

# Action-recherche du Cerema : Évaluation d'une toiture terrasse végétalisée à zéro rejet

## Livrable n°1 : Note sur l'instrumentation



# Action-recherche du Cerema : Évaluation d'une toiture terrasse végétalisée à zéro rejet

## Livrable n°1 : Note sur l'instrumentation

### Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
A	10/06/2016	
B	08/07/2016	Suite aux remarques de E.Berthier et de D.Ramier

### Affaire suivie par

<b>Cédric PAYET</b> - Département Ville Durable – Unité Hydrologie, Gestion des Eaux pluviales
Tél. : 01 34 82 13 01
Courriel : <a href="mailto:cedric.payet@cerema.fr">cedric.payet@cerema.fr</a>
<b>David RAMIER</b> - Département Ville Durable – Unité Hydrologie, Gestion des Eaux pluviales
Tél. : 01 34 82 12 30
Courriel : <a href="mailto:david.ramier@cerema.fr">david.ramier@cerema.fr</a>
<b>Site de Trappes</b> : Cerema / Dter IdF – VD / HGEP adresse 12 rue Teisserenc de Bort 78 190 – Trappes-en-Yvelines

### Références

n° d'affaire : C15PV0119-01

maître d'ouvrage : Société Siplast-Nidaplast et Agence de l'Eau Loire-Bretagne (M. Houssin)

Devis n° D15PV0119-1 du 24/09/2015

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Cédric PAYET		
Contrôlé par	Emmanuel BERTHIER		
Validé par	Jean GABER		

### Résumé de l'étude :

L'étude consiste à évaluer l'impact d'une toiture végétalisée avec stockage sous-jacent sur la gestion des eaux pluviales afin de répondre aux exigences réglementaires, voir de procéder à la déconnexion totale au réseau d'assainissement.

Dans le cadre d'un partenariat avec la société Siplast-Nidaplast et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'équipe du Cerema a pour mission d'équiper et instrumenter la toiture, de réaliser le suivi, la critique et la validation des mesures et enfin de développer un modèle conceptuel « Zéro Rejet ».

Ce livrable présente la toiture expérimentale, son instrumentation et ses conditions de suivi par le Cerema.

# SOMMAIRE

<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>2 PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIMENTATION.....</b>	<b>4</b>
<b>3 MATÉRIEL UTILISÉ.....</b>	<b>6</b>
3.1 Implantation du matériel retenu pour l'expérimentation.....	6
3.2 Description des capteurs de mesures.....	10
<b>4 RÉCUPÉRATION, CRITIQUE ET VALIDATION DES DONNÉES.....</b>	<b>16</b>
4.1 Récupération des données.....	16
4.2 Critique et validation des données.....	17
<b>5 EXPLOITATION ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES.....</b>	<b>19</b>
<b>6 CONCLUSION.....</b>	<b>20</b>

# 1 Introduction

Dans le cadre de l'étude de validation d'un système innovant de toiture terrasse végétalisée à Zéro Rejet mené par la société Siplast-Nidaplast et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'Unité Hydrologie, Gestion des Eaux Pluviales (UHGEP) du Cerema a été retenue comme partenaire pour l'évaluation des performances hydriques de cette toiture végétalisée.

Cette évaluation est découpée en trois étapes :

1. Équipement et instrumentation de la toiture ;
2. Suivi, critique et validation des mesures ;
3. Développement d'un modèle concept Zéro Rejet.

Le présent document concerne uniquement le volet 1 et constitue le livrable n°1 du partenariat. Il présente le site et l'implantation des appareils de mesures et décrit le matériel utilisé afin de réaliser un suivi efficace de l'expérimentation.

## 2 Présentation de l'expérimentation

Le site de l'étude se situe sur la toiture du groupe scolaire Bénédicte Maréchal basé à 12 rue des Dahlias, 45 100 Orléans (figure 1).

Plan de situation



Figure 1 : Plan de situation de la toiture instrumentée.

Le complexe de toiture végétalisée a déjà été mis en œuvre sur le site et présente les caractéristiques décrites sur les figures 2 et 3.

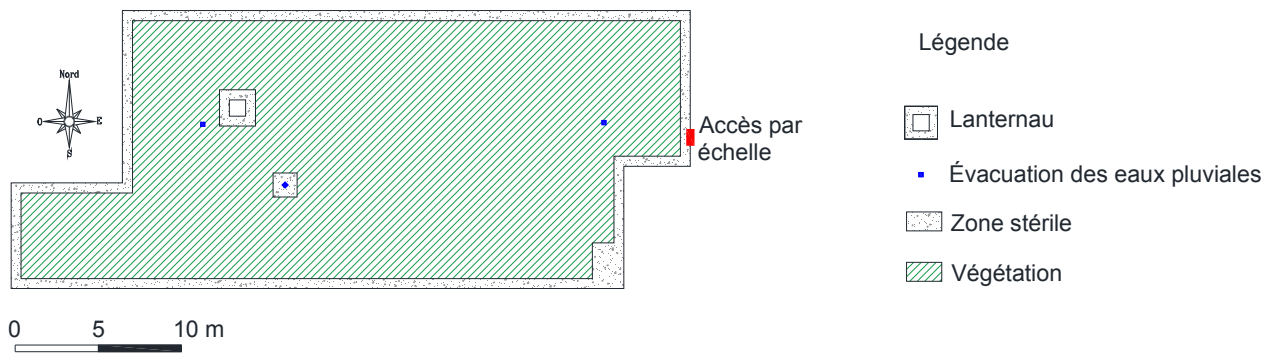


Figure 2 : Vue en plan schématique de la toiture.

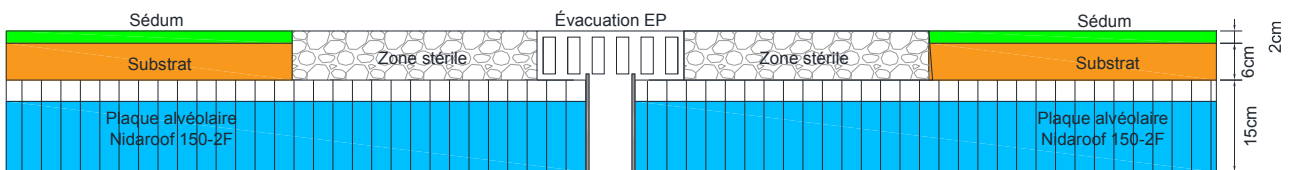


Figure 3 : Coupe type de la toiture à proximité d'une évacuation.

Le complexe de végétation est composé, de bas en haut, de plaques alvéolaires à structure en nid d'abeille d'une épaisseur de 15cm, d'une couche de 6cm de substrat séparée des alvéoles par un géotextile et recouverte par une végétation à base de sédums et de graminées.

Le principe d'une toiture végétalisée est de favoriser la transpiration des végétaux, l'évaporation du substrat et le stockage d'eau dans le substrat et la structure en nid d'abeille. Ces processus sont eux-mêmes fonctions des conditions météorologiques locales. L'évaluation des capacités de rétention de cette toiture végétalisée passe donc par un relevé précis des données météorologiques et des états hydriques et thermiques du complexe de végétalisation. Pour ce faire, trois profils de mesures répartis sur la toiture seront équipés de différents capteurs permettant le relevé des grandeurs clefs (ou des variables clefs).

## 3 Matériel utilisé

### 3.1 Implantation du matériel retenu pour l'expérimentation

Une station de mesure (figure 4) permet d'enregistrer en continu les états hydriques et thermiques mesurés selon trois profils verticaux.

Les profils hydriques du complexe de végétation sont composés de plusieurs types de capteurs, avec de haut en bas :

- des sondes capacitatives permettant de mesurer la teneur en eau du substrat ;
- un capteur d'humidité de l'air au-dessus du niveau d'eau des alvéoles de stockage ;
- des capteurs de hauteur d'eau dans les alvéoles de stockage sous-jacente.

