78.6	56	
	28.11.1999		-1.6	-6.2	6.3	-0.2	-2.6	3.2	73.9	54	
	29.11.1999		-0.8	-5.0	7.7	0.2	-2.0	4.0	76.5	55	
	30.11.1999		-1.7	-6.4	5.7	0.6	-1.4	3.5	81.0	50	
01.12.1999	-0.6	-4.6	5.9	0.6	-1.2	3.8	71.7	47			
1999/2000	12.01.2000	18	-3.5	-6.8	2.0	-0.6	-2.6	1.5	77.2	55	03 / 04
	13.01.2000		-4.7	-8.5	2.4	-2.0	-4.2	0.2	73.5	56	
	14.01.2000		-5.2	-9.5	1.8	-2.7	-5.4	-0.3	71.0	56	
	15.01.2000		-4.5	-8.8	1.8	-2.2	-4.5	0.2	81.9	54	
	16.01.2000		-3.0	-4.9	-1.7	-0.9	-1.7	-0.3	87.1	16	
	17.01.2000		-3.2	-6.5	0.3	-0.6	-1.6	1.3	74.0	55	
	18.01.2000		-2.0	-9.0	4.8	-1.4	-4.0	1.7	81.8	38	
	19.01.2000		-1.1	-5.0	4.8	-0.6	-2.7	2.5	77.7	60	
	20.01.2000		-2.9	-5.9	1.5	-0.7	-2.7	1.8	74.1	60	
	21.01.2000		-2.9	-7.5	1.5	-0.6	-2.3	2.2	73.9	57	
	22.01.2000		-4.3	-8.2	-0.5	-1.6	-3.7	-0.5	85.9	23	
	23.01.2000		-0.1	-1.2	1.8	0.0	-0.8	1.7	89.3	42	
	24.01.2000		-2.3	-4.6	0.4	-0.4	-1.2	1.3	85.5	45	
	25.01.2000		-4.7	-8.1	-0.8	-0.8	-2.2	1.9	68.6	69	
26.01.2000	-7.6	-11.2	-1.1	-3.0	-5.8	-0.2	70.3	70			
27.01.2000	-6.8	-11.2	0.2	-3.2	-6.2	0.1	72.3	72			
28.01.2000	-5.7	-10.5	1.1	-2.9	-5.6	0.0	70.7	57			
29.01.2000	-3.0	-7.7	0.6	-1.6	-3.3	0.0	80.2	27			
2005/2006*	02.01.2006	16	-0.6	-3.1	1.5	-0.1	-0.6	1.4	65.2	20	04
	03.01.2006		-1.8	-4.0	1.2	-0.8	-1.6	0.3	77.5	31	
	04.01.2006		-3.2	-6.8	-0.3	-0.9	-2.5	0.3	79.5	47	
	05.01.2006		-5.2	-8.7	0.1	-2.9	-4.9	-0.9	80.6	48	
	06.01.2006		-4.3	-7.6	0.4	-3.1	-5.0	-0.9	72.9	43	
	07.01.2006		-5.2	-9.2	0.1	-3.4	-5.3	-1.2	80.7	37	
	08.01.2006		-3.3	-6.1	2.6	-2.3	-4.2	-0.1	82.0	48	
	09.01.2006		-6.0	-9.6	0.2	-3.4	-5.6	-0.9	85.7	49	
	10.01.2006		-6.8	-11.1	-0.5	-4.2	-6.6	-1.2	79.8	50	
	11.01.2006		-7.5	-12.0	-0.8	-4.9	-7.4	-1.5	77.6	52	
	12.01.2006	-5.6	-10.3	-0.3	-3.9	-6.1	-1.2	74.2	44		
	13.01.2006	-5.9	-10.6	1.6	-4.1	-6.8	-1.0	76.2	52		
	14.01.2006	-7.0	-11.3	0.2	-4.5	-7.2	-1.3	79.0	53		
	15.01.2006	-7.5	-12.4	0.4	-5.0	-7.9	-1.5	77.9	54		
	16.01.2006	-6.7	-11.7	-2.2	-5.0	-7.7	-2.7	74.4	28		
	17.01.2006	-1.1	-3.5	1.3	-1.8	-3.1	-0.5	75.8	23		
	22.01.2006	-0.4	-3.8	5.0	0.3	-2.0	4.3	73.2	63	01	
23.01.2006	-3.6	-6.8	1.9	-1.1	-3.4	2.1	79.7	63			
24.01.2006	-5.0	-9.0	0.9	-2.2	-4.8	0.9	76.1	64			
25.01.2006	-5.0	-9.2	1.1	-2.7	-5.1	0.4	73.4	64			
26.01.2006	-4.5	-8.0	0.5	-2.6	-4.6	-0.1	74.7	52			
27.01.2006	-1.2	-6.2	4.7	-1.5	-3.4	1.3	58.9	44			
2006/2007*	19.12.2006	12	-0.7	-4.1	3.4	2.0	0.3	4.3	80.4	43	03
	20.12.2006		-2.9	-5.5	2.1	0.1	-1.5	2.1	85.6	42	
	21.12.2006		-3.8	-6.6	1.3	-0.9	-2.6	0.9	88.9	41	
	22.12.2006		-4.4	-7.9	1.4	-1.8	-3.7	0.0	88.3	39	
	23.12.2006		-4.9	-9.4	1.1	-2.3	-4.5	-0.2	88.3	41	
	24.12.2006		-4.6	-8.7	2.0	-2.5	-4.6	-0.2	91.1	42	
	25.12.2006		-6.0	-8.6	-3.1	-2.8	-4.5	-0.8	94.4	21	
	26.12.2006		-4.8	-8.5	1.5	-3.0	-5.2	-0.3	93.0	41	
	27.12.2006		-3.0	-7.8	5.5	-2.2	-4.5	0.6	85.3	44	
	28.12.2006		-2.6	-7.4	4.3	-1.9	-4.2	0.1	77.4	40	
	29.12.2006	-2.6	-7.3	4.5	-1.8	-4.0	0.4	72.9	45		
	30.12.2006	-1.0	-6.4	5.5	-1.1	-3.6	1.4	71.0	42		
	24.01.2007	10	-2.2	-4.4	0.2	1.3	-0.1	4.3	79.4	58	02
	25.01.2007		-4.5	-6.4	-0.7	-0.1	-1.8	2.3	74.2	62	
26.01.2007	-5.0		-8.3	-0.8	-1.1	-3.2	1.6	78.3	56		
27.01.2007	-3.2		-7.3	2.5	-0.6	-2.7	2.5	75.8	65		
28.01.2007	-2.2		-6.1	4.6	-0.1	-2.7	4.4	80.2	71		
29.01.2007	-2.5		-6.9	3.5	0.1	-2.5	3.7	84.2	59		
30.01.2007	-1.1		-5.9	6.2	0.6	-2.4	5.5	79.8	73		
31.01.2007	-0.5		-4.8	6.8	1.4	-1.6	6.2	82.2	74		
01.02.2007	-1.1	-5.2	5.3	1.5	-1.1	6.0	86.7	66			
02.02.2007	-0.4	-4.3	6.0	1.9	-0.9	6.9	85.7	72			

* Enrobé drainant

Tableau 5: Exemples de périodes de froid prolongé.

5.4.1 Exemple n° 01

L'exemple n° 01 s'intéresse à deux périodes de 6 journées (du 22.12.1994 au 27.12.1994 et du 22.01.2006 au 27.01.2006). Il y a une bonne correspondance entre les deux périodes pendant l'intervalle du 22.12.1994 à 18h, respectivement du 22.01.2006 à 18h, et le 26.12.1994 à 18h, respectivement le 26.01.2006 à 18h. Les caractéristiques météorologiques de ces intervalles sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Température moyenne de l'air de -4.7°C et températures max, respectivement min, de 0.8°C , respectivement -8.4°C . La température n'est inférieure à 0°C que pendant 4 heures. L'humidité relative moyenne est de 80% et l'ensoleillement moyen est de 44W/m^2 sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) se situe entre 110W/m^2 et 130W/m^2 .
- Enrobé drainant : Température moyenne de l'air de -4.4°C et des températures max, respectivement min, de 1.9°C , respectivement -9.2°C . La température est inférieure à 0°C pendant 12 heures. L'humidité relative moyenne est de 76% et l'ensoleillement moyen est de 60W/m^2 sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) se situe entre 140W/m^2 et 170W/m^2 .

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid prolongé - Exemple n° 01**

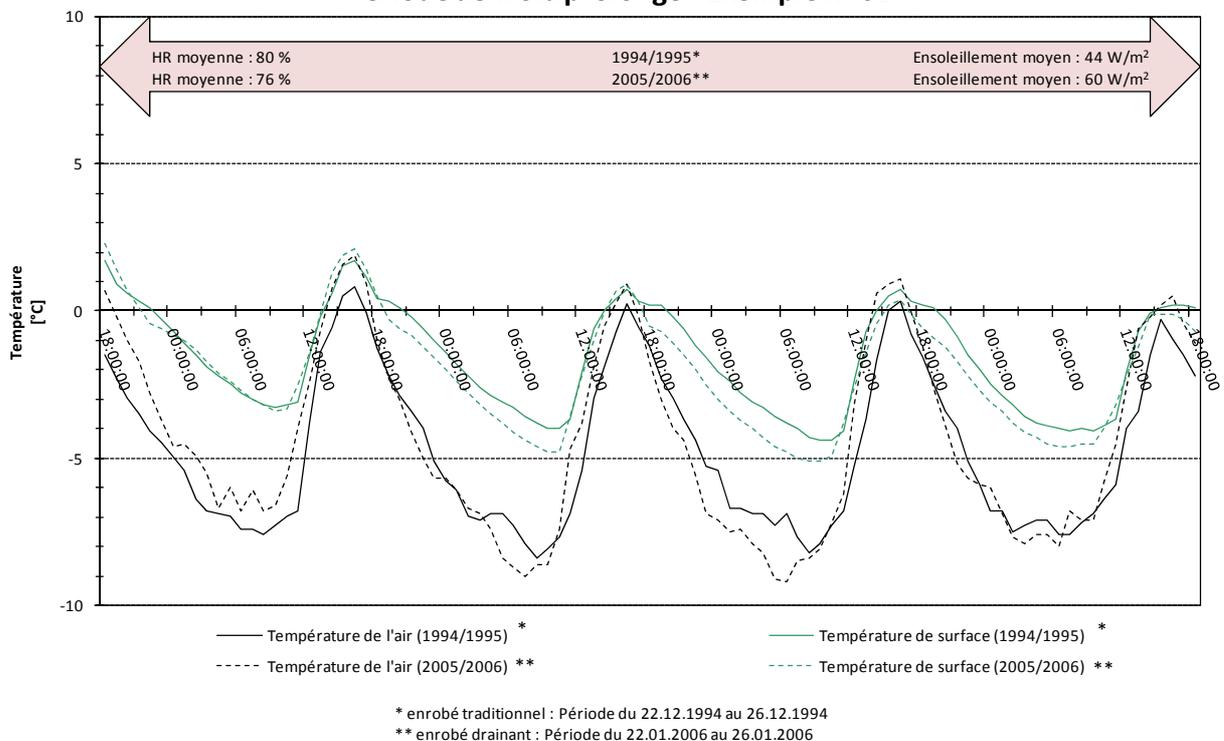


Figure 19: Période de froid prolongé – Exemple n° 01.

Les conditions météorologiques des deux périodes comparées sont très proches. Seulement l'ensoleillement est légèrement supérieur pour le cas de l'enrobé drainant. Au niveau du comportement des revêtements il peut être constaté que la température de surface des deux types d'enrobé sont très proches. Lors des périodes d'ensoleillement, l'enrobé drainant a une température de surface identique, voir supérieure, à l'enrobé traditionnel, alors que l'ensoleillement pour le premier cas est supérieur. Lors des phases sans ensoleillement, l'enrobé drainant est légèrement plus froid avec une différence de la température de la surface inférieure à 1°C . Les températures de surface des deux types d'enrobé sont très proches de la température de l'air pendant les journées.

La température du sol pour l'enrobé traditionnel est supérieure à celle de l'enrobé drainant. Cette différence varie entre 1 et 2°C . Ce phénomène peut expliquer en partie la différence des températures de surface, le sol jouant un rôle de réservoir de chaleur. La réactivité thermique est moins marquée pour les températures du

sol à profondeur élevée, comparée aux températures de surface. De même il peut être constaté que les pics des températures du sol à profondeur élevée sont décalés par rapport aux pics des températures de surface. Ceci indique que le transfert de chaleur atmosphère-sol n'est pas instantané.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid prolongé - Exemple n° 01**

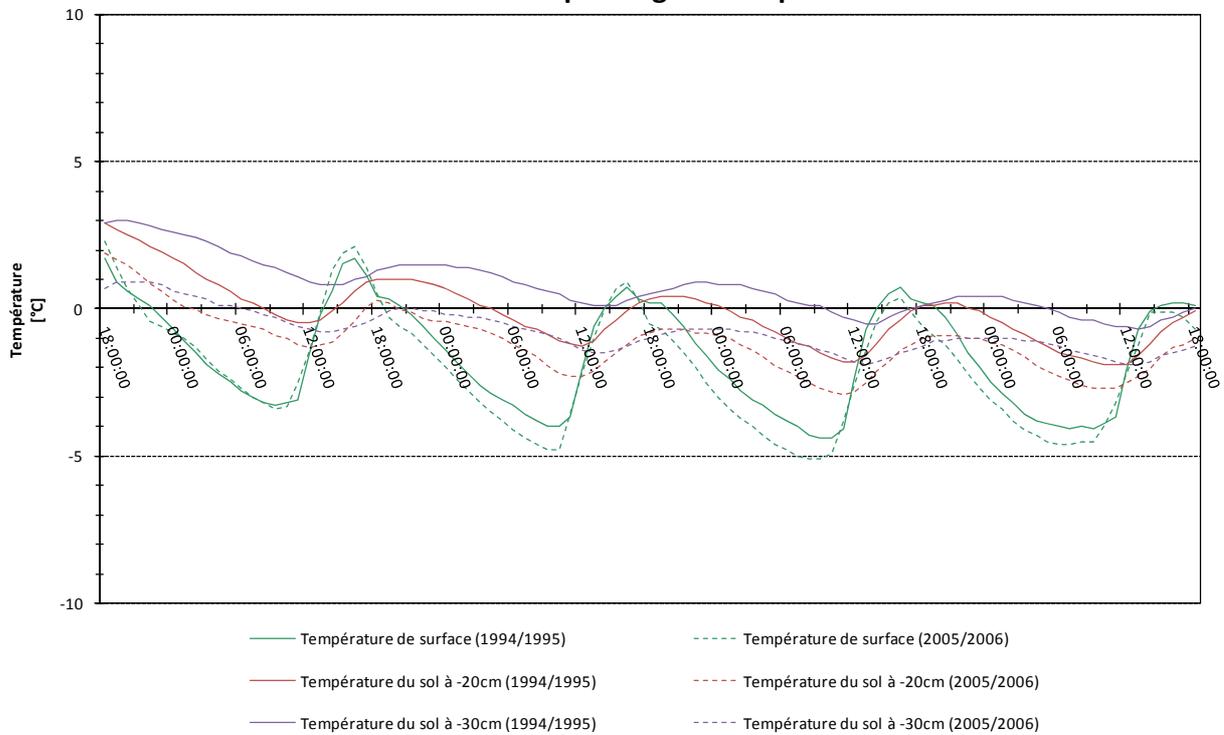


Figure 20: Période de froid prolongé – Exemple n° 01 – Températures du sol.

5.4.2 Exemple n° 02

L'exemple n° 02 s'intéresse à deux périodes de 7 et 10 journées (du 25.11.1999 au 01.12.1999 et du 24.01.2007 au 02.02.2007). Il y a une bonne correspondance entre les deux périodes pendant l'intervalle du 25.11.1999 à 8h, respectivement du 27.01.2007 à 8h, et le 02.12.1999 à 23h, respectivement le 03.02.2007 à 23h. Les caractéristiques météorologiques de ces intervalles sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Température moyenne de l'air de -1.3°C et températures max, respectivement min, de 7.7°C , respectivement -7°C . La température présente des hausses/chutes journalières importantes pouvant atteindre 14°C . L'humidité relative moyenne est de 77% et l'ensoleillement moyen est de $56\text{W}/\text{m}^2$ sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) se situe entre $130\text{W}/\text{m}^2$ et $150\text{W}/\text{m}^2$.
- Enrobé drainant : Température moyenne de l'air de -1.1°C et des températures max, respectivement min, de 7.9°C , respectivement -6.9°C . La température présente des hausses/chutes journalières importantes pouvant atteindre 12.5°C . L'humidité relative moyenne est de 82% et l'ensoleillement moyen est de $72\text{W}/\text{m}^2$ sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) se situe entre $160\text{W}/\text{m}^2$ et $200\text{W}/\text{m}^2$.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid prolongé - Exemple n° 02**

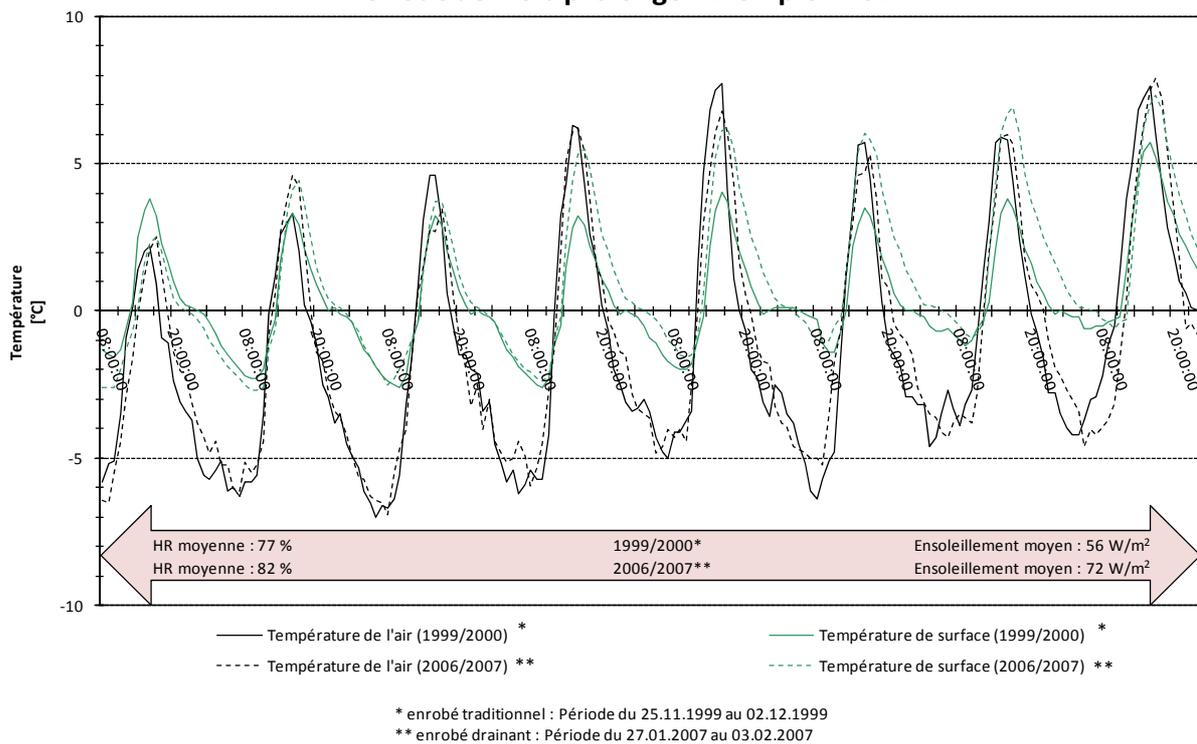


Figure 21: Période de froid prolongé – Exemple n° 02.

Les conditions météorologiques des deux périodes comparées sont proches, mais se distinguent par des ensoleillements légèrement supérieurs pour le cas de l'enrobé drainant. La température de surface des deux types d'enrobé est très proche pendant les matinées, mais se sépare par la suite à cause de l'ensoleillement. Lors des périodes d'ensoleillement, la température de surface de l'enrobé drainant augmente plus rapidement et à des valeurs plus élevées. Lors des phases sans ensoleillement, les deux enrobés se refroidissent à une vitesse proche. La température de surface des enrobés drainants s'approche d'avantage aux températures de l'air.

La température du sol pour l'enrobé drainant s'adapte plus rapidement aux changements de la température de l'air. L'enrobé drainant semble transférer la chaleur venant de l'ensoleillement plus facilement au sol. A température d'air quasiment identique, l'ensoleillement supplémentaire qui agit sur l'enrobé drainant est utilisé pour réchauffer à moyen terme le sol. Les pics des températures du sol à différentes profondeurs sont de nouveau décalés par rapport aux pics des températures de surface et de l'air.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid prolongé - Exemple n° 02**

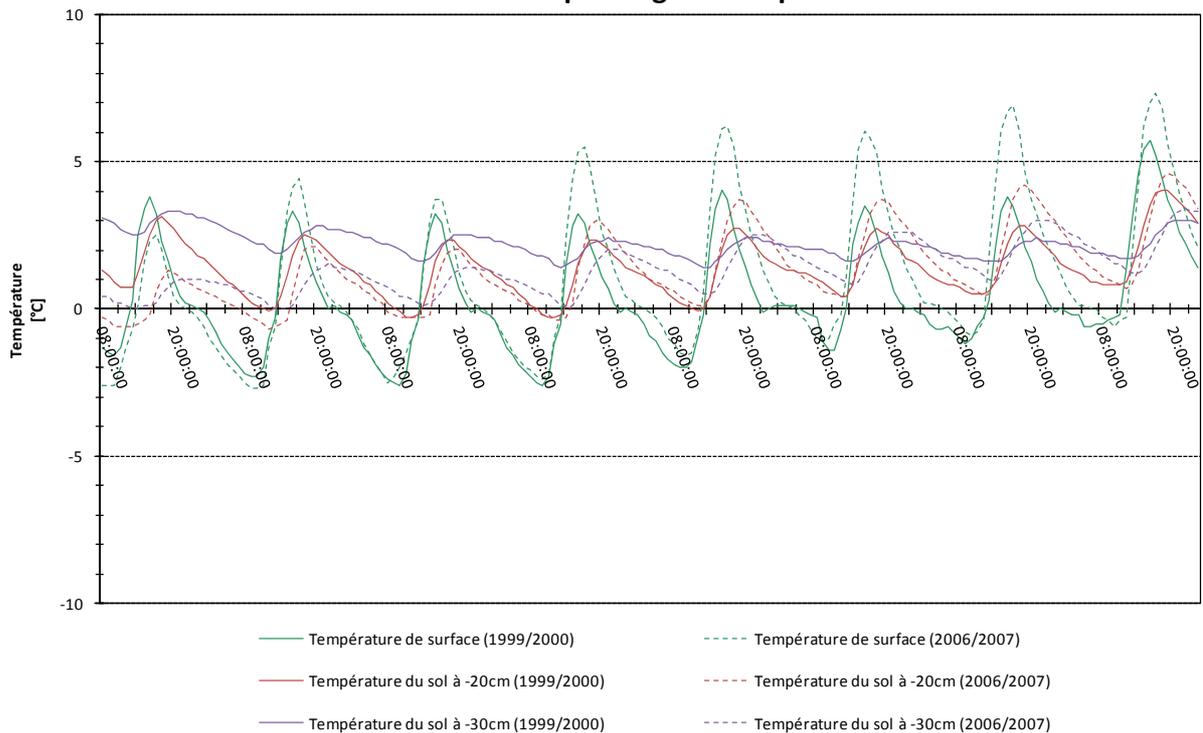


Figure 22: Période de froid prolongé – Exemple n° 02 – Températures du sol.

5.4.3 Exemple n° 03

L'exemple n° 03 s'intéresse à deux périodes de 18 et 12 journées (du 12.01.2000 au 29.01.2000 et du 19.12.2006 au 30.12.2006). Il y a une bonne correspondance entre les deux périodes pendant l'intervalle du 11.01.2000 à 18h, respectivement du 20.12.2006 à 18h, et le 15.01.2000 à 23h, respectivement le 24.12.2006 à 23h. Les caractéristiques météorologiques de ces intervalles sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Température moyenne de l'air de -4.3°C et températures max, respectivement min, de 2.4°C , respectivement -9.5°C . La température peut atteindre des valeurs très basses et n'est supérieure à 0°C que pendant 18 heures. L'humidité relative moyenne est de 76% e l'ensoleillement moyen est de $52\text{W}/\text{m}^2$ sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) reste relativement stable (entre $140\text{W}/\text{m}^2$ et $150\text{W}/\text{m}^2$).
- Enrobé drainant : Température moyenne de l'air de -4.3°C et des températures max, respectivement min, de 2°C , respectivement -9.4°C . La température peut atteindre des valeurs très basses et n'est supérieure à 0°C que pendant 13 heures. L'humidité relative moyenne est de 89% et l'ensoleillement moyen est de $39\text{W}/\text{m}^2$ sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) reste très stable (environ $110\text{W}/\text{m}^2$).

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid prolongé - Exemple n° 03**

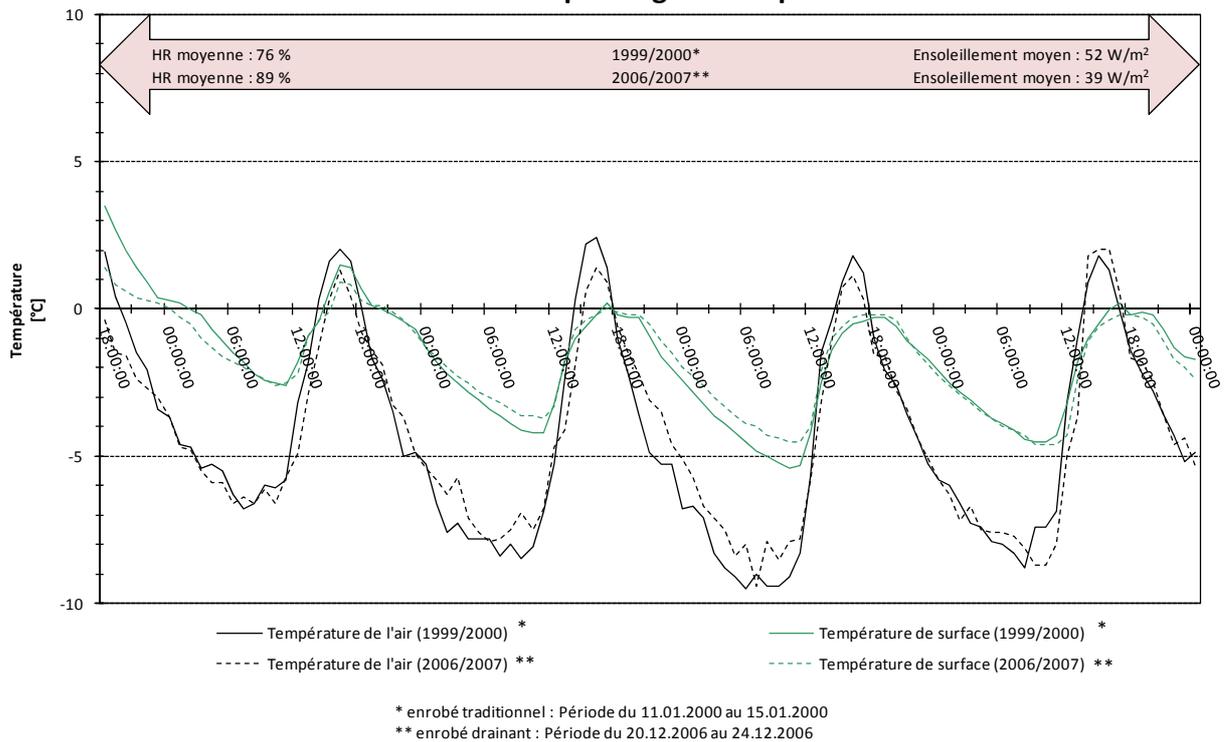


Figure 23: Période de froid prolongé – Exemple n° 03.

Les conditions météorologiques des deux périodes comparées sont proches, mais se distinguent par des humidités relatives supérieures pour le cas de l'enrobé drainant. La température de surface des deux types d'enrobé est très proche pour cette période examinée. Lors des périodes d'ensoleillement, qui sont de faible intensité, les températures de surface des deux types d'enrobé sont presque identiques. Les hausses et chutes de température de surface impliquent des variations très proches pour les deux enrobés.

Les températures du sol sont très proches pour les deux types d'enrobé. A une profondeur de 30cm de la surface, les températures du sol tournent autour de 0°C que ce soit pour les enrobés drainants ou traditionnels. Lors de températures du sol et de conditions météorologiques très proches, les températures de surface présentent donc très peu de différences.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
Période de froid prolongé - Exemple n° 03**

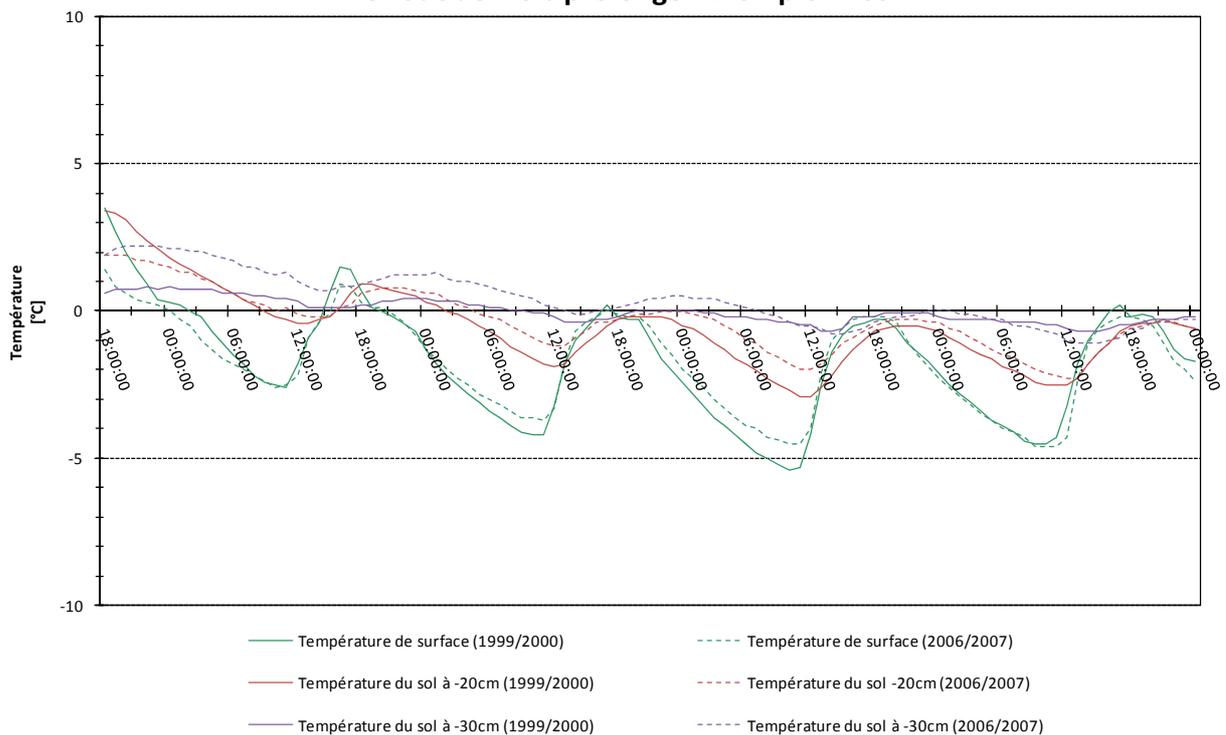


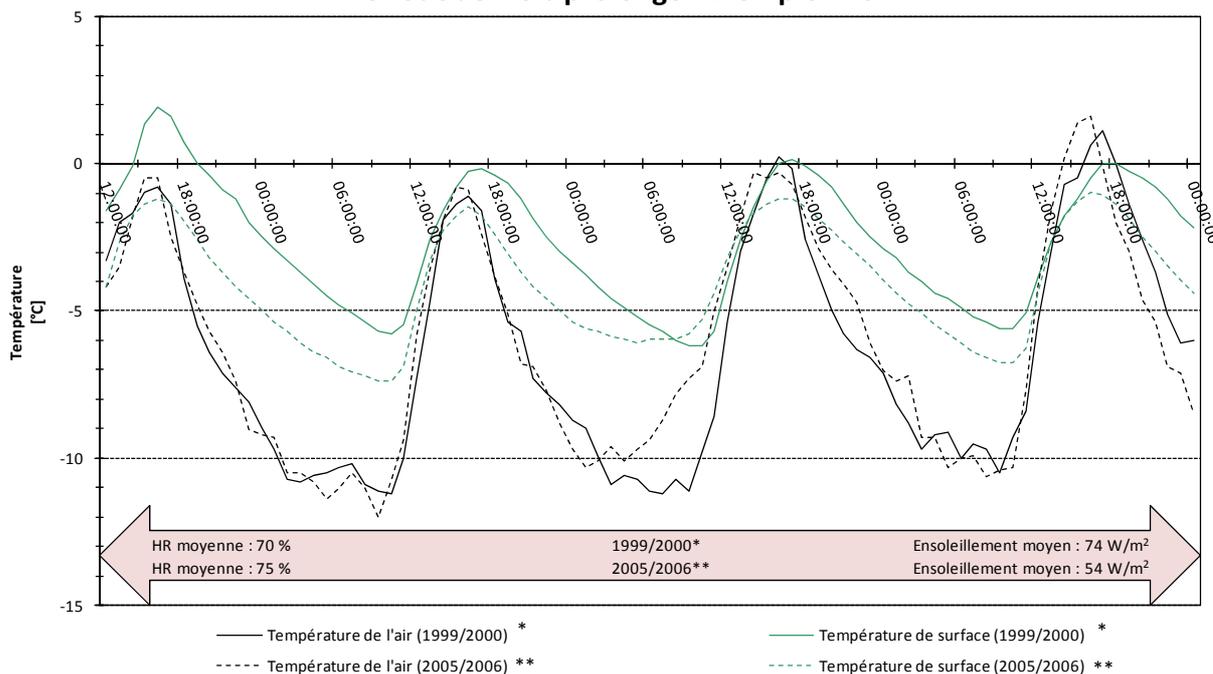
Figure 24: Période de froid prolongé – Exemple n° 03 – Températures du sol.

