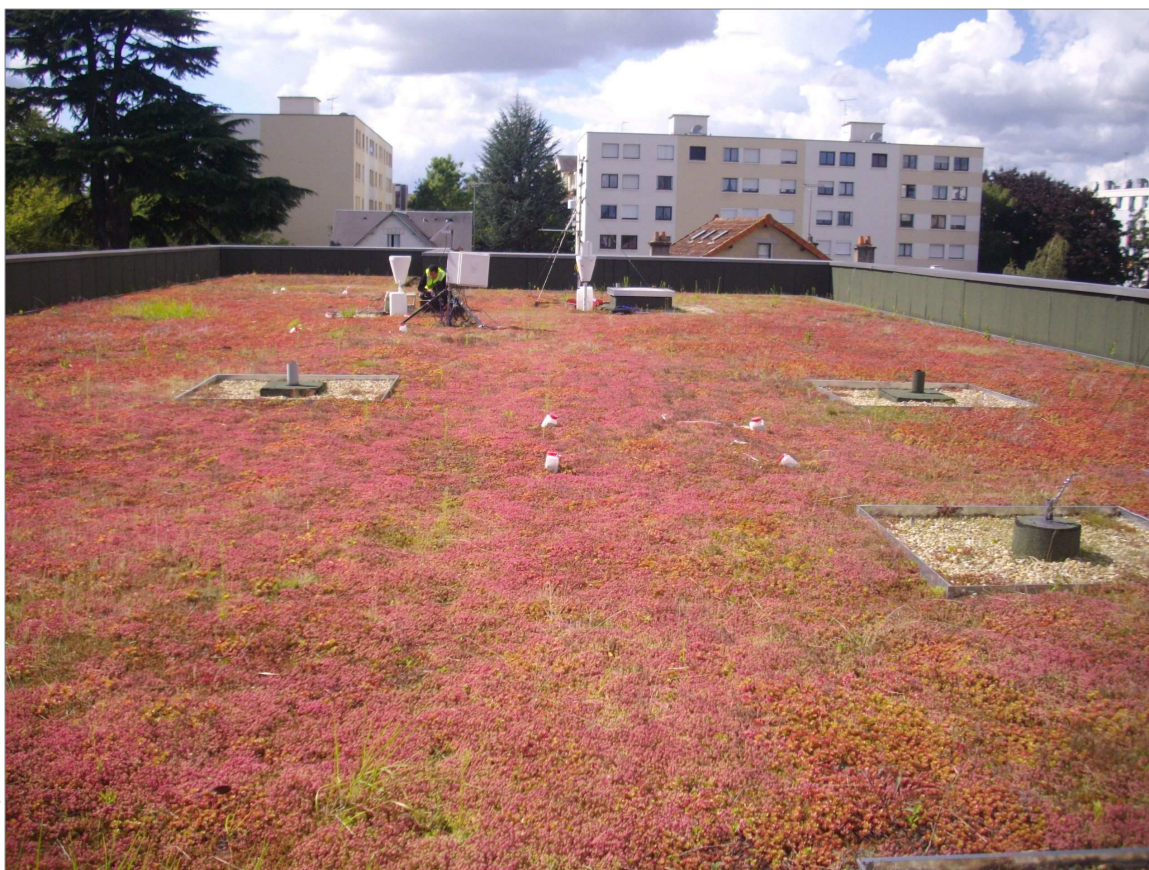


Action-recherche du Cerema : évaluation d'une toiture terrasse végétalisée à zéro rejet Livraison n°3 : rapport final

Janvier 2019



Crédit photo : © Cédric PAYET/Cerema

Partenaires :



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

Livrable n°3 : rapport final

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	19/03/18	Version initiale
2	13/04/18	Suite aux modifications des partenaires
3	31/07/18	Suite au COPIL du 27 juin 2018
4	21/01/19	Version finale validée

Affaire suivie par

Cédric PAYET - Département Ville Durable – Unité Eau
Tél : 01 34 82 13 01 / Fax : 01 30 50 83 69
Courriel : cedric.payet@cerema.fr
Site de Trappes : Cerema / Dter IdF / DVD / UE – 12 rue Teisserenc de Bort 78 190 – Trappes-en-Yvelines

Références

n° d'affaire : C15PV0119-01

Maître d'ouvrage : Sociétés Siplast et Nidaplast – Agence de l'Eau Loire-Bretagne (M.Houssin)

Devis n° D15PV0119-1 du 24/09/2015

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Cédric PAYET		APPROUVÉ Par Payet, 09:23, 22/01/2019
Avec la participation de			
Contrôlé par	Emmanuel BERTHIER		APPROUVÉ Par Berthier, 09:37, 23/01/2019
Validé par	Vincent GRAFFIN		

Conditions de diffusion :

Notice (jusqu'au sommaire inclus)	<input checked="" type="checkbox"/> diffusable <input type="checkbox"/> non diffusable
Rapport d'étude	<input type="checkbox"/> libre (document téléchargeable librement) <input checked="" type="checkbox"/> contrôlé (celui qui en veut communication doit en faire la demande et obtenir l'autorisation et les conditions d'usage auprès du commanditaire) <input type="checkbox"/> confidentiel (document non diffusable)

Droits

Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans autorisation expresse du Département Ville Durable

Crédits photos – illustrations : Cédric PAYET

Nomenclature et mots-clés

<p>Nomenclature Cerema : Eau, ville et territoires Mots-clés : toiture végétalisée, zéro rejet</p>

Résumé de l'étude :

La toiture à très haute capacité de rétention en eaux (150 litres/m²) expérimentée fait partie d'un concept de gestion des eaux pluviales en vue de permettre la déconnexion totale de la parcelle. L'étude consiste à évaluer l'impact de ce type de toiture sur la gestion des eaux pluviales et vérifier sa capacité à devenir un élément majeur pour atteindre cet objectif de zéro rejet à la parcelle.

Dans le cadre d'un partenariat avec les sociétés 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 ». Un suivi de la qualité des eaux recueillies dans les alvéoles est également prévu.

Ce livrable présente les résultats obtenus lors des deux années de suivi et le modèle conceptuel développé.

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	5
2 RAPPEL DE L'EXPÉRIMENTATION.....	6
3 RÉSULTATS DES DEUX ANNÉES DE SUIVI.....	8
3.1 Données relevées.....	8
3.1.1 Pluviométrie.....	8
3.1.2 Pressions dans les alvéoles.....	11
3.1.3 Teneur en eau dans le substrat.....	12
3.1.4 Résultats des analyses d'eaux.....	15
3.1.4.1 Méthodologie des prélèvements.....	15
3.1.4.2 Résultats et exploitation des données.....	16
3.1.4.3 Conclusion.....	19
3.2 Compréhension du fonctionnement de la toiture.....	20
3.2.1 Expériences en laboratoire.....	20
3.2.2 Comportement théorique de la toiture.....	21
3.2.3 Validation du fonctionnement de la toiture.....	23
3.2.4 Conclusion.....	25
3.3 Performances de la toiture.....	26
4 MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT DE LA TOITURE.....	27
4.1 Description du modèle « Faveur-0R ».....	27
4.2 Calage du modèle « Faveur-0R ».....	30
4.3 Résultats du modèle « Faveur-0R ».....	34
4.3.1 Résultats du modèle avec les deux années de données d'Orléans.....	34
4.3.2 Résultats du modèle avec des données issues de la région Île-de-France pour la période juillet 1993 – décembre 2011.....	34
4.4 Performances de la toiture à partir du modèle « Faveur-0R ».....	36
4.4.1 Performances du modèle avec les deux années de données d'Orléans.....	36
4.4.2 Performances du modèle avec des données issues de la région Île-de-France pour la période juillet 1993 – décembre 2011.....	36
4.5 Sensibilité du modèle « Faveur-0R ».....	39
4.6 Prise en compte du phénomène de surpression dans le modèle « Faveur-0R ».....	40
5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	42

1 Introduction

La toiture à très haute capacité de rétention en eaux (150 litres/m²) expérimentée fait partie d'un concept de gestion des eaux pluviales en vue de permettre la déconnexion totale de la parcelle. L'étude consiste à évaluer l'impact de ce type de toiture sur la gestion des eaux pluviales et vérifier sa capacité à devenir un élément majeur pour atteindre cet objectif de zéro rejet à la parcelle.

Dans le cadre de cette étude menée par les sociétés Siplast, Nidaplast et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'Unité Eau (UE) du Cerema Île-de-France a été retenue comme partenaire pour l'évaluation des performances hydriques de cette toiture végétalisée, mise en place sur un groupe scolaire à Orléans (45).

Cette évaluation est découpée en trois étapes :

1. équipement et instrumentation de la toiture ;
2. suivi, critique et validation des mesures pendant 2 ans ;
3. développement d'un modèle concept « Zéro Rejet ».

Le présent document concerne le volet 2 et 3 et constitue le livrable n°3 final du partenariat. Après un rappel de l'expérimentation mis en place, il présente dans un premier temps les résultats obtenus lors des deux années d'observation sur la compréhension du fonctionnement de ce type de toiture et la qualité des eaux. Par la suite un modèle simulant le comportement de la toiture a été réalisé.

2 Rappel de l'expérimentation

La description complète de l'expérimentation et l'instrumentation mise en place sont développées dans le livrable n°1 intitulé « Note sur l'instrumentation ». Le présent paragraphe rappelle la configuration de la toiture, l'emplacement et l'équipement des profils de mesures.

La toiture végétalisée d'une surface d'environ 600 m² présente les caractéristiques décrites sur les figures 1 et 2.