De même, afin de réaliser les profils thermiques de la toiture, les capteurs suivants ont été installés :

- des capteurs de température dans l'eau des alvéoles, le substrat et dans l'air au-dessus des alvéoles ;
- des thermocouples pour la mesure de la température à la surface du substrat de la toiture.

Ces différents capteurs sont connectés à une centrale d'acquisition de type CR3000.



Figure 4 : Photo de la station de mesure des profils hydriques et thermiques et aperçu de surface de deux profils (entourés par du ruban de signalisation).

Une station météorologique (figure 5) permettant de renseigner les conditions météorologiques du site a été également mise en place comprenant :

- un capteur de vitesse et de direction du vent ;
- un capteur de température et d'humidité relative de l'air ;
- un baromètre pour mesurer la pression atmosphérique ;
- deux pluviomètres permettant de mesurer les précipitations ;
- un capteur de rayonnement net permettant de renseigner le bilan des radiations incidentes et réfléchies sur la zone d'étude.

Ces capteurs sont reliés à une seconde centrale d'acquisition de type CR800.

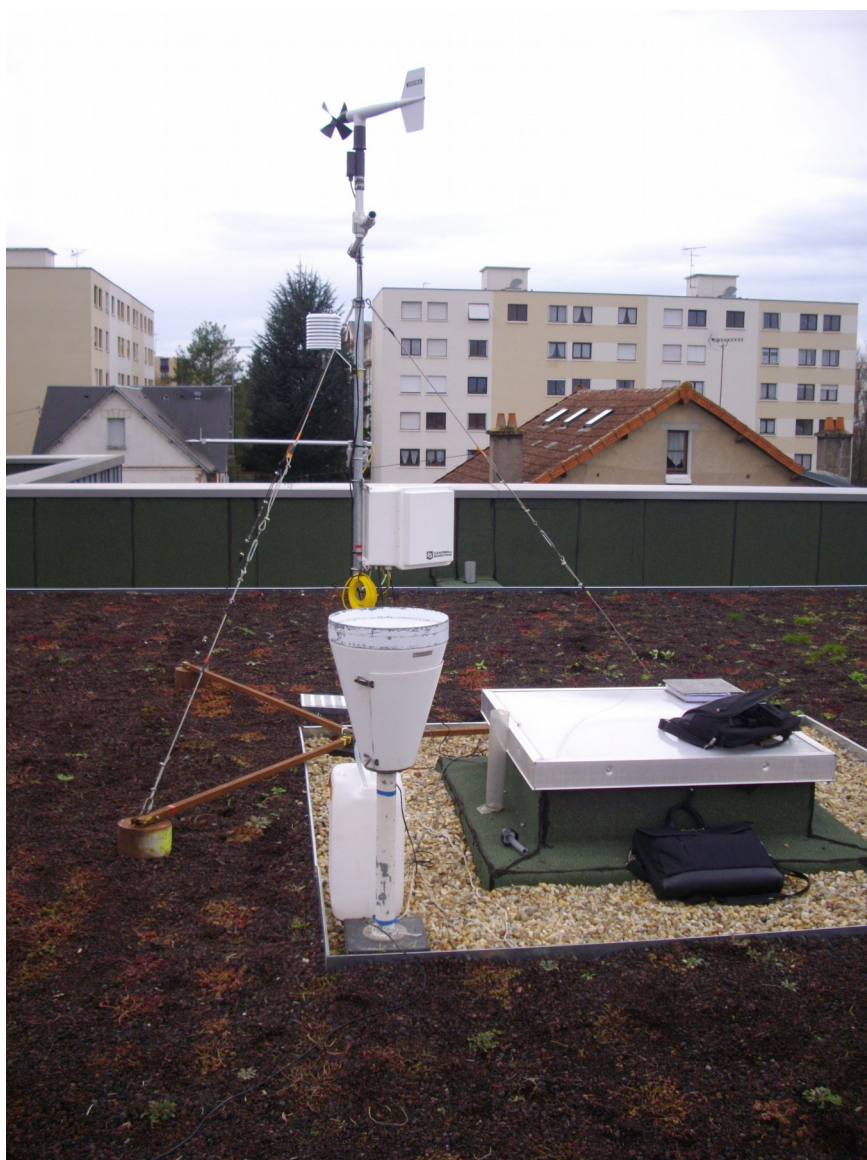


Figure 5 : Photo de la station météorologique.

Les deux centrales sont alimentées par un panneau solaire. Le transfert des données se font à distance par l'intermédiaire de deux transmissions GSM.

Ces capteurs et centrales d'acquisition serviront à réaliser et enregistrer les mesures en continu, au pas de temps de **5 minutes** pour la centrale CR3000 et de **30 minutes** pour la centrale CR800, et sur une durée de deux ans afin d'observer l'effet saisonnier et la variabilité intra-annuelle.

Les figures 6 et 7 précisent l'implantation du matériel.

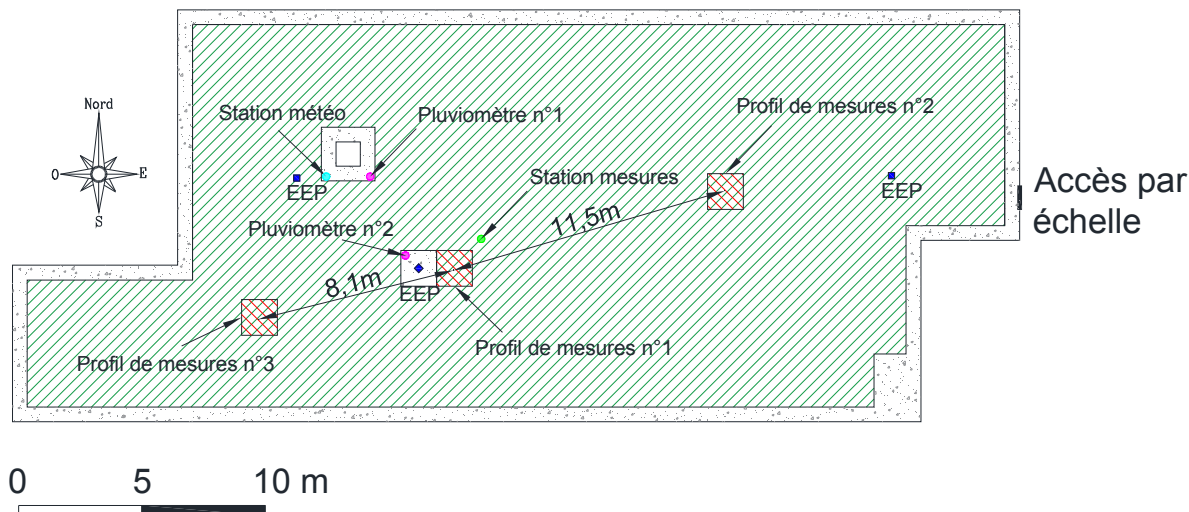


Figure 6 : Implantation des centrales d'acquisition et des profils de mesure.

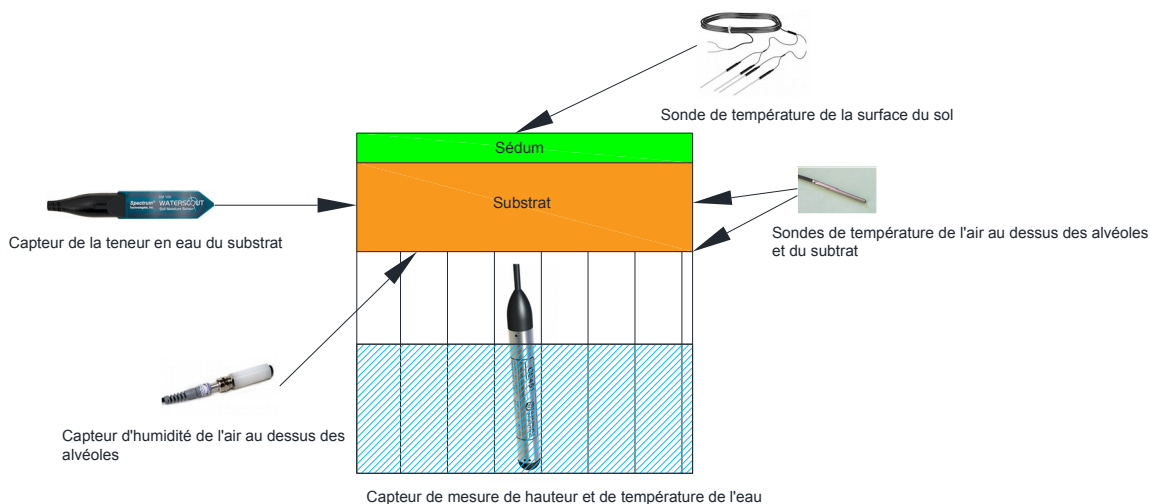


Figure 7 : Implantation des capteurs.