5.4.4 Exemple n° 04

L'exemple n° 04 s'intéresse à deux périodes de 18 et 16 journées (du 12.01.2000 au 29.01.2000 et du 02.01.2006 au 17.01.2006). Il y a une bonne correspondance entre les deux périodes pendant l'intervalle du 25.01.2000 à 12h, respectivement du 10.01.2006 à 12h, et le 28.01.2000 à 23h, respectivement le 13.01.2006 à 23h. Les caractéristiques météorologiques de ces intervalles sont les suivantes :

- Enrobé traditionnel : Température moyenne de l'air de -6.3°C et températures max, respectivement min, de 1.1°C , respectivement -11.2°C . La température peut atteindre des valeurs très basses et n'est supérieure à 0°C que pendant 4 heures. L'humidité relative moyenne est de 70% et l'ensoleillement moyen est de 74W/m^2 sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) est important pour les trois premiers jours (190W/m^2) et plus faible pour le dernier jour (150W/m^2).
- Enrobé drainant : Température moyenne de l'air de -6°C et des températures max, respectivement min, de 1.6°C , respectivement -12°C . La température peut atteindre des valeurs très basses et n'est supérieure à 0°C que pendant 3 heures. L'humidité relative moyenne est de 75% et l'ensoleillement moyen est de 54W/m^2 sur toute la période. L'ensoleillement journalier moyen (9h à 18h) varie entre 120W/m^2 et 140W/m^2 .

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de froid prolongé - Exemple n° 04**



* enrobé traditionnel : Période du 25.01.2000 au 28.01.2000
 ** enrobé drainant : Période du 10.01.2006 au 13.01.2006

Figure 25: Période de froid prolongé – Exemple n° 04.

Les conditions météorologiques des deux périodes comparées sont proches, mais se distinguent par un ensoleillement supérieur pour le cas de l'enrobé traditionnel. La température de surface de l'enrobé traditionnel est supérieure à celle de l'enrobé drainant, à cause de l'ensoleillement plus fort. La température de surface est d'avantage influencé par l'ensoleillement que par les températures de l'air.

Les températures du sol suivent la même logique que les températures de surface. La température du sol pour l'enrobé traditionnel est plus élevée mais cette différence s'amenuise avec le temps (d'environ 2°C à 1°C). Le sol joue donc son rôle de réservoir de chaleur.

La recherche de situations avant/après semblables d'un point de vue météorologique a abouti à la l'analyse de plusieurs cas représentatifs dont quatre ont été choisis comme exemples. Leurs caractéristiques sont données dans la figure ci-après (Tableau 6).

hiver (1.10. au 30.40)	date			t _{air}		t _{surf} (- 5 cm) [°C]	Humidité relative [%]	Ensoleil- lement [W/m ²]	Exemple	
	jour	heure	longueur période [h]	t _{air} [°C]	diff. t _{air} [°C]					
1993/1994	12.02.1994	16h à 17h	17	3.4	10.8	9.8	44.3	244	03	
	13.02.1994	8h à 9h		-7.4		-1.1	75.6	0		
1998/1999	16.01.1999	6h à 7h	12	-5.9	11.6	-1.3	90.5	0	01	
	16.01.1999	17h à 18h		5.7		3.9	58.9	50		
1999/2000	15.01.2000	8h à 9h	8	-8.8	10.6	-4.4	88.7	0	02	
	15.01.2000	15h à 16h		1.8		-0.5	68.1	208		
	27.01.2000	16h à 17h	18	0.2		0.0	49.2	181	04	
	28.01.2000	9h à 10h		-10.5		-5.6	85.0	5		
2005/2006*	09.01.2006	16h à 17h	17	0.2	11.3	-0.9	57.3	57	04	
	10.01.2006	8h à 9h		-11.1		-6.5	92.3	0		
	11.02.2006	16h à 17h	17	3.5		7.0	45.5	159	03	
	12.02.2006	8h à 9h		-7.4		-2.3	82.5	2		
2006/2007*	24.12.2006	10h à 11h	6	-8.7	10.7	-4.6	96.9	4	02	
	24.12.2006	15h à 16h		2.0		-0.6	63.8	197		
	30.12.2006	8h à 9h	10	-6.4		11.9	-3.4	86.4	0	01
	30.12.2006	17h à 18h		5.5		1.4	50.6	29		

* Enrobé drainant

Tableau 6: Exemples de périodes de variation rapide de la température.

5.5.1 Exemple n° 01

L'exemple n° 01 correspond à une variation positive de la température de l'air. Il possède les caractéristiques météorologiques suivantes :

- Enrobé traditionnel : Journée du 16.01.1999 avec une température moyenne de l'air de -0.9°C. Une hausse de température de 11.6°C est enregistrée entre 6-7h (-5.9°C) et 17-18h (5.7°C). L'humidité relative journalière moyenne est de 79%, l'humidité à 6-7h est de 91% et à 17-18h de 59%. L'ensoleillement moyen est de 155W/m² entre 9h et 18h.
- Enrobé drainant : Journée du 30.12.2006 avec une température moyenne de l'air de -1°C. Une hausse de température de 11.9°C est enregistrée entre 8-9h (-6.4°C) et 17-18h (5.5°C). L'humidité relative journalière moyenne est de 71%, l'humidité à 8-9h est de 86% et à 17-18h de 51%. L'ensoleillement moyen est de 110W/m² entre 9h et 17h.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 01**

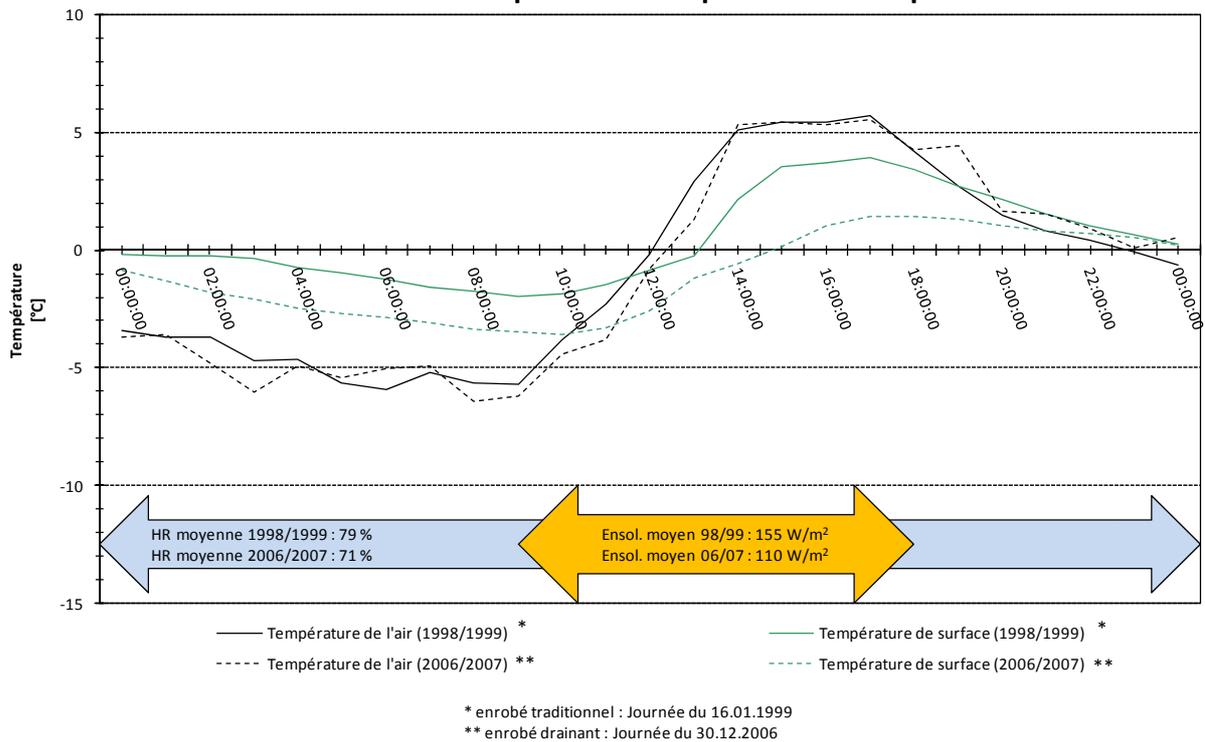


Figure 27: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 01.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées sont assez proches, seulement l'ensoleillement est plus élevé pour l'enrobé traditionnel. Au niveau du comportement des revêtements il peut être constaté que la température de surface de l'enrobé drainant est toujours inférieure à la température de l'enrobé traditionnel. Cette différence monte jusqu'à 3.4°C lors de la journée. L'ensoleillement plus marqué pour l'enrobé traditionnel se traduit par une augmentation plus marquée de la température de surface de celui-ci.

La hausse de la température de l'air de 11.6°C pour l'enrobé traditionnel et de 11.9°C pour l'enrobé drainant est accompagnée d'une hausse de la température de surface de 5.9°C pour l'enrobé traditionnel et de 5°C pour l'enrobé drainant.

Les températures du sol indiquent une différence constante entre les deux types d'enrobé quelque soit la profondeur. La température du sol pour l'enrobé traditionnel est supérieure à la température de l'enrobé drainant (environ 2°C). La variation rapide de la température de l'air ne se répercute pas sur les températures du sol.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 01**

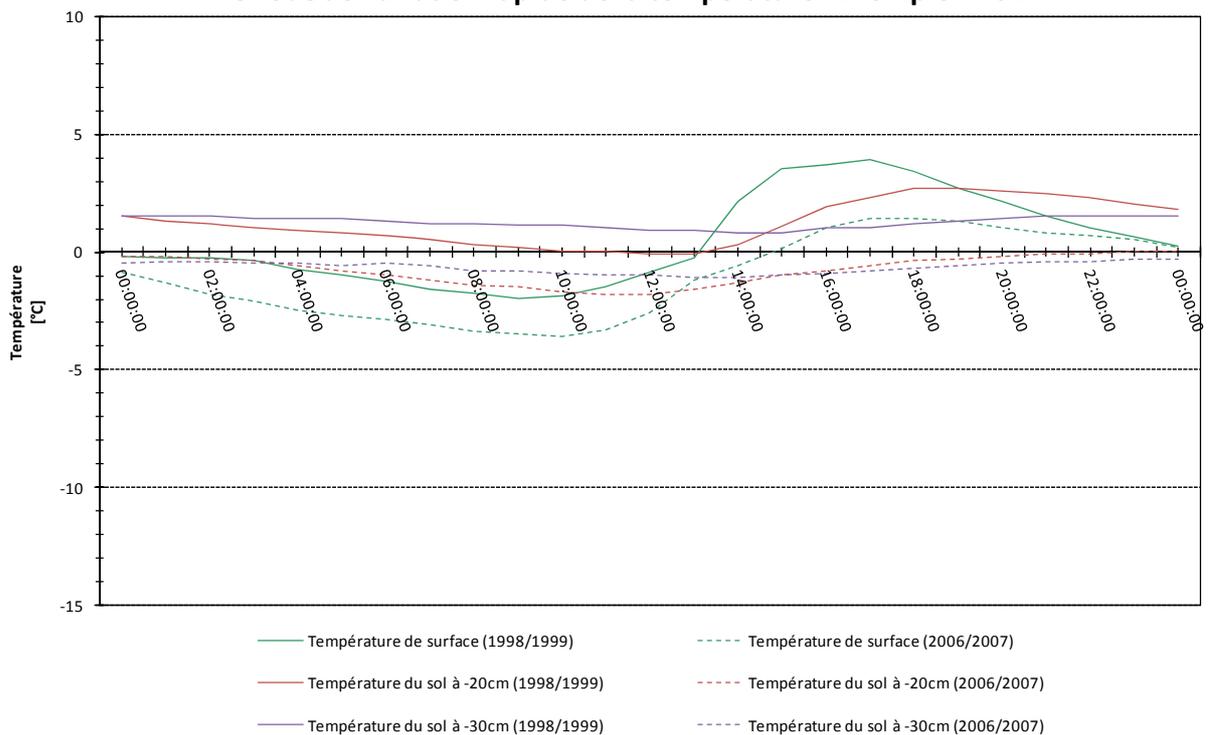


Figure 28: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 01 – Températures du sol.

5.5.2 Exemple n° 02

L'exemple n° 02 correspond à une variation positive de la température de l'air. Il possède les caractéristiques météorologiques suivantes :

- Enrobé traditionnel : Journée du 15.01.2000 avec une température moyenne de l'air de -4.5°C. Une hausse très rapide de température de 10.6°C est enregistrée entre 8-9h (-8.8°C) et 15-16h (1.8°C). L'humidité relative journalière moyenne est de 82%, l'humidité à 8-9h est de 89% et à 15-16h de 68%. L'ensoleillement moyen est de 140W/m² entre 9h et 17h.
- Enrobé drainant : Journée du 24.12.2006 avec une température moyenne de l'air de -4.6°C. Une hausse très rapide de température de 10.7°C est enregistrée entre 10-11h (-8.7°C) et 15-16h (2.0°C). L'humidité relative moyenne est de 91%, l'humidité à 10-11h est de 97% et à 15-16h de 64%. L'ensoleillement moyen est de 110W/m² entre 9h et 17h.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 02**

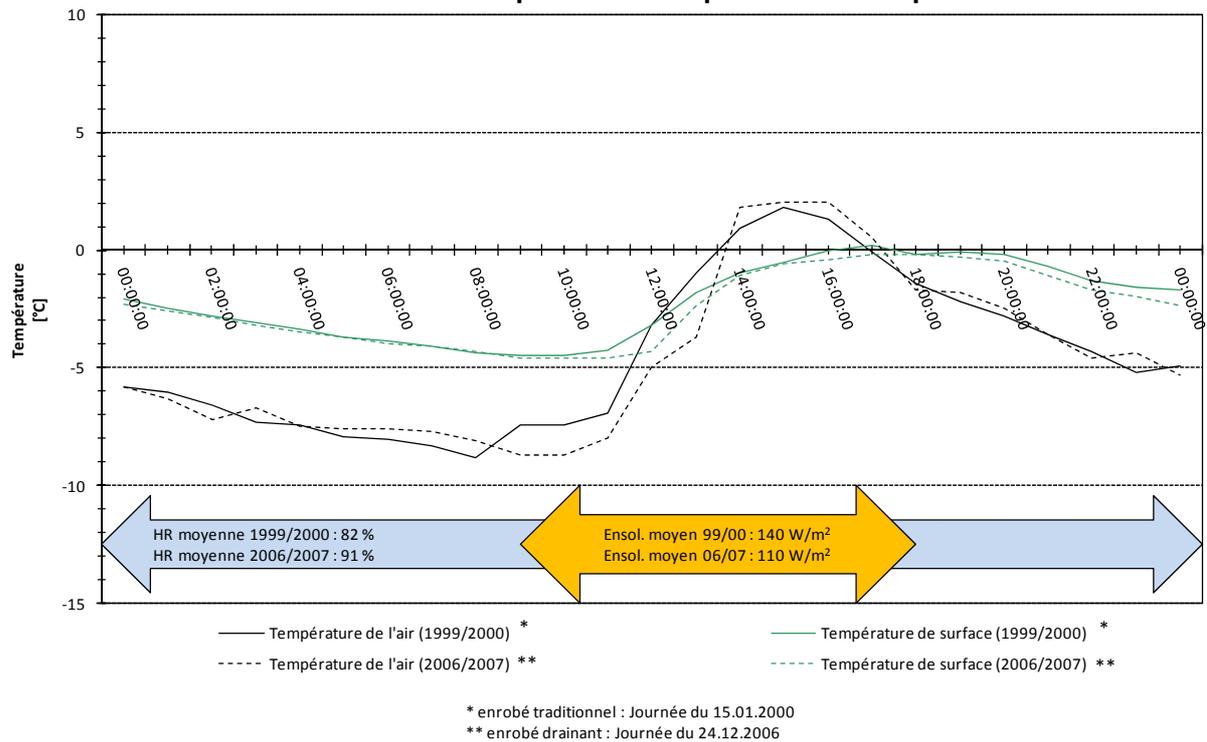


Figure 29: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 02.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées sont très proches, seulement l'ensoleillement est légèrement plus élevé pour l'enrobé traditionnel. Les températures de surface des deux types d'enrobé sont quasiment identiques. L'enrobé traditionnel n'atteint pas des valeurs plus élevées même avec un ensoleillement supérieur.

La hausse de la température de l'air de 10.6°C pour l'enrobé traditionnel et de 10.7°C pour l'enrobé drainant est accompagnée d'une hausse de la température de surface de 4.7°C pour l'enrobé traditionnel et de 4.4°C pour l'enrobé drainant.

Les températures du sol sont quasiment identiques quelque soit la profondeur. Pour une profondeur de plus en plus élevée, la variation journalière diminue. A 30cm de la surface, la température du sol est presque constante sur toute la journée (autour de 0°C). A conditions météorologiques et température du sol quasiment identiques, le comportement des deux types d'enrobé est donc très proche.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 02**

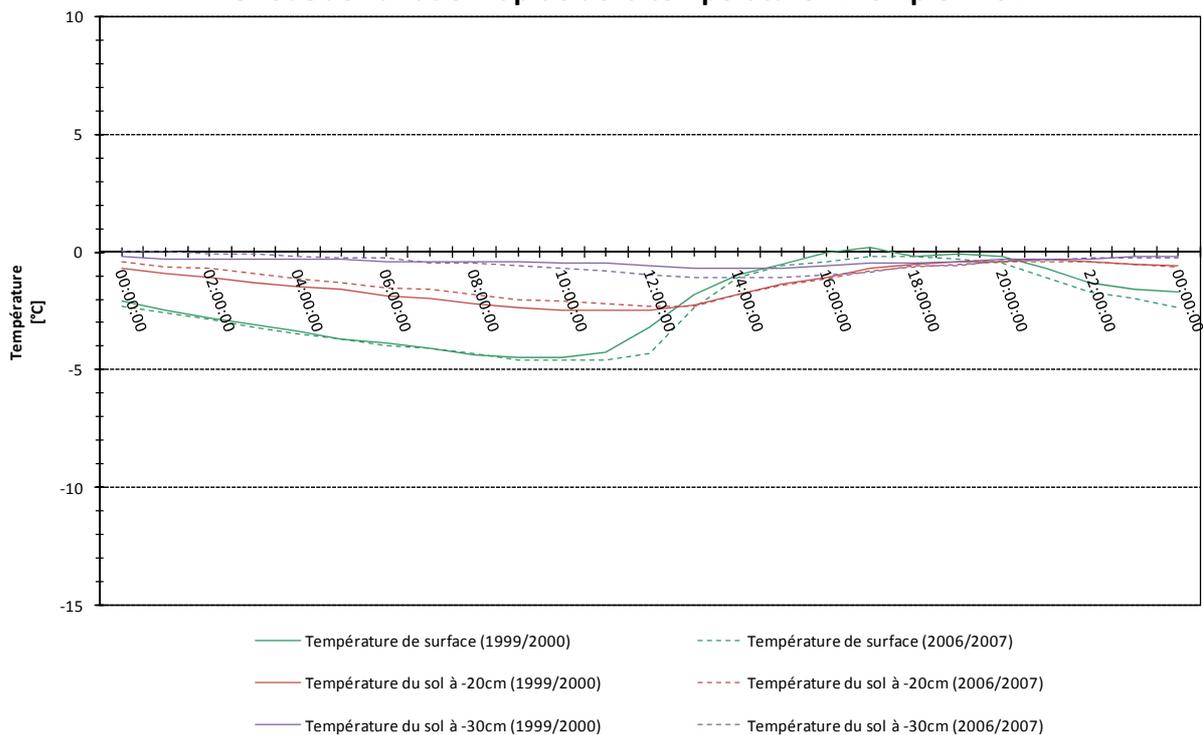


Figure 30: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 02 – Températures du sol.

5.5.3 Exemple n° 03

L'exemple n° 03 correspond à une variation négative de la température de l'air. Il possède les caractéristiques météorologiques suivantes :

- Enrobé traditionnel : Nuit du 12.02.1994 au 13.02.1994 avec une température moyenne de l'air de -2.4°C (de 12h à 12h). Une chute de température de 10.8°C est enregistrée entre 16-17h (3.4°C) et 8-9h du lendemain (-7.4°C). L'humidité relative moyenne est de 60% sur cette période, l'humidité à 16-17h est de 44% et à 8-9h le lendemain de 76%. L'ensoleillement moyen (9h à 18h) est de 270W/m² pour le 12.02.1994 et de 260W/m² pour le 13.02.1994.
- Enrobé drainant : Nuit du 11.02.2006 au 12.02.2006 avec une température moyenne de l'air de -2.4°C (de 12h à 12h). Une chute de température de 10.9°C est enregistrée entre 16-17h (3.5°C) et 8-9h du lendemain (-7.4°C). L'humidité relative moyenne est de 65% sur cette période, l'humidité à 16-17h est de 46% et à 8-9h le lendemain de 83%. L'ensoleillement moyen (9h à 18h) est de 240W/m² pour le 11.02.2006 et de 220W/m² pour le 12.02.2006.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 03**

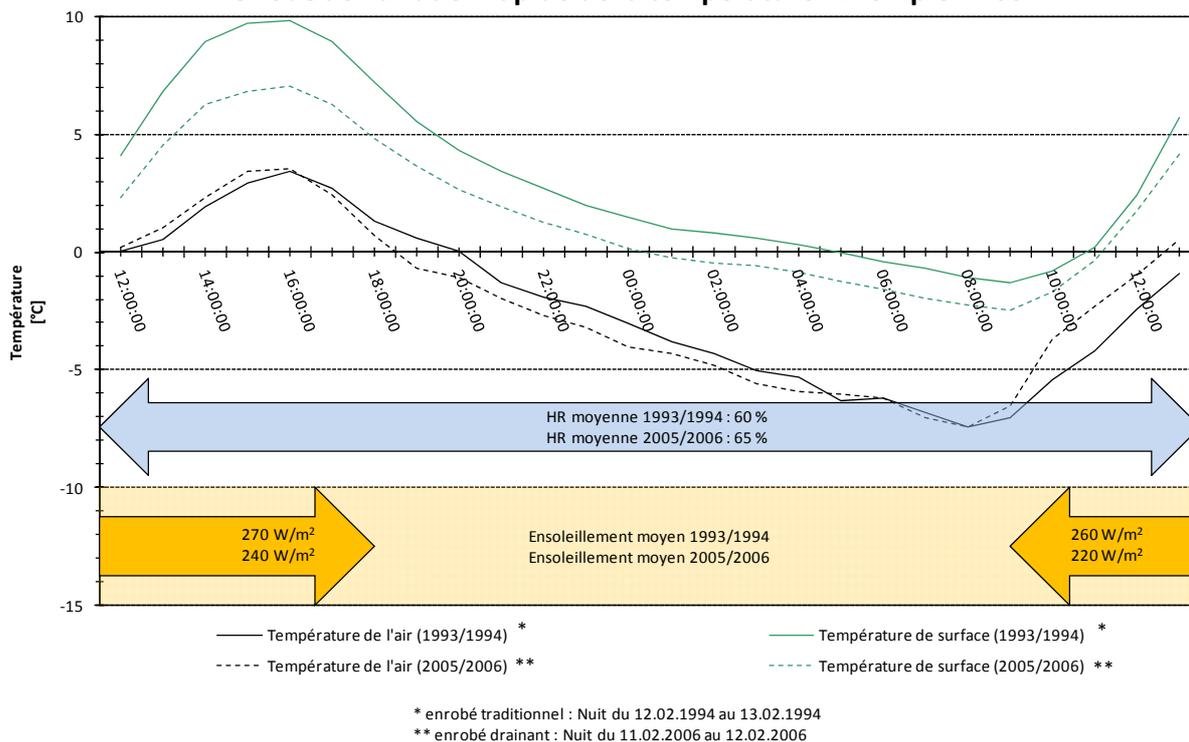


Figure 31: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 03.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées sont très proches, et sont caractérisées par des ensoleillements élevés. La température de surface de l'enrobé drainant est constamment inférieure à la température de l'enrobé traditionnel. Cette différence atteint 3°C lors de la première journée. L'ensoleillement plus marqué pour l'enrobé traditionnel pourrait être une explication pour cette différence.

La chute de la température de l'air de 10,8°C pour l'enrobé traditionnel et de 10,9°C pour l'enrobé drainant est accompagnée d'une chute plus marquée de la température de surface de 11,1°C pour l'enrobé traditionnel et de 9,5°C pour l'enrobé drainant.

Les températures du sol indiquent une différence constante d'environ 2°C quelque soit la profondeur. La température du sol pour l'enrobé traditionnel est toujours supérieure à la température de l'enrobé drainant. La température de surface de l'enrobé drainant semble se rapprocher d'avantage de la température du sol.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 03**

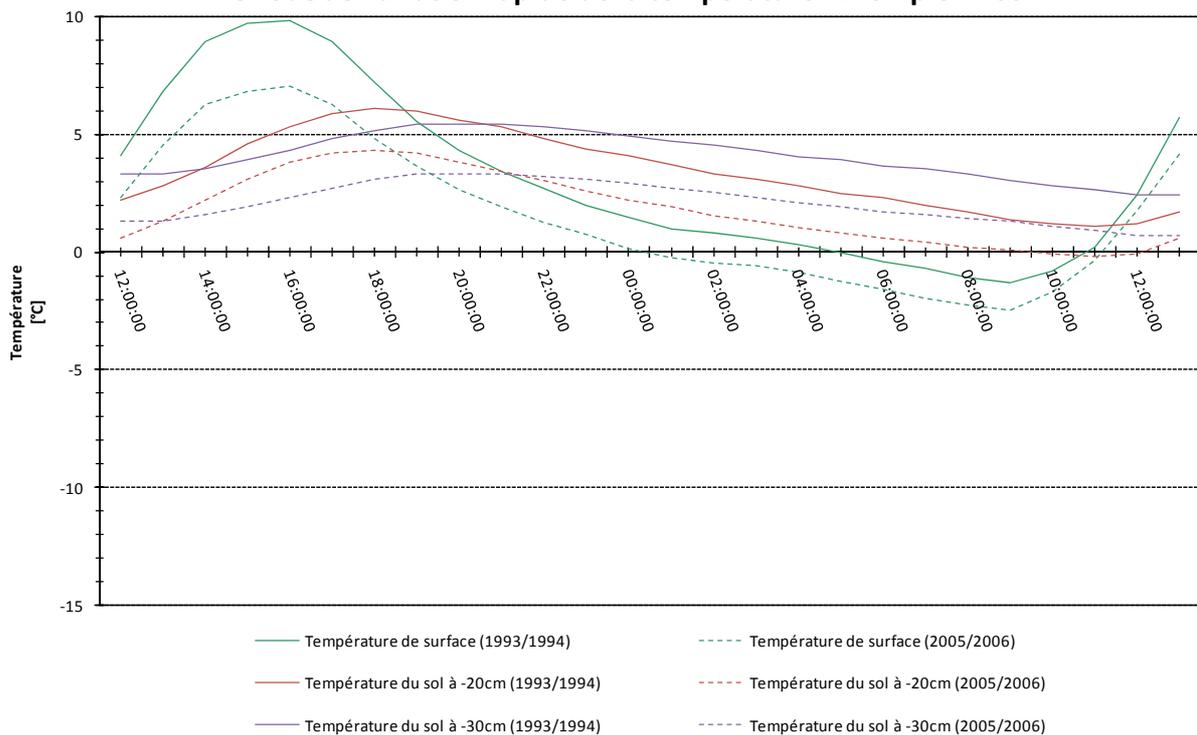


Figure 32: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 03 – Températures du sol.

5.5.4 Exemple n° 04

L'exemple n° 04 correspond à une variation négative de la température de l'air. Il possède les caractéristiques météorologiques suivantes :

- Enrobé traditionnel : Nuit du 27.01.2000 au 28.01.2000 avec une température moyenne de l'air de -6.2°C (de 12h à 12h). Une chute de température de 10.7°C est enregistrée entre 16-17h (0.2°C) et 9-10h du lendemain (-10.5°C). L'humidité relative moyenne est de 72% sur cette période, l'humidité à 16-17h est de 49% et à 9-10h le lendemain de 85%. L'ensoleillement moyen (9h à 18h) est de 190W/m² pour le 27.01.2000 et de 150W/m² pour le 28.01.2000.
- Enrobé drainant : Nuit du 09.01.2006 au 10.01.2006 avec une température moyenne de l'air de -6.4°C (de 12h à 12h). Une chute de température de 11.3°C est enregistrée entre 16-17h (0.2°C) et 8-9h du lendemain (-11.1°C). L'humidité relative moyenne est de 83% sur cette période, l'humidité à 16-17h est de 57% et à 8-9h le lendemain de 92%. L'ensoleillement moyen (9h à 18h) est de 130W/m² pour le 09.01.2006 et pour le 10.01.2006.

**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
 Période de variation rapide de la température - Exemple n° 04**

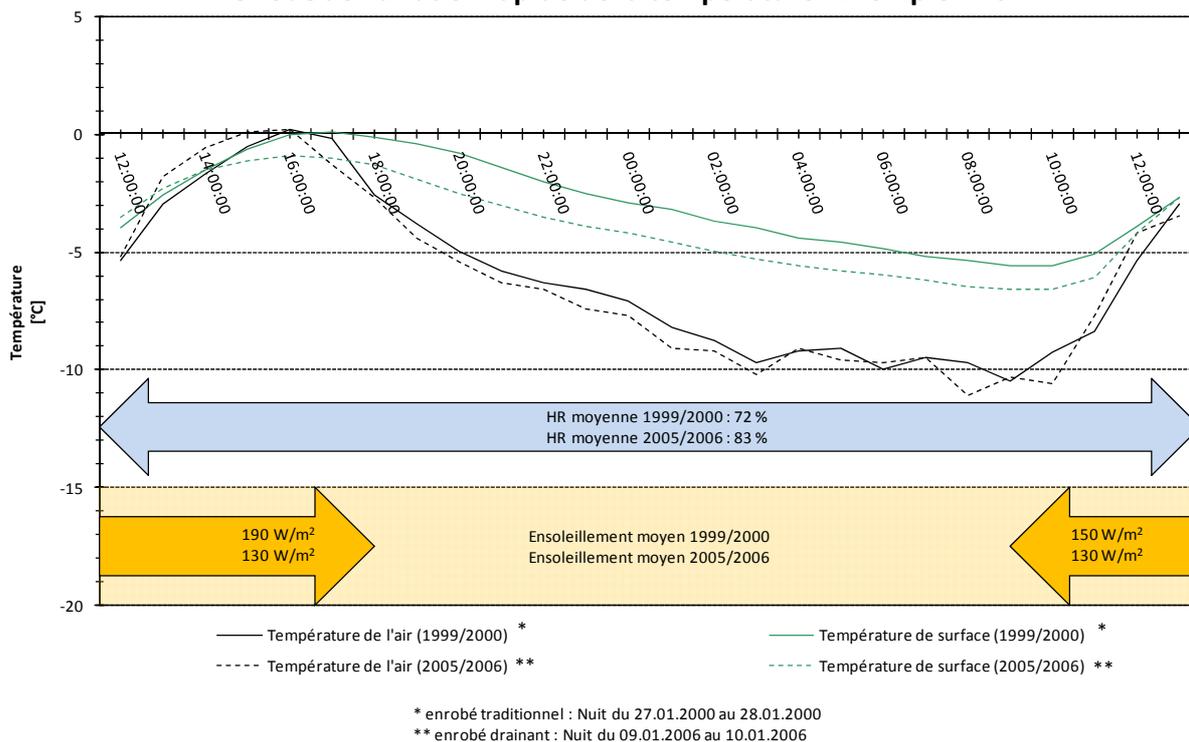


Figure 33: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 04.