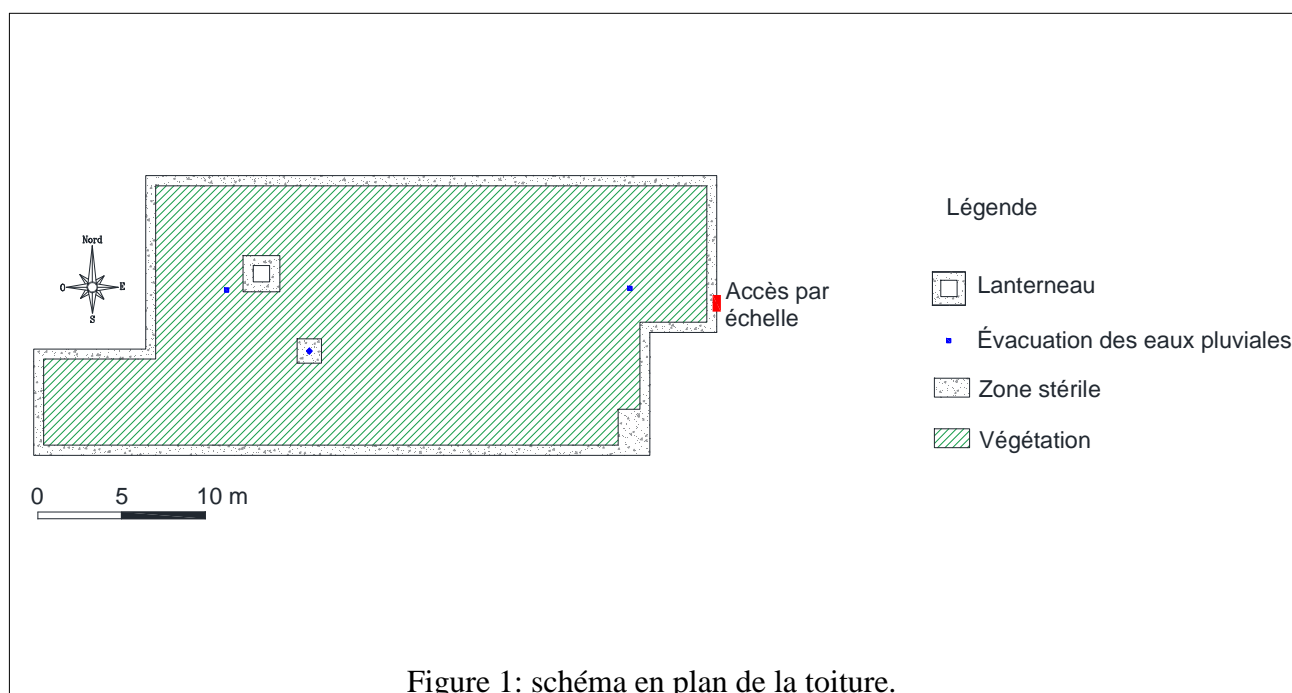


Figure 1: schéma en plan de la toiture.

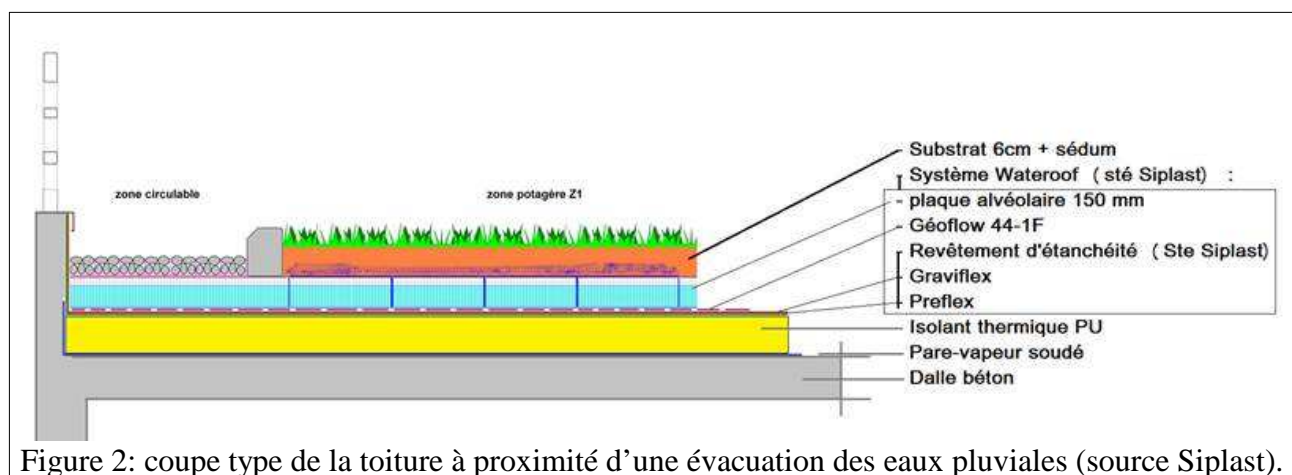
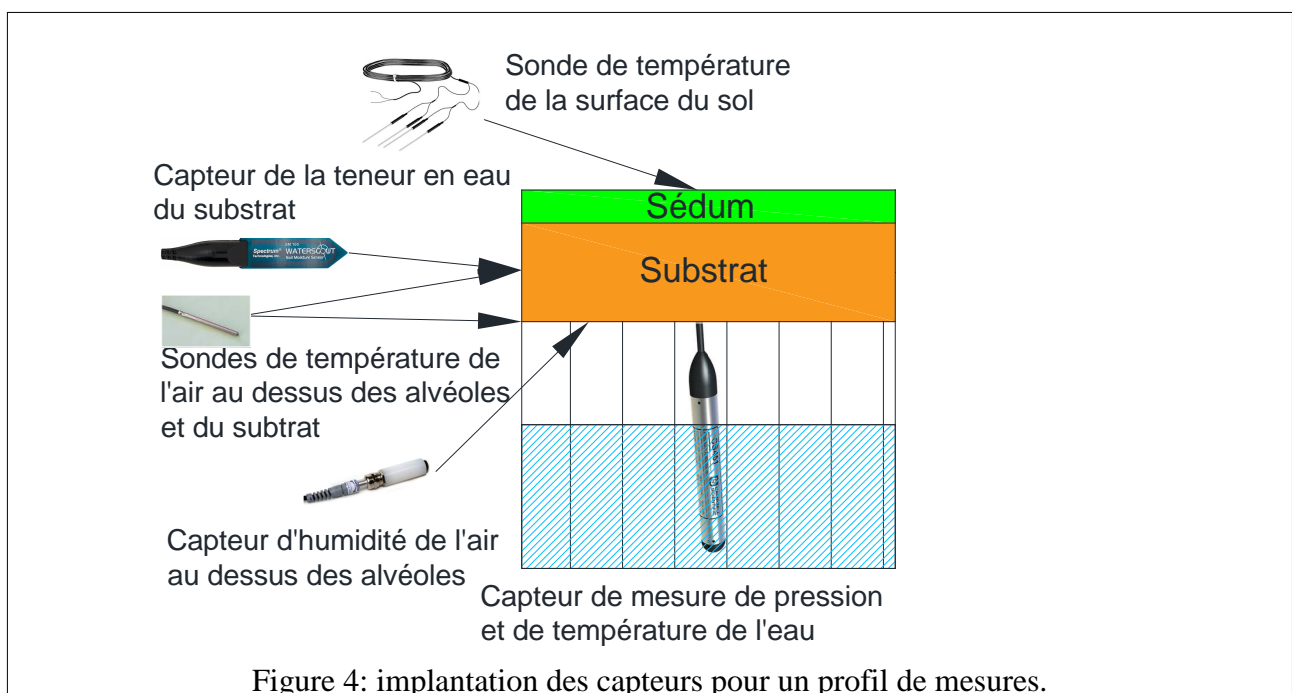
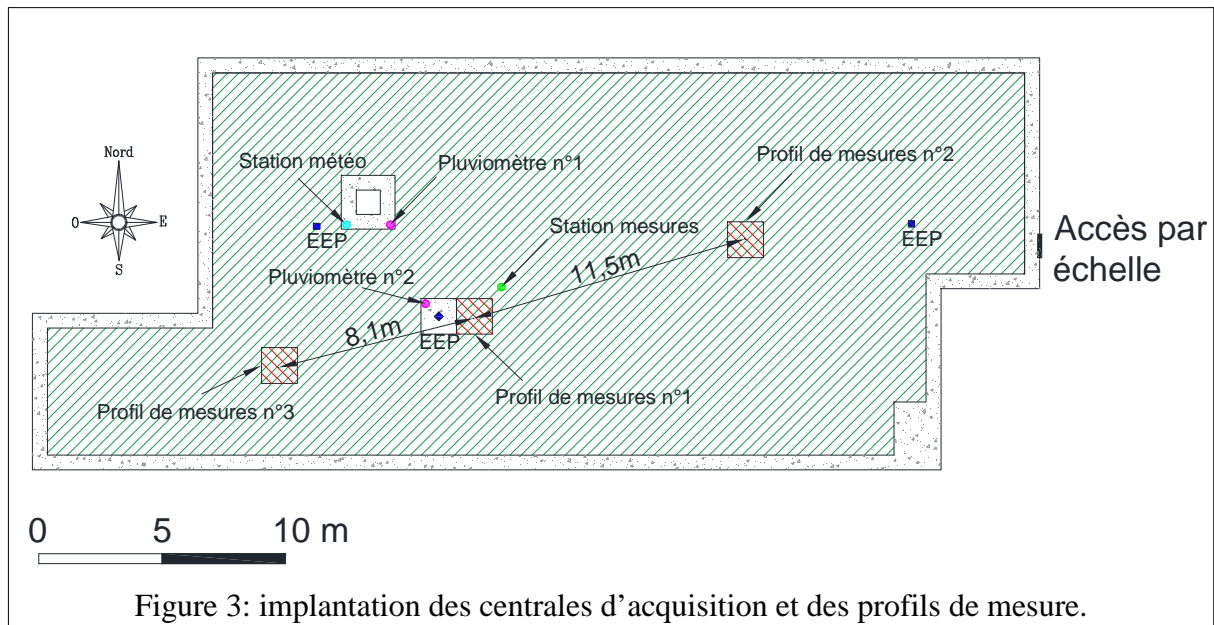


Figure 2: coupe type de la toiture à proximité d'une évacuation des eaux pluviales (source Siplast).

Le complexe de végétalisation est composé, de bas en haut, de plaques alvéolaires à structure en nid d'abeille d'une hauteur de 15 cm, d'une couche de 6 cm de substrat séparée des alvéoles par un géotextile et recouverte par une végétation composée majoritairement de sédums et de quelques graminées répartis de manière épars.

Une station de mesure permet d'enregistrer en continu à un pas de temps de 5 minutes les états hydriques et thermiques mesurés selon trois profils verticaux. Une station météorologique permet de renseigner les conditions météorologiques à un pas de temps de 30 minutes.

Les figures 3 et 4 précisent l'implantation des profils de mesure et l'emplacement des capteurs pour chacun des profils.



À partir du 28 septembre 2016, un capteur de pression a été placé au niveau d'une évacuation d'eaux pluviales pour mesurer la hauteur d'eau en dehors des alvéoles et mieux préciser les éventuels débordements.