Le profil n°1 a été implanté à proximité immédiate d'une évacuation d'eaux pluviales. Les profils n°2 et n°3 ont été implantés respectivement à 8m10 et 11m50 par rapport au profil n°1. Cette répartition permettra de statuer sur l'homogénéité du comportement thermo hydrique de la toiture sur la totalité de sa surface.



La liste du matériel installé pour les trois profils hydro thermiques est présentée dans le tableau I. Il en est de même pour la station météo dans le tableau II.

Tableau I : Liste du matériel composant la station de mesures des profils.

<b>Description</b>	<b>Marque</b>	<b>Hauteur (par rapport à la surface du substrat)</b>
1 centrale d'acquisition de type CR3000	Campbell Scientific	-
1 transmission GPS de type Fastrack	Wavecom	-
1 alimentation sur panneau solaire de type SP10	Campbell Scientific	-
3 sondes de température de surface de type TCAV	Campbell Scientific	0cm
3 sondes capacitives de type SM100	Spectrum Technologies	- 3cm
3 capteurs de mesure de hauteur et de température de l'eau de type CS451	Campbell Scientific	- 21cm
5 sondes de température de type 107	Campbell Scientific	- 3cm (3 sondes) - 6cm (2 sondes)
1 sonde de mesure d'humidité de l'air de type Hydracap (sonde en test qui devrait être généralisée)	Cementys	- 6cm

Tableau II : Liste du matériel composant la station météorologique.

<b>Description</b>	<b>Marque</b>	<b>Hauteur (par rapport à la surface de la végétation)</b>
1 centrale d'acquisition de type CR800	Campbell Scientific	-
1 transmission GPS de type COM110A	Campbell Scientific	-
1 capteur de température et d'humidité relative de type CS215	Campbell Scientific	+2m00
1 moniteur de vent 05103	Campbell Scientific	+3m00
1 capteur NR-Lite	Campbell Scientific	+1m50
1 baromètre de type SETRA CS100	Campbell Scientific	-
2 pluviomètres de type 3039	Précis Mécanique	+1m50

## 3.2 Description des capteurs de mesures

### 3.2.1 Sondes capacitives de mesure de l'humidité du sol type SM100

Le capteur de mesure de l'humidité du sol (figure 8) est constitué de deux électrodes qui fonctionnent comme un condensateur, avec le sol environnant servant en tant que diélectrique. Un oscillateur pilote le condensateur et un signal proportionnel à la permittivité diélectrique du sol est converti en signal de sortie. La permittivité électrique de l'eau est beaucoup plus grande que celles de l'air, des minéraux du sol et de la matière organique et donc les changements de la permittivité électrique de l'eau détectés par le capteur sont corrélés à la variation de la teneur en eau du sol.

- Étendue de mesure : de 0 %VWC à saturation (signal de sortie entre 0,200mV et 0,500mV),
- Résolution : 0,1 % VWC,
- Précision : 3 % VWC dans les milieux de conductivité électrique < 8 mS/cm.



Figure 8 : Photo d'une sonde SM100.

### 3.2.2 Capteur de température et d'humidité de l'air Hydracap

Le capteur HydraCap (figure 9) est constitué de plusieurs éléments capacitifs de haute précision qui incorporent la mesure de température et d'humidité relative. Il est étanche à l'eau liquide jusqu'à 10 bars.

- Étendue de mesure en humidité relative : de 0 à 100 % d'HR (de -20°C à +60°C),
- Précision à 25°C en humidité relative : +/- 2 % entre 10 et 90 % et +/- 4 % entre 0 et 100 %,
- Étendue de mesure de température : de -40 à +70°C,
- Précision en température : +/- 0,3°C à 25°C, +/- 0,4°C entre +5 et +40°C, +/- 0,9°C entre -40°C et +70°C.



Figure 9 : Photo d'un capteur Hydracap.

### 3.2.3 Capteur de mesure de hauteur et de température de l'eau type CS451

Le capteur CS451 (figure 10) est constitué d'un transducteur piézorésistif et d'un capteur de température permettant de mesurer la hauteur et la température de l'eau.

- Étendue de mesure de la hauteur d'eau : 0 à 2m de hauteur,
- Résolution pour la hauteur d'eau: 0,0035 % de l'étendue de mesure soit 0,07mm,
- Précision pour la hauteur d'eau : +/- 0,1 % de l'étendue de mesure soit 2mm,
- Étendue de mesure de la température : 0 à 60°C,
- Précision pour la température : +/- 0,2°C.



Figure 10 : photo d'un capteur CS451.

### 3.2.4 Capteur de température 107

Le capteur de température 107 (figure 11) utilise une thermistance afin de mesurer la température.

- Étendue de mesure : -55 à +70°C,
- Résolution : < 0,08°C entre -55 et +70°C,
- Précision : +/- 0,3°C pour l'étendue de mesure de -25 à +50°C.



Figure 11 : Photo d'un capteur 107.

### 3.2.5 Sondes de température de surface TCAV

Le TCAV (figure 12) est une sonde de température composé de quatre thermocouples connectés en parallèle pour donner une seule mesure de température. La tension de sortie représente la température moyenne des quatre jonctions.

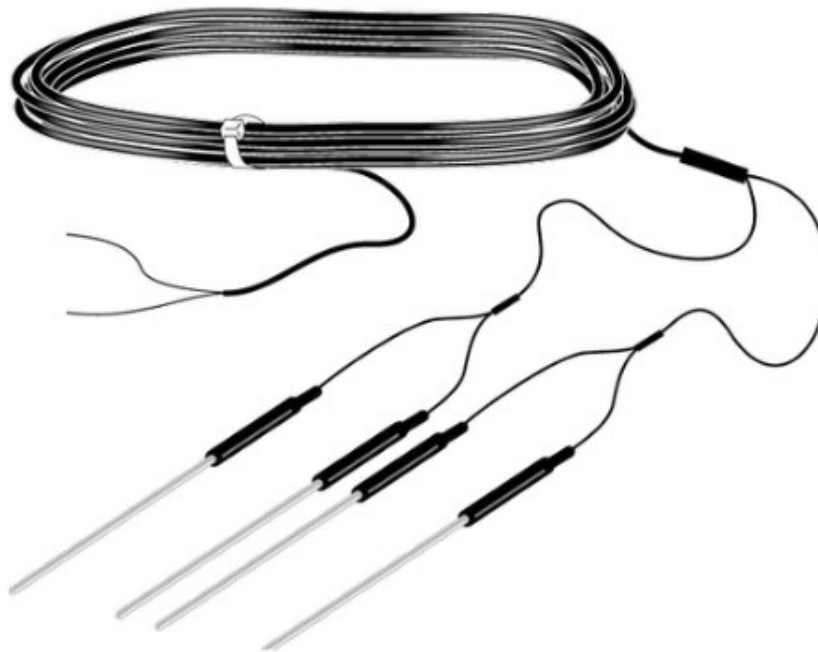


Figure 12 : Photo d'une sonde TCAV.

### 3.2.6 Capteur de mesure de rayonnement net type NR-Lite

Le NR-Lite (figure 13) est un capteur à thermopile qui mesure la somme algébrique des rayonnements de courtes longueur d'onde (rayonnement solaire visible) et de grandes longueur d'ondes (rayonnement infrarouge) incidents (provenant de l'atmosphère) et réfléchis (provenant de la surface).