Les conditions météorologiques des deux journées comparées sont assez proches, et sont caractérisées par un ensoleillement plus faible et des températures de l'air extrêmes. La température de surface de l'enrobé drainant est inférieure à la température de l'enrobé traditionnel pendant la nuit, mais s'approche de cette dernière pendant la journée. Cette différence atteint 1.7°C pendant la nuit. L'ensoleillement plus marqué pour l'enrobé traditionnel ne se traduit ici pas par une température de surface plus élevée.

La chute de la température de l'air de 10.7°C pour l'enrobé traditionnel et de 11.3°C pour l'enrobé drainant est accompagnée d'une chute de la température de surface de 5.7°C pour l'enrobé traditionnel et de 5.7°C pour l'enrobé drainant.

Les températures du sol présentent peu de changements sur la période examinée. Elles se situent entre -1°C et -4°C, avec une température de l'enrobé traditionnel qui est légèrement supérieure à celle de l'enrobé drainant (différence inférieure à 1°C).

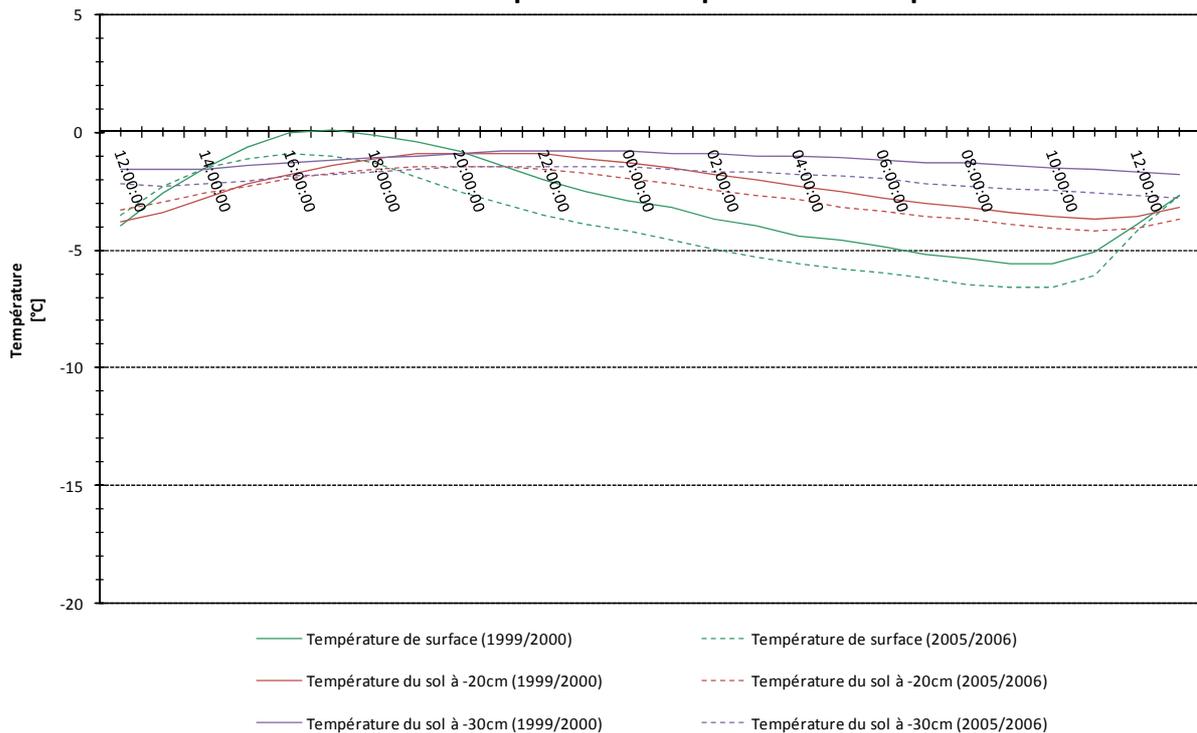
**Comparaison entre les enrobés traditionnels et les enrobés drainants :
Période de variation rapide de la température - Exemple n° 04**

Figure 34: Période de variation rapide de la température – Exemple n° 04 – Températures du sol.

5.5.5 Remarques

Les périodes de variation rapide de la température ne sont pas forcément liées à l'ensoleillement. En effet des ensoleillements moyens peuvent engendrer des variations rapides de la température de l'air sur un intervalle court. Des facteurs tels que la couverture nuageuse ou le vent interviennent à ce stade et jouent un rôle prépondérant pour ces périodes analysées.

Les hausses de températures sont plus marquées que les chutes de température. En effet, toutes les périodes de chute de température répertoriées se réalisent sur un intervalle de plus de 10h, alors que des hausses rapides peuvent se produire sur un intervalle de 6h. Ceci s'explique principalement par le facteur soleil.

Les chutes de température peuvent atteindre des valeurs très élevées si les conditions s'y prêtent. Ceci est le cas lorsqu'on passe d'une journée ensoleillée à une nuit froide, sans couverture nuageuse et avec beaucoup de vent.

La variation rapide de la température de l'air ne se répercute pas de manière concrète sur les températures du sol. Le sol présente une sensibilité thermique moins marquée et nécessite de ce fait plusieurs longues périodes pour que sa température change.

6 RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION

Les mesures météorologiques et thermiques récoltées sur le site d'Ardon (A9) depuis 15 ans ont été rassemblées et analysées de manière détaillée sur l'ensemble de la période afin d'identifier quelques événements majeurs (froid extrême, froid prolongé, variations rapides des températures). Ces données ont été utilisées pour compléter et renforcer les analyses menées dans le cadre du mandat "Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales" concernant le site de l'Arnon sur

l'autoroute A5 [1]. Sur ce sites, 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

Les données de mesure provenant de divers capteurs installés sur l'autoroute A5 ont été analysées et ont montré qu'un enrobé drainant sur pont se comporte différemment d'un enrobé identique posé sur remblai, mais que cette différence reste très faible.

Les données de mesure provenant de capteurs installés sur l'autoroute A9 ont permis d'observer que la susceptibilité thermique de l'enrobé drainant est plus élevée. 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).

Le lien entre les deux enrobés (drainant et traditionnel) et les deux situations de pose (sur pont et sur remblai) a été fait à l'aide d'un outil de modélisation qui a permis de comparer entre eux les comportements hivernaux des quatre cas possibles (pont drainant – remblai drainant, pont traditionnel – remblai traditionnel, pont drainant – remblai traditionnel, pont traditionnel – remblai drainant). 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 sur pont, 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.

L'expérience des gestionnaires des routes a montré que les enrobés drainants présentent un comportement particulier lors des périodes hivernales. Quelques jours par an, un revêtement drainant est susceptible de présenter un comportement hivernal 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.

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 limites d'intervention.

Finalement on se rapportera au rapport précédemment cité (AGB 2004/002) qui donne en détail la démarche permettant d'aboutir aux présentes conclusions.

7 BIBLIOGRAPHIE

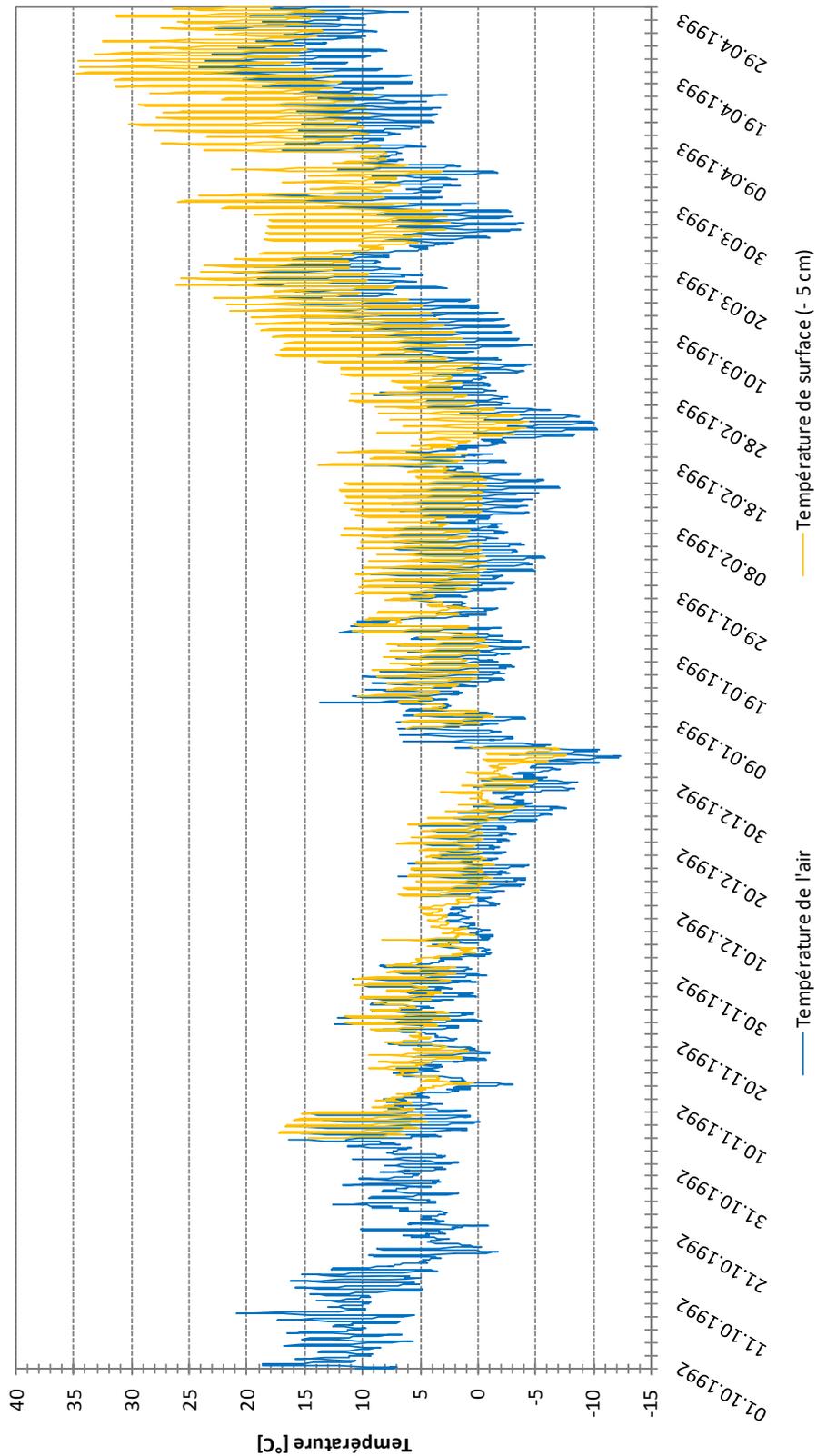
- [1] RODRIGUEZ M., DUMONT A.-G., "Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales", AGB 2004/002, à paraître.

8 ANNEXES

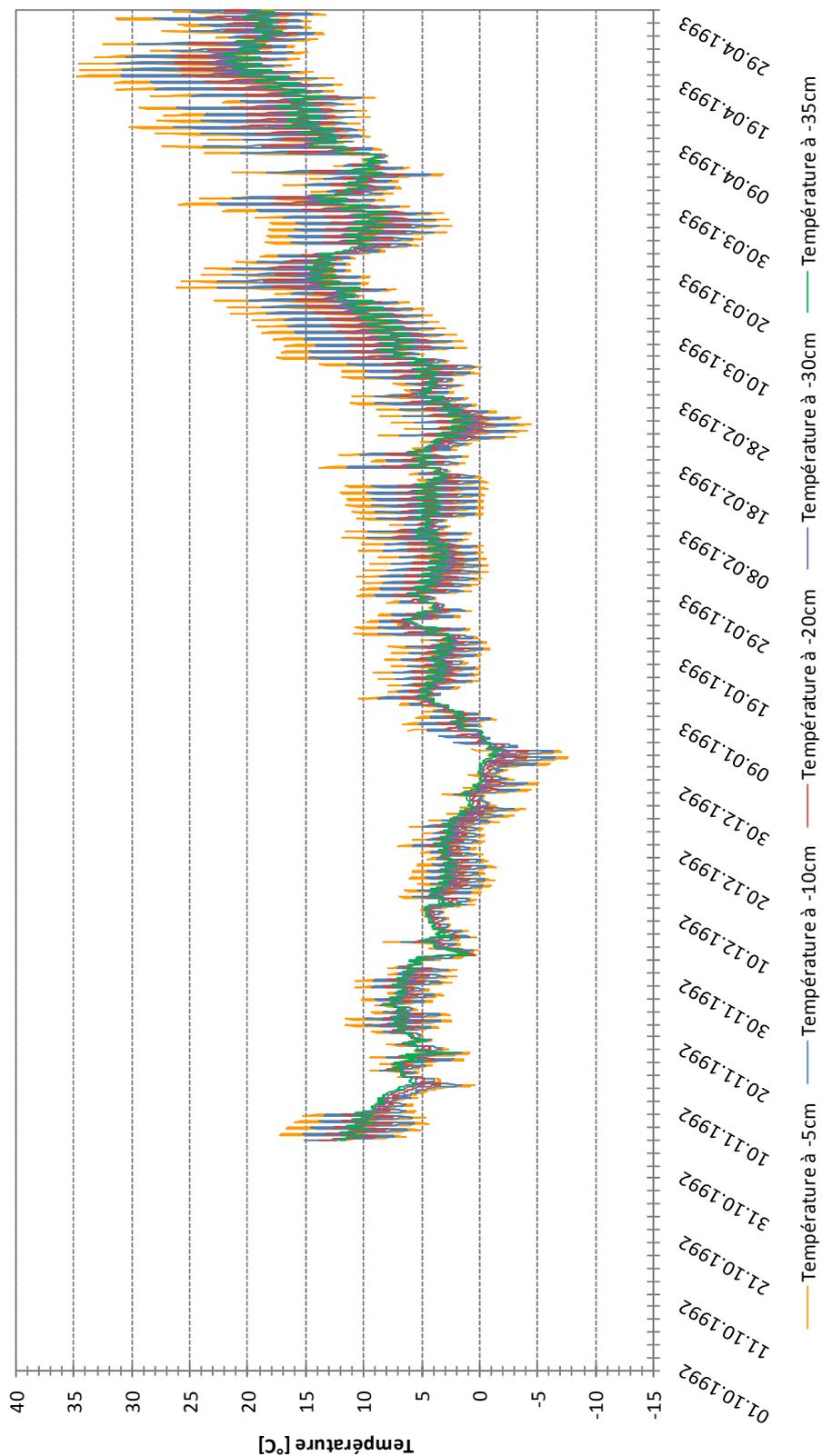
8.1 GRAPHES DES HIVERS 1992-2007

8.1.1 Hiver 1992/1993

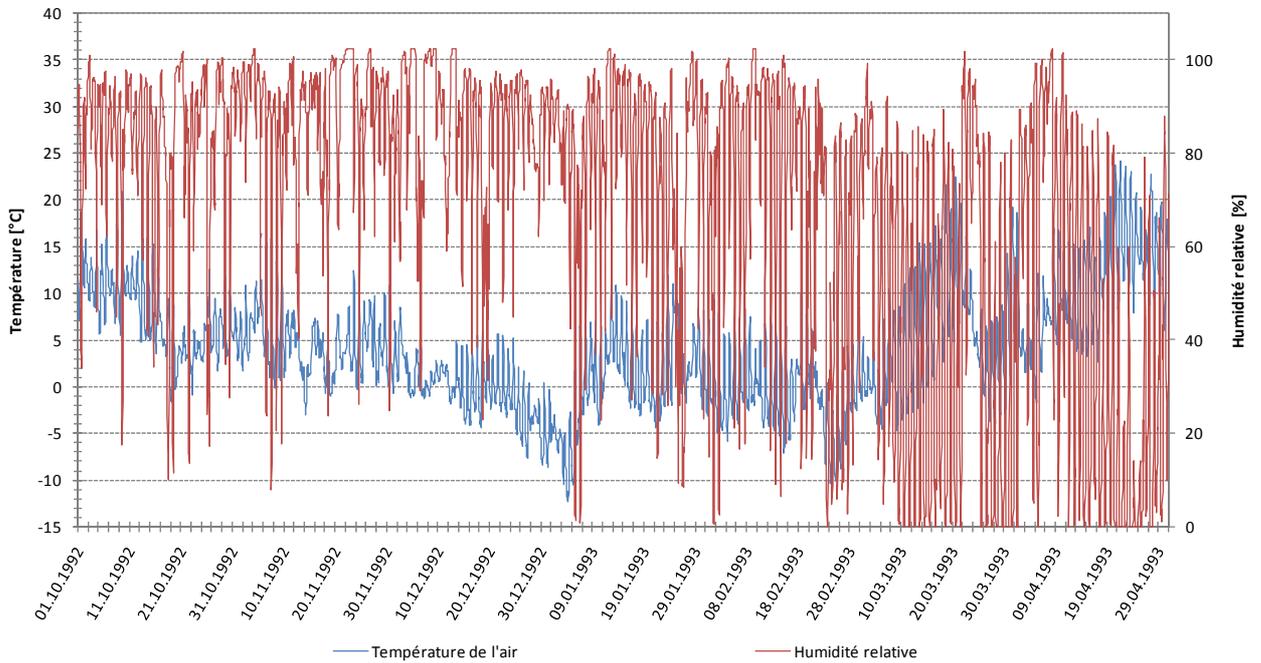
Hiver 1992/1993 : Température de l'air et de la surface



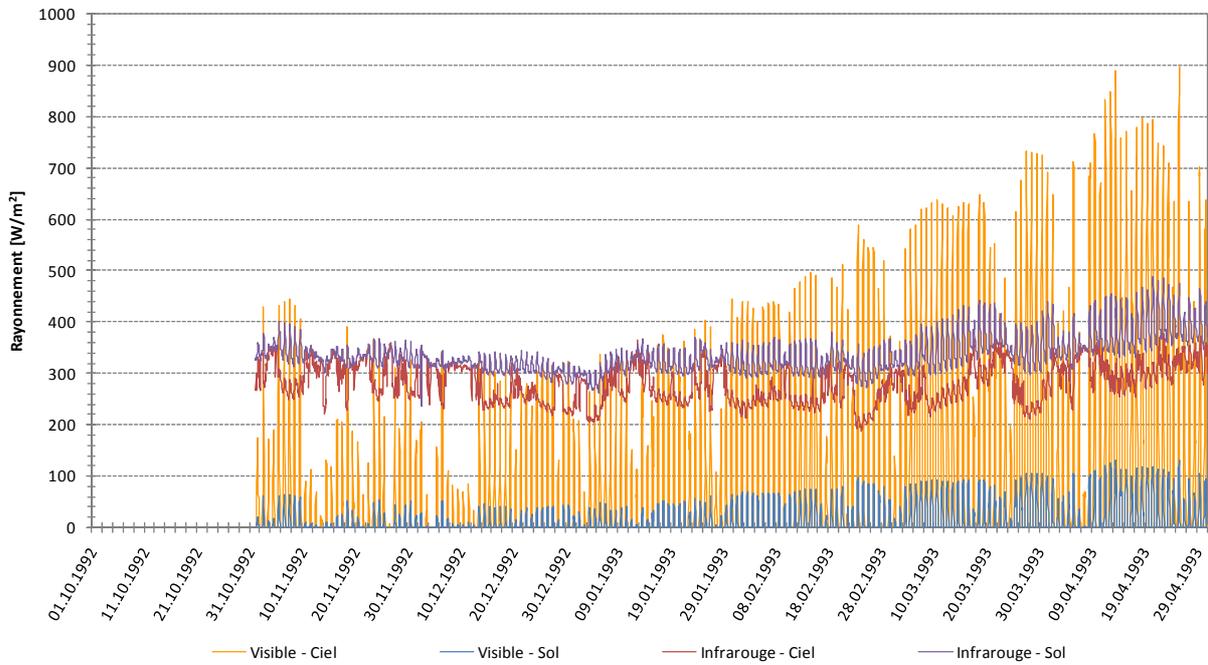
Hiver 1992/1993 : Température de la chaussée



Hiver 1992/1993 : Température de l'air et humidité relative

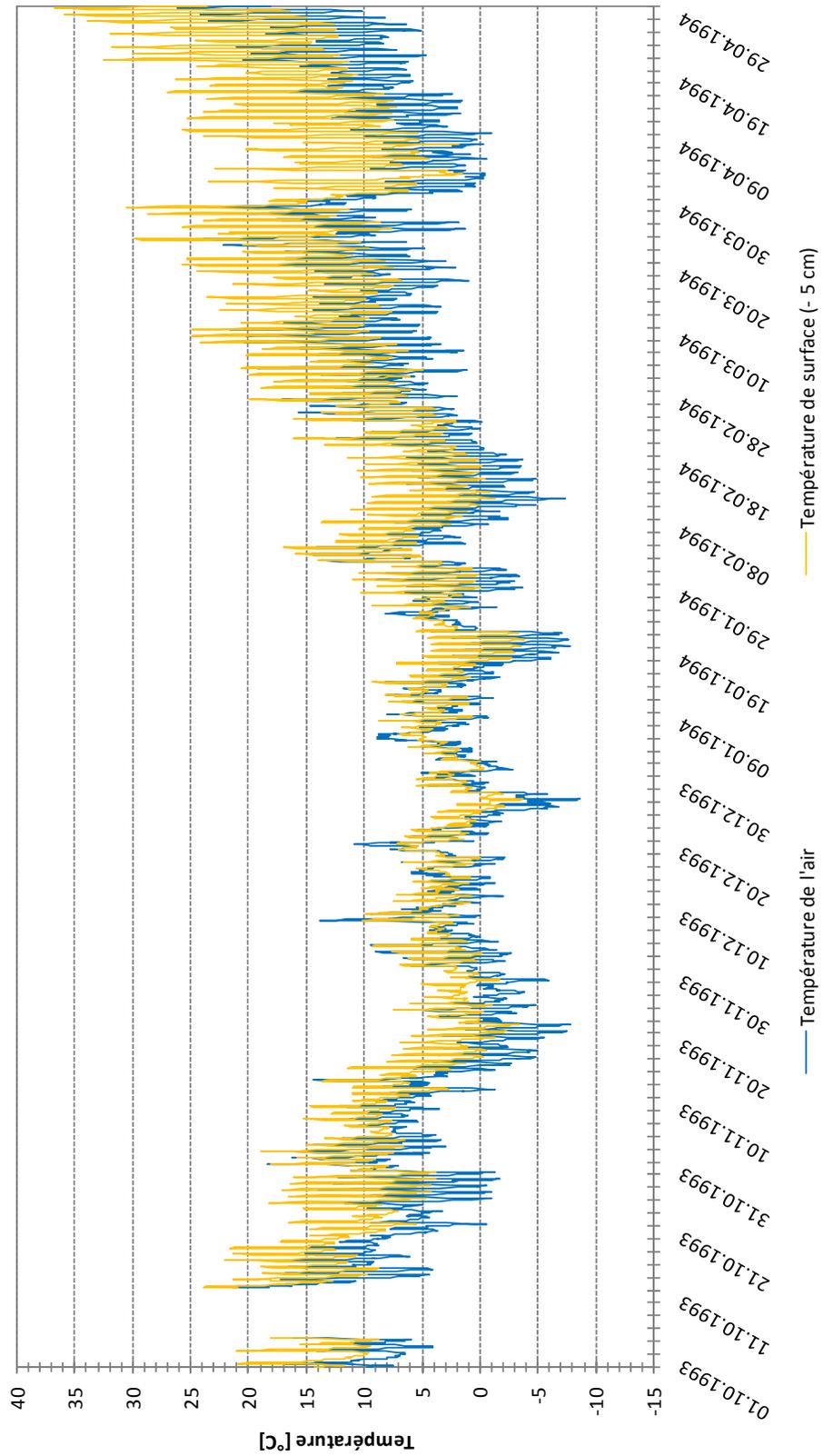


Hiver 1992/1993 : Rayonnement

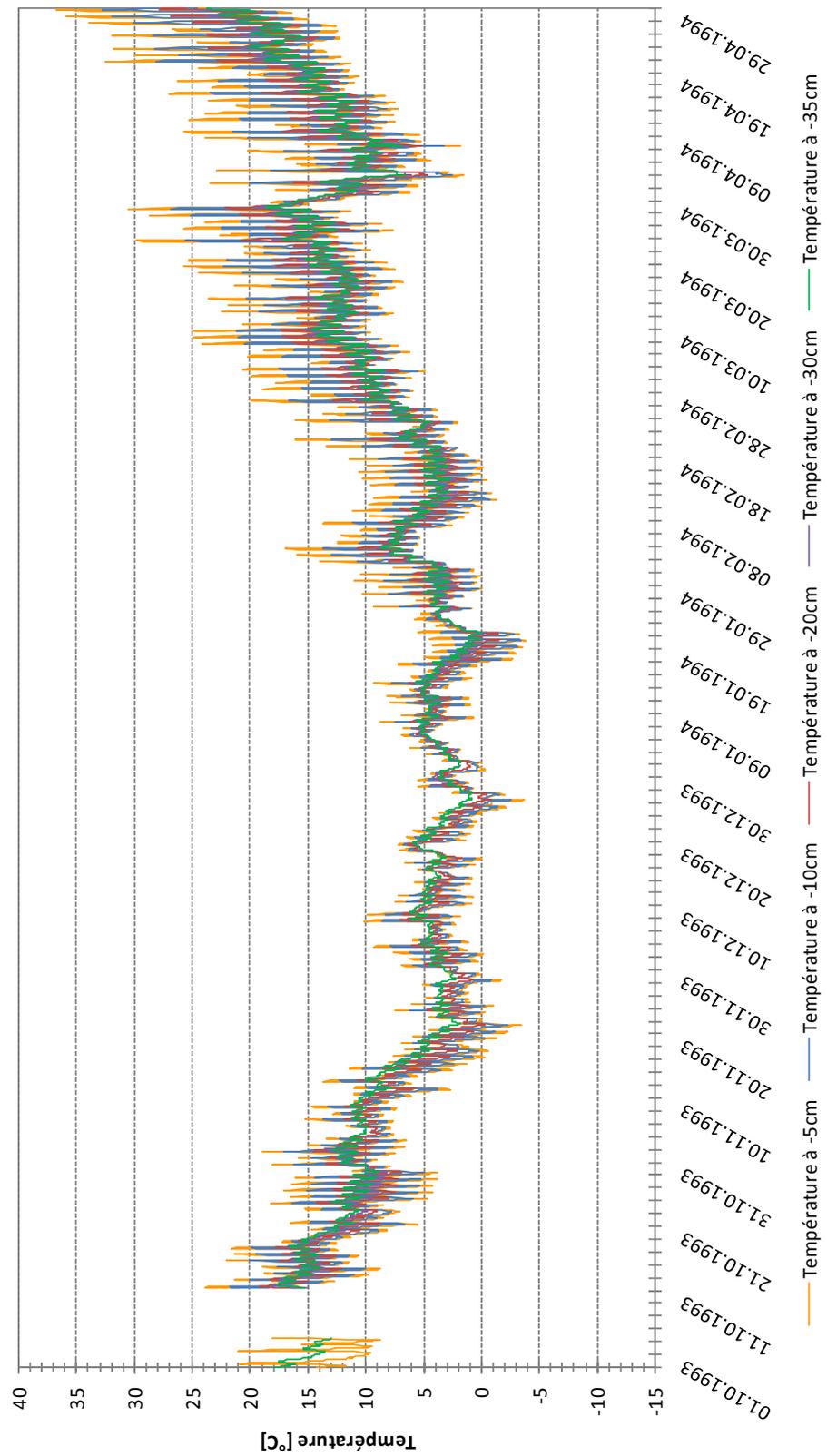


8.1.2 Hiver 1993/1994

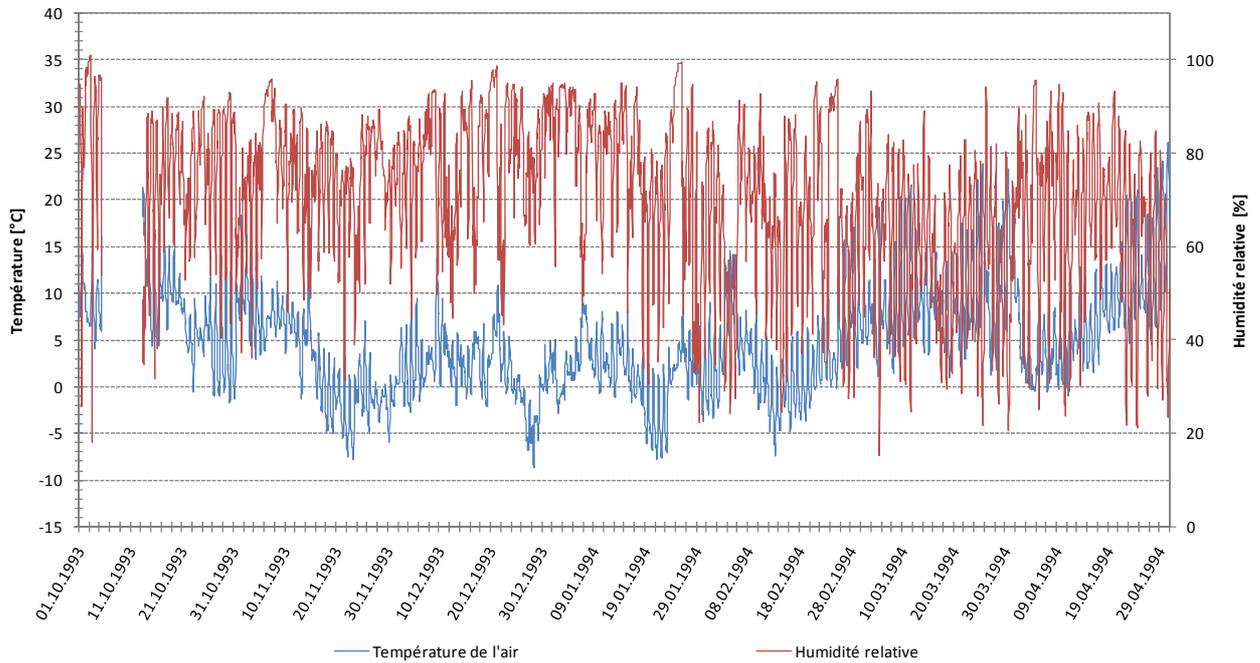
Hiver 1993/1994 : Température de l'air et de la surface



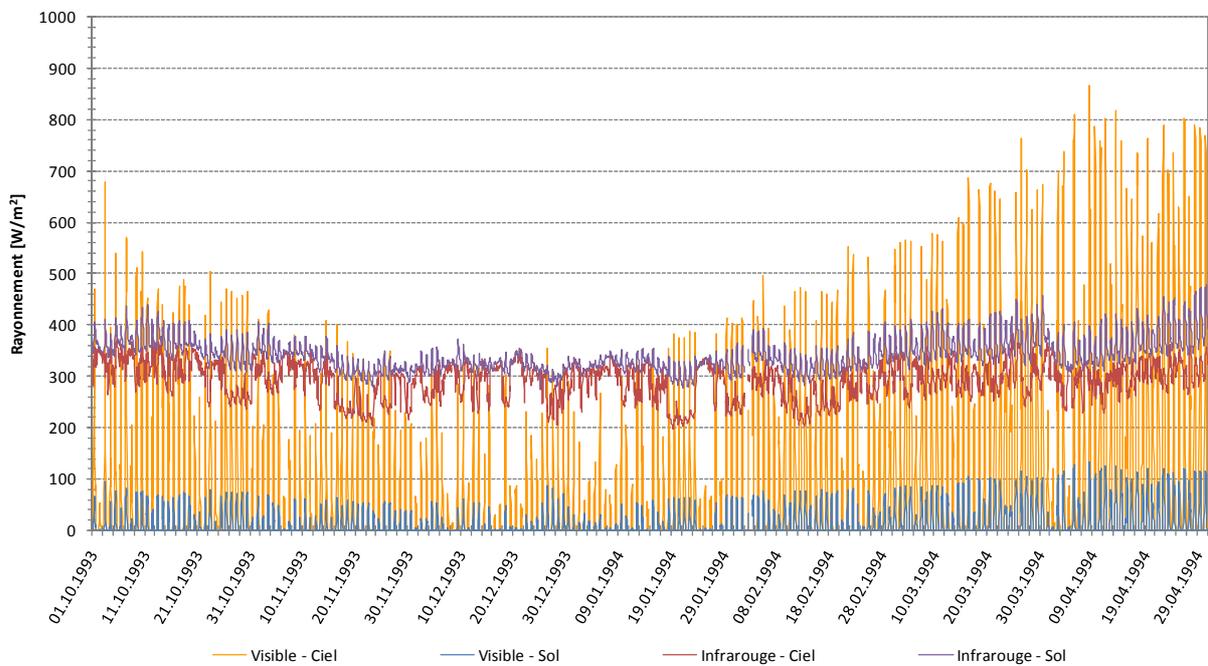
Hiver 1993/1994 : Température de la chaussée