Le capteur d'humidité de l'air a été placé uniquement sur le profil n°1 afin de le tester et le généraliser ensuite sur les trois profils de mesures. En effet, l'implantation de ce capteur est délicate car celui-ci est soumis aux infiltrations d'eaux provenant du substrat et à l'eau des alvéoles lorsque celles-ci sont saturées. Ce capteur doit donc être étanche ce qui n'est pas le cas des capteurs d'humidité relative classiques. Le choix s'est donc porté sur le capteur « HydraCap » fabriqué par Cementys qui est un capteur d'humidité classique rendu étanche avec comme application principale la mesure in-situ du gradient d'humidité interne dans le béton. Le capteur semble avoir fonctionné

de janvier à mars 2016 où il s'est arrêté car de l'eau s'est infiltrée dans le capteur (traces de corrosion). Il a été remplacé par le constructeur et remis en place fin juillet 2016 et s'est de nouveau arrêté de fonctionner à la mi-mai 2017. Les résultats obtenus sur cette période et présentés en annexe 1 ne semblent pas satisfaisants. En effet certaines baisses d'humidité ont été constatées pendant l'été 2016 mais les données ne sont pas cohérentes avec la pluviométrie pendant cette période.

3 Résultats des deux années de suivi

3.1 Données relevées

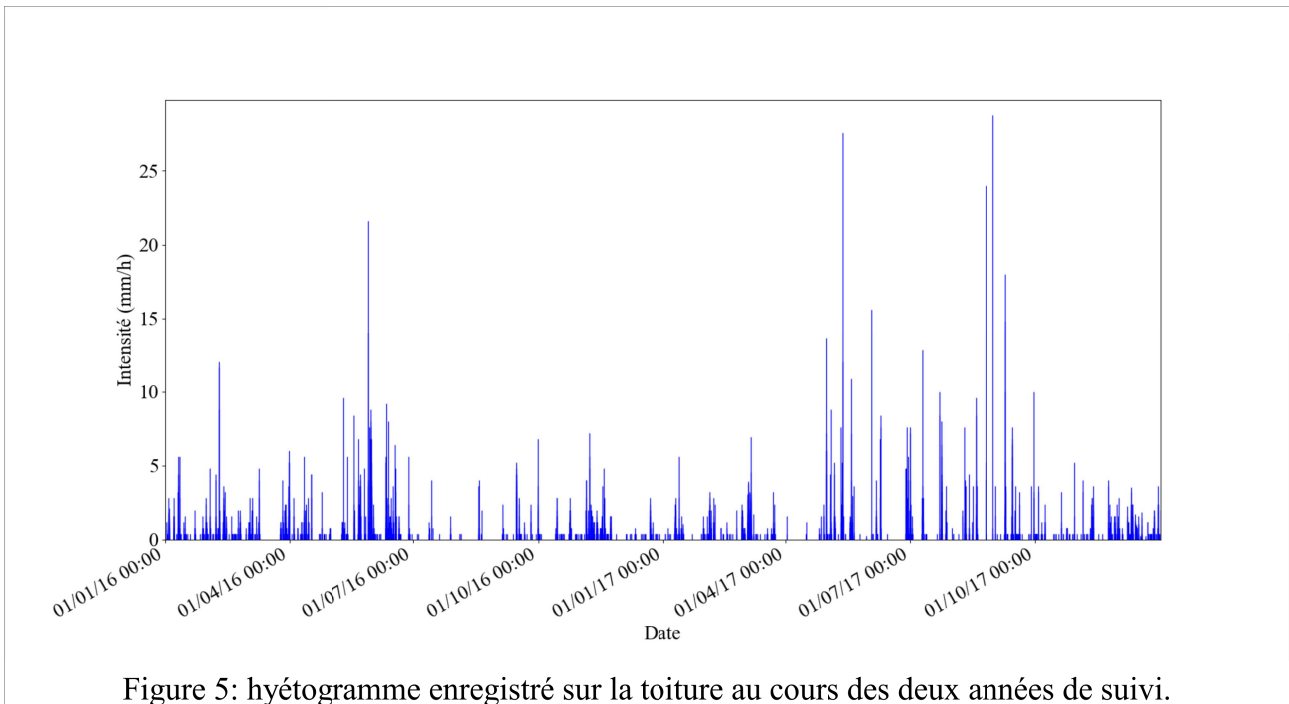
Les données ont été relevées en continu au cours des années 2016 et 2017 avec quelques plages de données manquantes. Le matériel a souffert lors de l'épisode de gel du mois de janvier 2017 avec la perte en fin d'étude de deux capteurs de hauteurs d'eau. Par ailleurs, l'alimentation des batteries par panneau solaire a entraîné la perte de quelques données lors des périodes de faible ensoleillement sur plusieurs jours consécutifs.

Pour le besoin de l'étude, les données de pluviométrie et d'évapotranspiration manquantes ont été complétées avec celles relevées par Météo – France à la station d'Orléans-Bricy. Les plages manquantes sont rappelées en annexe 2 du présent document. Ces données manquantes représentent 59 jours soit 8 % sur les deux années de suivi (118,3 mm de pluie, 92 mm d'évapotranspiration potentielle).

Dans la suite du rapport les graphes, tableaux et résultats présentés tiennent compte des données complétées.

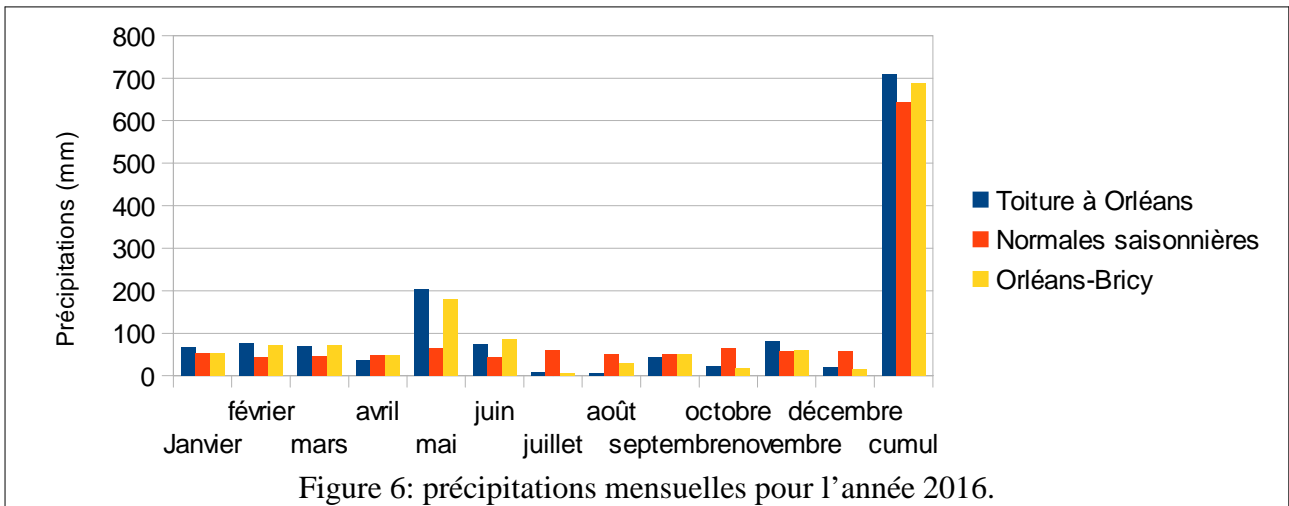
3.1.1 Pluviométrie

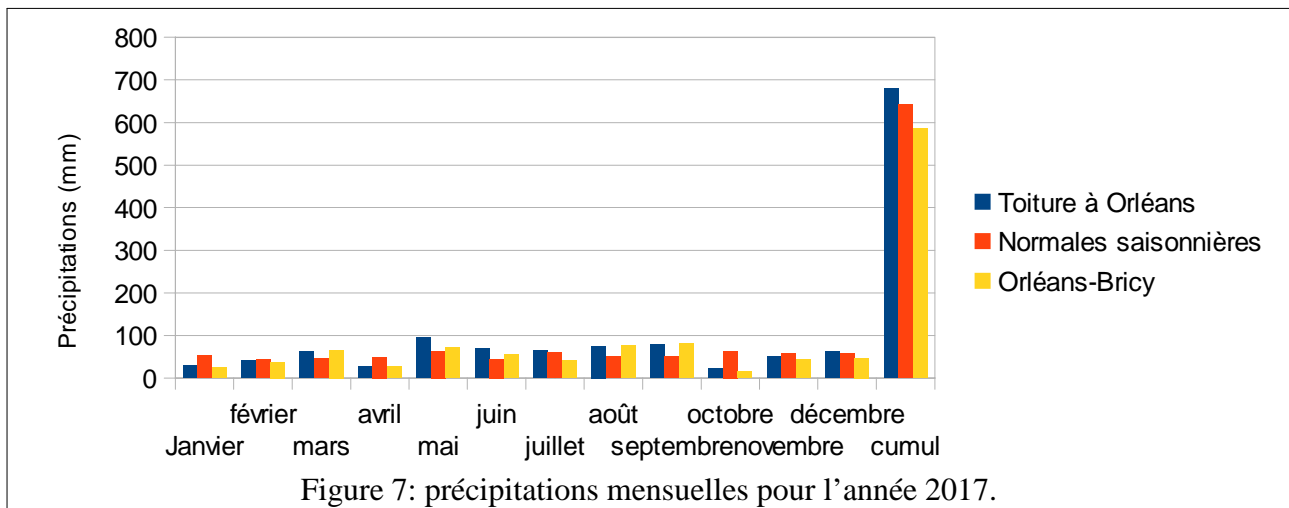
Les données de pluviométrie ont été relevées au cours des années 2016 et 2017. La figure n°5 présente le hyétogramme à un pas de temps de 30 minutes.



Au cours de ces deux années de suivi, le cumul des précipitations a été de 1390,3 mm. 1035 évènements ont été identifiés dont 279 avec une hauteur de pluie cumulée supérieure ou égale à 1 mm.

Les figures 6 et 7 présentent les graphes des précipitations mensuelles de la toiture et ceux de la station Orléans-Bricy pour les années 2016 et 2017 et les normales saisonnières sur la période 1981-2010 (données issues du site internet <http://www.meteofrance.com>).





La figure 6 montre la cohérence entre les données relevées et les données de la station d'Orléans-Bricy sur l'année 2016 (710 mm contre 689,6 mm). Des écarts mensuels (jusqu'à 21,7 mm au mois d'août, 21,6 mm au mois de mai et novembre) dus peut-être à une répartition spatiale hétérogène de la pluie sur la ville d'Orléans ont été constatés.