- Étendue de mesure : longueur d'onde de 0,2 à 100 $\mu$ m (visible : 0,2 – 3 $\mu$ m, infrarouge : 3-100 $\mu$ m)

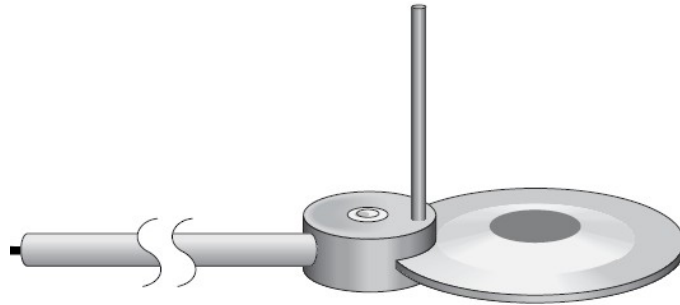


Figure 13 : Schéma d'un capteur NRLite.

### 3.2.7 Capteur de température et d'humidité relative de l'air de type CS215

Le capteur CS215 (figure 14) est constitué de plusieurs éléments capacitifs de haute précision qui incorporent la mesure de température et d'humidité relative.

- Étendue de mesure de la température : de -40°C à +70°C,
- Précision de mesure pour la température : +/-0,3°C à 25°C, +/-0,4°C entre +5°C et +40°C, +/- 0,9°C entre -40°C et +70°C,
- Étendue de mesure de l'humidité relative : de 0 à 100 % d'HR,
- Précision de l'humidité relative à 25°C : +/-2% entre 10 et 90%, +/- 4% entre 0 et 100%.



Figure 14 : Photo d'un capteur CS215.

### 3.2.8 Moniteur de vent type 05103

Le moniteur de vent 05103 (figure 15) mesure la vitesse et la direction horizontale du vent. La rotation de l'hélice produit un signal sinusoïdal dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du vent. La position de la girouette est transmise par un potentiomètre. Avec une tension constante au potentiomètre, la tension de sortie est proportionnelle à l'azimut de l'angle de la girouette.

- Étendue de mesure de la vitesse du vent : de 1 à 60 m/s,
- Précision de mesure de vitesse du vent +/- 0,3 m/s de 1 à 60 m/s et +/- 1,0m/s de 60 à 100m/s,
- Étendue de mesure de la direction du vent : 360° mécaniques, 355° électrique,
- Précision de mesure de la direction du vent : +/- 3°.



Figure 15 : Schéma d'un moniteur de vent.

### 3.2.9 Baromètre type CS100

Le baromètre CS100 (figure 16) est un transducteur de pression capacitif pour la mesure de pression barométrique sur la gamme 600 à 1100 millibars. Le capteur est composé de deux surfaces métalliques, dont une composée d'un matériau capable de détecter les variations de pression et de les convertir en signal de tension analogique.

- Étendue de mesure : 600 à 1100 mb,
- Résolution : 0,01 mb,
- Précision totale : +/- 0,5 mb à 20°C, +/-1,0 mb de 0 à +40°C, +/- 1,5 mb de -20°C à +50°C et +/- 2,0 mb de -40°C à +60°C.



Figure 16 : Photo d'un baromètre CS100.

### 3.2.10 Pluviomètre

Le pluviomètre à augets (figure 17) permet la mesure des hauteurs et intensités de précipitations recueillies au sol. Chaque basculement d'auget contenant 0,2 mm d'eau, provoque la fermeture brève d'un circuit électrique. L'horodatage continu des impulsions permet de déterminer les hauteurs d'eau et l'intensité des précipitations. La superficie du cône de réception est de 1000 cm<sup>2</sup>.



Figure 17 : Photo d'un pluviomètre.

## 4 Récupération, critique et validation des données

### 4.1 Récupération des données

Le tableau III résume les grandeurs enregistrées par les deux centrales d'acquisition.

Tableau III : Grandeurs enregistrées par les deux centrales d'acquisition.

<b>Grandeur enregistrée</b>	<b>Unité</b>
Hauteur de pluie précipitée du pluviomètre n°1	mm
Hauteur de pluie précipitée du pluviomètre n°2	mm
Vitesse du vent	m/s
Direction du vent	°/Nord
Rayonnement net	W/m <sup>2</sup>
Température de l'air	°C
Humidité de l'air	%
Pression atmosphérique	mbar
Température à la surface du substrat de P1	°C
Température à la surface du substrat de P2	°C
Température à la surface du substrat de P3	°C
Température du substrat de P1	°C
Température du substrat de P2	°C
Température du substrat de P3	°C
Température au dessus des alvéoles de P1	°C
Température au dessus des alvéoles de P2	°C
Température au dessus des alvéoles de P3	°C
Température de l'eau dans les alvéoles de P1	°C
Température de l'eau dans les alvéoles de P2	°C
Température de l'eau dans les alvéoles de P3	°C
Hauteur d'eau dans les alvéoles de P1	m
Hauteur d'eau dans les alvéoles de P2	m
Hauteur d'eau dans les alvéoles de P3	m
Humidité au dessus des alvéoles de P1	%



Les données sont rapatriées à distance une fois par semaine. Par ailleurs, des visites, régulières (une fois par mois) afin de réaliser l'entretien du matériel ou ponctuelles en cas de constatation d'un problème sur un des capteurs, sont prévues.

La récupération des données se fait par l'intermédiaire du logiciel « Loggernet » :

- soit en connectant directement le PC à la centrale via un câble « RS-232 »,
- soit en se connectant à distance via une transmission GSM.

À chaque relevé, trois fichiers sont récupérés :

- un fichier « pluvio »,
- un fichier « météo »,
- un fichier « zéro ».

Les données de ces trois fichiers seront par la suite concaténées dans des fichiers contenant la totalité des données pour chacune des grandeurs mesurées (un fichier par grandeur).

## 4.2 Critique et validation des données

Avant de compléter les fichiers de chaque grandeur mesurée, les données récupérées doivent être validées. Les données non validées seront identifiées par des codes d'erreur.

Cette étape de critique-validation des données est importante et doit être menée rigoureusement à chaque nouvelle récupération des données.

La méthodologie de validation est la suivante :

- La première étape consiste à identifier les données fausses. Pour chaque capteur, des limites inférieure et supérieure ont été fixées (tableau IV). Les valeurs situées en dehors de ces limites sont remplacées par le code erreur « -9999 »,
- La seconde étape permet de tester la continuité temporelle (selon le pas de temps d'acquisition) entre le fichier à compléter et les nouvelles données. Si cette continuité n'est pas respectée, les pas de temps manquants sont complétés avec le code erreur « -6999 »,
- La troisième étape consiste à identifier selon des critères d'expertise (visuel et/ou numérique) les données non satisfaisantes. C'est-à-dire d'exclure des données dont l'ordre de grandeur des valeurs paraît bon mais qui en réalité ne le sont pas. Ces valeurs seront substituées par le code erreur « -7999 ». Le critère numérique est utilisé pour la station de mesures. Cela consiste à calculer le coefficient de détermination  $R^2$  (voir exemple en annexe 2) entre deux grandeurs du même type de chacun des trois profils. Si la valeur  $R^2$  est hors limites (tableau IV), le choix d'invalider totalement ou partiellement ces données se fait après analyse détaillée de celles-ci.

Les codes erreurs identifiés ci-avant sont archivés dans des fichiers pour chaque relevé de données.

Le tableau IV rappelle pour chaque capteur les critères numériques utilisés afin de renseigner les codes d'erreur « -9999 » et « -7999 ».

Tableau IV : Critères numériques utilisés pour chaque capteur afin de renseigner les codes erreurs « -9999 » et « -7999 ».