Hiver 1993/1994 : Température de l'air et humidité relative

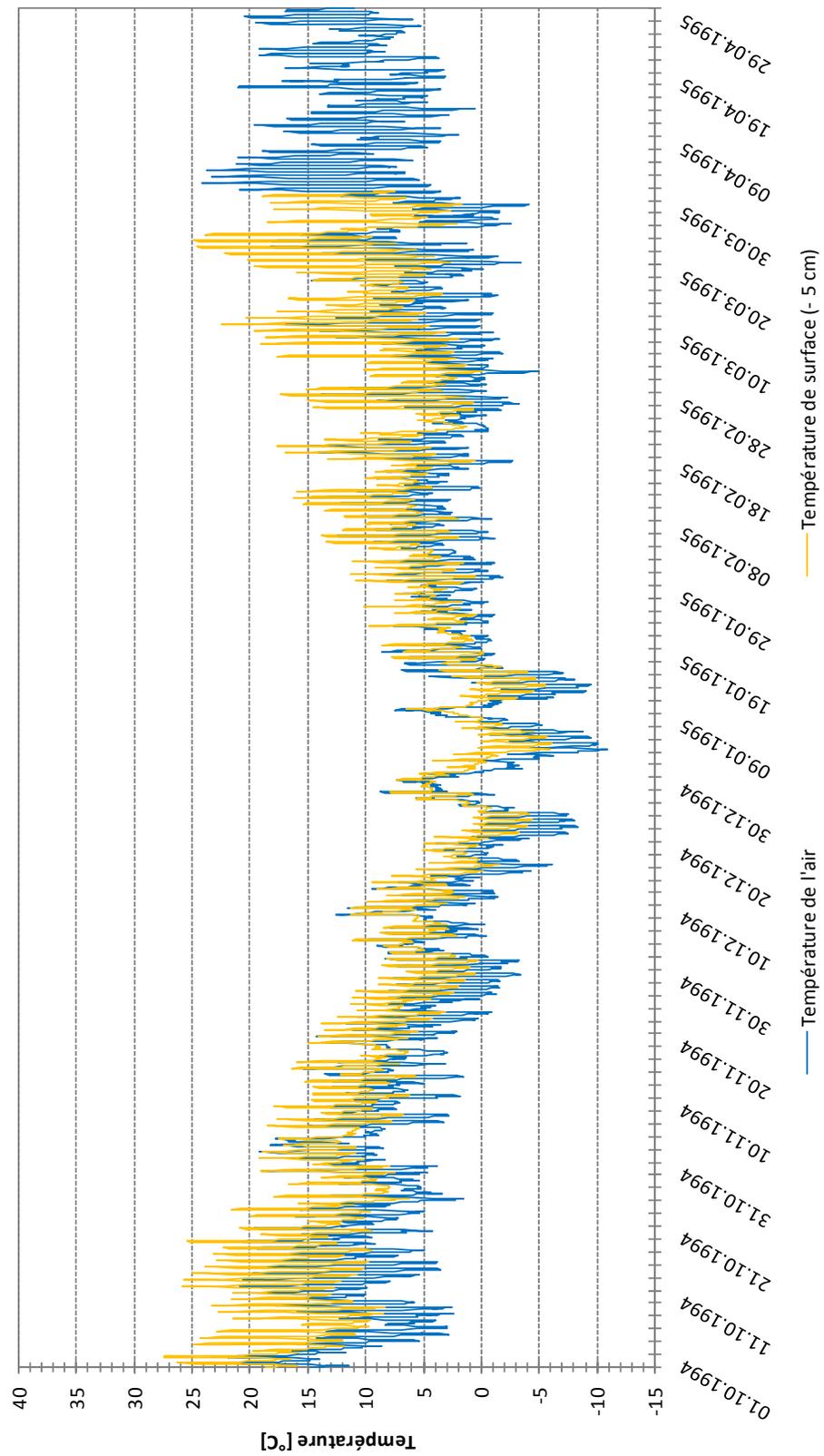


Hiver 1993/1994 : Rayonnement

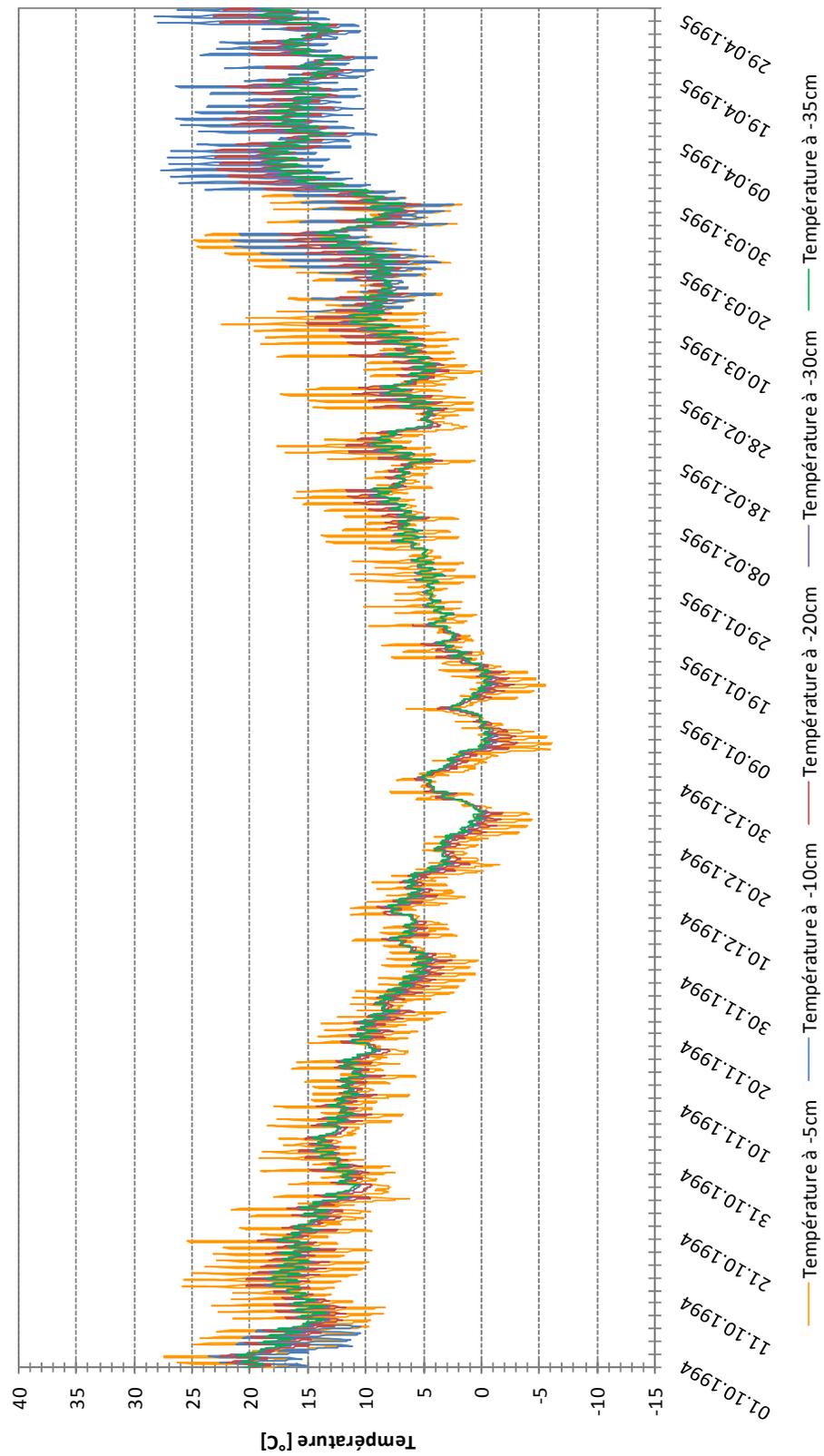


8.1.3 Hiver 1994/1995

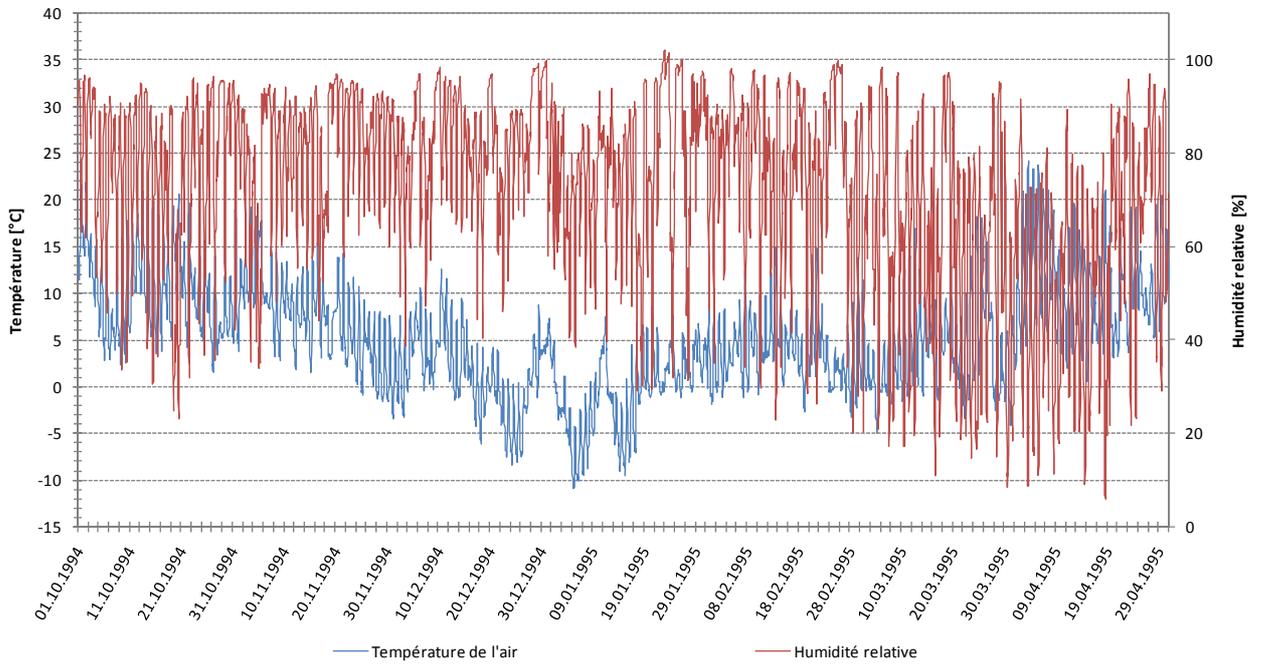
Hiver 1994/1995 : Température de l'air et de la surface



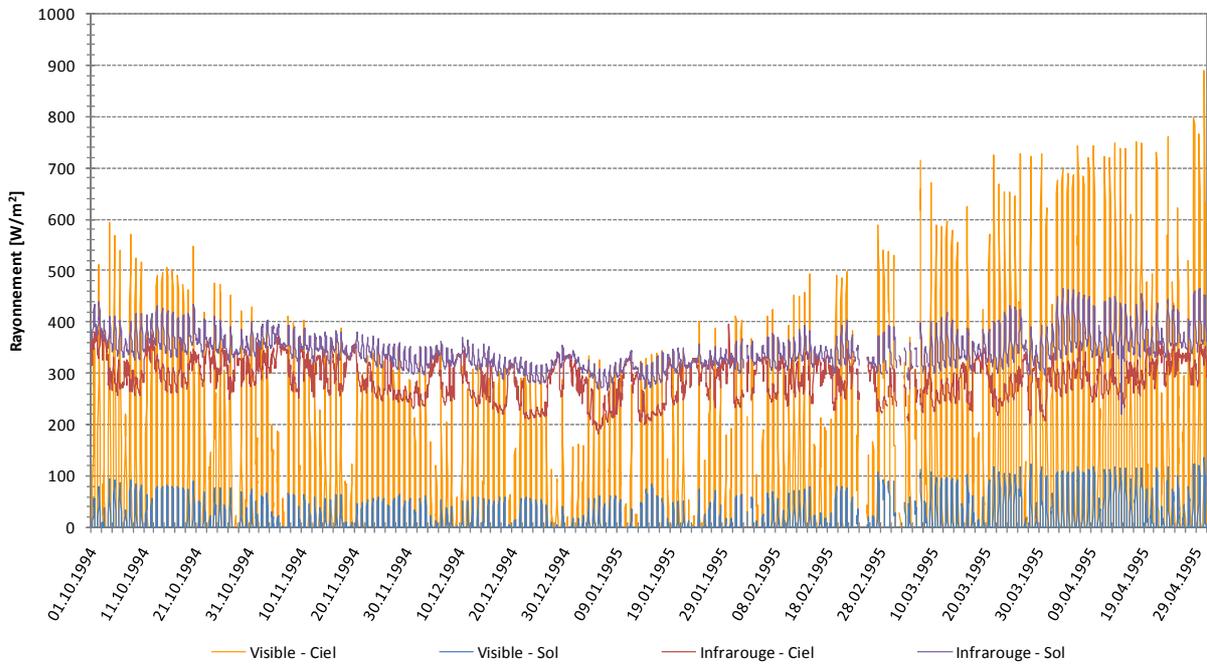
Hiver 1994/1995 : Température de la chaussée



Hiver 1994/1995 : Température de l'air et humidité relative

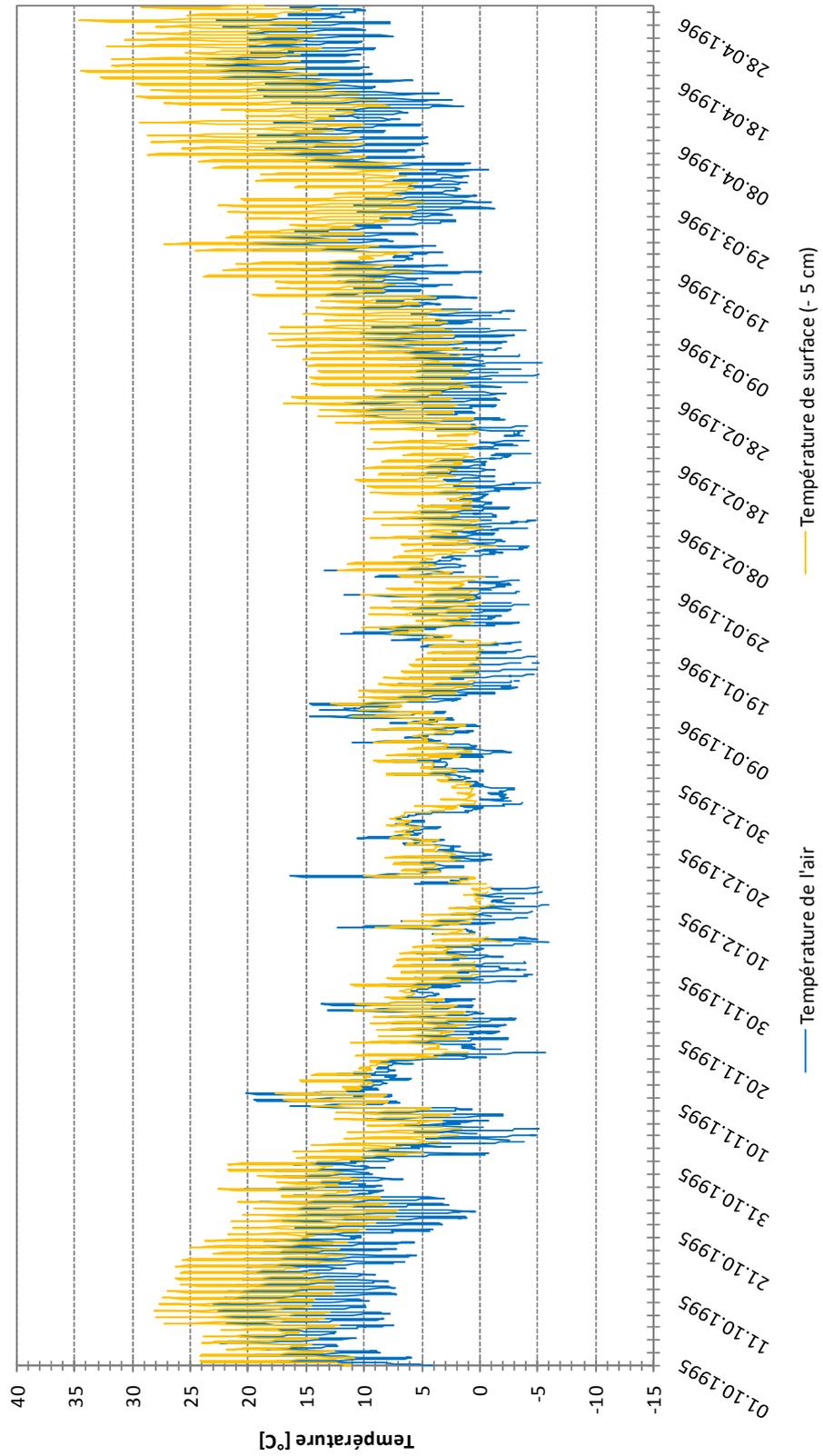


Hiver 1994/1995 : Rayonnement

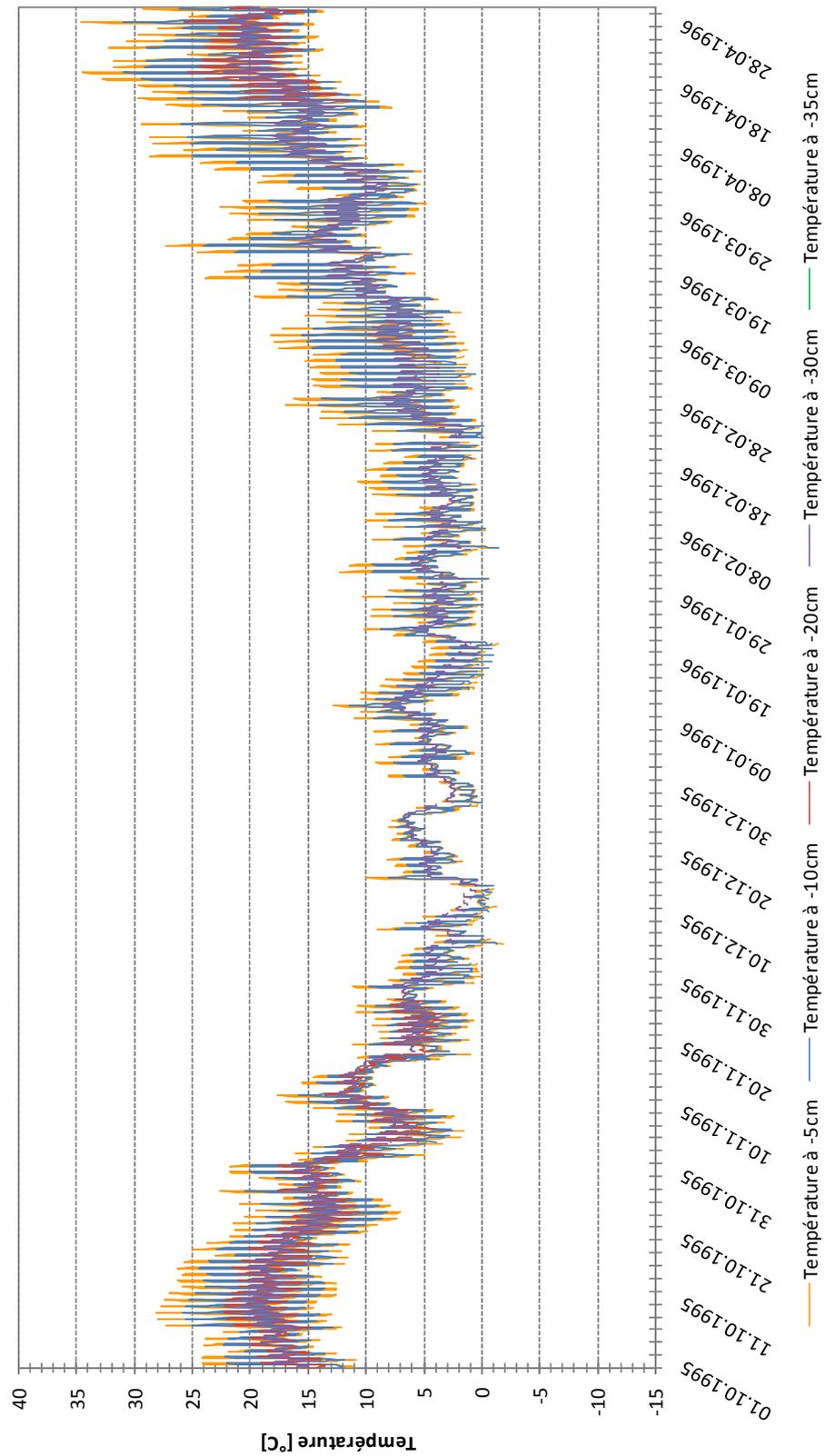


8.1.4 Hiver 1995/1996

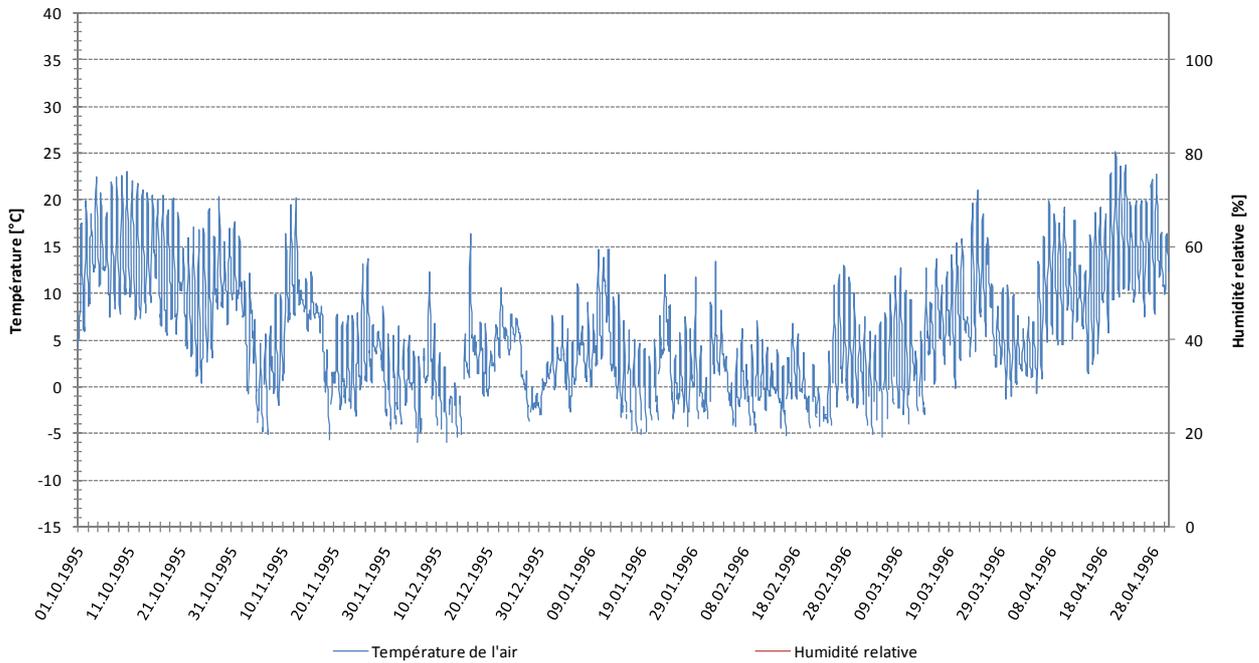
Hiver 1995/1996 : Température de l'air et de la surface



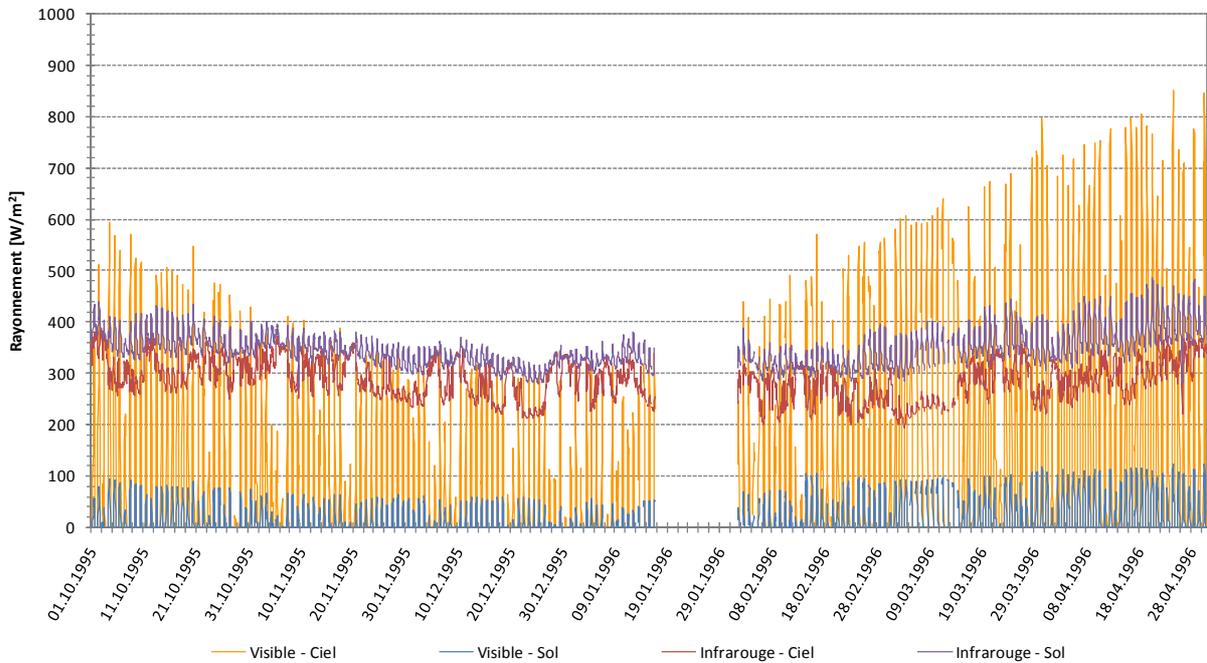
Hiver 1995/1996 : Température de la chaussée



Hiver 1995/1996 : Température de l'air et humidité relative

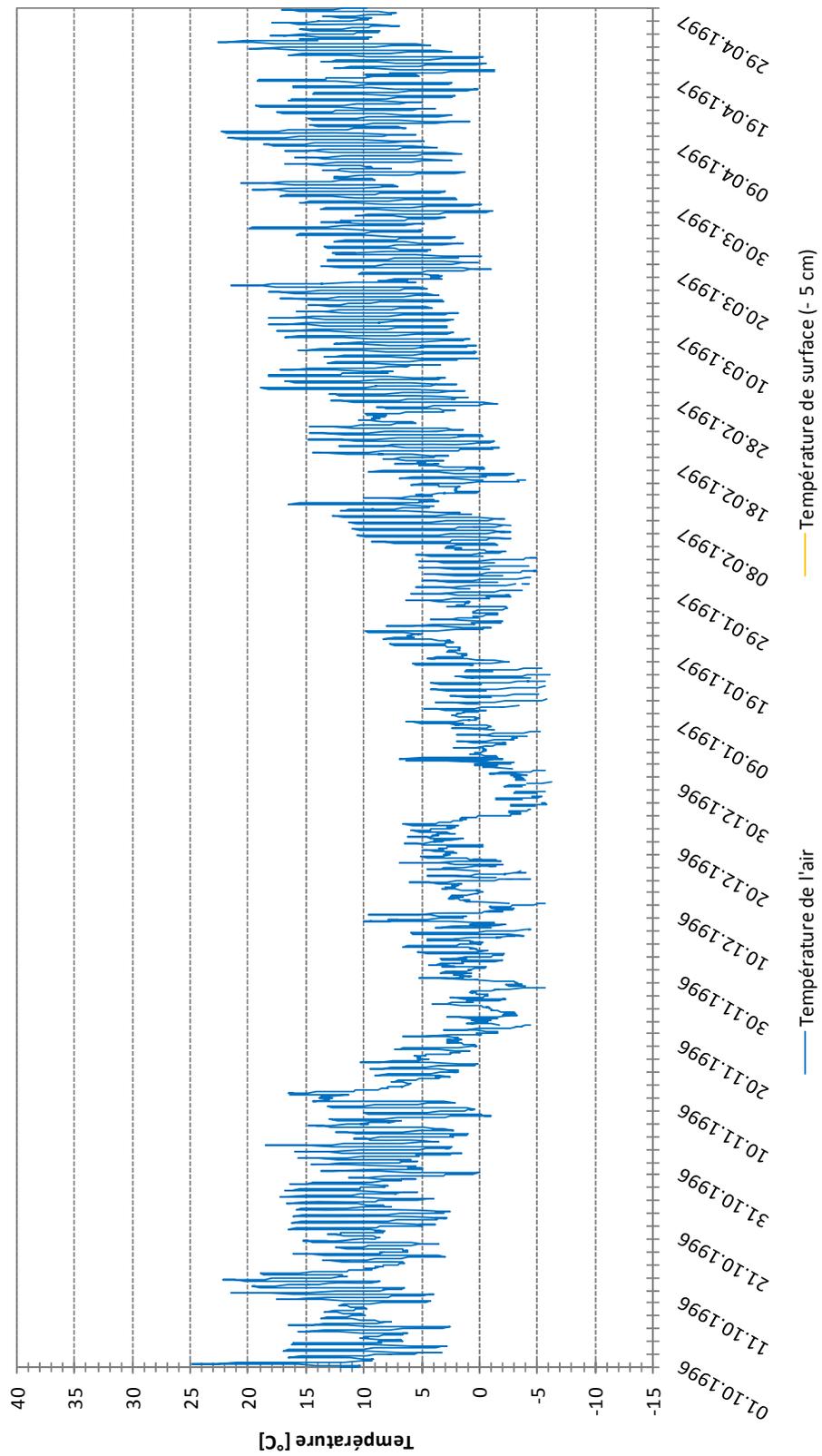


Hiver 1995/1996 : Rayonnement

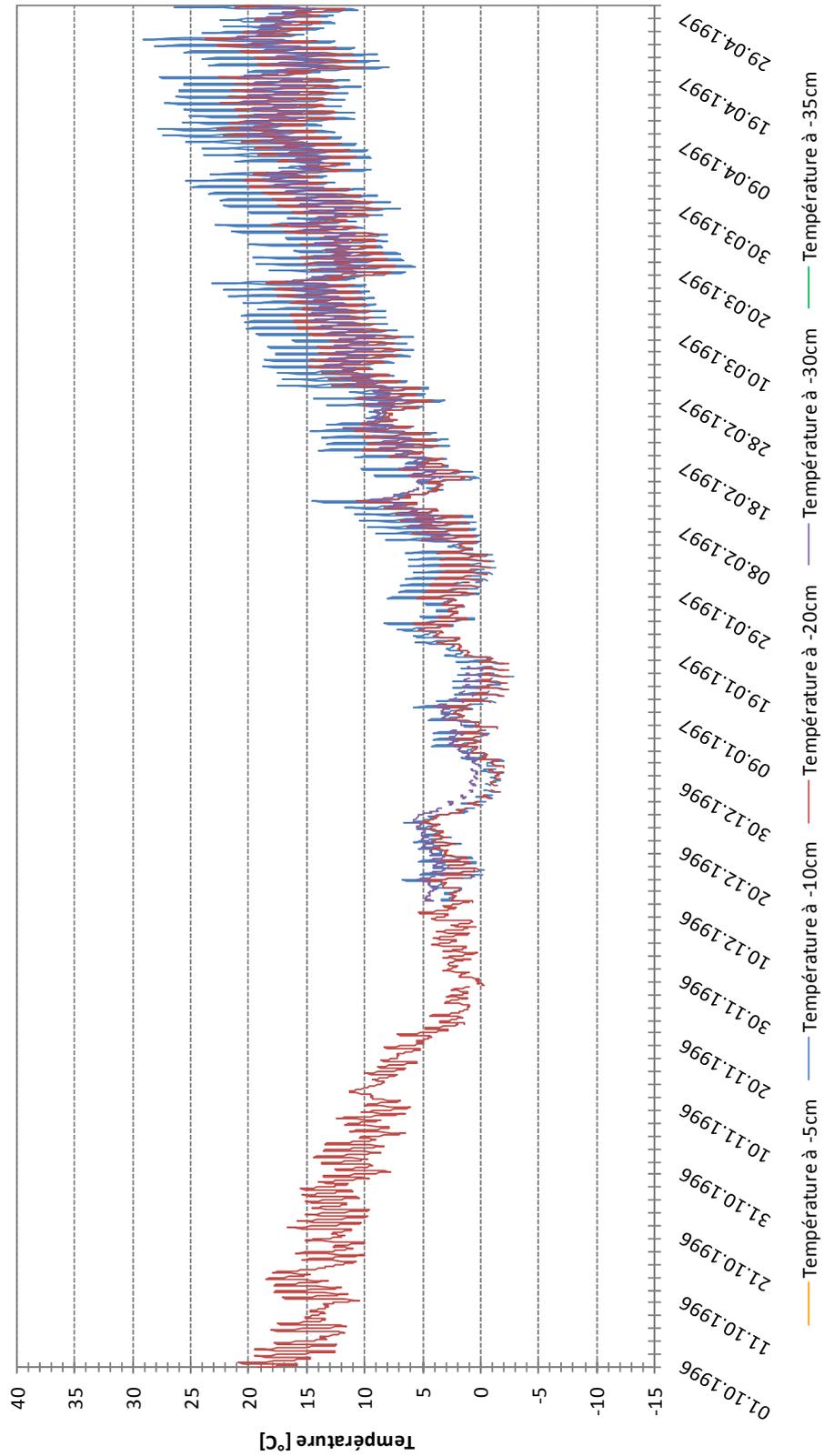


8.1.5 Hiver 1996/1997

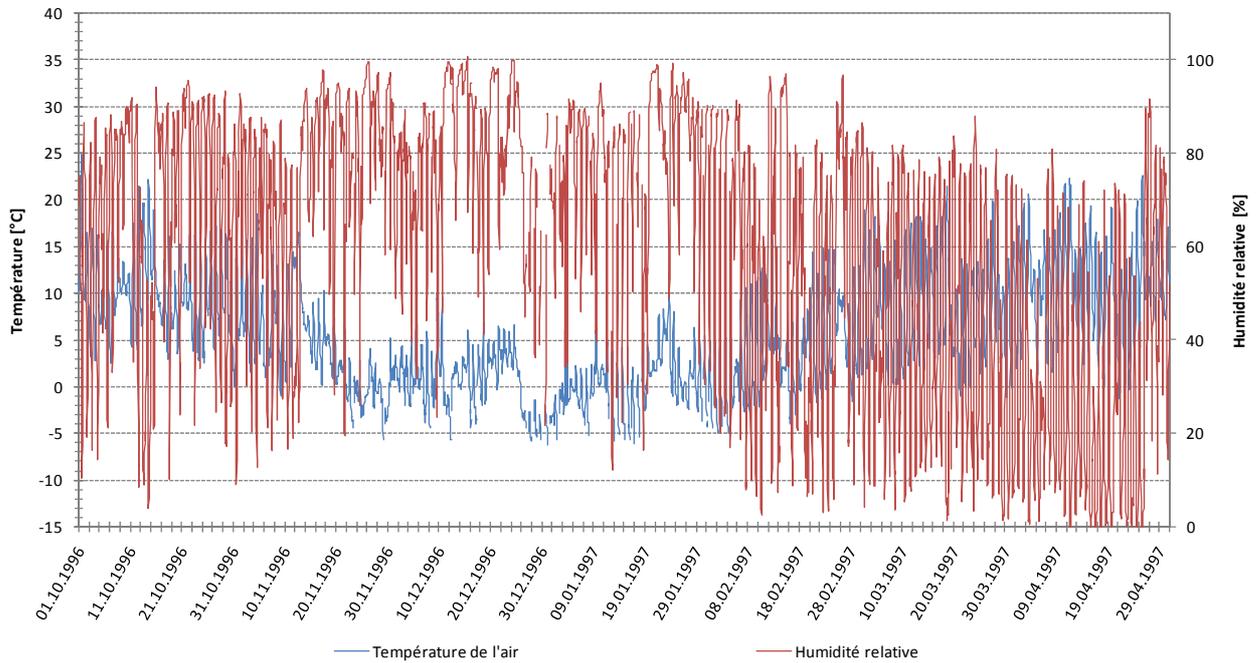
Hiver 1996/1997 : Température de l'air et de la surface