La comparaison avec les normales saisonnières fait apparaître que l'année 2016 a connu deux périodes distinctes. Un premier semestre plus pluvieux que les normales saisonnières avec des écarts significatifs pour les mois de février-mars et des écarts importants voire exceptionnels aux mois de mai-juin (événement de période de retour bien supérieure à la centennale de fin mai voir figure 8). A contrario le second semestre a été plus sec avec des écarts importants aux mois de juillet, octobre et décembre.

Globalement l'année 2016 a été plus pluvieuse que les normales saisonnières (710 mm contre 642,5 mm).

La figure 7 fait apparaître des précipitations relevées plus importantes sur la toiture que sur celles de la station d'Orléans-Bricy pour l'année 2017 (680,3 mm contre 586,5 mm) soit un écart de 93,8 mm. Des écarts mensuels (24,6 mm au mois d'août et 23,6 mm au mois de mai), ont comme lors de l'année 2016 été constatés.

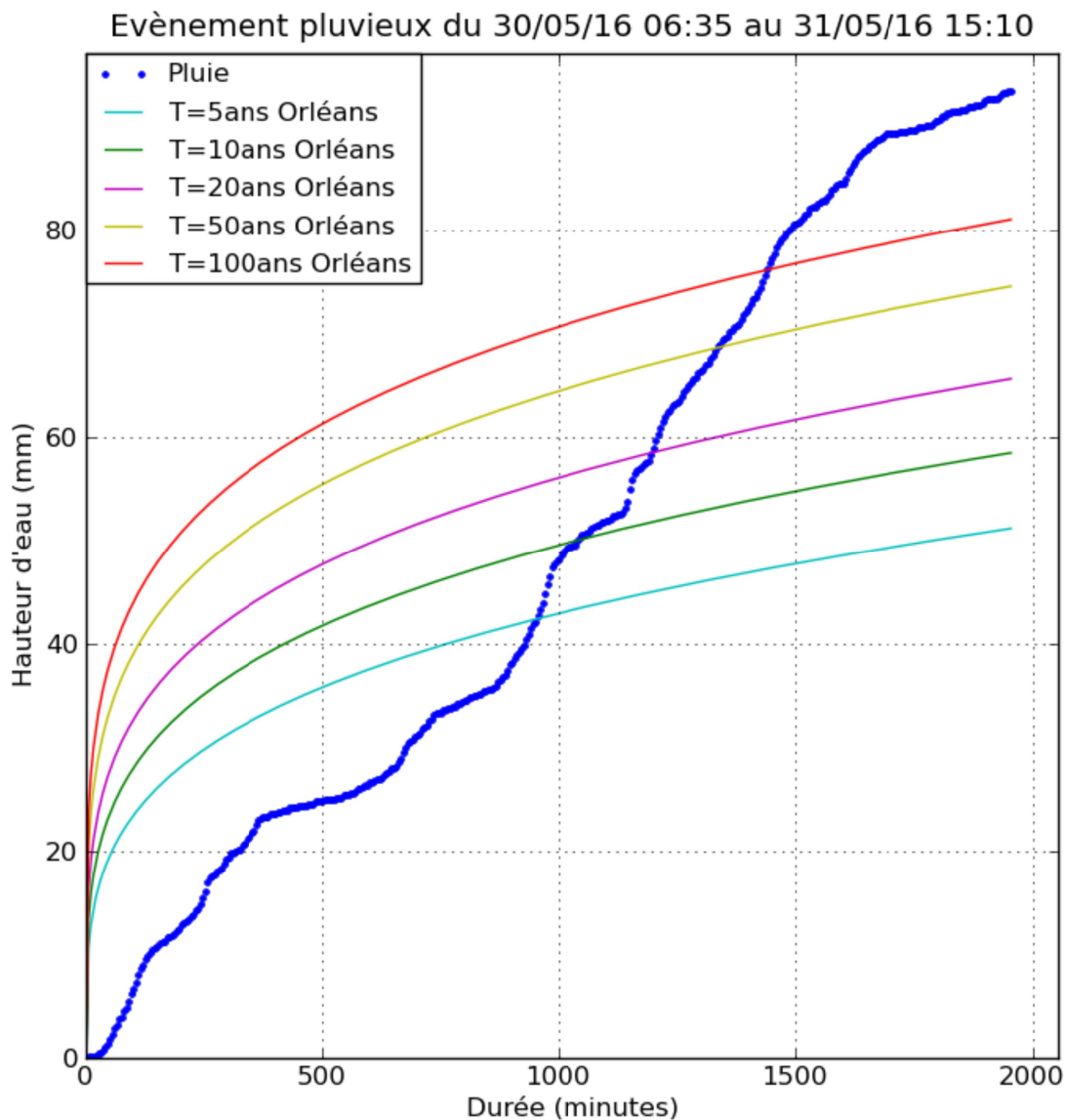


Figure 8: comparaison entre l'évènement pluvieux du 30/05/2016 06:35:00 au 31/05/2016 15:10:00 et des hauteurs de pluie estimées pour différentes périodes de retour.

Le cumul des précipitations relevées est proche de celui des normales saisonnières (680,3 mm contre 642,5 mm) mais avec une répartition différente. En effet la période de mai à septembre a été plus pluvieuse que la normale alors que les périodes de janvier-avril (hormis mars) et octobre-décembre ont été plus sèches.

La hauteur cumulée au cours de cet évènement pluvieux représente 93,6 mm soit 12,5 mm de plus que la hauteur estimée pour une période de retour centennale.

3.1.2 Pressions dans les alvéoles

Les capteurs utilisés dans le cadre de l'étude, mesure une pression relative par rapport à la pression atmosphérique. Cette pression est exprimée en mm de hauteur d'eau équivalente. La suite du document montrera que dans alvéoles, la pression mesurée par les capteurs n'est pas due uniquement à la hauteur d'eau mais aussi à une pression supplémentaire contenue dans la partie « air » d'une partie des alvéoles.

Dans la suite du document, le vocabulaire suivant sera donc utilisé :

- le terme « pression » pour la mesure dans les alvéoles ;
- le terme « hauteur » pour la mesure au niveau de l'évacuation des eaux pluviales.

La figure 9 montre l'évolution de la pression à la base des alvéoles pour les trois profils de mesures ainsi que la hauteur d'eau au niveau de l'évacuation d'eaux pluviales.

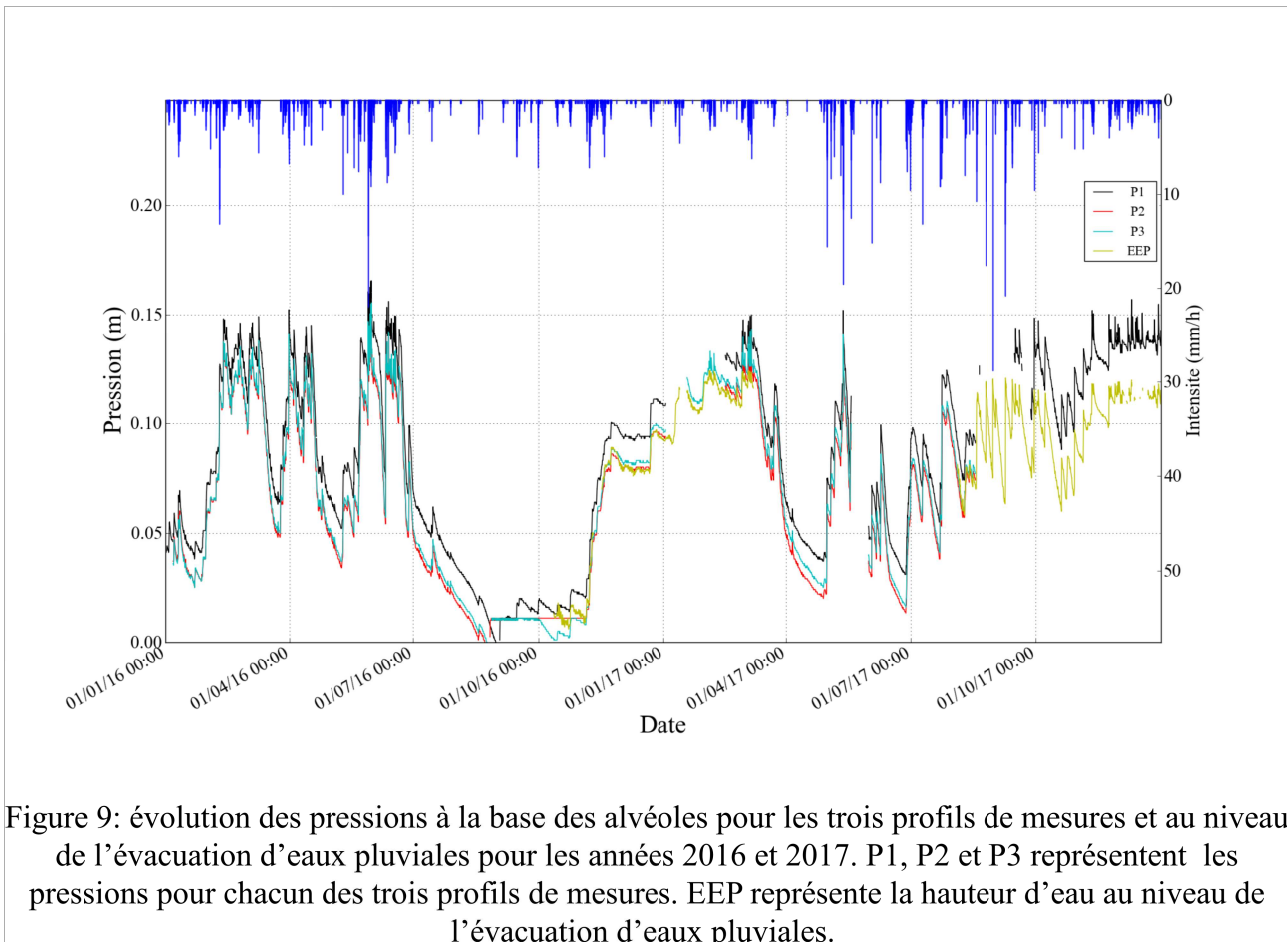


Figure 9: évolution des pressions à la base des alvéoles pour les trois profils de mesures et au niveau de l'évacuation d'eaux pluviales pour les années 2016 et 2017. P1, P2 et P3 représentent les pressions pour chacun des trois profils de mesures. EEP représente la hauteur d'eau au niveau de l'évacuation d'eaux pluviales.