Capteur	Identification du code erreur « -9999 »		Identification du code erreur « -7999 »
	Limites inférieure	et supérieure	Limite du coefficient de détermination R <sup>2</sup>
Sonde capacitive de mesure de l'humidité du sol type SM100	0 et 100 %		0,7 et 1
Capteur de température et d'humidité de l'air Hydracap	-30 et 50 °C 0 et 100 %		0,7 et 1 (pour la température)
Capteur de mesure de hauteur et de température de l'eau type CS451	0 et 20cm		0,7 et 1
Capteur de température 107	-30 et 50°C		0,7 et 1
Sonde de température de surface TCAV	-30 et 50°C		0,7 et 1
Capteur de mesure de rayonnement net type NRlite	-200 et 1000 W/m2		-
Capteur de température et d'humidité relative de l'air de type CS215	-30 et 50 °C 0 et 100 %		-
Moniteur de vent type 05103	0 et 50 m/s 0 et 355°		-
Baromètre type CS100	900 et 1100 mbar		-

## 5 Exploitation et interprétation des données

Dès que la mise à jour des fichiers de chaque grandeur est effectuée, les données peuvent être exploitées à un pas de temps et à une période choisie :

- pour tracer les graphes avec les grandeurs souhaitées,
- pour extraire les données souhaitées dans un fichier texte.

## 6 Conclusion

Cette étape d'instrumentation de la toiture a été menée à son terme. Un suivi régulier et rigoureux devra maintenant être mené afin de récupérer des données exploitables pour la suite du projet avec comme objectif de comprendre le comportement hydrique et thermique de la toiture, puis de caler un modèle décrivant ce comportement.

Quelques illustrations commentées des données récupérées sur les quatre premiers mois sont présentées dans l'annexe 1.

## Liste des annexes

Annexe 1 : Illustrations commentées des données récupérées sur les quatre premiers mois (figures 18 à 21)

Annexe 2 : Exemple des graphes du coefficient de détermination  $R^2$  à partir du graphe des températures du substrat des trois profils

Annexe 1 : Illustrations commentées des données récupérées sur les quatre premiers mois (figures 18 à 21)

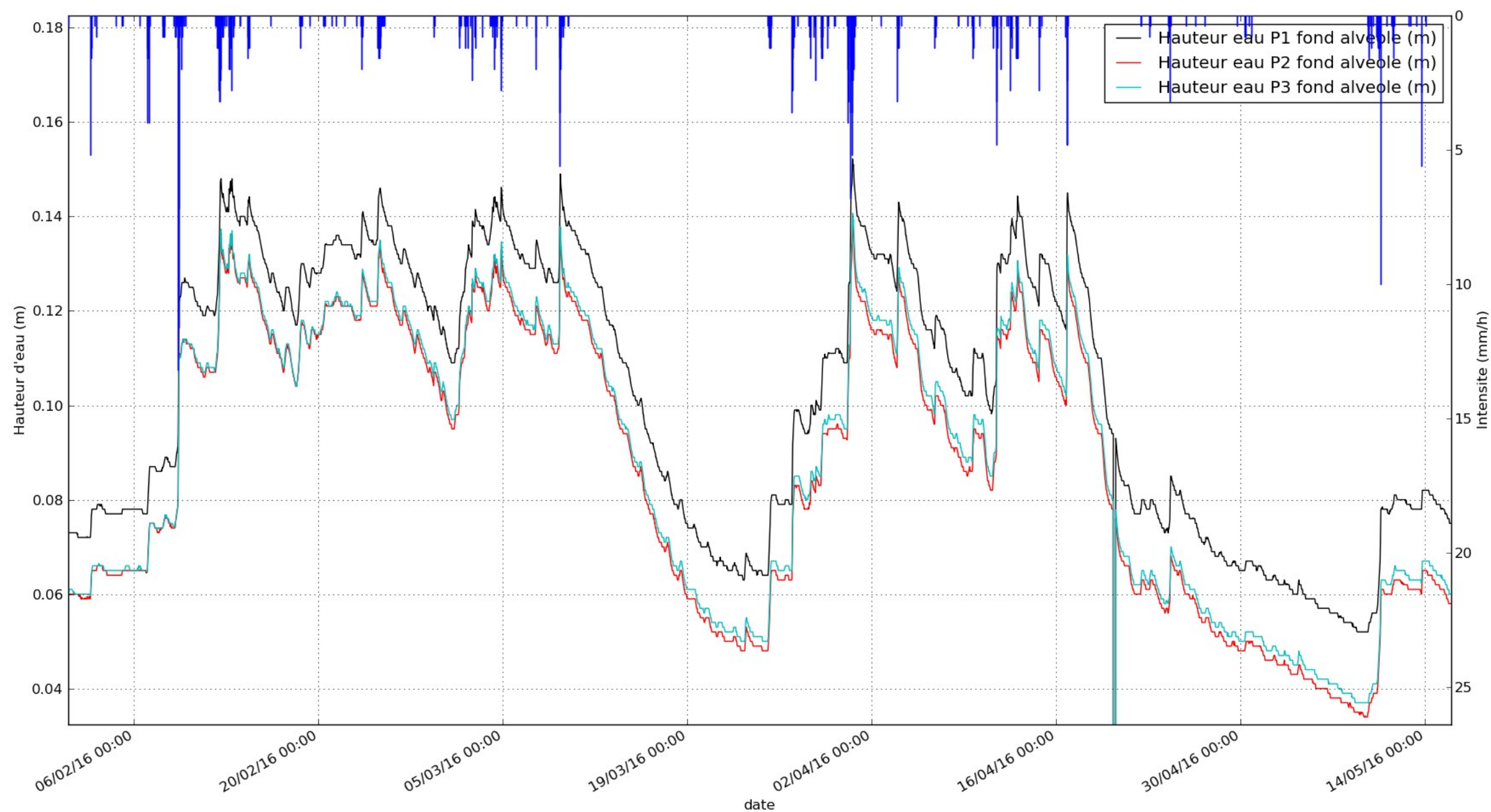


Figure 18 : Intensité de la pluie/ Hauteur d'eau dans les alvéoles en fonction du temps.

Le graphe montre une montée rapide du niveau d'eau en cas d'épisode pluvieux. Lors de la première période sèche significative du 10/03/2016 au 19/03/2016, la hauteur d'eau a diminuée de 64 mm soit 7,11mm/jour, ce qui représente beaucoup pour de l'évapotranspiration. En revanche lors de la période sèche du 02/05/2016 au 09/05/2016, la diminution est de 11 mm soit 1,57mm/jour ce qui représente une valeur cohérente d'évapotranspiration en cette période de l'année.