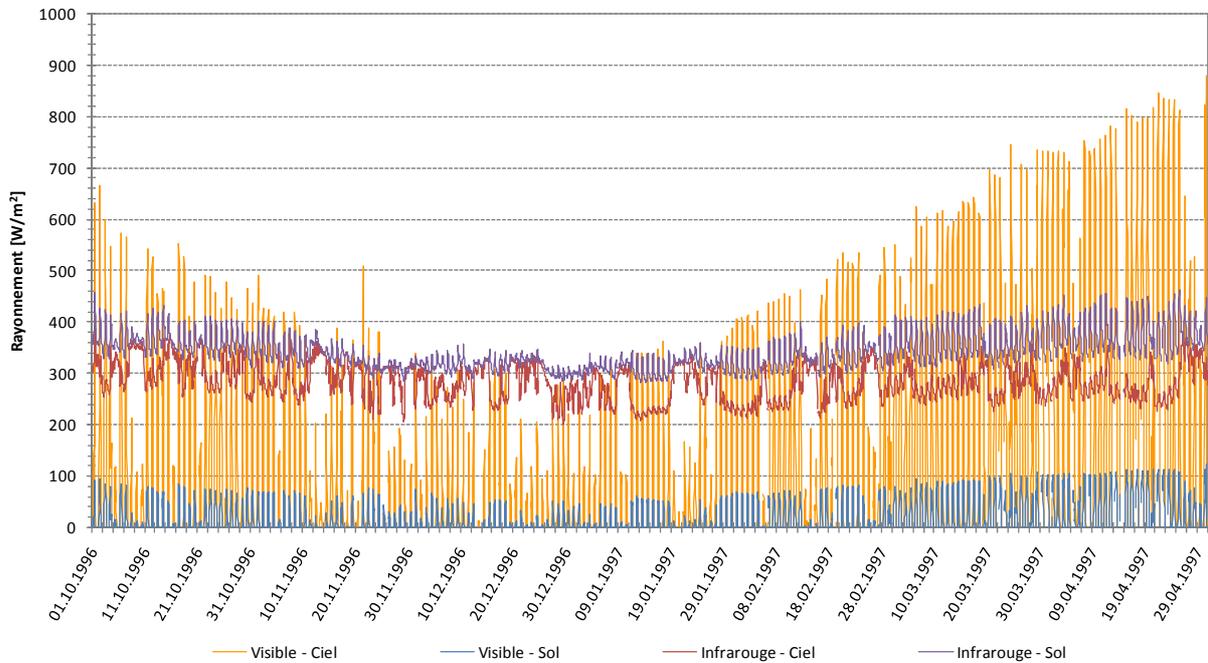
Hiver 1996/1997 : Température de la chaussée



Hiver 1996/1997 : Température de l'air et humidité relative

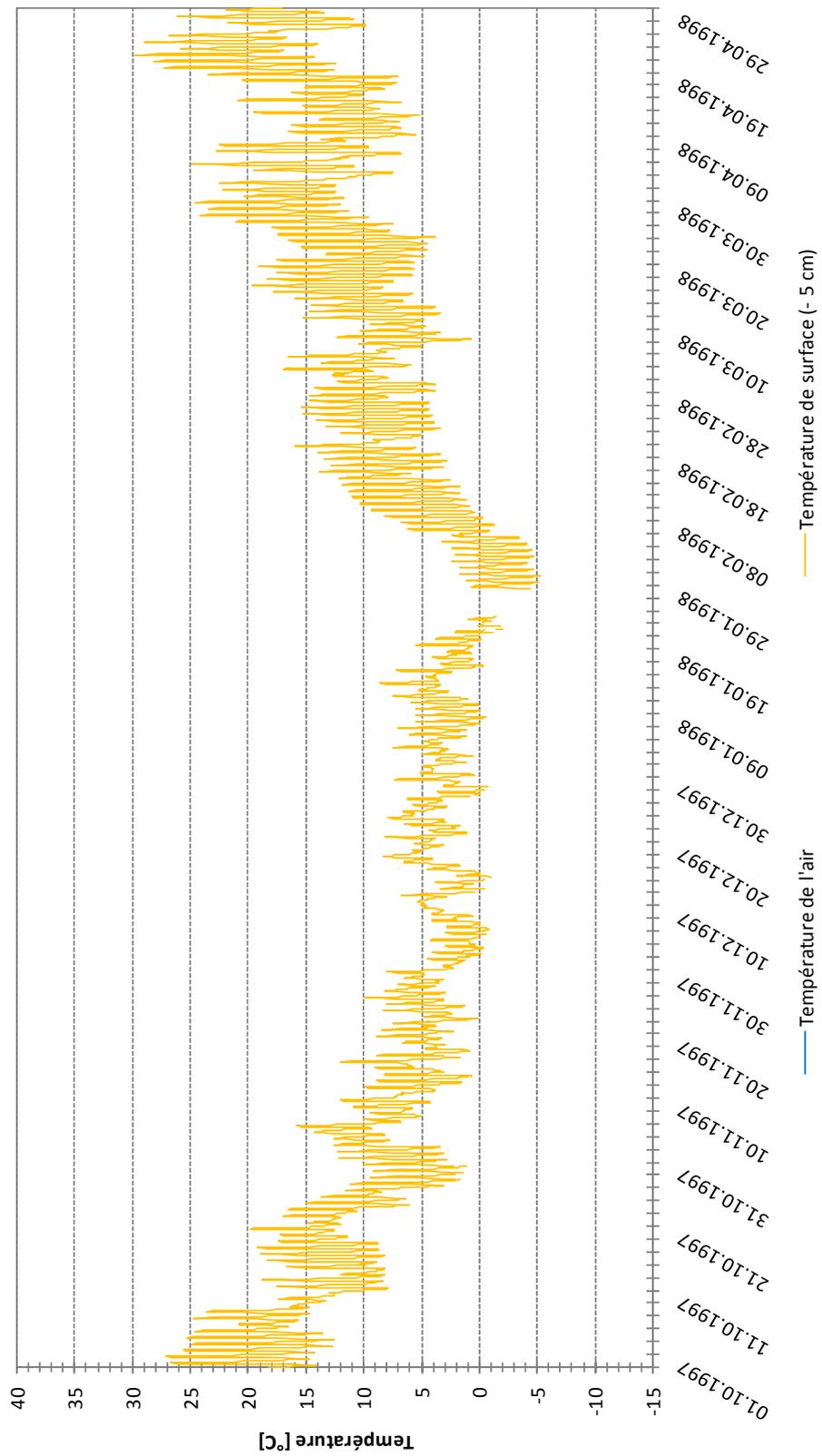


Hiver 1996/1997 : Rayonnement

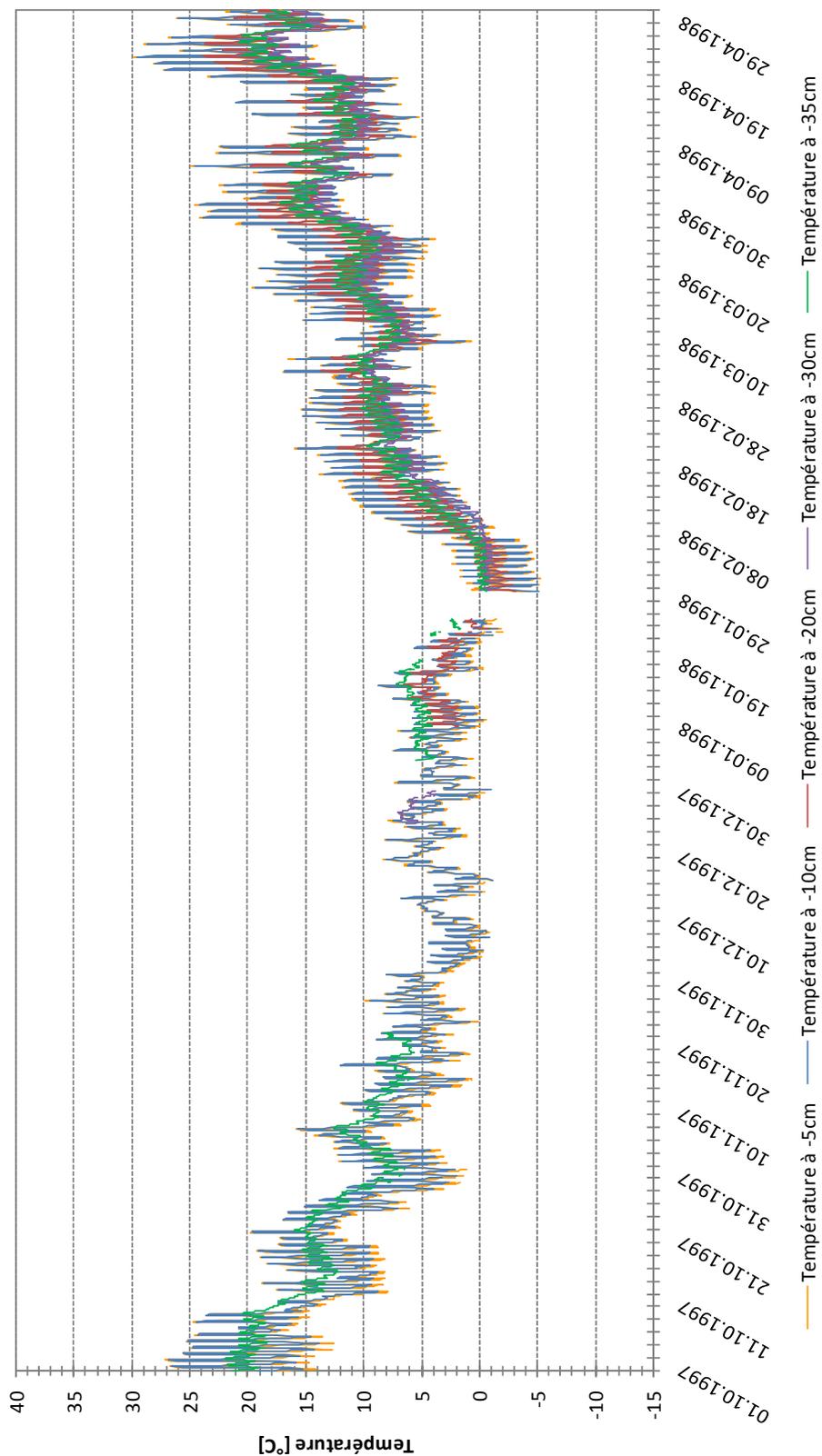


8.1.6 Hiver 1997/1998

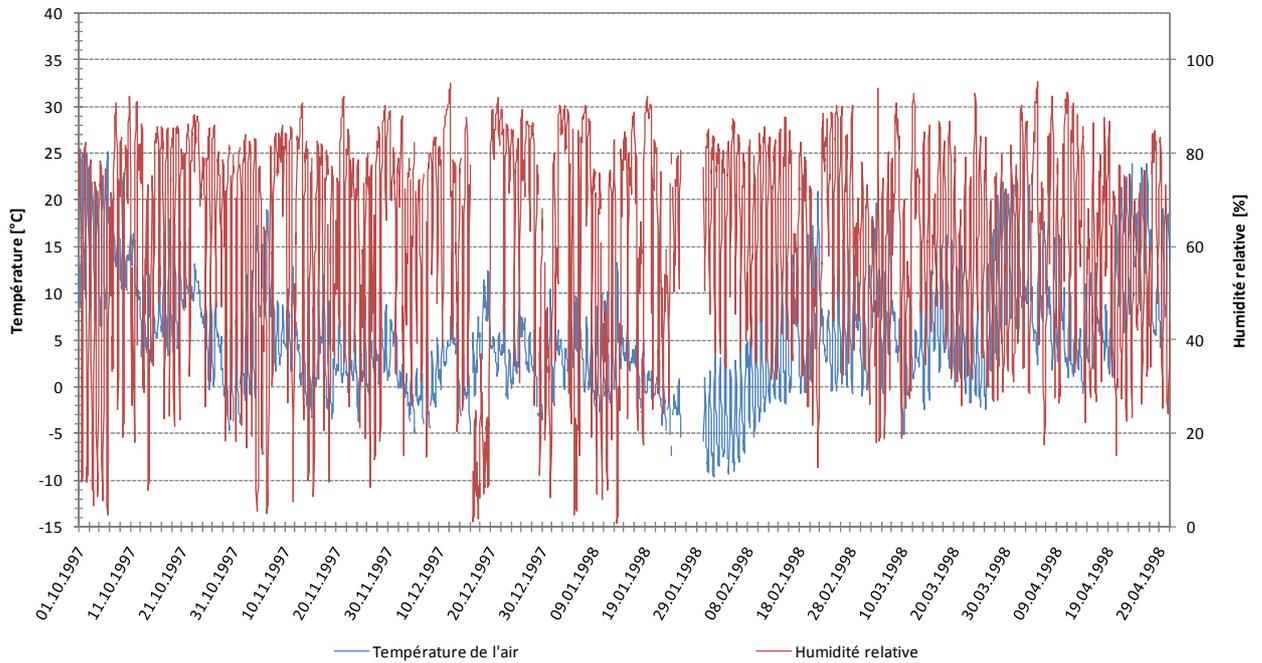
Hiver 1997/1998 : Température de l'air et de la surface



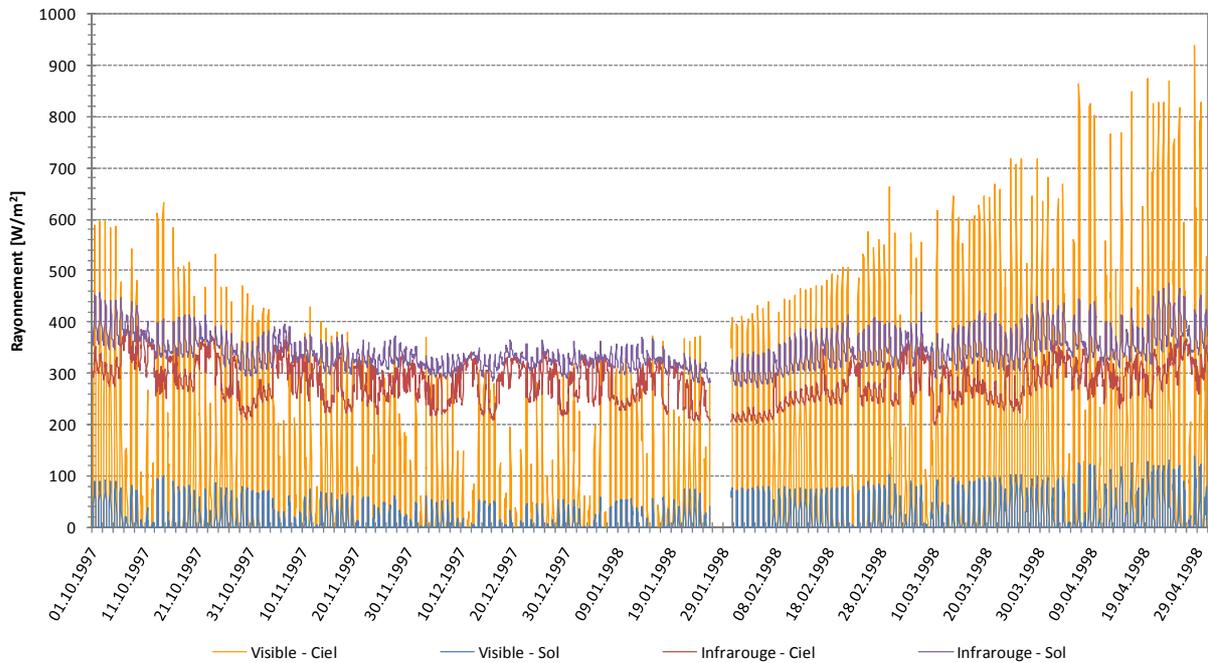
Hiver 1997/1998 : Température de la chaussée



Hiver 1997/1998 : Température de l'air et humidité relative

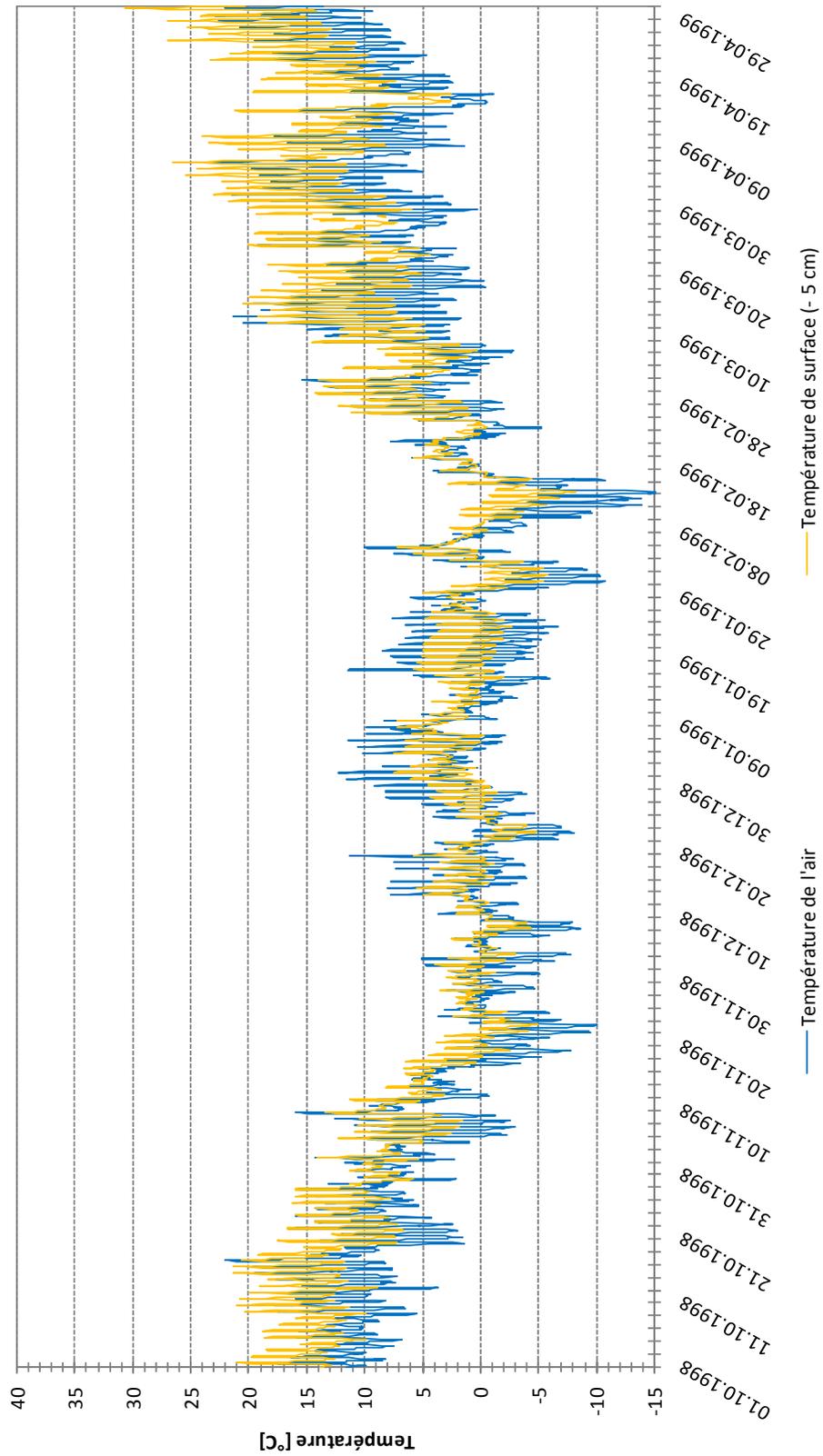


Hiver 1997/1998 : Rayonnement

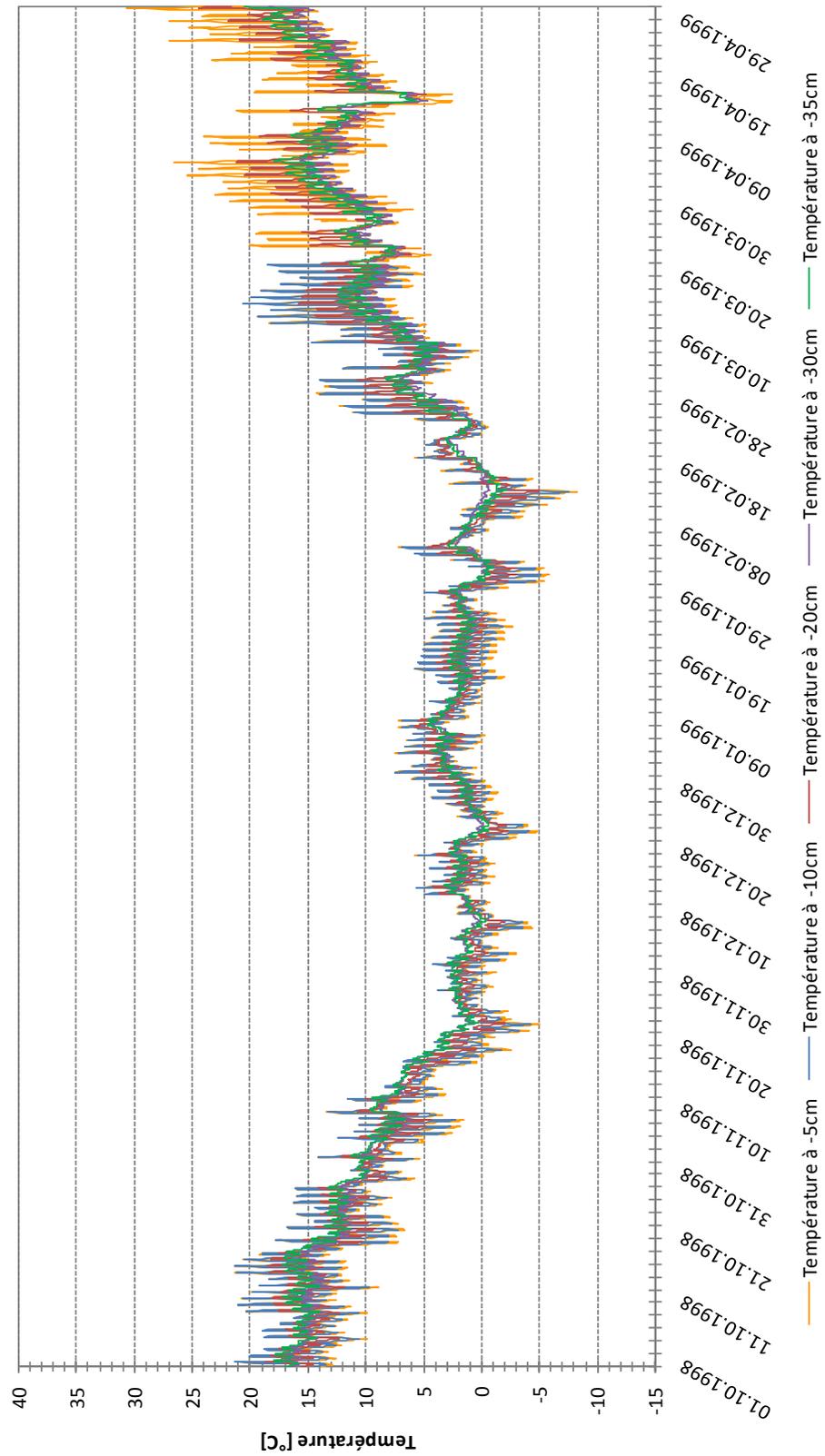


8.1.7 Hiver 1998/1999

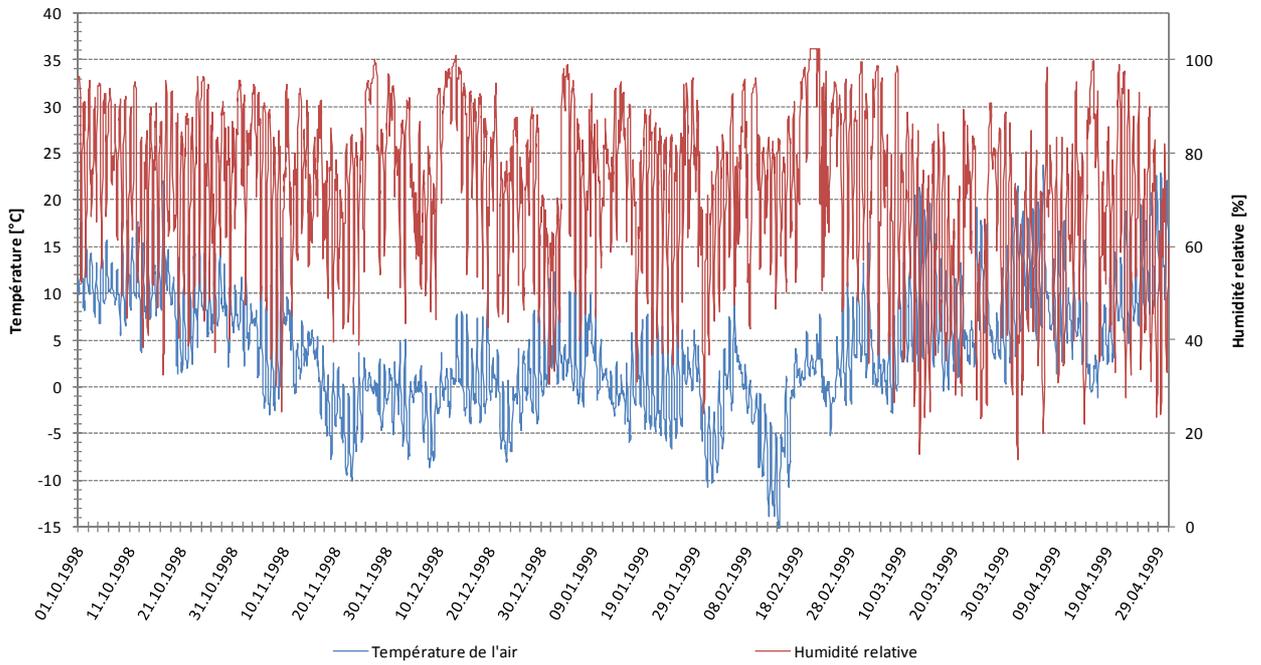
Hiver 1998/1999 : Température de l'air et de la surface



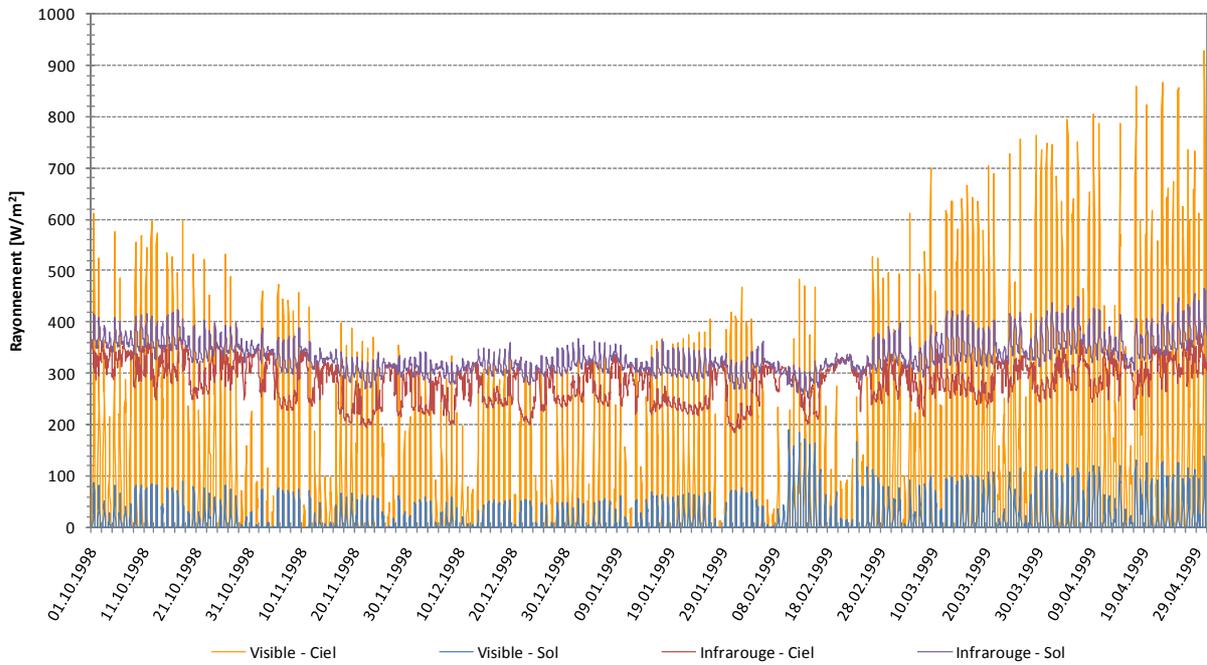
Hiver 1998/1999 : Température de la chaussée