La figure 9 montre que les pressions à la base des trois profils de mesures et la hauteur d'eau au niveau de l'évacuation d'eaux pluviales ont des variations quasi-identiques. Les écarts entre les courbes peuvent s'expliquer par le fait que la toiture n'est pas totalement horizontale.

Pendant les deux années de suivi, la toiture a stocké les eaux pluviales pendant les deux périodes hivernales avec quelques épisodes de débordement notamment lors de l'épisode exceptionnel de mai-juin 2016 (débordement estimé à 169,4 mm). Ce stock diminue ensuite pendant les périodes sèches (juillet-septembre 2016, fin mars-début mai 2017, juin 2017). Cependant la toiture ne s'est totalement vidée qu'une seule fois à la fin du mois d'août 2016.

3.1.3 Teneur en eau dans le substrat

Dans le livrable n°2 sur le suivi de l'année 2016, deux méthodologies avaient été présentées

pour l'étalonnage des sondes de teneurs en eau. Une campagne de prélèvements in situ a été réalisée au début de l'année 2016 avec des résultats plus proches de ceux réalisés avec la méthode n°1 qui consiste à ajouter et mélanger successivement une quantité d'eau au substrat (la méthode n°2 consiste elle à saturer puis sécher le substrat). Une seconde campagne in situ était envisagée lorsque le substrat aurait été sec mais la pluviométrie de l'année 2017 n'a pas permis de réaliser cette seconde campagne. Les résultats de la campagne de prélèvements in situ et les valeurs issues de la méthode n°1 plus proches des valeurs observées habituellement pour ce type de substrat ont conduit à retenir la méthode n°1.

Dans la suite du présent document les résultats affichés sont donc ceux issus de la méthode n°1.

La figure 10 représente l'évolution de la teneur en eau volumique du substrat (rapport entre le volume d'eau contenu dans le substrat et le volume total du substrat) pour les trois profils de mesures.

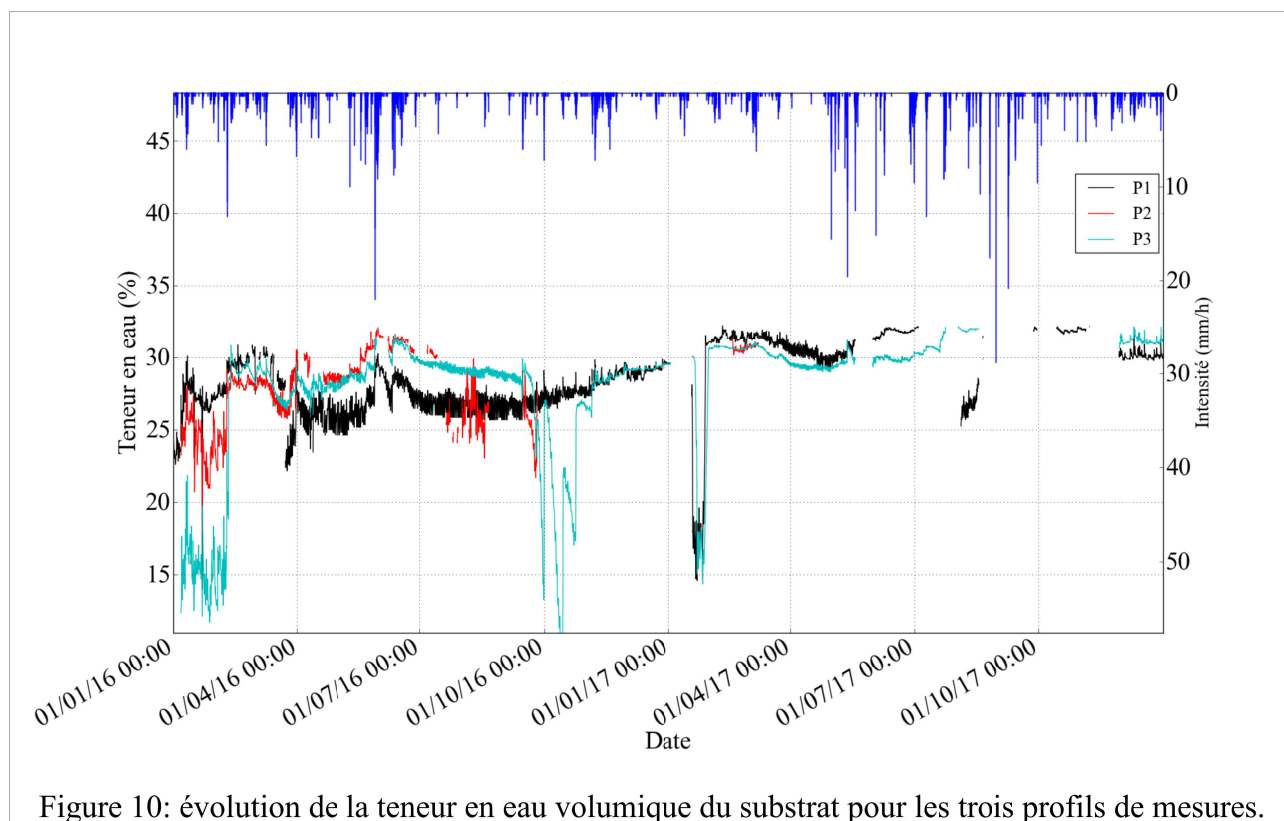
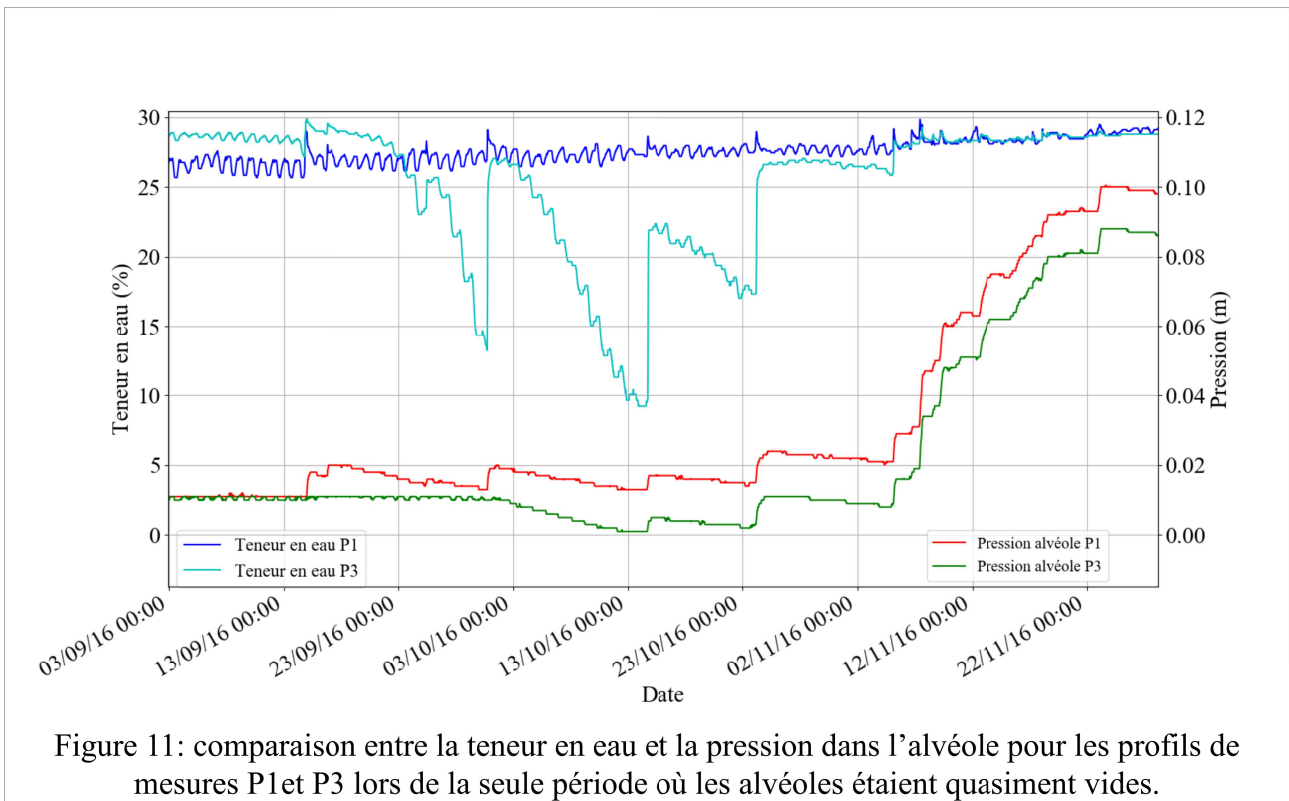


Figure 10: évolution de la teneur en eau volumique du substrat pour les trois profils de mesures.

Ce qu'il faut retenir de ces deux années de suivi est que la teneur en eau du substrat est restée élevée (autour de 25-35 %, ce qui représente la capacité maximale en eau du substrat) presque durant toute la période d'observation. La teneur en eau au profil P3 a baissée fortement uniquement pendant la fin d'été-début d'automne 2016. L'interprétation de cette diminution est décrite dans la suite du présent document.