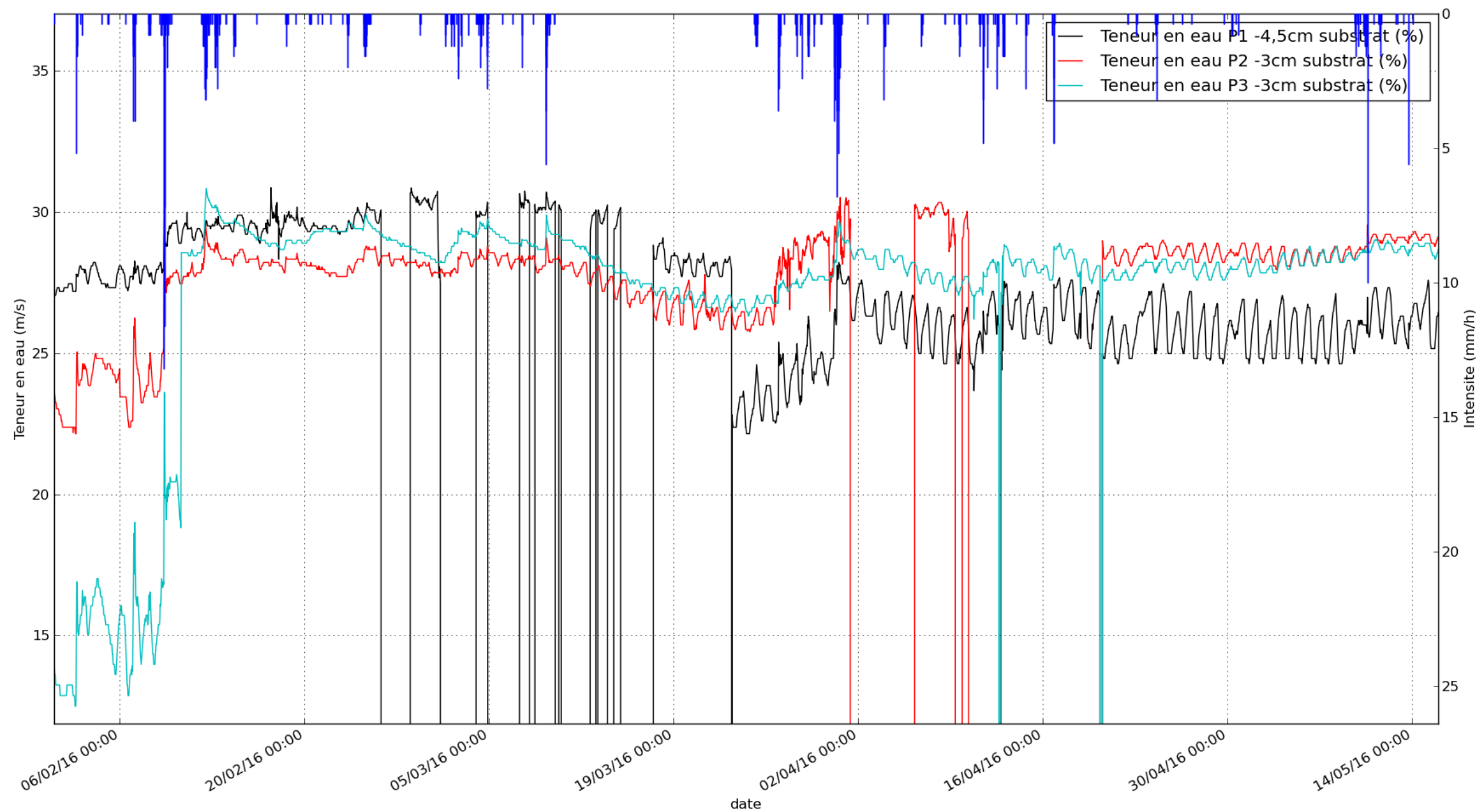


Figure 19 : Intensité de la pluie/ Teneur en eau en fonction du temps.

Le graphe des teneurs en eau montre des valeurs moyennes proches de la valeur de la capacité maximale en eau du substrat, ce qui correspond aux valeurs attendues en cette période de l'année.

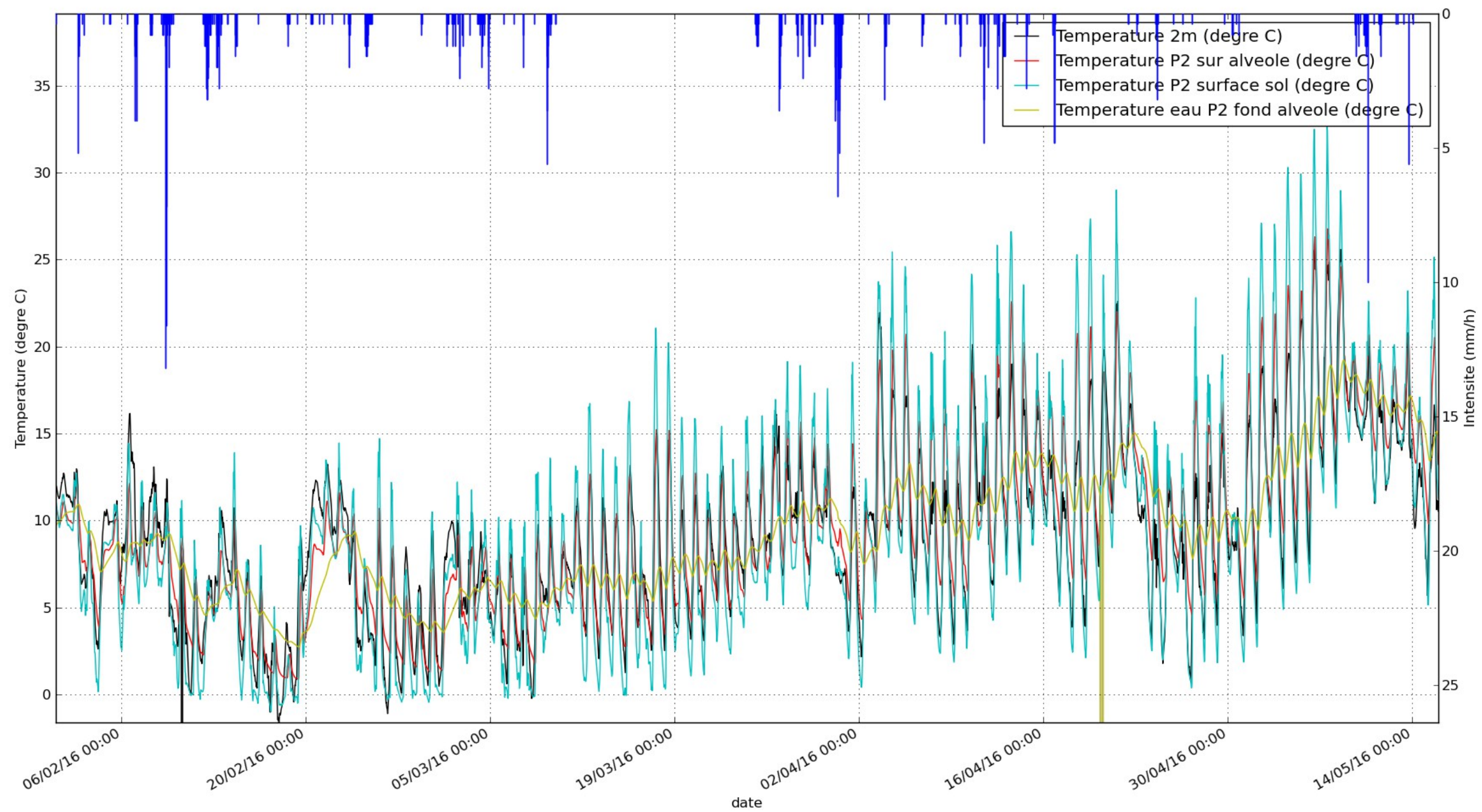


Figure 20 : Intensité de la pluie/ Températures en fonction du temps.