Hiver 1998/1999 : Température de l'air et humidité relative

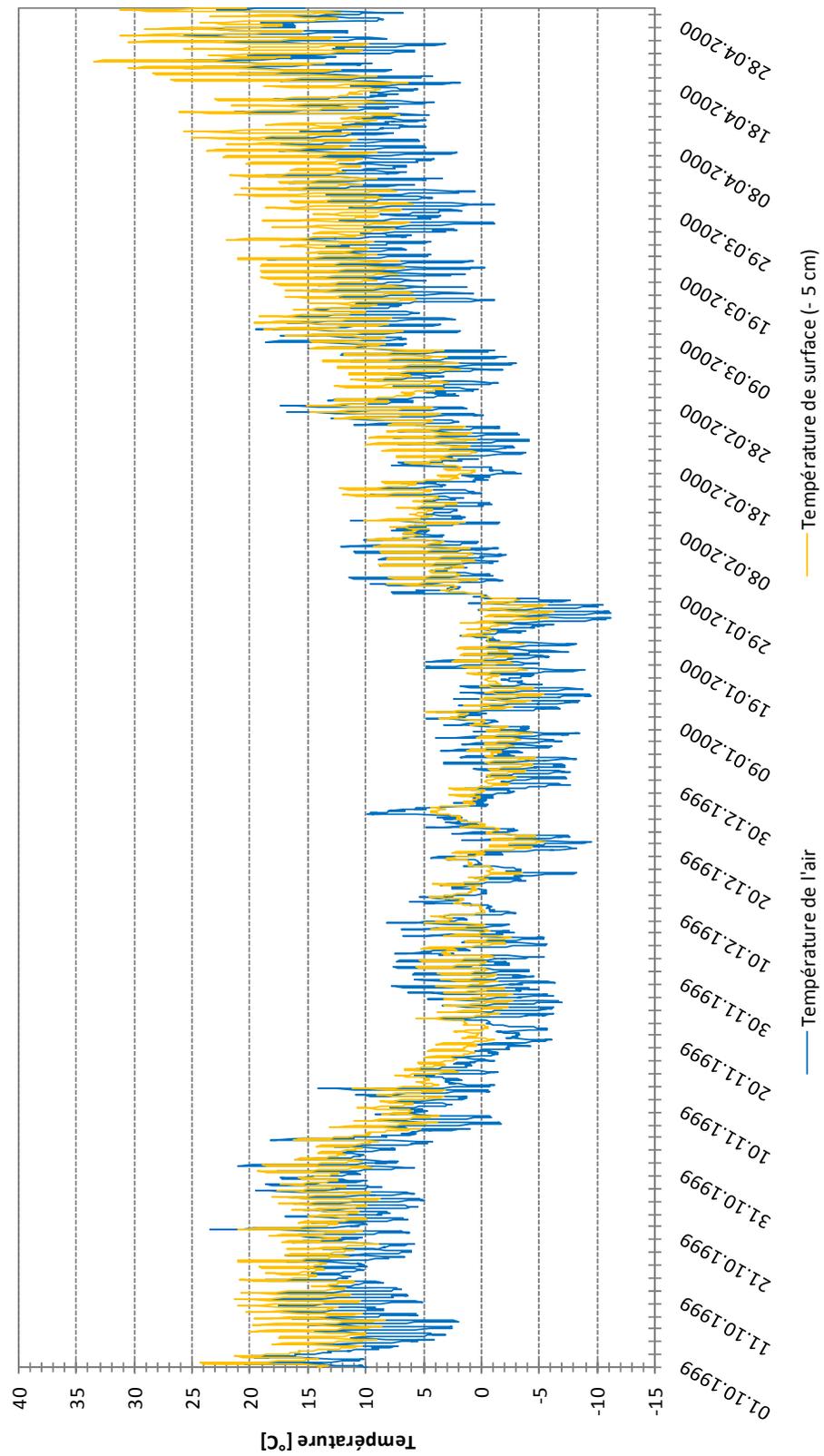


Hiver 1998/1999 : Rayonnement

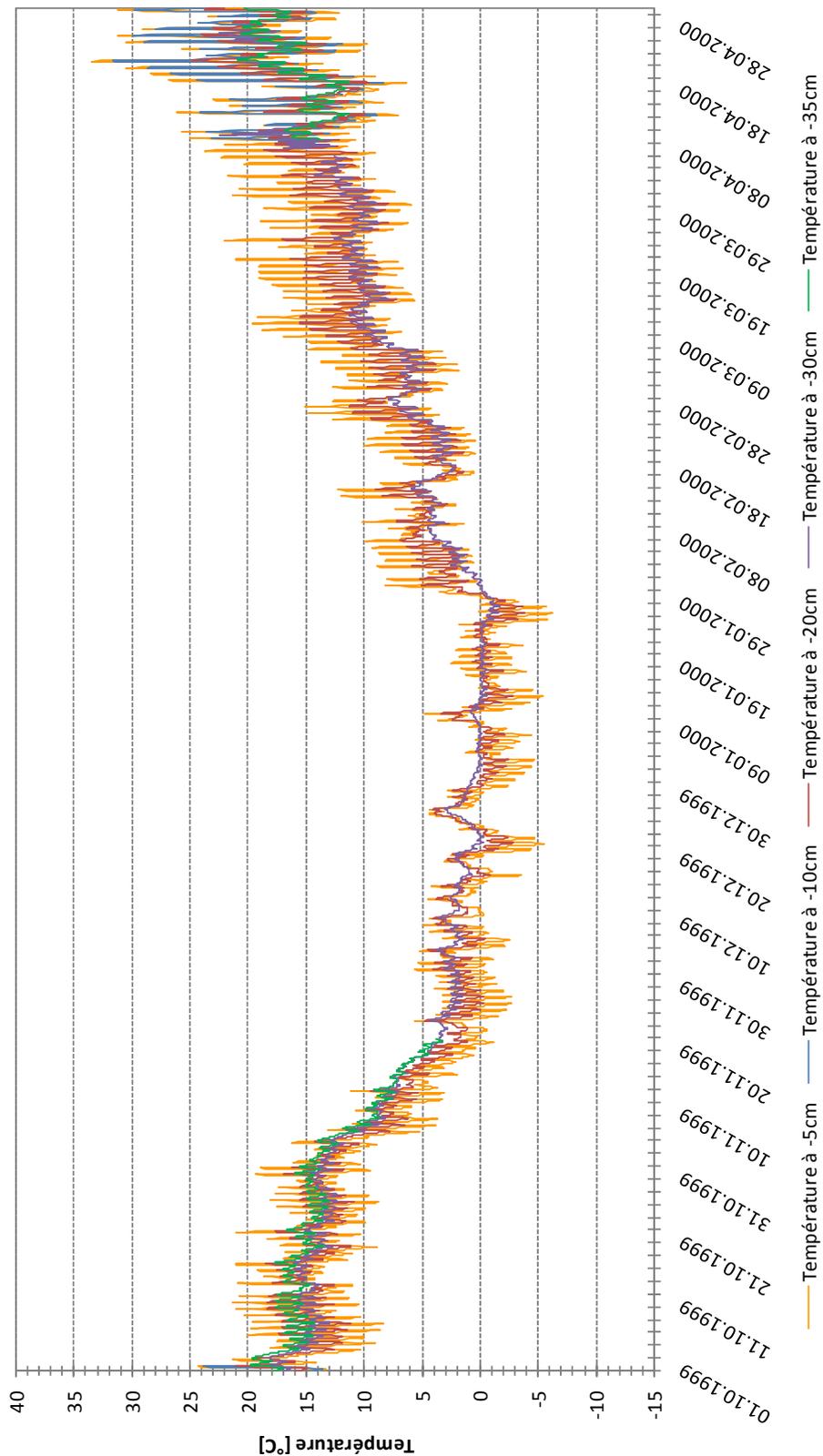


8.1.8 Hiver 1999/2000

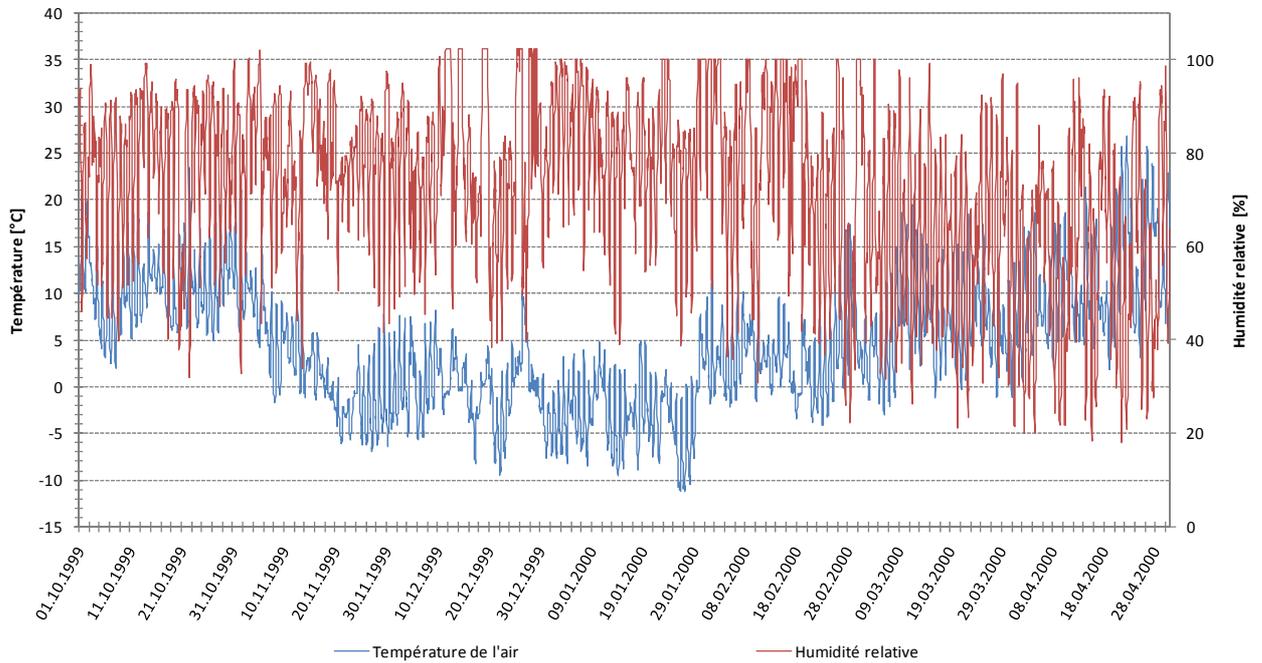
Hiver 1999/2000 : Température de l'air et de la surface



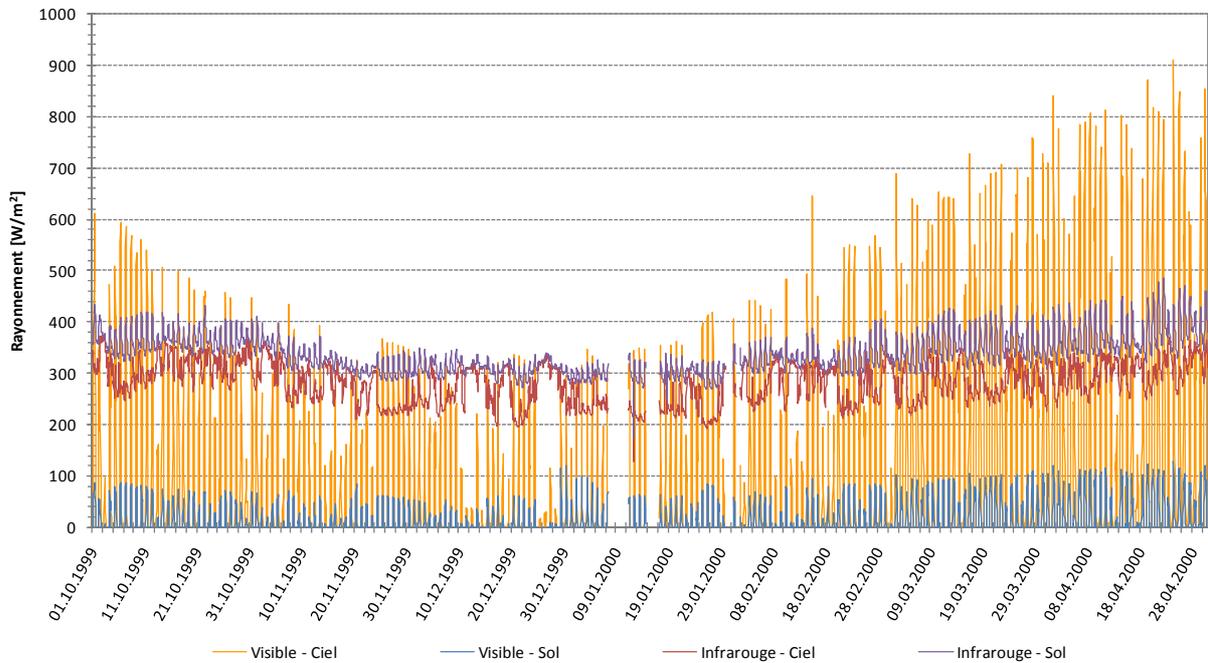
Hiver 1999/2000 : Température de la chaussée



Hiver 1999/2000 : Température de l'air et humidité relative

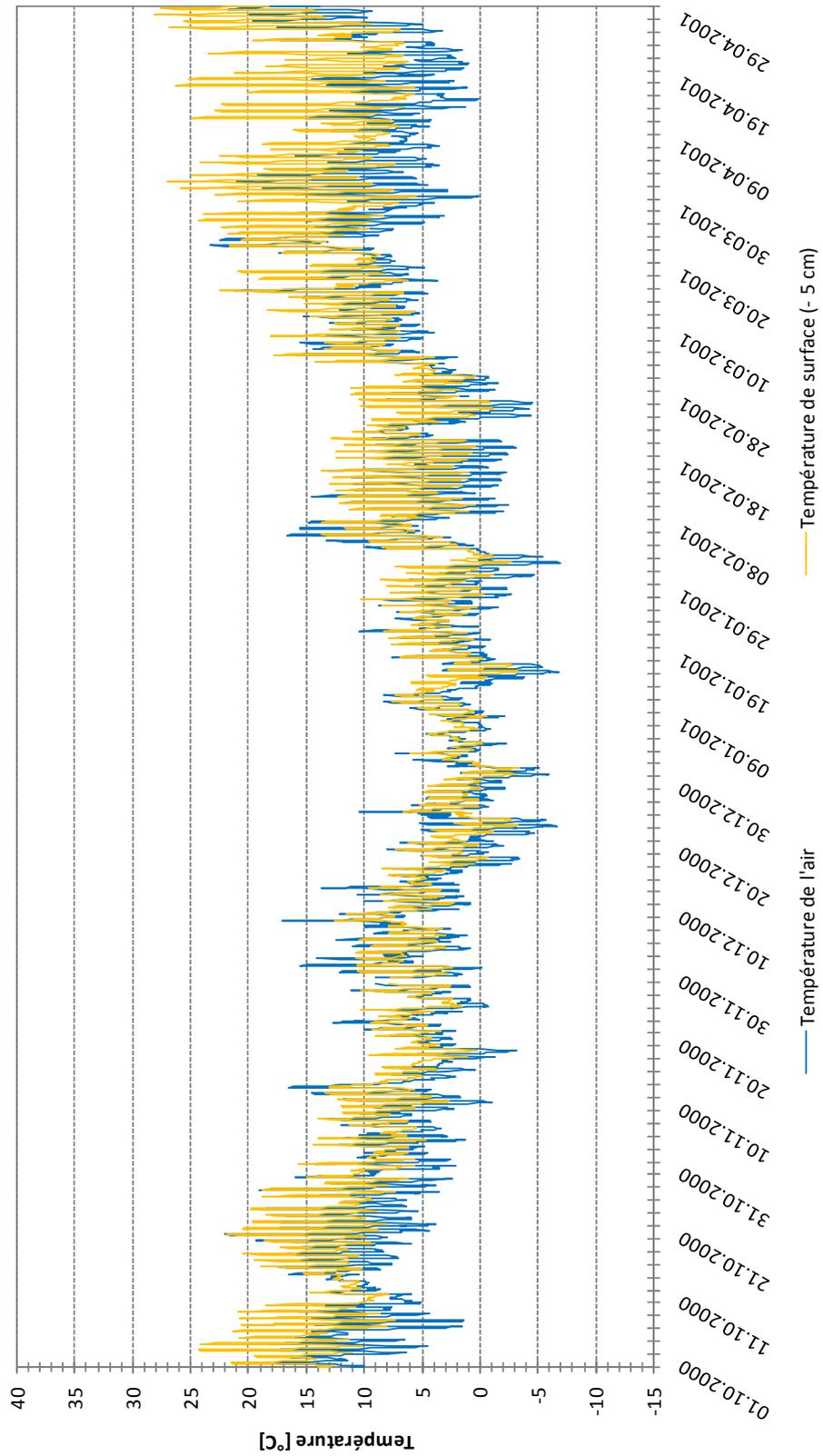


Hiver 1999/2000 : Rayonnement

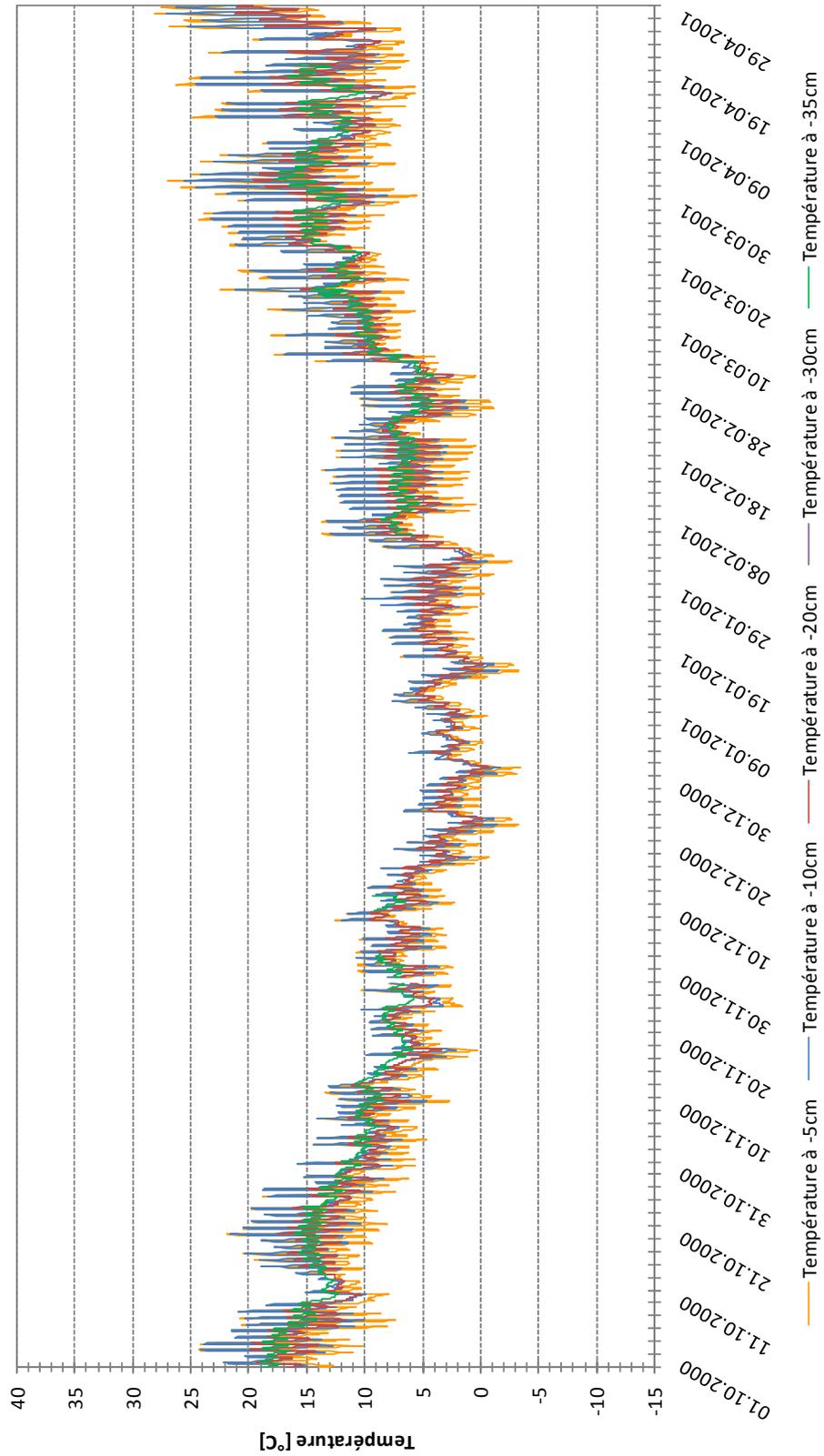


8.1.9 Hiver 2000/2001

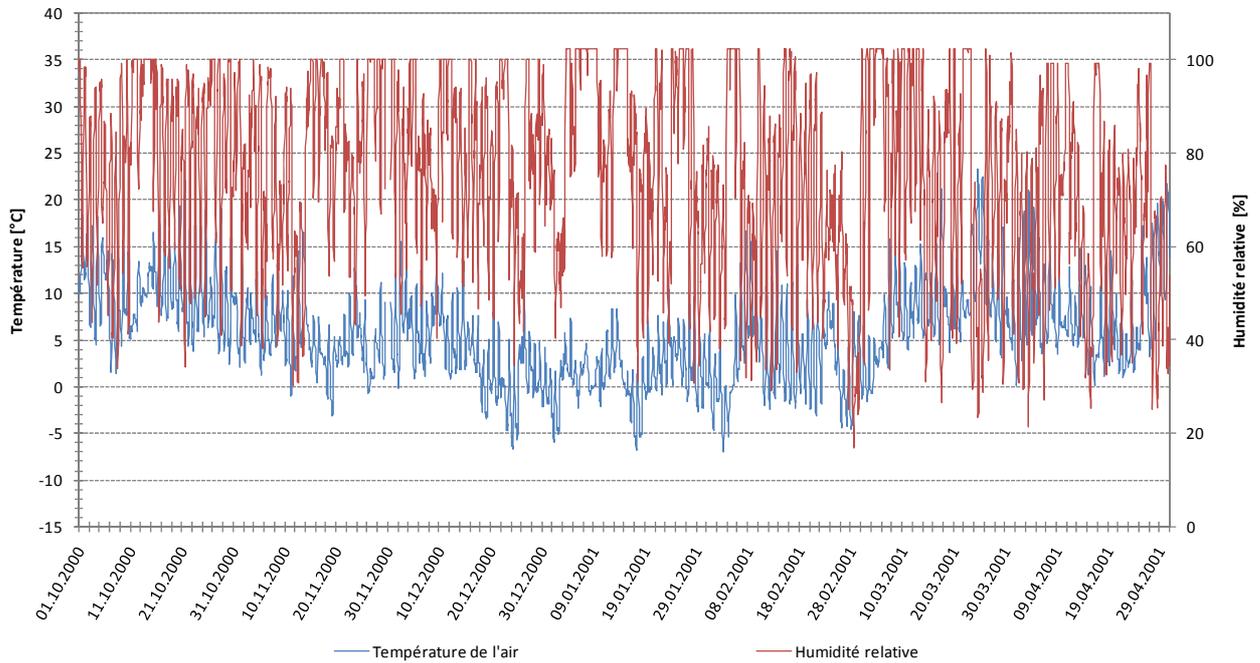
Hiver 2000/2001: Température de l'air et de la surface



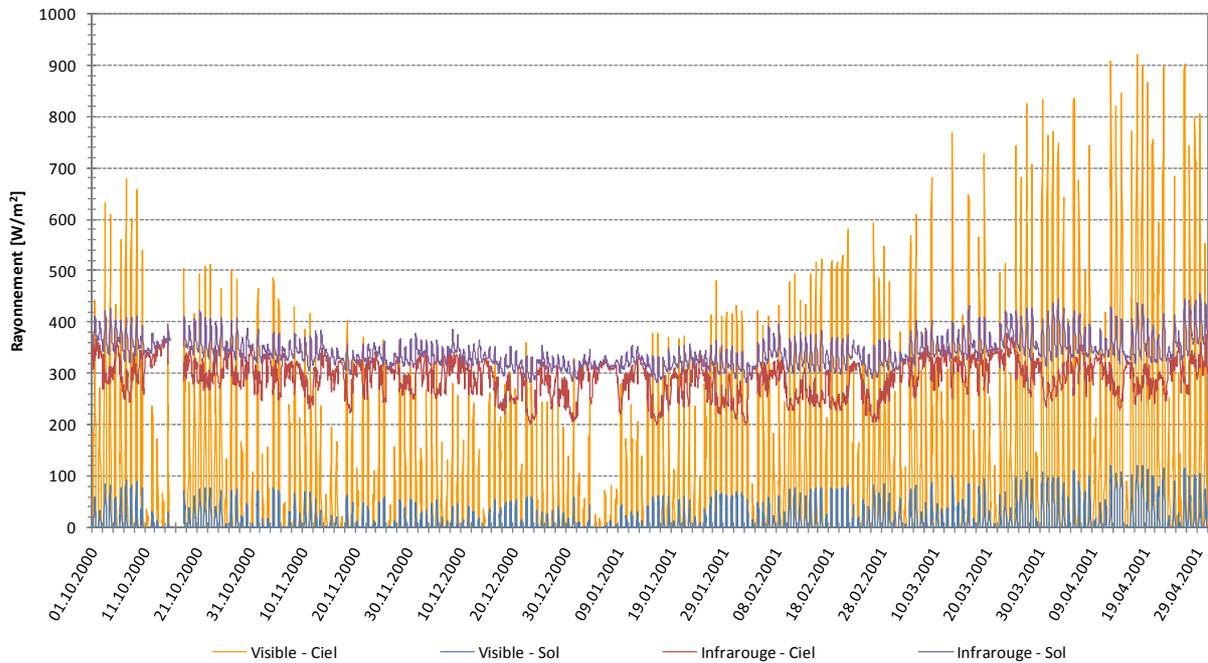
Hiver 2000/2001: Température de la chaussée



Hiver 2000/2001: Température de l'air et humidité relative

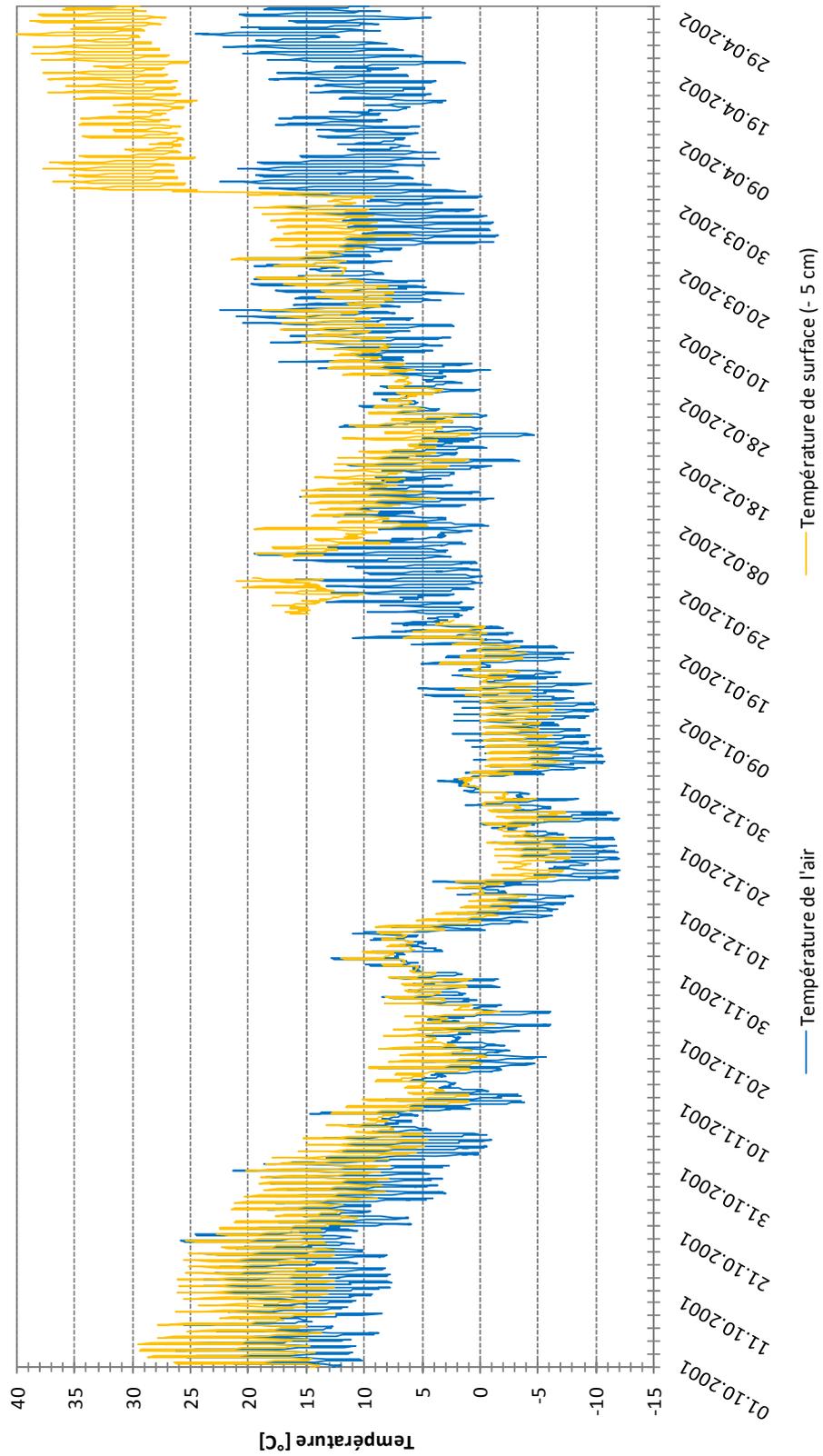


Hiver 2000/2001: Rayonnement

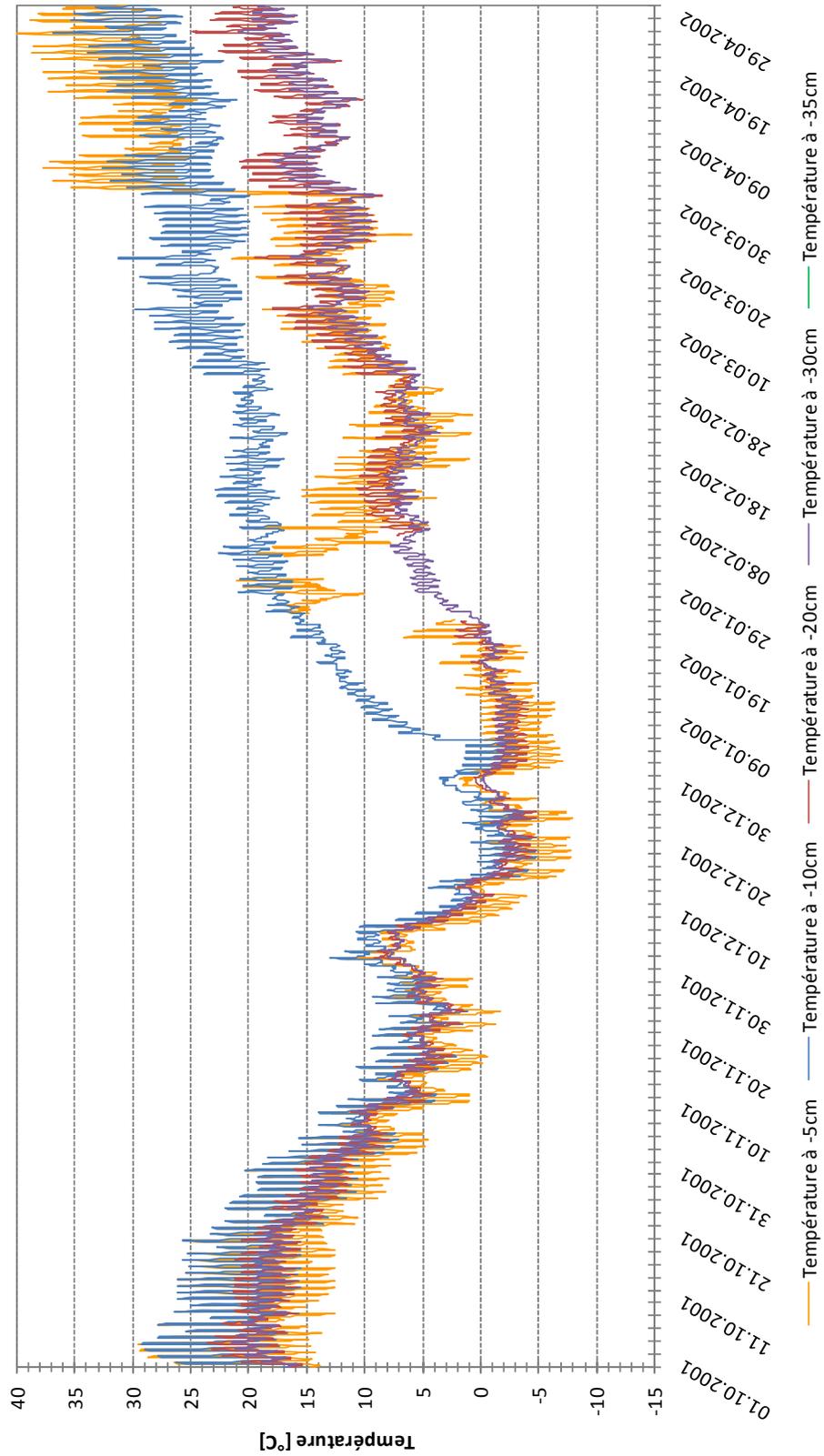


8.1.10 Hiver 2001/2002

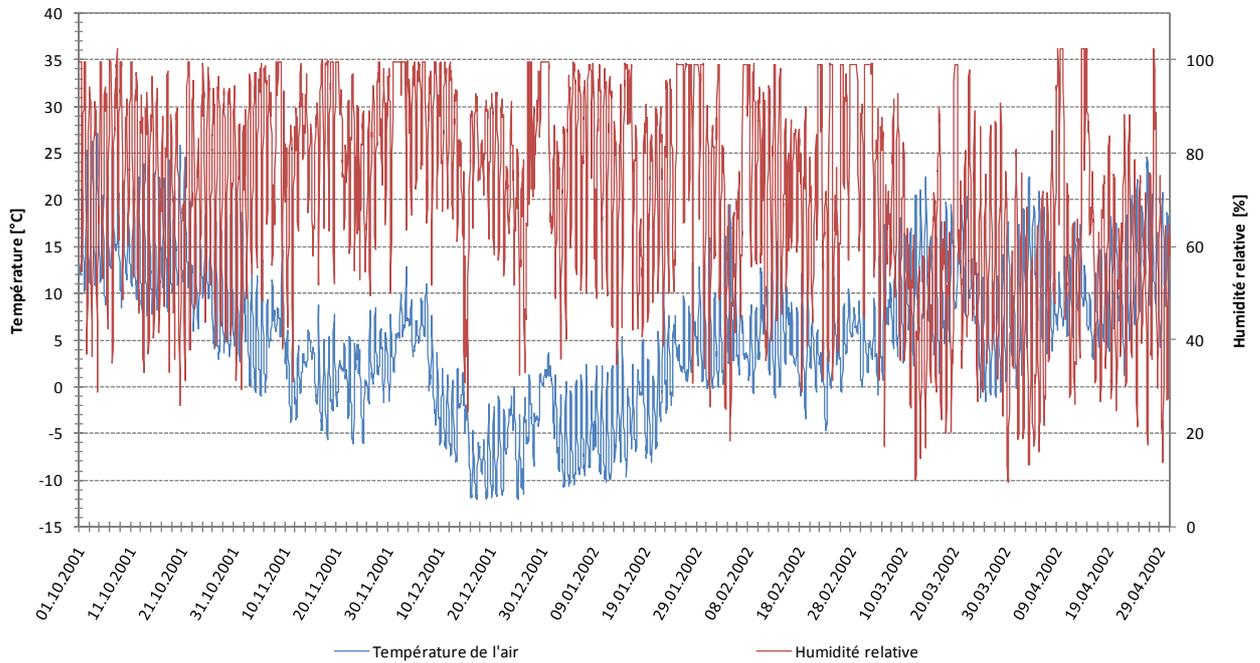
Hiver 2001/2002 : Température de l'air et de la surface