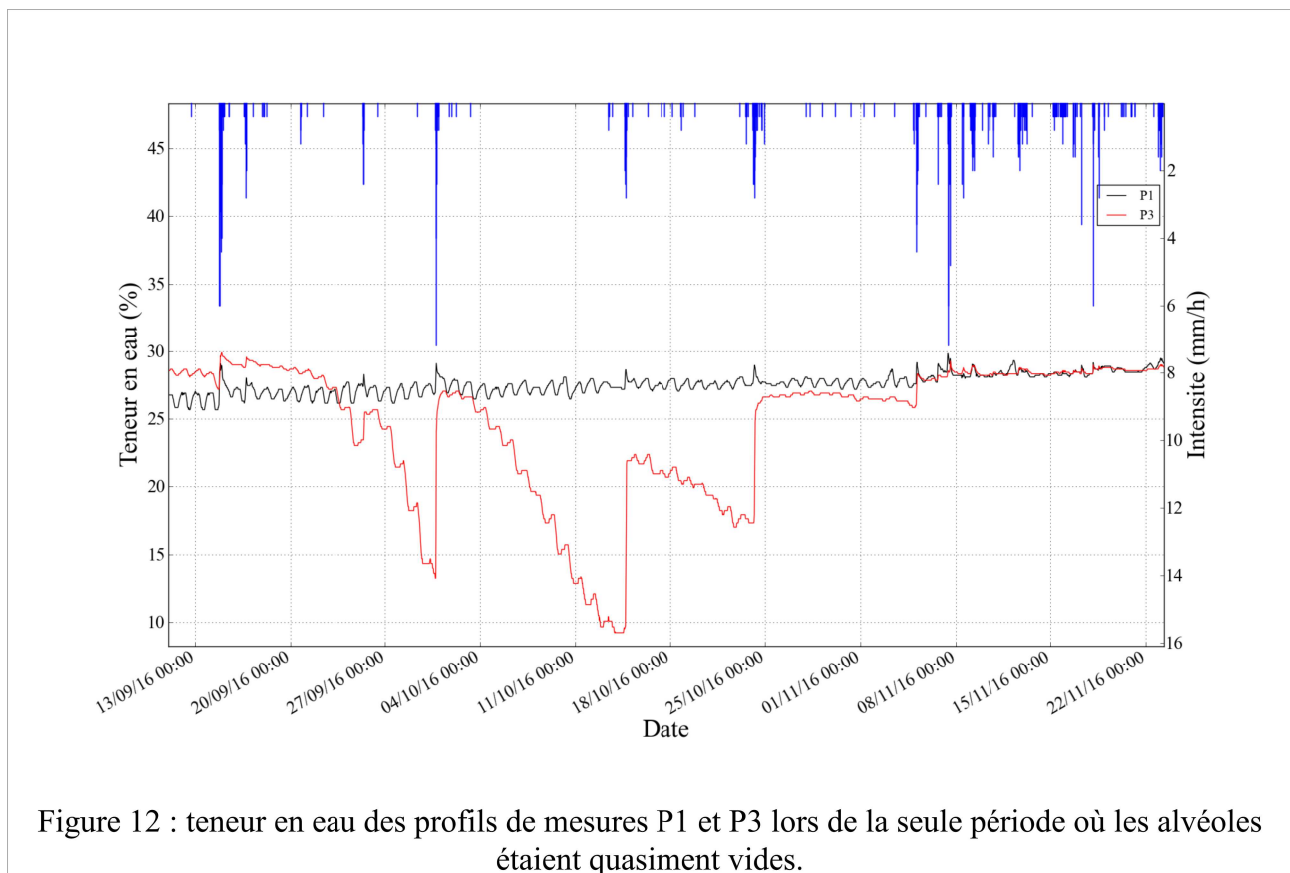
Il est à noter que la chute de la teneur en eau constatée au mois de janvier-février 2017 est due au gel du substrat lors de cette période.

La figure 11 représente la comparaison entre la teneur en eau et la pression dans les alvéoles P1 et P3 lors de la seule période où les alvéoles étaient quasiment vides.



La teneur en eau du profil P3 semble avoir diminué fortement uniquement pendant la période où les alvéoles étaient quasiment vides à la fin de l'été-début d'automne 2016 puis a retrouvé une valeur proche des 30 % dès lors que les alvéoles se sont de nouveau remplies. L'alvéole P1 quant à elle contenait toujours un peu plus d'eau au gré de quelques averses de pluie et sa teneur en eau est restée elle élevée (25-30%) pendant cette même période.

La figure 12 représente la teneur en eau des profils de mesures P1 et P3 lors de la seule période où les alvéoles étaient quasiment vides.



Les variations constatées sur le profil de mesures P3 apparaissent cohérentes avec les conditions climatiques et ressemblent à des variations observées sur d'autres toitures.

Les constats faits sur les figures 11 et 12 montreraient que tant que de l'eau est disponible dans les alvéoles, des échanges hydriques pourraient se faire entre la réserve d'eau et le complexe substrat-végétation. Pour confirmer cette idée, il aurait fallu pouvoir observer ce phénomène sur d'autres périodes. Ces échanges hydriques pourraient se faire soit par l'intermédiaire de racines de la végétation qui descendraient dans les alvéoles ou par évaporation de l'eau des alvéoles vers le substrat. L'annexe 5 montre des photos de racines en relation directe avec l'eau contenue dans les alvéoles sous différentes formes. Soit les racines descendent le long des parois de l'alvéole, soit elles se regroupent dans la partie centrale de l'alvéole pour former une mèche. Ces descentes de racines ne sont pas systématiques et n'ont été constatées que dans certaines alvéoles (la toiture a été végétalisée en 2015).

3.1.4 Résultats des analyses d'eaux

3.1.4.1 Méthodologie des prélèvements.

Au cours de l'étude, quatre campagnes de prélèvements et d'analyses de qualité de l'eau stockée dans les alvéoles ont été réalisées. Pour chacune des campagnes, trois échantillons (un à proximité de chaque profil) ont été prélevés et analysés. Pour ce faire, la méthodologie suivante a été appliquée :

- extraction de la végétation et du substrat autour d'une alvéole ;
- réalisation d'un trou dans le géotextile et agitation de l'eau contenu dans l'alvéole (sauf pour la campagne n°3 et n°4 où l'eau n'a pas été agitée) ;
- passage d'un tube à travers le géotextile ;
- pompage de l'eau à l'aide d'une pompe à main vers un bocal en verre ;
- transfère de l'eau (après rinçage préalable des contenants avec un peu d'eau prélevée) dans un bocal en verre de 1L transparent pour les hydrocarbures totaux (HCT), dans un bocal en verre opaque de 1L pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et dans un bidon en plastique de 2L pour les autres paramètres ;
- remise en place du substrat et de la végétation.

Lors des campagnes n°2 et n°3, l'eau de pluie a également été prélevée dans le bidon récupérant l'eau du pluviomètre et analysée afin de voir l'impact réel du complexe substrat/végétation sur la qualité des eaux.

Il est important de noter qu'en début d'étude une fertilisation complémentaire a été réalisée pour aider à une pousse rapide des boutures de sédum.

3.1.4.2 Résultats et exploitation des données

L'ensemble des résultats analytiques sont présentés en annexe 3 du rapport.

L'exploitation des données s'est faite dans un premier temps en comparant pour chaque paramètre les ratios concentrations moyennes de l'eau des alvéoles et concentrations de l'eau de pluie afin de voir le rôle (apports ou rétention) du substrat (végétalisé, nature des matériaux utilisés) sur les eaux infiltrées.

Le tableau 1 présente les ratios moyens obtenus pour les deux campagnes d'analyses où l'eau de pluie a été prélevée. Ces ratios traduisent une image globale associée à des variations inter-campagne.

Tableau 1: ratios concentrations moyennes de l'eau des alvéoles et concentrations moyennes de l'eau de pluie. Pour les cellules grisées, les valeurs étant inférieures à la limite de quantification (LQ) pour la pluie et l'eau des alvéoles, le ratio n'a pas été calculé.

Paramètres	Unités	Pluie	Moyenne eau des alvéoles	Ratio alvéoles/pluie
Conductivité à 25°C	µS/cm	29,000	311,167	10,7
DBO5	mg O2/l	3,500	19,833	5,7
DCO micro méthode	mg/l O2	18,900	131,333	6,9
MES	mg/l	5,500	2,167	0,4
NK	mg/l N	1,285	2,467	1,9
P total	mg P/l	0,100	2,888	28,9
pH	-	7,075	5,933	0,8
Acenaphtène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Acenaphtylène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Anthracène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Benzo(a)anthracène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Benzo(a)pyrène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Benzo(b)fluoranthène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Benzo(ghi)perylène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Benzo(k)fluoranthène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
C10-C40 hydrocarbures totaux	mg/l	0,090	0,083	0,9
Chrysène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Dibenzo(ah)anthracène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Fluoranthène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Fluorène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Naphtalène	µg/l	0,009	0,014	1,6
Phénanthrène	µg/l	0,010	0,006	0,6
Pyrène	µg/l	<0,006	<0,006	non calculé
Aluminium	µg/l	5,585	826,167	147,9
Cadmium	µg/l	<1	<1	non calculé
Chrome	µg/l	<5	<5	non calculé
Cuivre	µg/l	8,160	7,718	0,9
Fer	µg/l	16,530	988,667	59,8
Nickel	µg/l	5,780	14,865	2,6
Plomb	µg/l	<10	<10	non calculé
Zinc	µg/l	1544,500	391,700	0,3

Pour les polluants globaux, les résultats sont décrits ci-après.

Les ratios associés à la conductivité électrique, la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la Demande Biologique en Oxygène (DBO5) et le phosphore total (P total), respectivement de 10,7, 5,7, 6,9 et 28,9, supérieurs à 5 témoignent d'un processus de relargage à partir du substrat, ces paramètres étant liés à sa valeur agronomique. En ce qui concerne l'azote, également associé au niveau de fertilité du substrat, les nitrates n'ayant pas été analysés, aucune conclusion ne peut être formulée.

Le ratio de Matières En Suspension (MES) de 0,4 montre que le substrat retient une partie des particules présentes dans l'eau de pluie.

Pour les micro-polluants, les ratios associés aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), aux hydrocarbures totaux, au nickel et au cuivre sont proches de 1 (0,6 à 2,6) traduisant la faible réactivité du substrat.

En ce qui concerne le fer et l'aluminium les ratios supérieurs à 10 témoignent d'un relargage de ces éléments, processus associé à une acidification des eaux.

En ce qui concerne le chrome et le plomb les concentrations étant inférieures à la limite de quantification dans l'eau de pluie et dans l'eau des alvéoles il est impossible de se prononcer sur le rôle du substrat.

À noter que le ratio associé au zinc est faible mais en raison de concentrations importantes dans l'eau de pluie. Ceci s'explique par la nature du pluviomètre dont le revêtement de surface peut

relarguer des polluants. Il est donc difficile de préciser si du zinc est réellement relargué par le substrat. Il est à noter que le profil 3 montre des concentrations beaucoup plus importantes que les deux autres profils. Cette particularité est peut-être due à une source de pollution ponctuelle de proximité (équipements de la toiture, pluviomètre).

La présence de grande quantités de fer dans l'eau des alvéoles est constatée et pourrait provenir en partie de l'amendement du substrat par de l'engrais (composition en annexe 4).

Le tableau 2 montre l'évolution des concentrations des polluants entre deux campagnes.

Tableau 2: évolution des concentrations moyennes des polluants présents dans l'eau des alvéoles entre les quatre campagnes de prélèvements. Pour les cellules grisées, les valeurs étant inférieures à la limite de quantification, le ratio n'a été calculé.