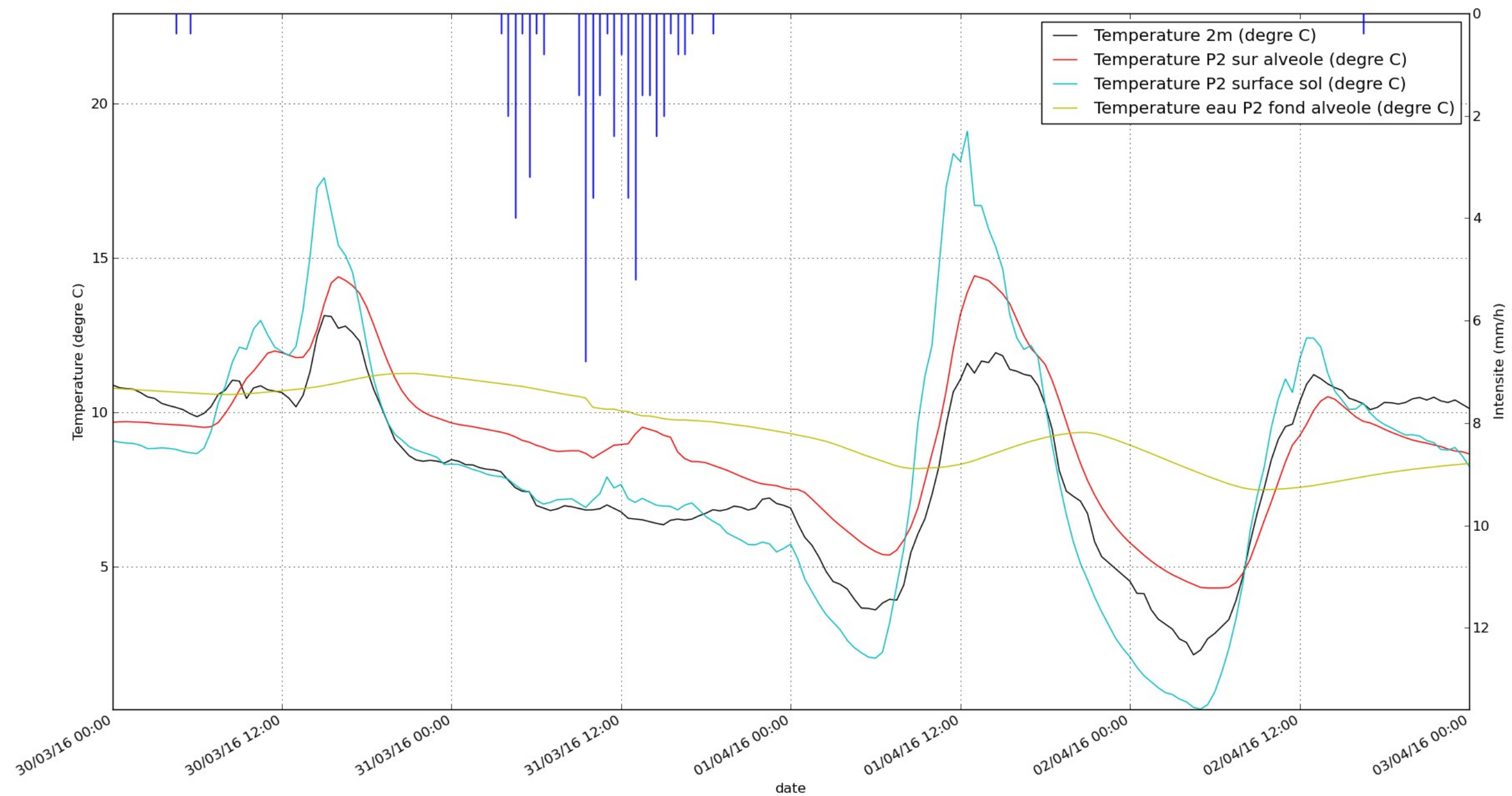


Figure 21 : Zoom du graphe Intensité de la pluie/ Températures en fonction du temps.

Le graphe du profil des températures en un point donné montre le cycle journalier des températures. En cas d'évènement pluvieux, ce cycle journalier est moins visible avec la chute des températures (31/03/2016). La variation de température de l'eau est moins prononcée, ce qui peut améliorer l'isolation thermique du bâtiment.

Annexe 2 : Exemple des graphes du coefficient de détermination  $R^2$  à partir du graphe des températures du substrat des trois profils

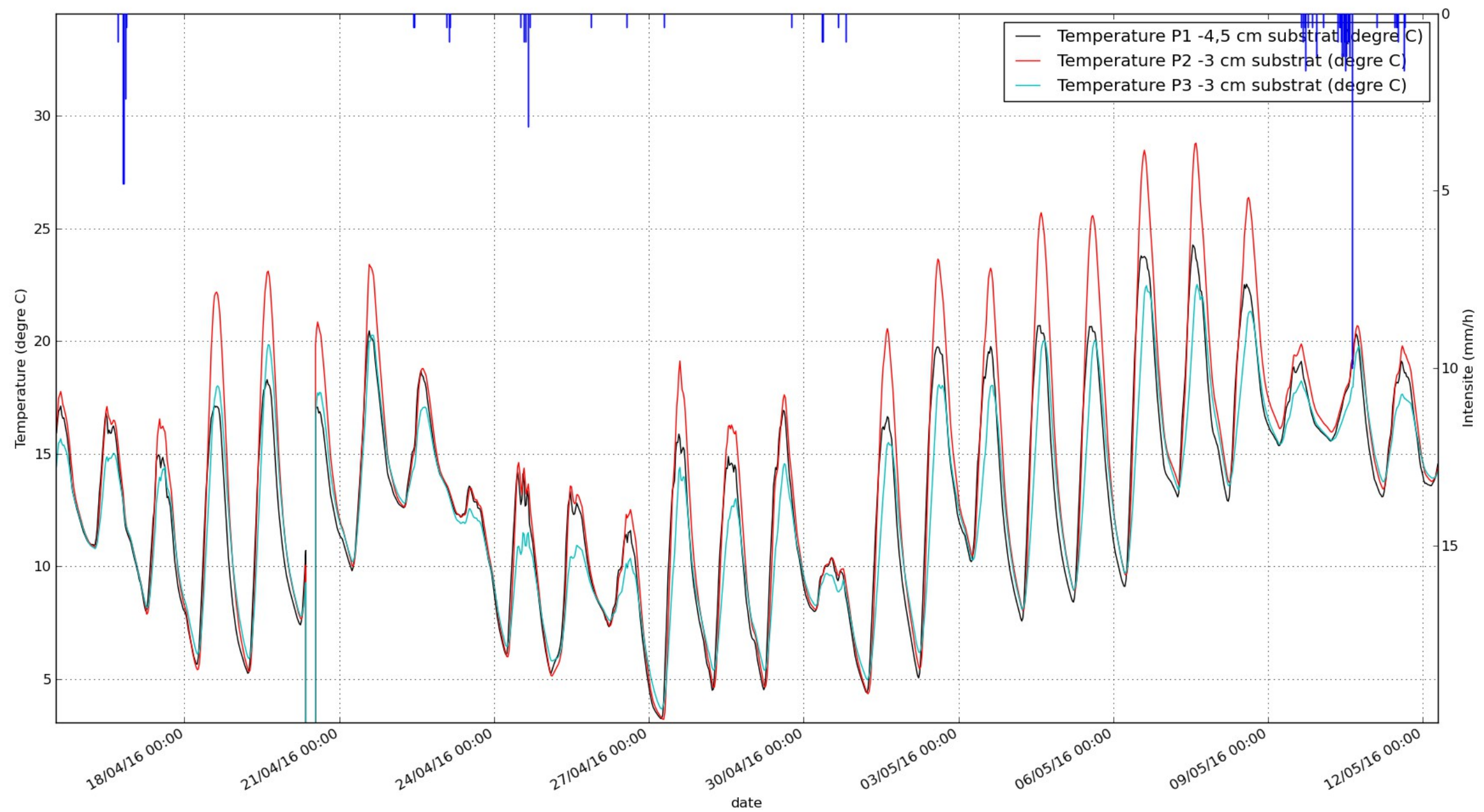


Figure 22 : Graphe des températures du substrat en fonction du temps.