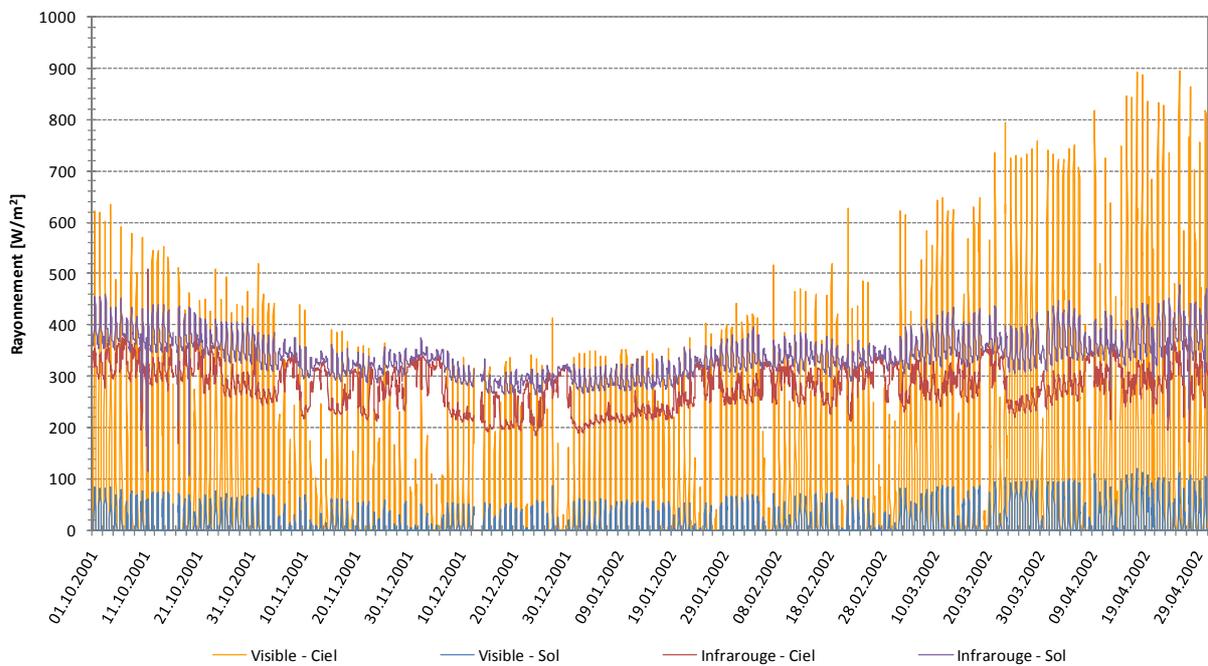
Hiver 2001/2002 : Température de la chaussée



Hiver 2001/2002 : Température de l'air et humidité relative

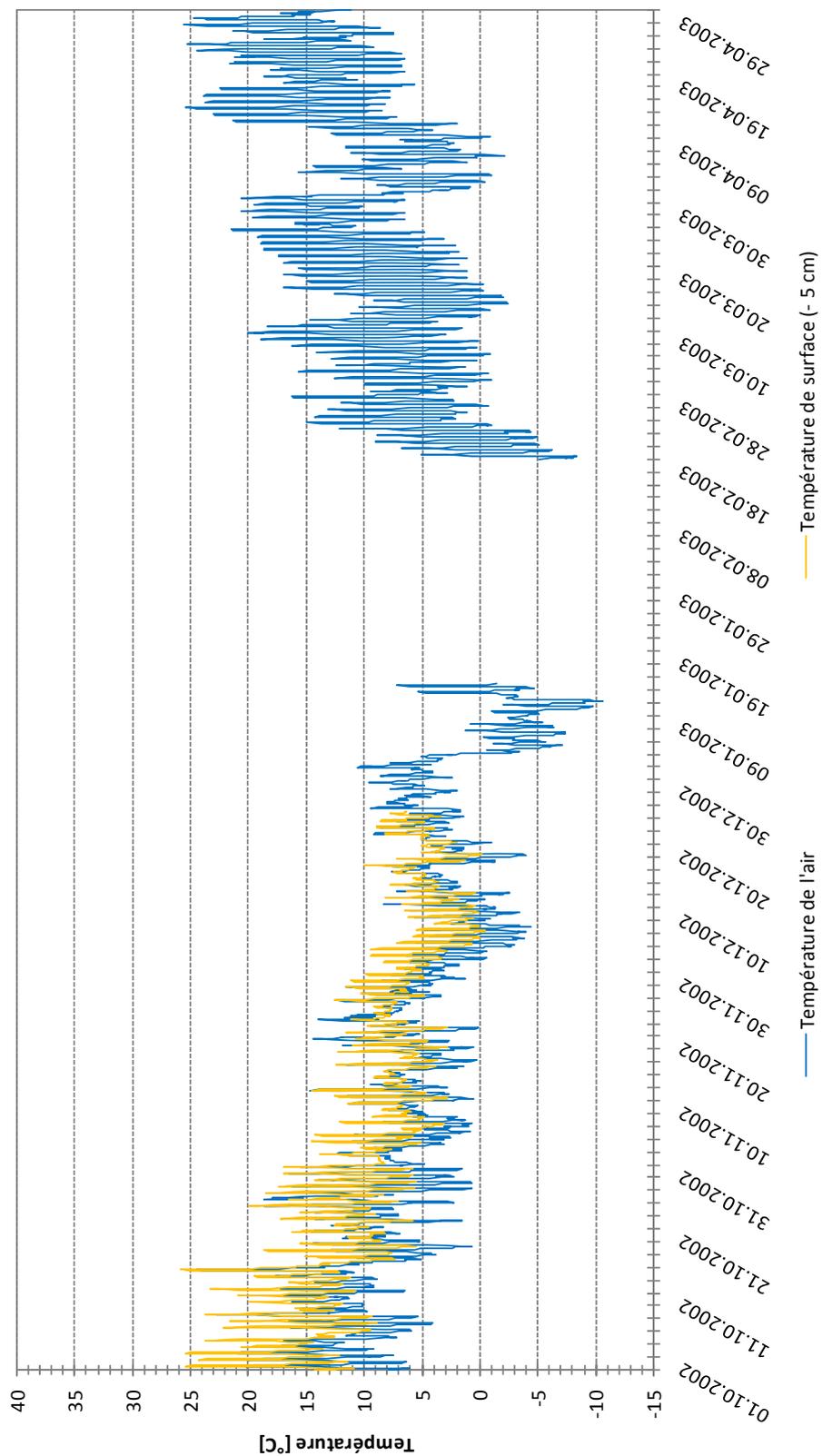


Hiver 2001/2002 : Rayonnement

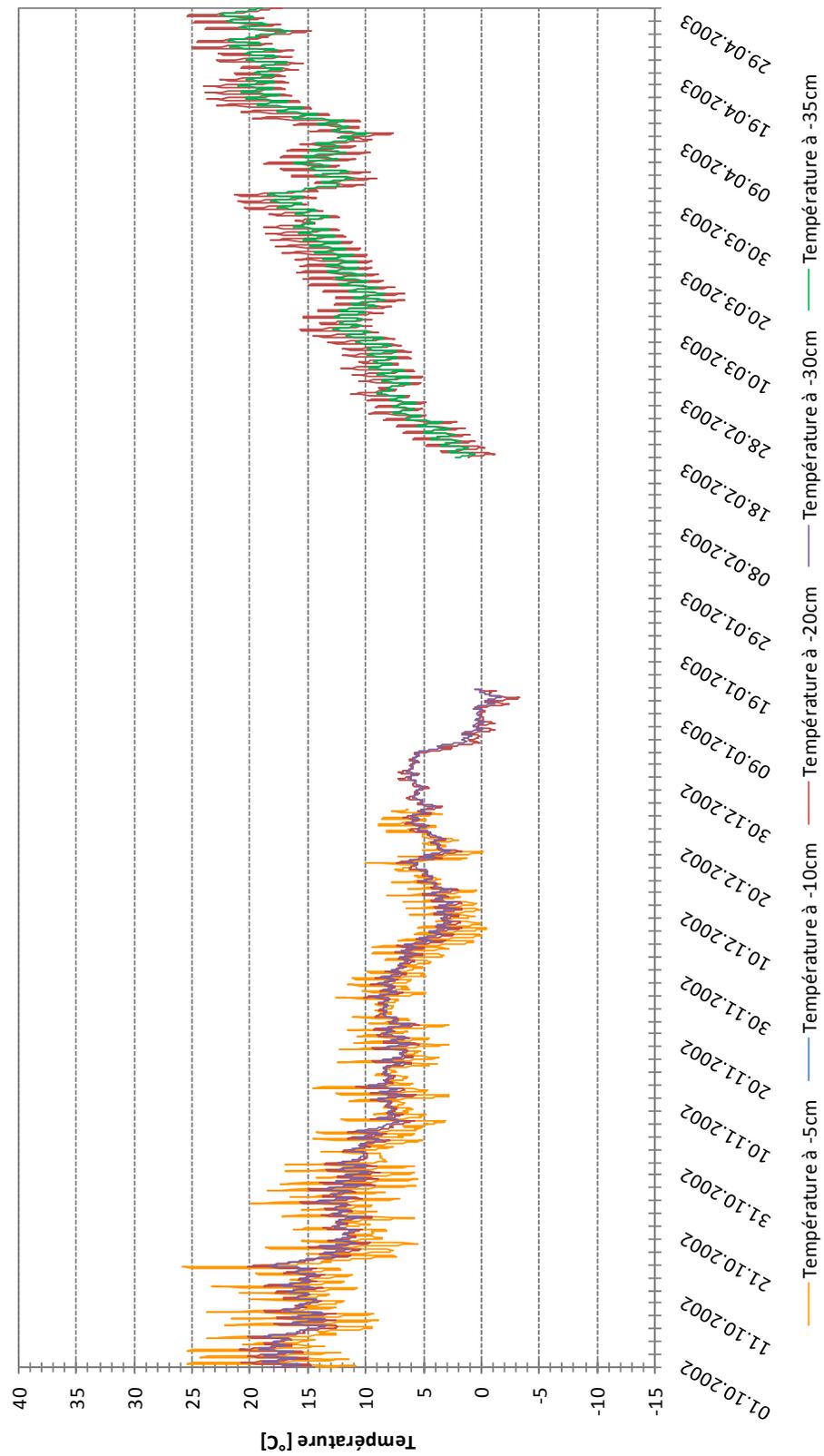


8.1.11 Hiver 2002/2003

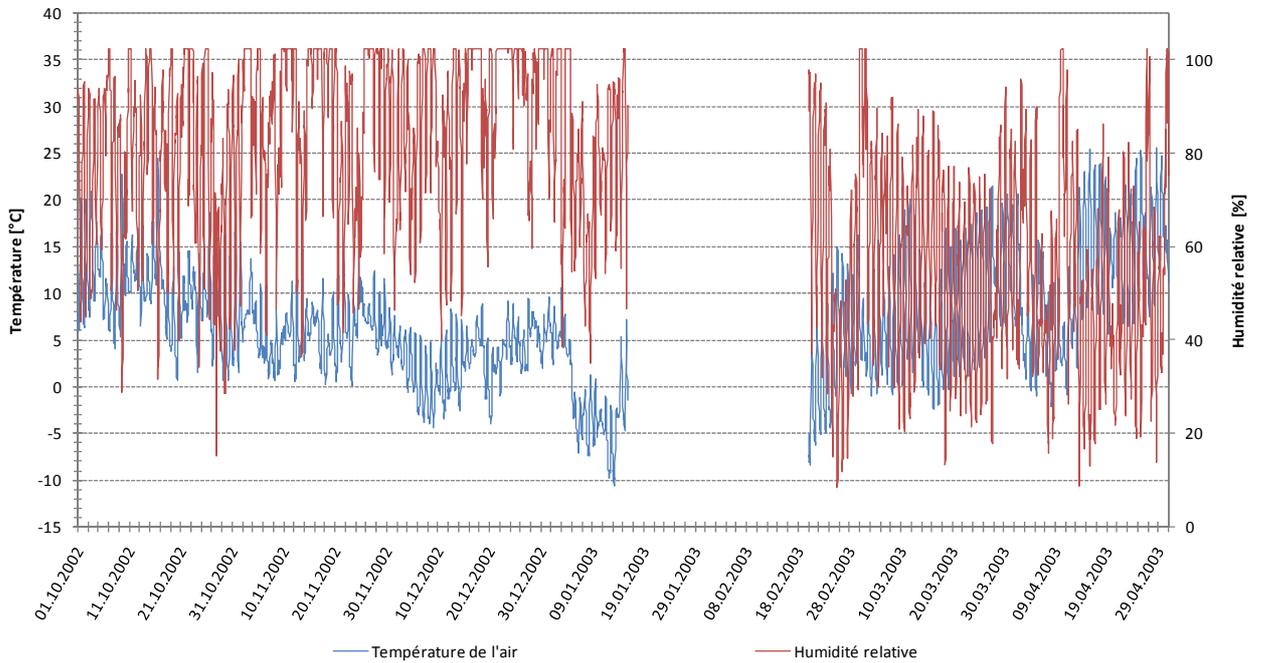
Hiver 2002/2003 : Température de l'air et de la surface



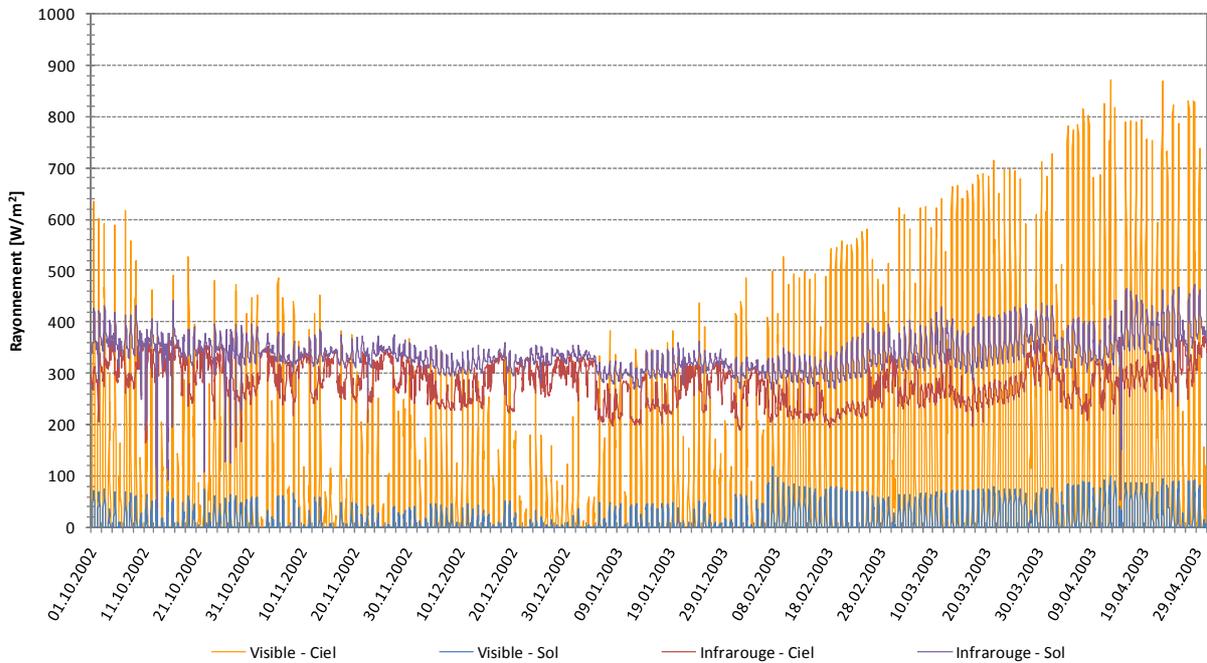
Hiver 2002/2003 : Température de la chaussée



Hiver 2002/2003 : Température de l'air et humidité relative

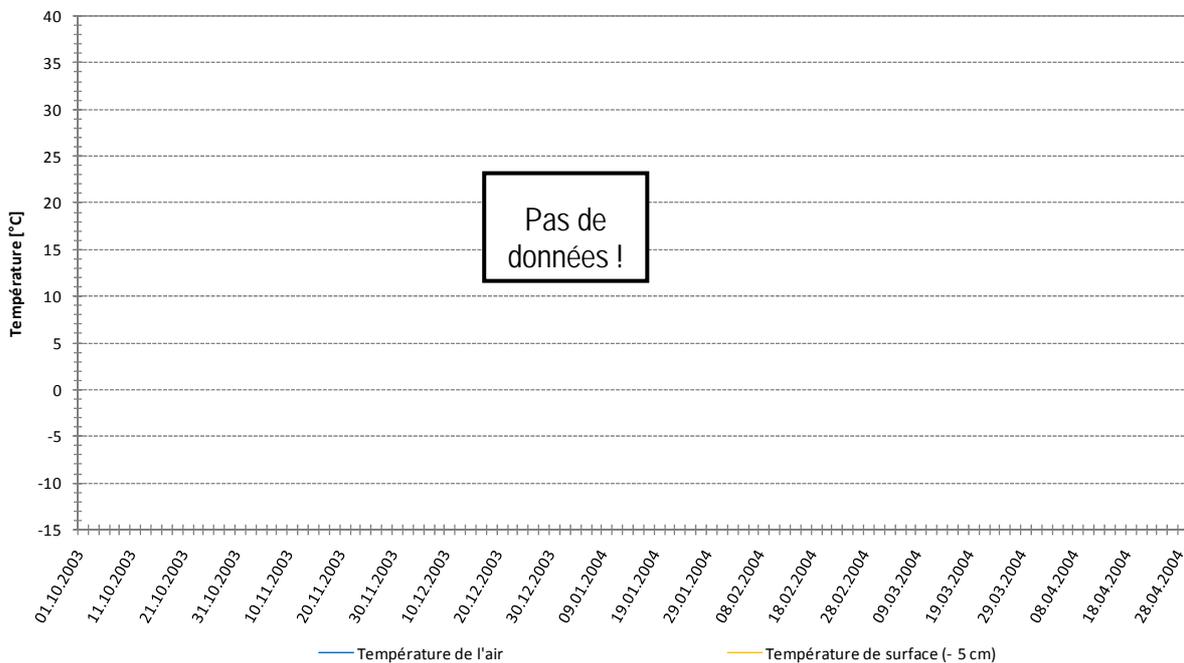


Hiver 2002/2003 : Rayonnement

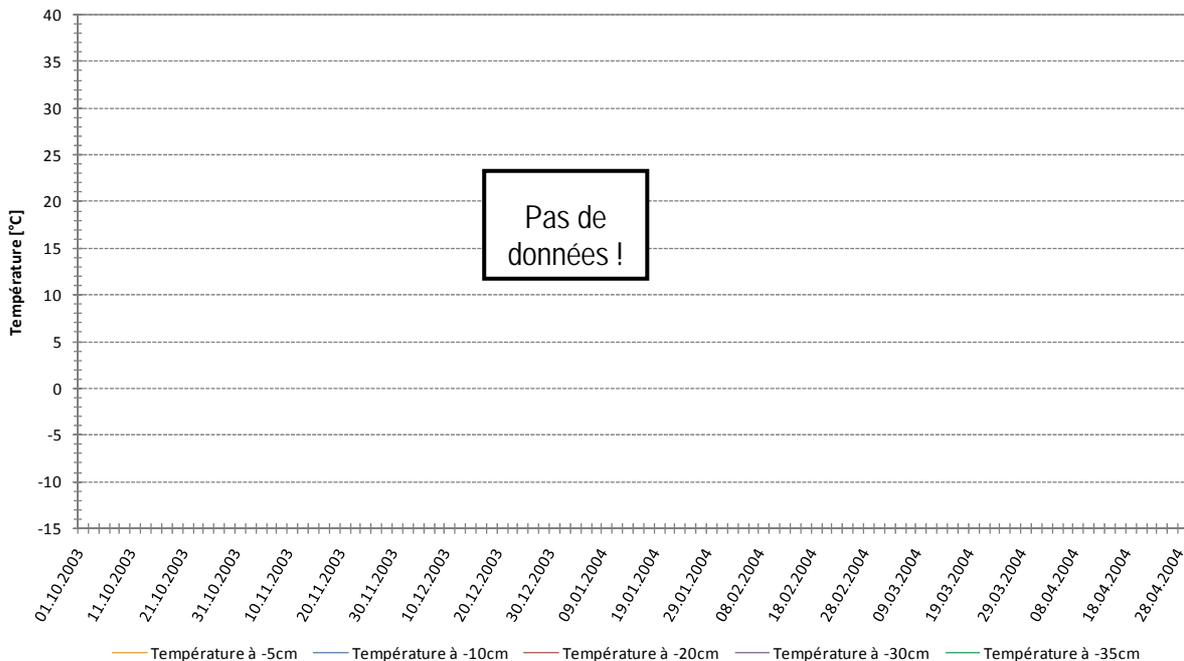


8.1.12 Hiver 2003/2004

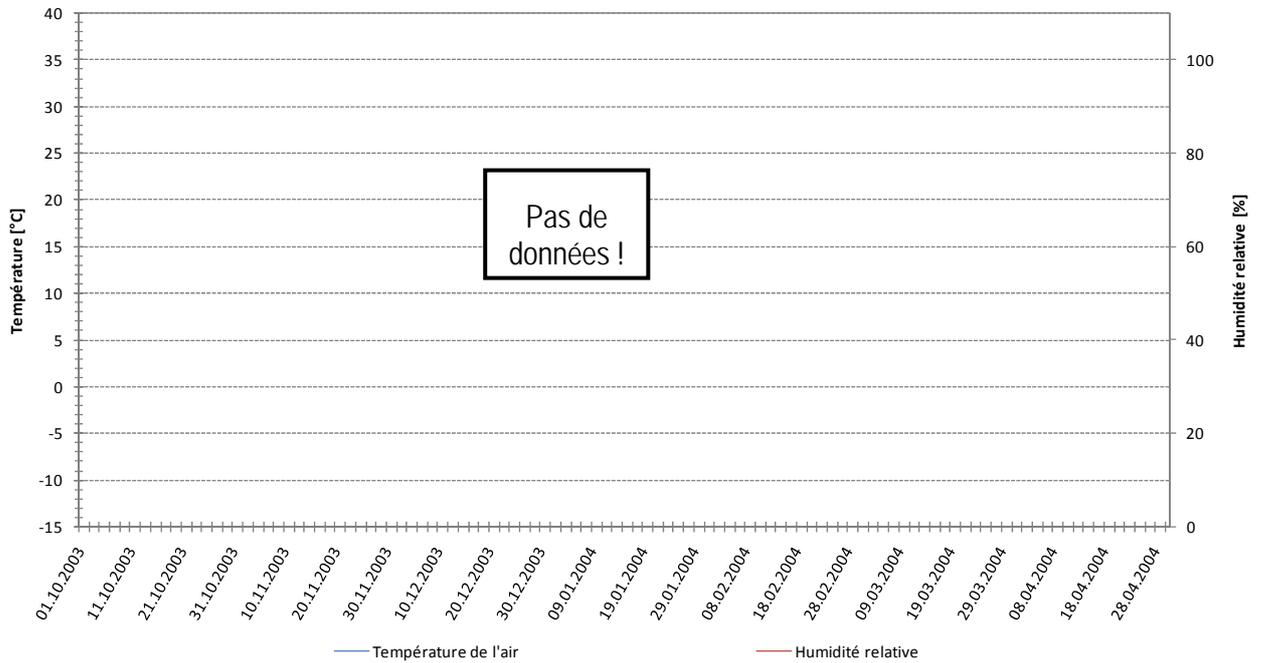
**Hiver 2003/2004 :
Température de l'air et de la surface**



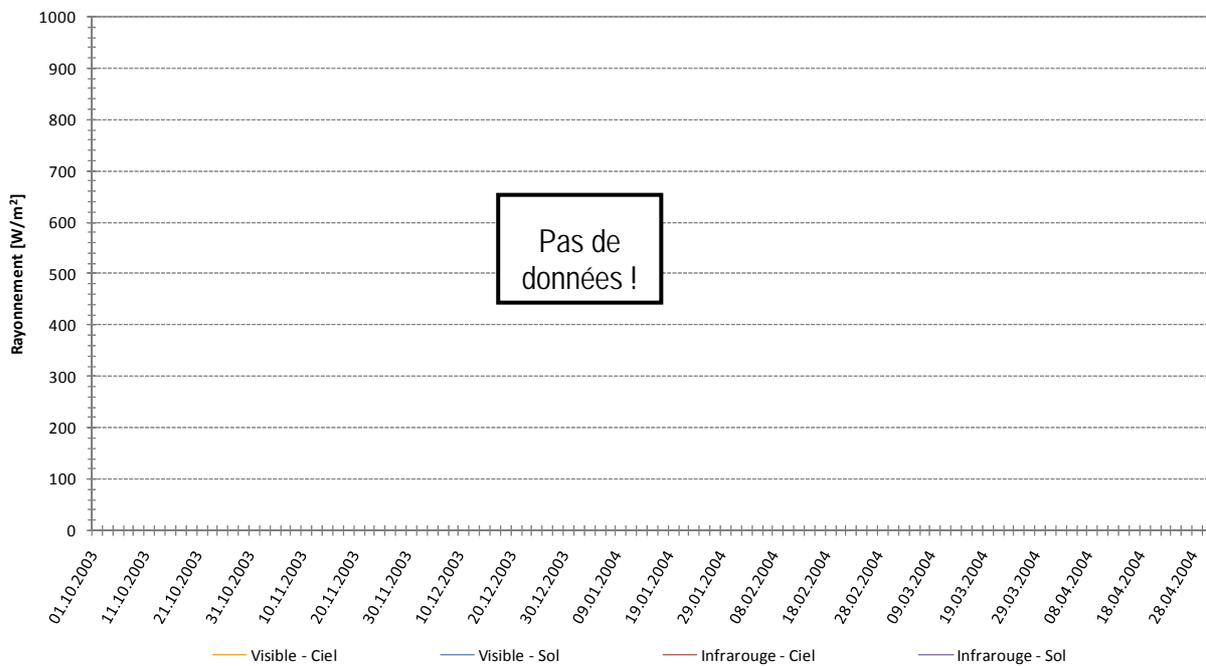
**Hiver 2003/2004 :
Température de la chaussée**