Paramètres	Ratio concentration moyenne des trois profils entre la campagne n°1 et la campagne n°2	Ratio concentration moyenne des trois profils entre la campagne n°2 et la campagne n°3	Ratio concentration moyenne des trois profils entre la campagne n°3 et la campagne n°4	Ratio concentration moyenne des trois profils entre la campagne n°1 et la campagne n°4
Conductivité à 25°C	5.1	0.5	0.4	0.9
DBO5	7.3	0.1	7.7	4.6
DCO micro méthode	1.7	2.0	0.7	2.3
MES	0.2	1.2	1.9	0.4
NK	3.3	0.4	1.3	1.9
P total	0.6	2.3	0.5	0.6
pH	1.0	1.1	1.1	1.1
Acenaphthène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Acenaphthylène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Anthracène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Benzo(a)anthracène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Benzo(a)pyrène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Benzo(b)fluoranthène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Benzo(ghi)perylène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Benzo(k)fluoranthène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
C10-C40 hydrocarbures totaux*	1.8	0.5	0.4	0.4
Chrysène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Dibenz(ah)anthracène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Fluoranthène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Fluorène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Naphtalène	1.3	1.2	0.5	0.7
Phénanthrène	0.6	1.1	0.9	0.6
Pyrène	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Aluminium	1.4	1.3	0.7	1.3
Cadmium	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Chrome	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Cuivre	1.5	1.0	0.7	1.1
Fer	0.4	7.0	0.4	1.3
Nickel	3.2	0.5	0.5	0.8
Plomb	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
Zinc	3.7	0.2	0.4	0.3

Légende

augmentation de plus de 30 %
diminution de plus de 30 %
variation inférieure à 30 %

L'évolution des polluants globaux présents dans les alvéoles entre la campagne n°1 de juin 2016 et la campagne n°4 de juin 2018 montre une augmentation des concentrations pour les paramètres DBO5, DCO et NK. Les paramètres MES et P total sont eux en diminution. La conductivité est quant à elle stable.

Pour les micropolluants, une augmentation des concentrations en aluminium et en fer et une diminution pour les hydrocarbures totaux, le phénanthrène et le zinc sont constatées. Les concentrations des paramètres naphtalène, cuivre et nickel sont stables.

Néanmoins, entre les différentes campagnes, les tendances mentionnées ci-avant ne sont pas régulières et s'inversent entre les campagnes.

L'inversion des tendances constatée sur les polluants globaux et les micropolluants entre les campagnes pourrait s'expliquer par un possible renouvellement de l'eau des alvéoles lors des épisodes pluvieux exceptionnels ou de pluies successives entraînant une diminution de la concentration en polluants par dilution et relargage lors des débordements (diminution constatée entre la campagne n°2 de février 2017 et la campagne n°3 de septembre 2017, puis entre la campagne n°3 et la campagne n°4 de juin 2018 où des débordements ont eu lieu) et à l'inverse, une possible augmentation des concentrations lors de la diminution du niveau d'eau dans les alvéoles par évapotranspiration (augmentation constatée entre la campagne n°1 de juin 2016 et la campagne

n°2 de février 2017 où les alvéoles se sont quasiment vidées par évapotranspiration lors de l'été 2016).

Dans un second temps, les concentrations analysées ont été comparées (à titre indicatif) aux valeurs seuils permettant de qualifier l'état des masses d'eau (cf Guide technique relatif à l'évaluation des eaux de surface continentales de Mars 2016) présentées en annexe 3. Les résultats montrent un dépassement des seuils pour atteindre le Bon état pour la DCO, le zinc, l'aluminium, le cuivre et le P total pour chacune des quatre campagnes d'analyses.

3.1.4.3 Conclusion

Globalement, la tendance générale est la même, en termes d'impact sur la qualité des eaux, que celle issue de la bibliographie sur les toitures végétalisées¹. En effet les résultats montrent un apport de certains métaux (fer, aluminium, nickel) et de composés phosphorés. Par contre les valeurs de DCO et de phosphore sont plus élevées que celles constatées sur les toitures végétalisées classiques² ce qui amène à s'interroger sur la possible augmentation de la concentration des polluants dans les alvéoles et leur possible relargage dans les évacuations d'eaux pluviales lors des épisodes de débordements. L'analyse des eaux surversées permettrait de mieux caractériser la qualité des rejets.

1- http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Impacts_des_toitures_végétalisées_sur_la_qualité_des_eaux_pluviales

2- Marie Christine Gromaire -Impact of extensive green roofs on the quantity and the quality of runoff – first results of a test bench in the Paris region -Novatech 2013

3.2 Compréhension du fonctionnement de la toiture

Dans le rapport du livrable n°2 sur le suivi de l'année 2016, les bilans hydriques réalisés pour la plupart des événements ont montré que la variation de la pression dans les alvéoles était supérieure aux précipitations. Pour expliquer cette incohérence, l'apparition d'une pression supplémentaire (P_{air}) dans la partie « air » (partie située entre le niveau réel de l'eau dans une alvéole et le géotextile recouvrant cette même alvéole) avait été évoquée. La saturation du substrat et du géotextile empêche l'air contenu dans l'alvéole de s'échapper et génère une pression différente de la pression atmosphérique ($P_{air} + P_{atm}$), ce qui a pour incidence de perturber la mesure du capteur de pression dans les alvéoles. En effet, le capteur mesure la pression totale ($H + P_{air} + P_{atm}$) puis compense cette pression totale par la pression atmosphérique P_{atm} . La pression affichée par le capteur ne représente pas uniquement la hauteur d'eau (H) dans l'alvéole mais la hauteur d'eau augmentée de la pression contenue dans le compartiment « air » des alvéoles ($H + P_{air}$).

NB : la suite du présent document montrera que cette pression peut être négative.

3.2.1 Expériences en laboratoire

Afin de mieux comprendre le comportement de la toiture sous l'influence de ce phénomène de pression supplémentaire, diverses expériences ont été menées au laboratoire de Trappes.

Le dispositif expérimental, simulant le fonctionnement d'une alvéole, présenté sur la figure 13 est composé d'un bidon fermé au-dessus par deux couches de géotextile, et ouvert au-dessous par un trou permettant l'échange avec les zones extérieures représentées par le récipient (le bidon est mis dans le récipient). Le compartiment du substrat est représenté par un autre bidon ouvert collé au-dessus du premier bidon. Un capteur de pression d'air placé juste au-dessous du géotextile permet de déterminer la pression d'air dans le compartiment air du premier bidon.

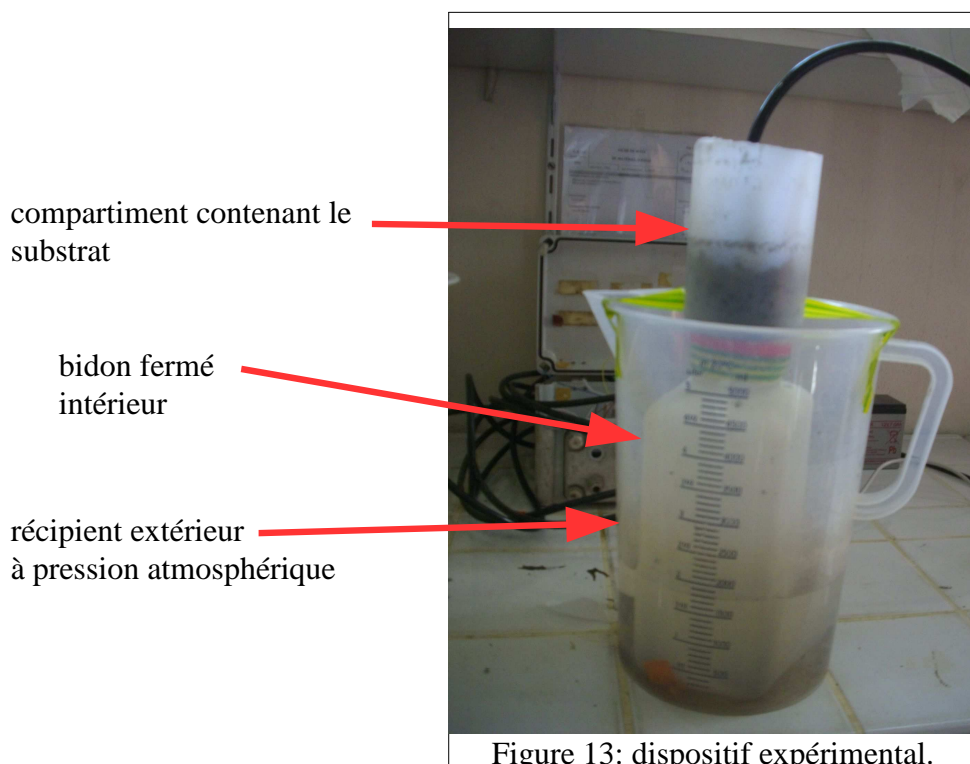


Figure 13: dispositif expérimental.

Plusieurs expériences détaillées dans le rapport de stage de master 2 de Toufik DJAOUI (rapport joint à ce livrable) ont été réalisées en ajoutant des quantités d'eau précises dans le compartiment substrat ou directement dans le récipient extérieur. Les conclusions de ces diverses expériences sont les suivantes :

- dans un premier temps, en versant de l'eau dans le substrat, le capteur mesure une surpression dès que le géotextile et le substrat sont saturés ;
- malgré l'apparition de cette surpression, l'eau n'est pas bloquée en surface mais continue de s'infiltrer ;
- même si l'eau s'infiltré dans l'alvéole, le niveau d'eau à l'intérieur du bidon ne bouge pas. La quantité d'eau versée rejoint directement le récipient extérieur. Une différence entre le niveau d'eau dans le bidon intérieur et celui du récipient extérieur est constatée et le capteur mesure une pression positive (une surpression par rapport à la pression atmosphérique) ;
- en ajoutant de l'eau directement dans le récipient extérieur, le niveau d'eau dans le bidon intérieur ne bouge toujours pas alors que le niveau monte dans le récipient extérieur, le capteur mesure dans ce cas aussi une pression positive ;
- en enlevant de l'eau dans le récipient extérieur, le niveau de l'eau ne bouge toujours pas dans le bidon intérieur et cette fois-ci, le niveau d'eau dans le récipient extérieur est inférieur à celui du bidon. Le capteur mesure cette fois une pression négative (une dépression par rapport à la pression atmosphérique) ;
- la relation entre la différence de hauteur d'eau ΔH dans le bidon et celui du récipient extérieur et les quantités d'eau ajoutées P dans le compartiment du substrat et directement dans le compartiment extérieur est la suivante :

$$\Delta H = \frac{S_{bidon}}{S_{ext}} * P + P$$

3.2.2 Comportement théorique de la toiture

Les expériences menées en laboratoire ont permis de mieux comprendre le fonctionnement à l'échelle de l'alvéole. En appliquant la relation précédente à la toiture d'Orléans. S_{bidon} représente la surface recouverte de substrat-végétation et S_{ext} celle des zones stériles.