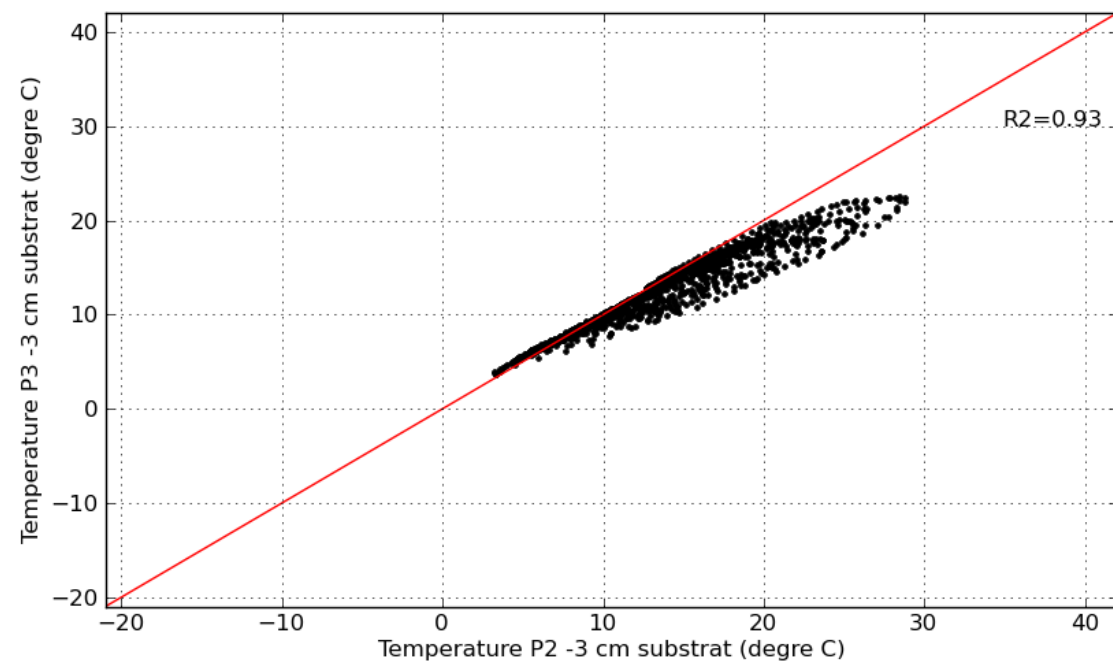
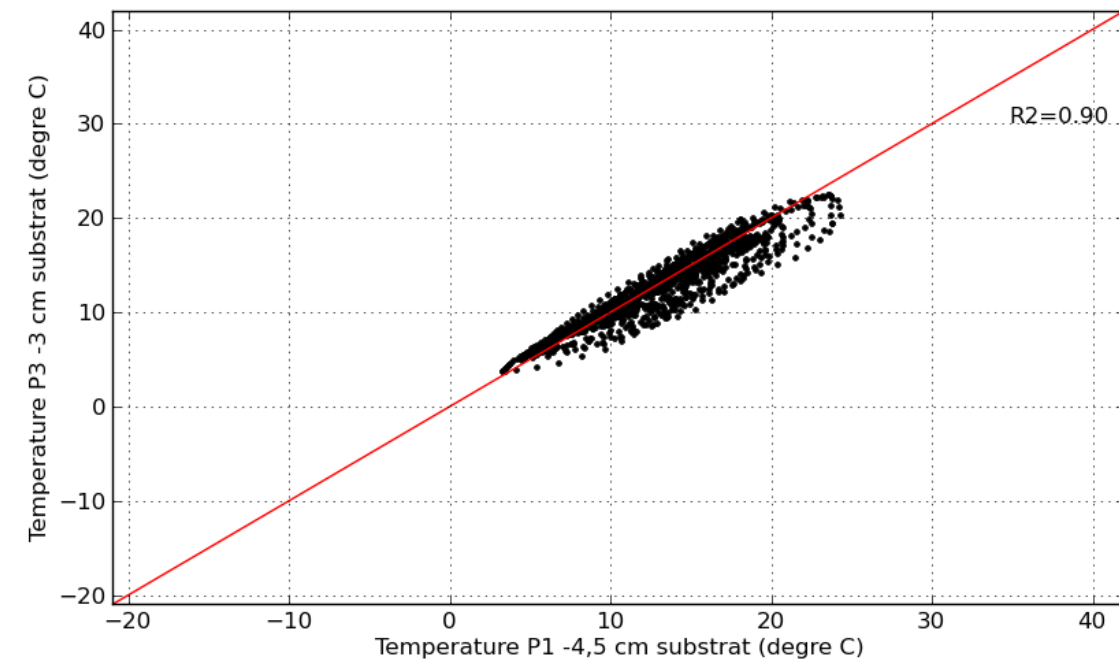
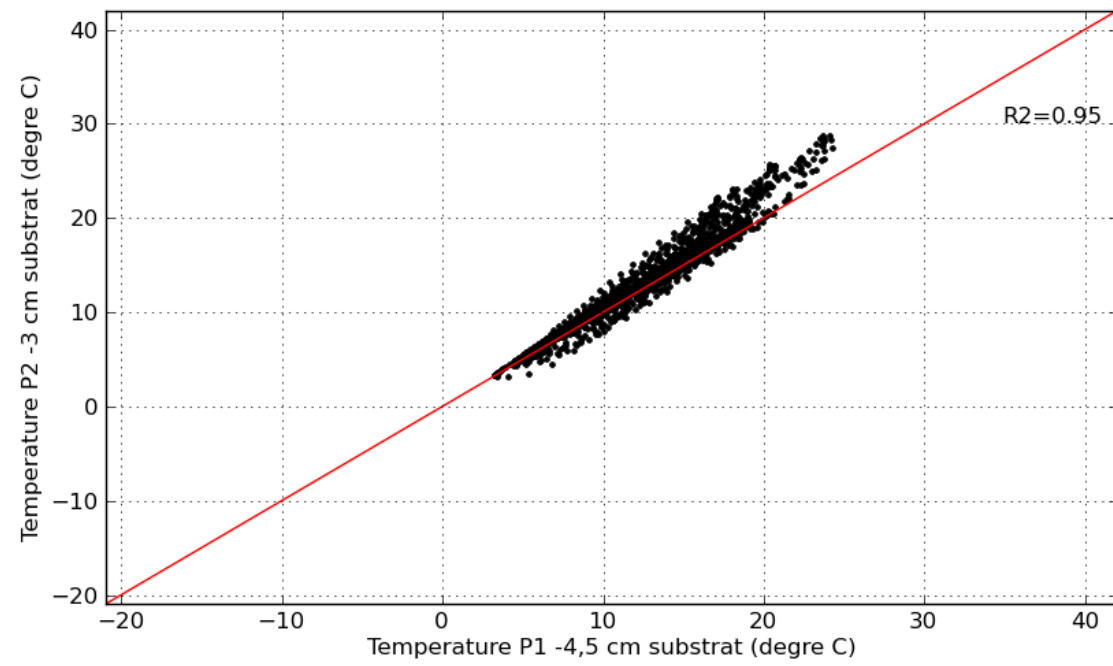


Figure 23 : Graphes du coefficient de détermination  $R^2$  entre les températures du substrat des trois profils.

## Liste des figures

- Figure 1 : Plan de situation.
- Figure 2 : Vue en plan schématique de la toiture.
- Figure 3 : Coupe type de la toiture.
- Figure 4 : Photo de la station de mesure des profils hydriques et thermiques.
- Figure 5 : Photo de la station météorologique.
- Figure 6 : Implantation des centrales d'acquisition et des profils de mesure.
- Figure 7 : Implantation des capteurs.
- Figure 8 : Photo d'une sonde SM100.
- Figure 9 : Photo d'un capteur Hydracap.
- Figure 10 : Photo d'un capteur CS451.
- Figure 11 : Photo d'un capteur 107.
- Figure 12 : Photo d'une sonde TCAV.
- Figure 13 : Schéma d'un capteur NRLite.
- Figure 14 : Photo d'un capteur CS215.
- Figure 15 : Schéma d'un moniteur de vent.
- Figure 16 : Photo d'un baromètre CS100.
- Figure 17 : Photo d'un pluviomètre.
- Figure 18 : Graphe Intensité de la pluie/ Hauteur d'eau en fonction du temps.
- Figure 19 : Graphe Intensité de la pluie/ Teneur en eau en fonction du temps.
- Figure 20 : Graphe Intensité de la pluie/ Températures en fonction du temps.
- Figure 21 : Zoom du graphe Intensité de la pluie/ Températures en fonction du temps.
- Figure 22 : Graphe des températures du substrat en fonction du temps.
- Figure 23 : Graphes du coefficient de détermination  $R^2$  entre les températures du substrat des trois profils.

## Liste des tableaux

Tableau I : Liste des capteurs branchés sur la CR3000.

Tableau II : Liste du matériel composant la station météorologique.

Tableau III : Grandeurs enregistrées par les deux centrales d'acquisition

Tableau IV : Critères numériques utilisées pour chaque capteur afin de renseigner les codes erreurs « -6999 » et « -7999 ».



Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction territoriale Ile-de-France – 12 rue Teisserenc de Bort – 78190 Trappes-en-Yvelines  
Tel : 01 34 82 12 34 – Fax : 01 30 50 83 69 – mel : dteridf.cerema@cerema.fr

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30  
Établissement public - Siret : 130 018 310 00313 - TVA Intracommunautaire : FR 94 130018310 - [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)