Hiver 2003/2004 : Température de l'air et humidité relative

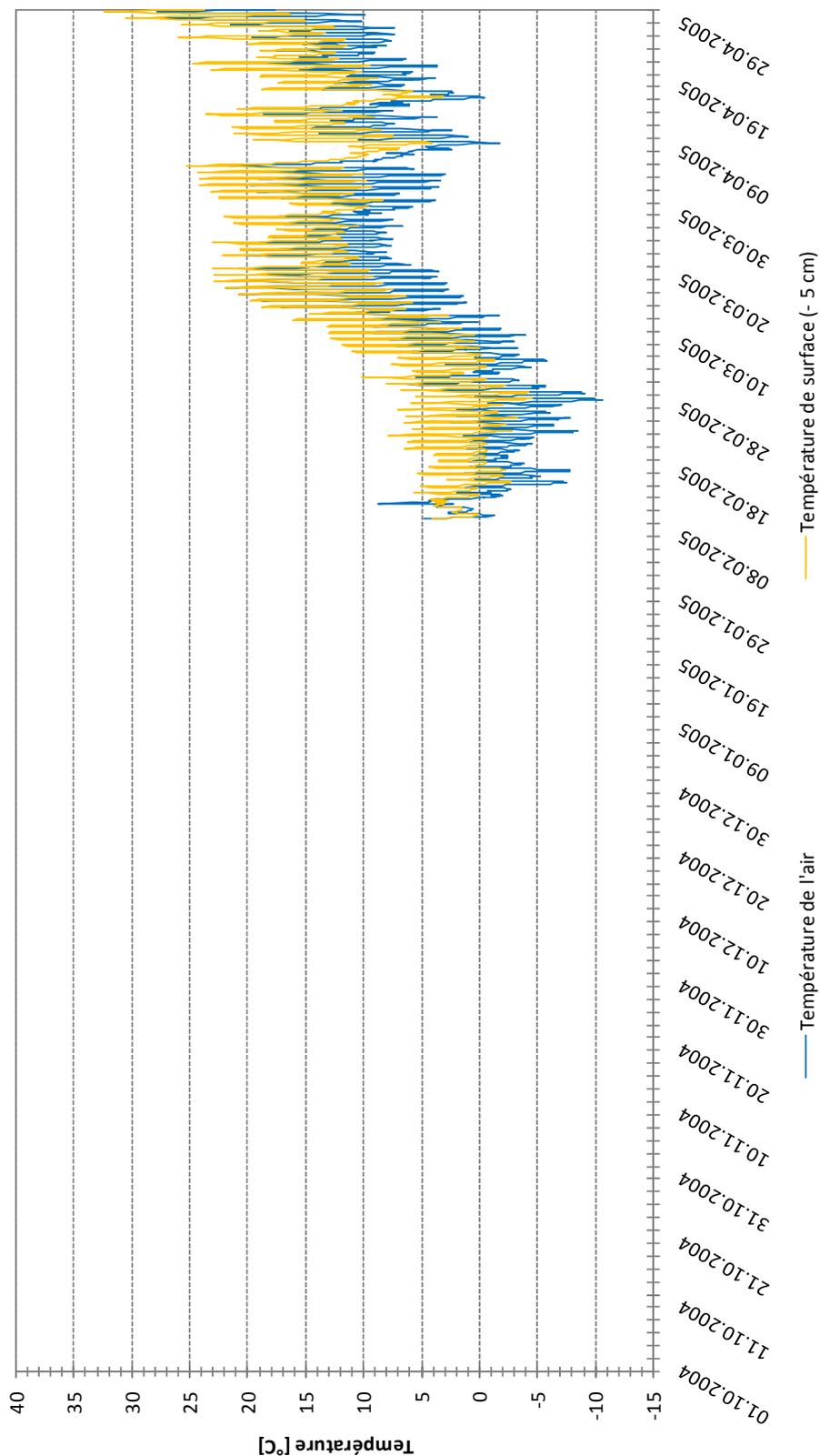


Hiver 2003/2004 : Rayonnement

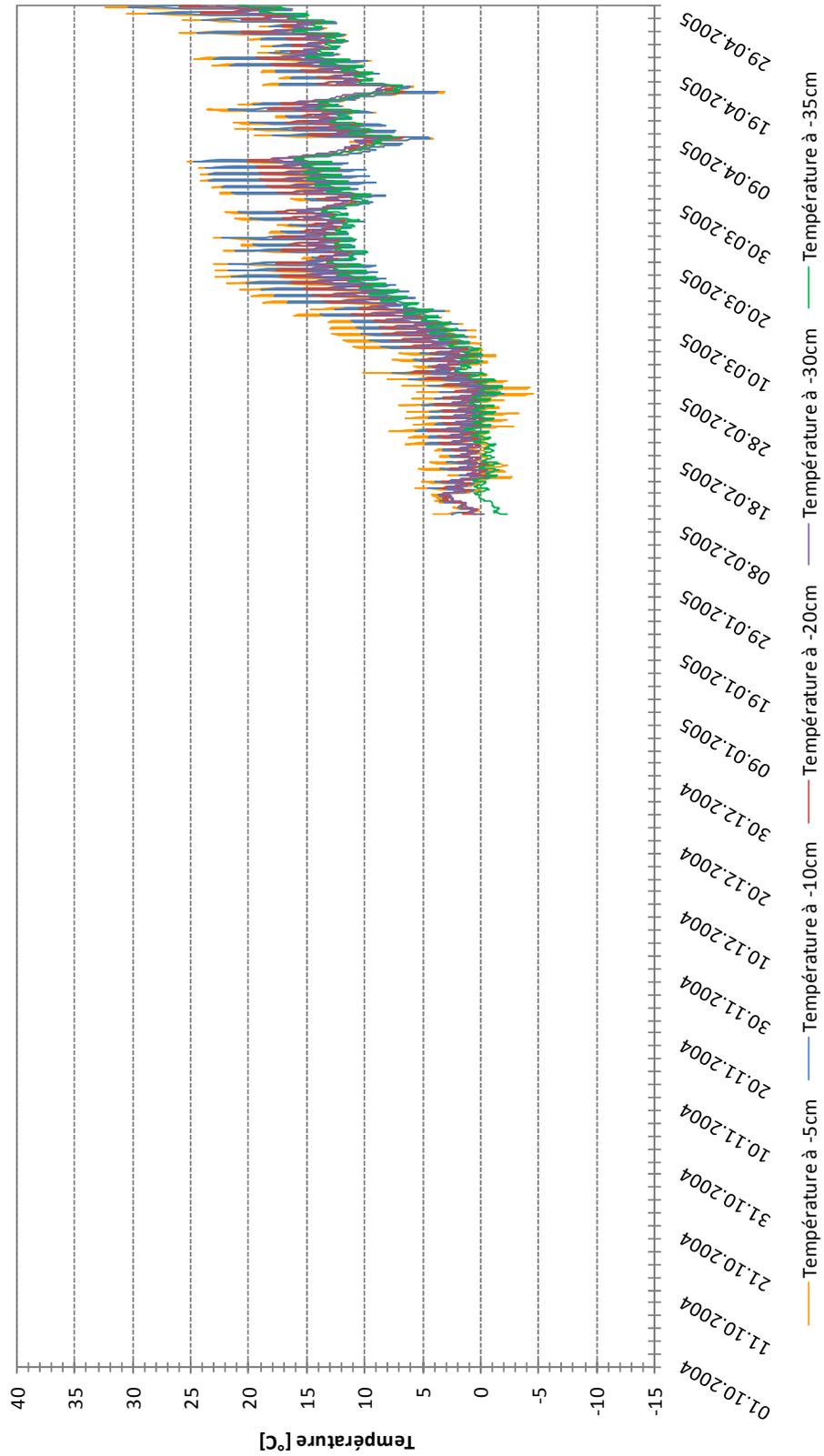


8.1.13 Hiver 2004/2005

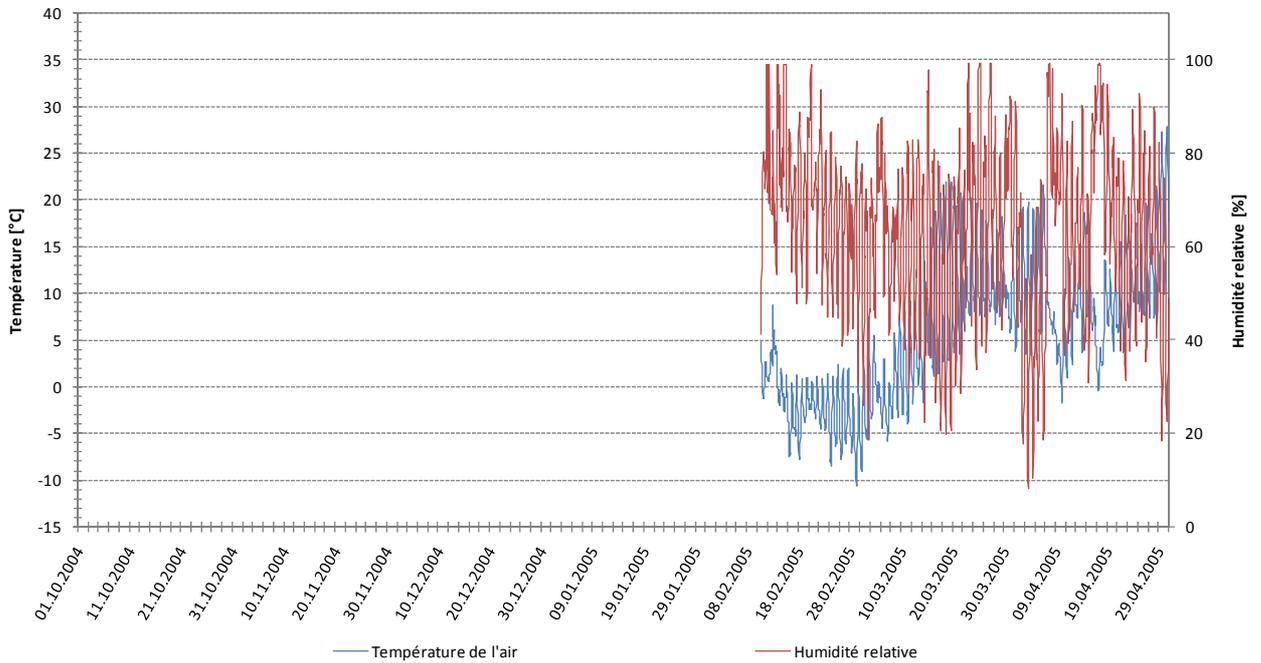
Hiver 2004/2005 : Température de l'air et de la surface



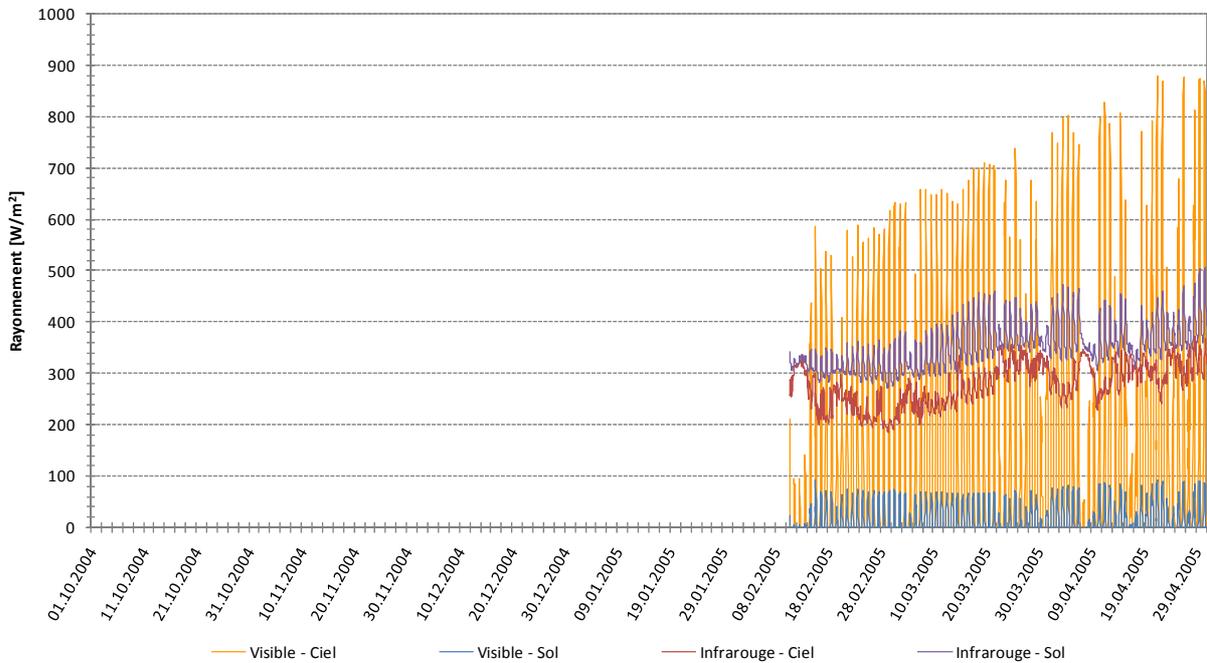
Hiver 2004/2005 : Température de la chaussée



Hiver 2004/2005 : Température de l'air et humidité relative

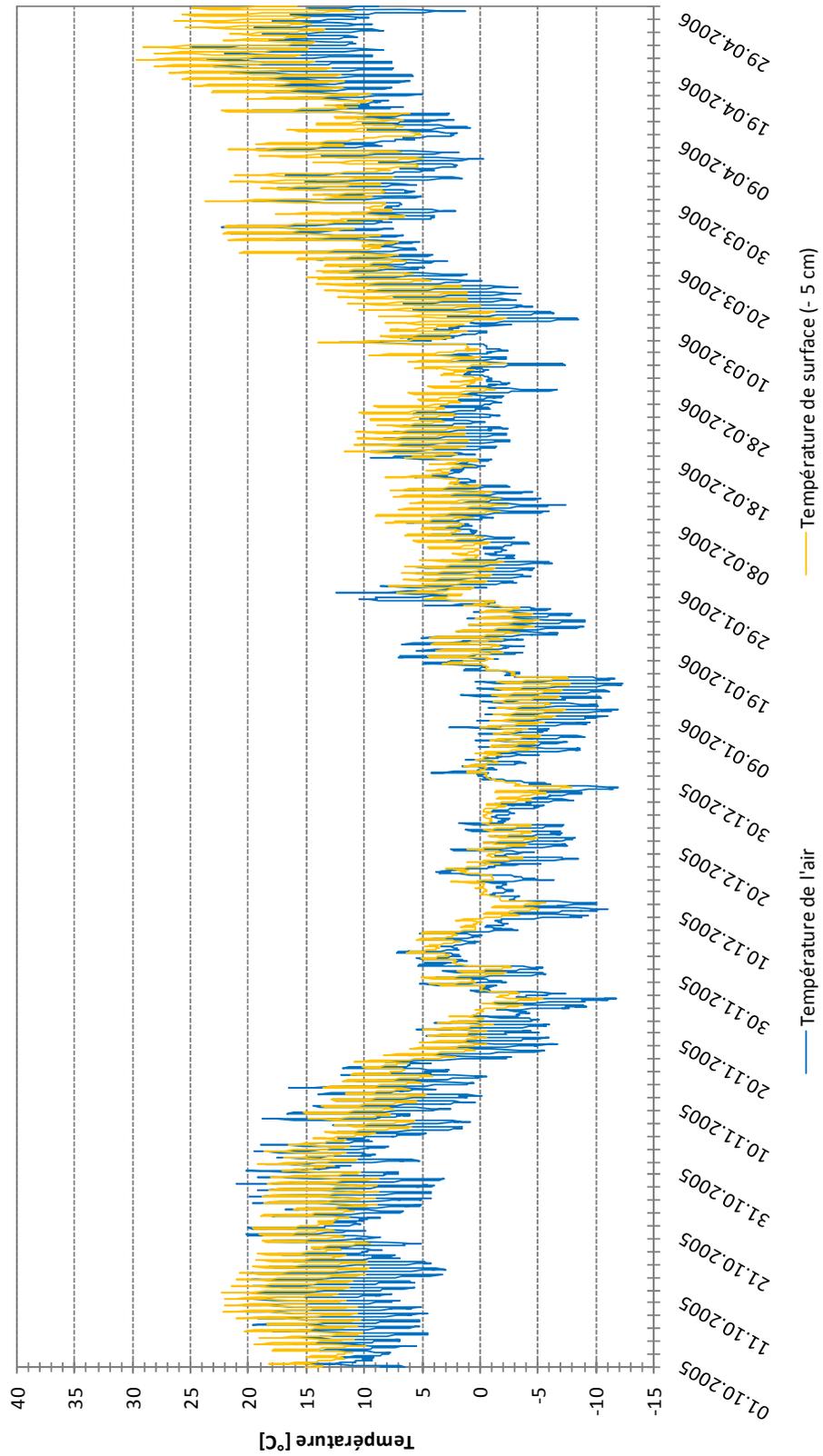


Hiver 2004/2005: Rayonnement

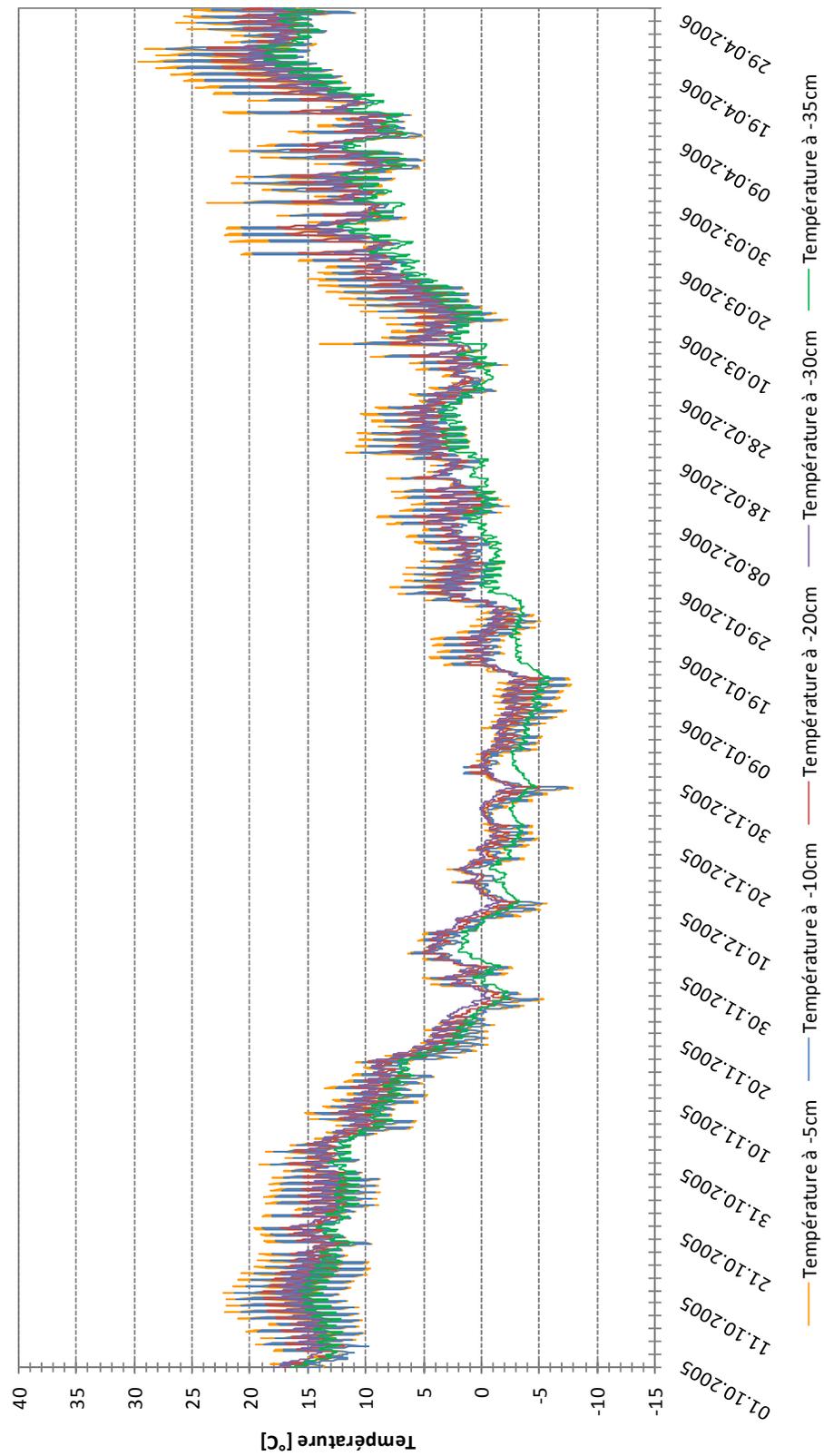


8.1.14 Hiver 2005/2006

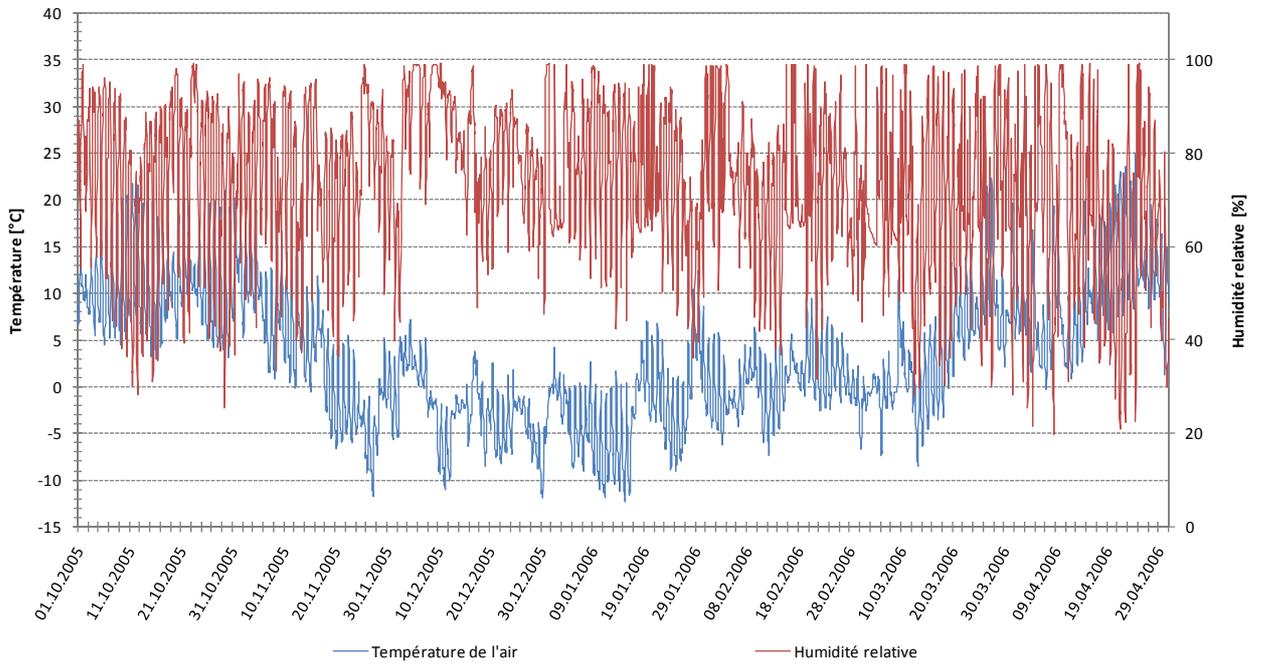
**Hiver 2005/2006 :
Température de l'air et de la surface**



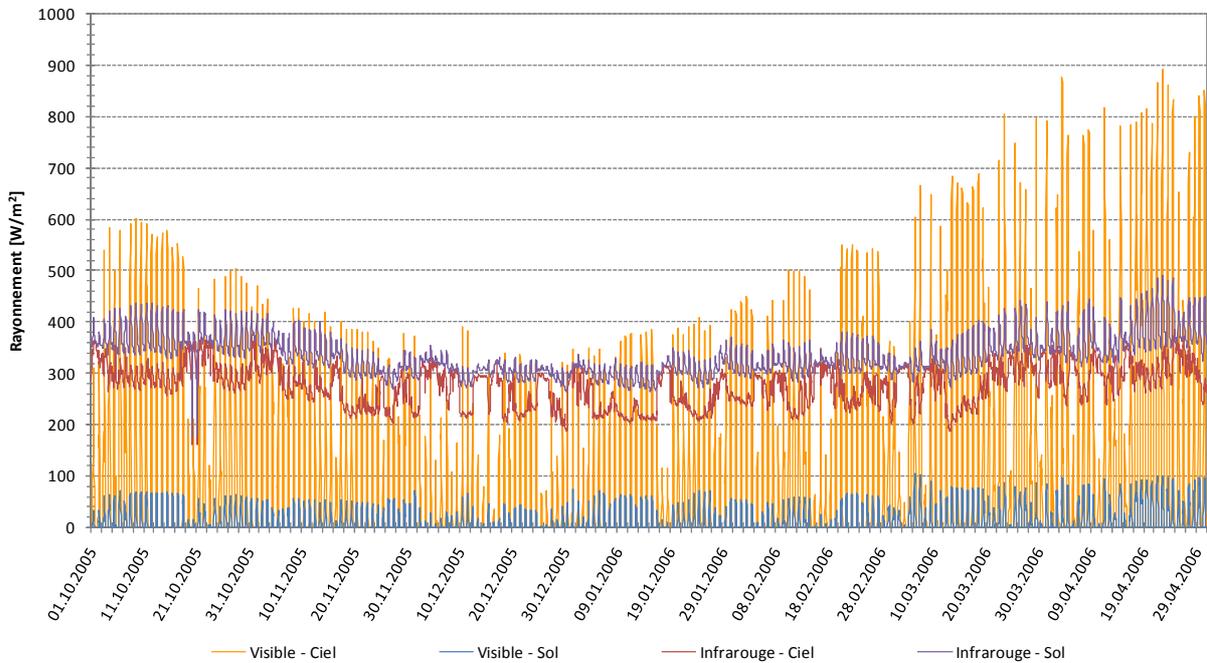
Hiver 2005/2006 : Température de la chaussée



Hiver 2005/2006 : Température de l'air et humidité relative

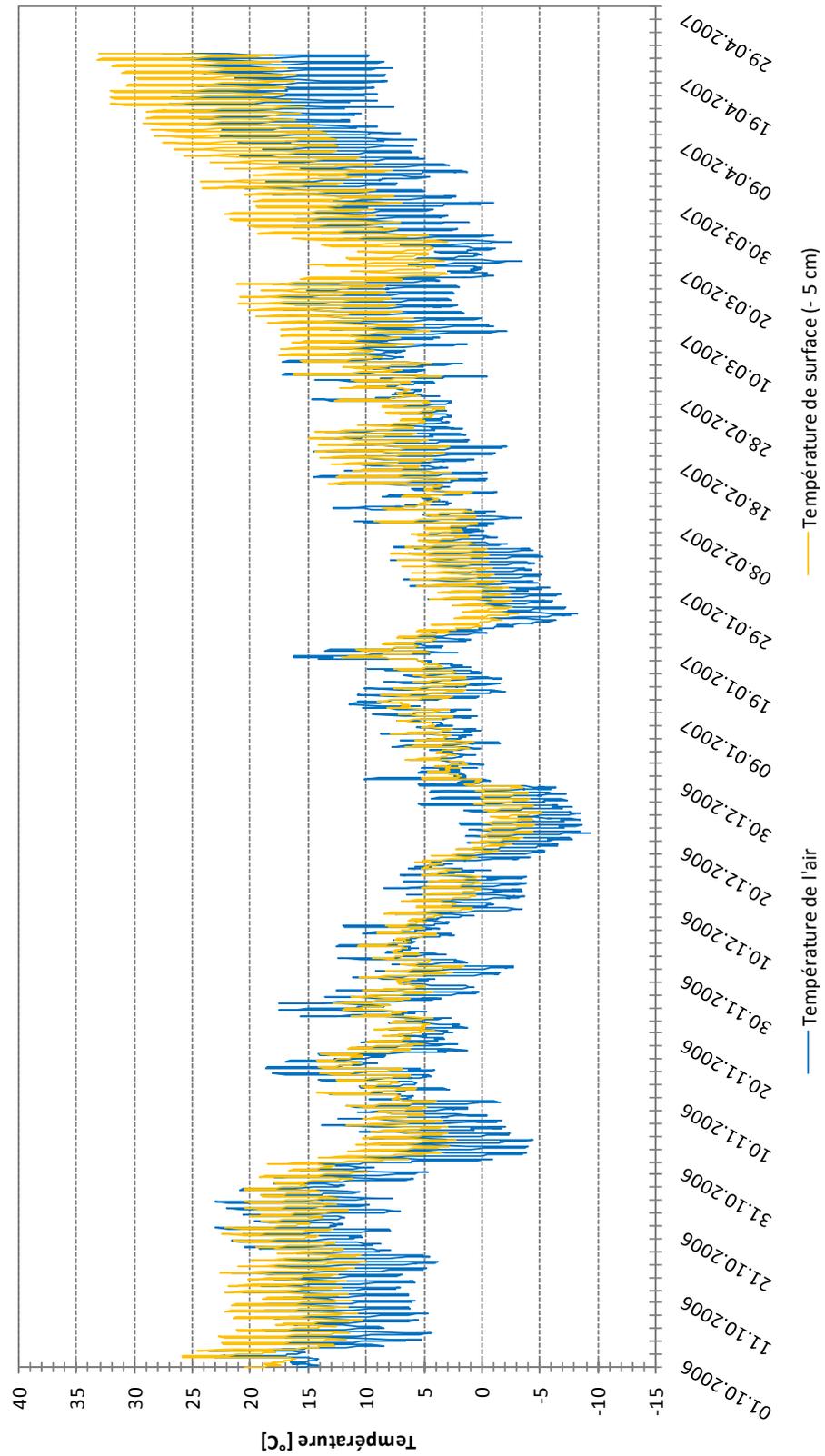


Hiver 2005/2006 : Rayonnement

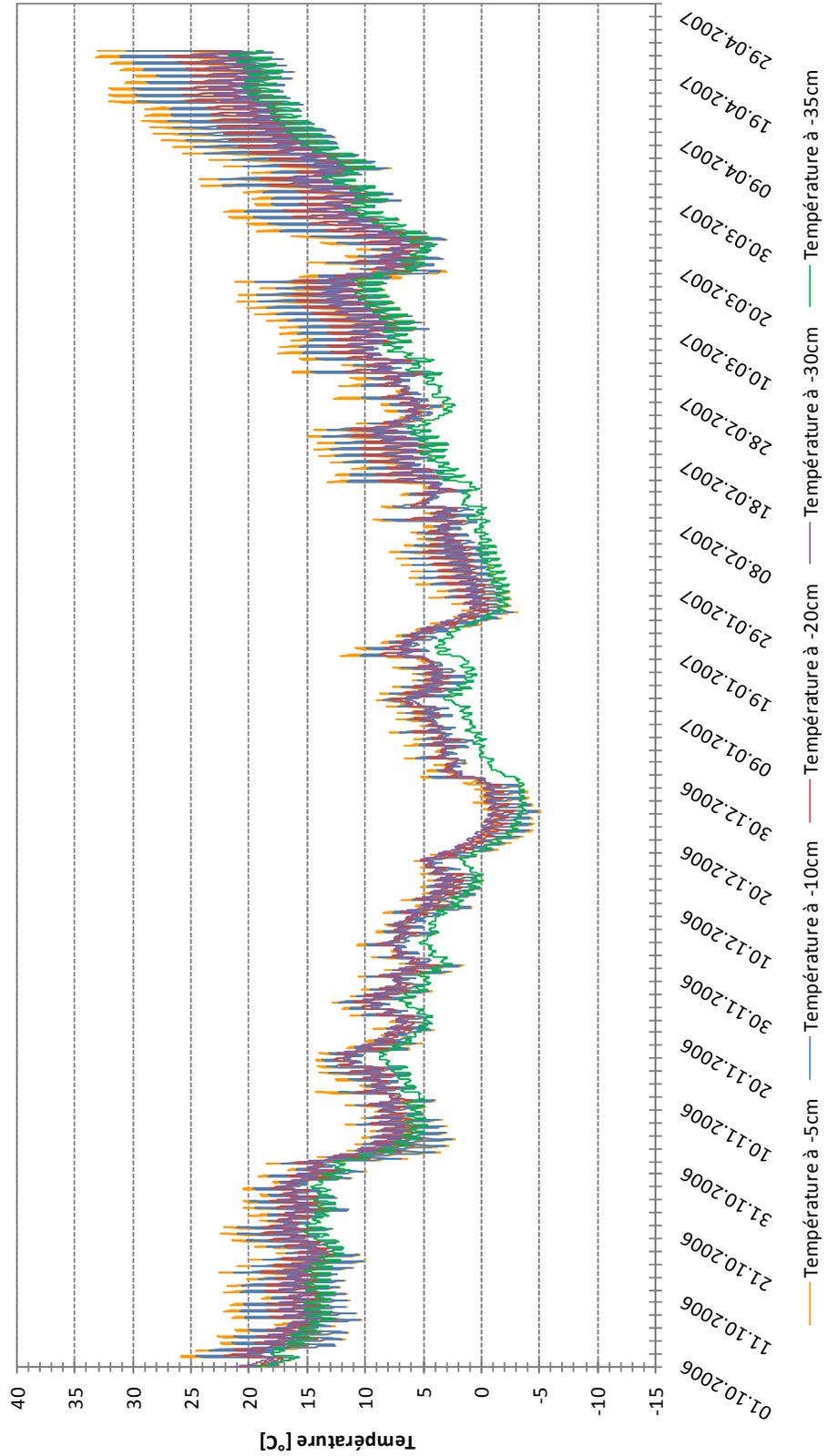


8.1.15 Hiver 2006/2007

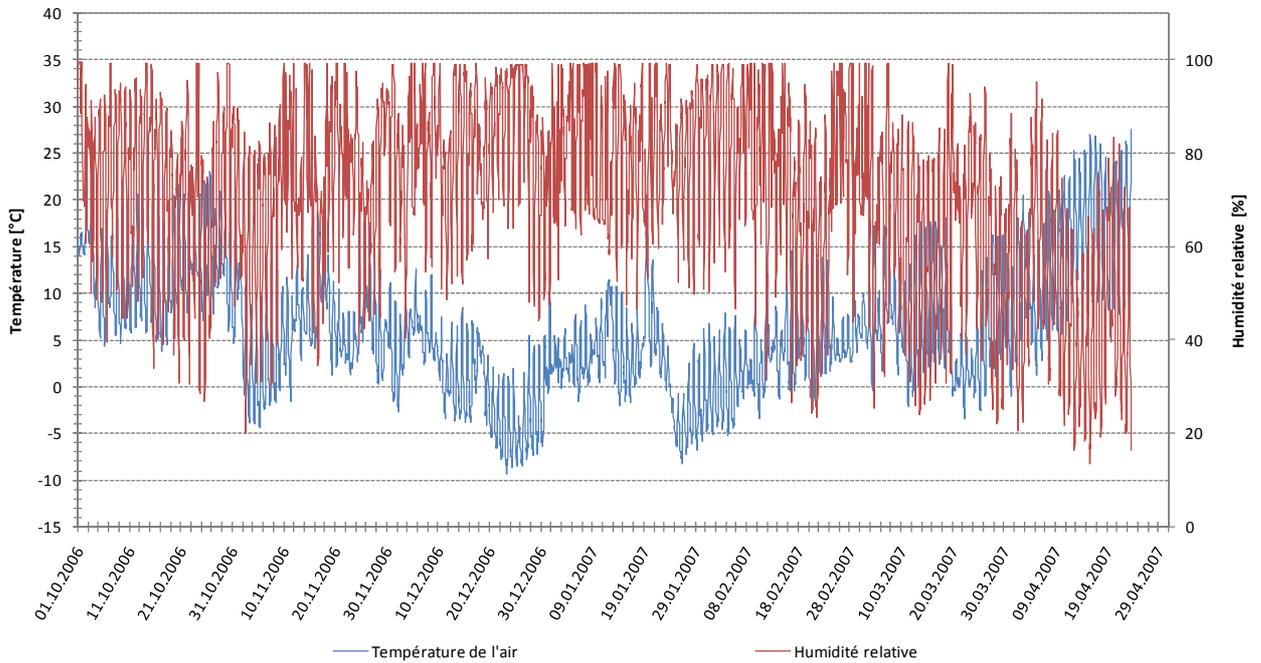
**Hiver 2006/2007 :
Température de l'air et de la surface**



Hiver 2006/2007 : Température de la chaussée



Hiver 2006/2007 : Température de l'air et humidité relative



Hiver 2006/2007 : Rayonnement