Le rapport entre ces deux surfaces est estimé à environ 8. Après vérification avec les données de pluie et de pression dans les alvéoles enregistrées lors d'un événement pluvieux, ce rapport n'est jamais atteint. L'apparition de ce phénomène de pression supplémentaire ne se ferait donc pas sur l'ensemble de la zone recouverte du complexe substrat-végétation mais seulement sur une partie.

La toiture serait alors découpée en trois zones lors d'un événement pluvieux :

- la zone stérile ;
- la zone d'alvéoles recouverte de substrat où le phénomène de pression supplémentaire apparaît suite au blocage de l'air dans ces alvéoles ;

- la zone où malgré la saturation du substrat et du géotextile, l'air parvient à circuler et ce phénomène de pression supplémentaire n'apparaît donc pas.

La figure 14 illustre la répartition de ces trois zones.

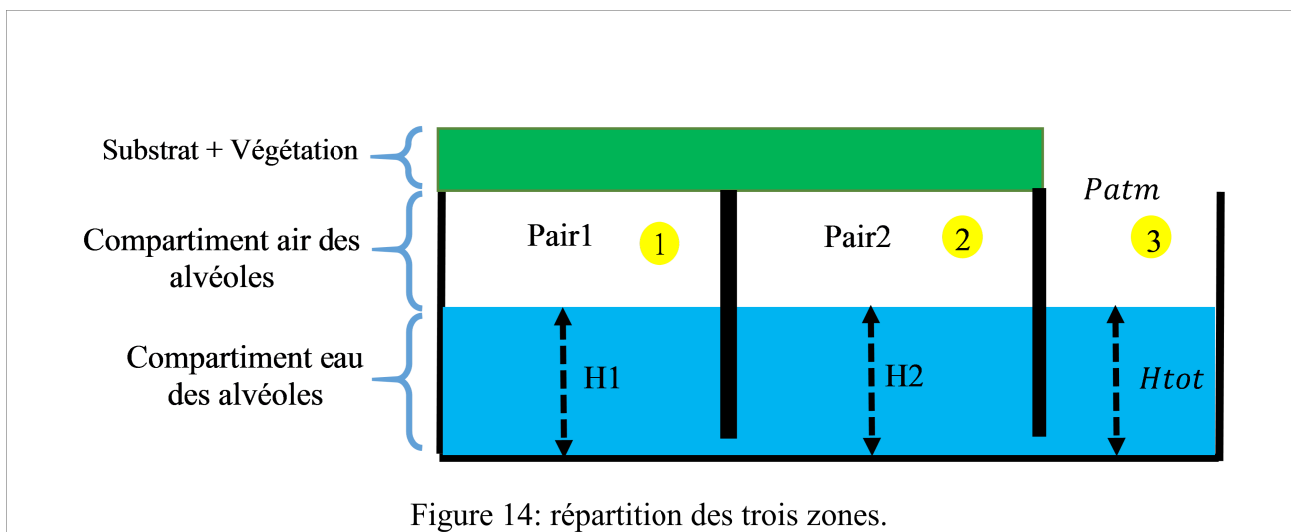


Figure 14: répartition des trois zones.

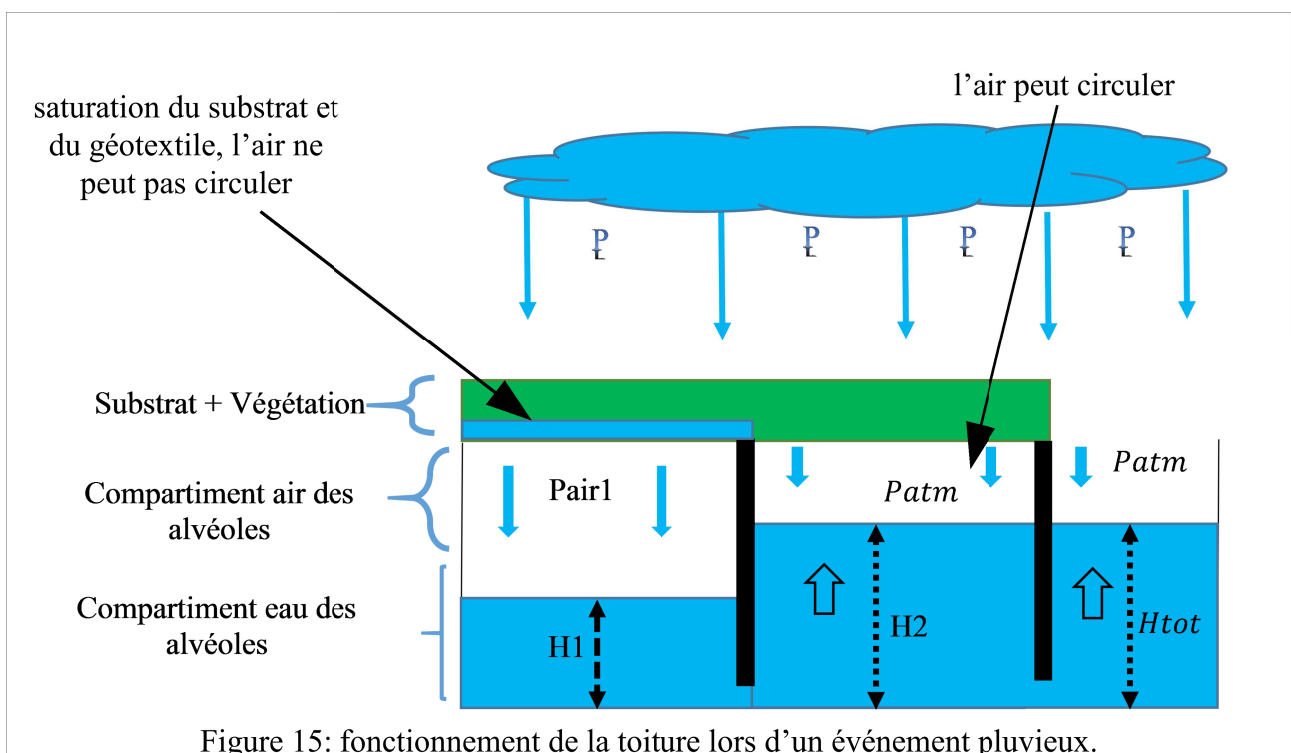


Figure 15: fonctionnement de la toiture lors d'un événement pluvieux.

La figure 15 montre la réaction de la toiture lors d'un événement pluvieux.

Les précipitations saturent le substrat et le géotextile puis s'infiltrent dans les alvéoles et rejoignent à la fois la zone où l'air peut circuler et les zones stériles.

La relation entre ΔH (différence entre H_{tot} et H_1) et P s'écrit sous la forme suivante :

$$\Delta H = \frac{S_{ap}}{(S_{al} + S_s)} * I + \frac{S_{al}}{(S_{al} + S_s)} * I + \frac{S_s}{(S_{al} + S_s)} * P$$

Tel que :

ΔH : différence de hauteur entre H_{tot} et H_1 ;

S_{ap} : surface totale des alvéoles où le phénomène de pression est présent ;

S_{al} : surface totale des alvéoles où le phénomène de pression n'est pas présent ;

S_s : surface totale des zones stériles dans la toiture ;

I : infiltration dans les alvéoles, égale à la pluie moins la rétention du substrat au-dessus ;

P : pluie.

3.2.3 Validation du fonctionnement de la toiture

Afin de valider l'existence de cette surpression dans les alvéoles, deux capteurs ont été mis en place dans les parties « air » de deux alvéoles indépendantes.

La figure 16 montre l'implantation des deux capteurs sur la toiture.

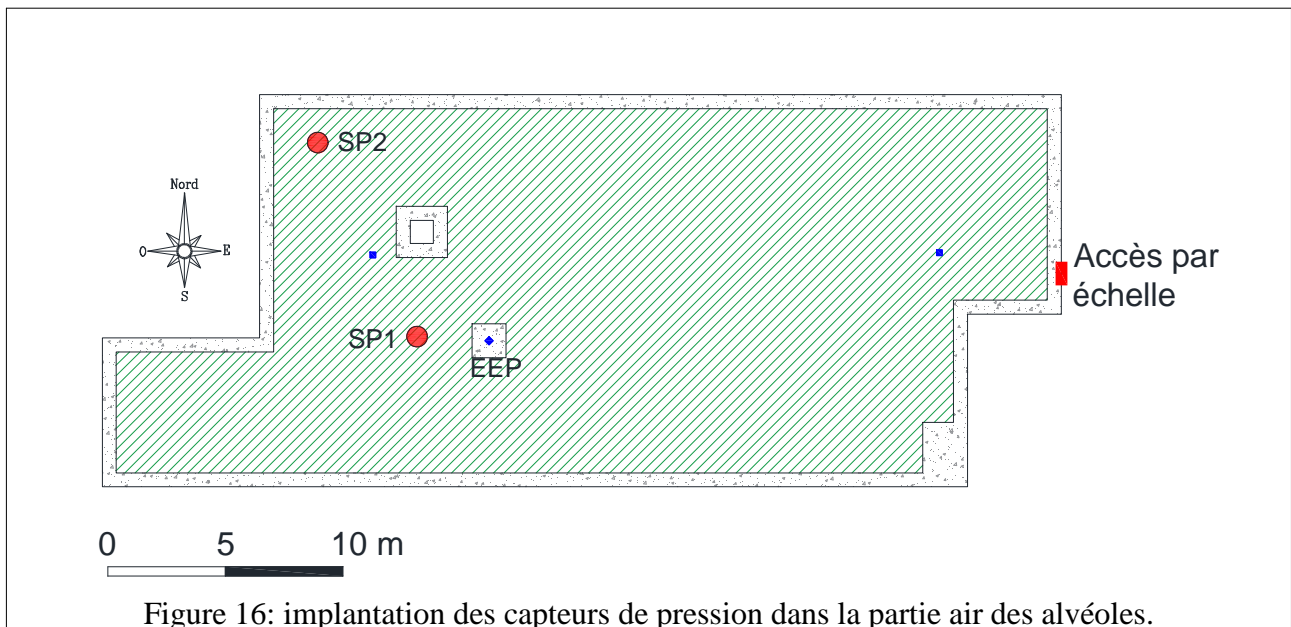
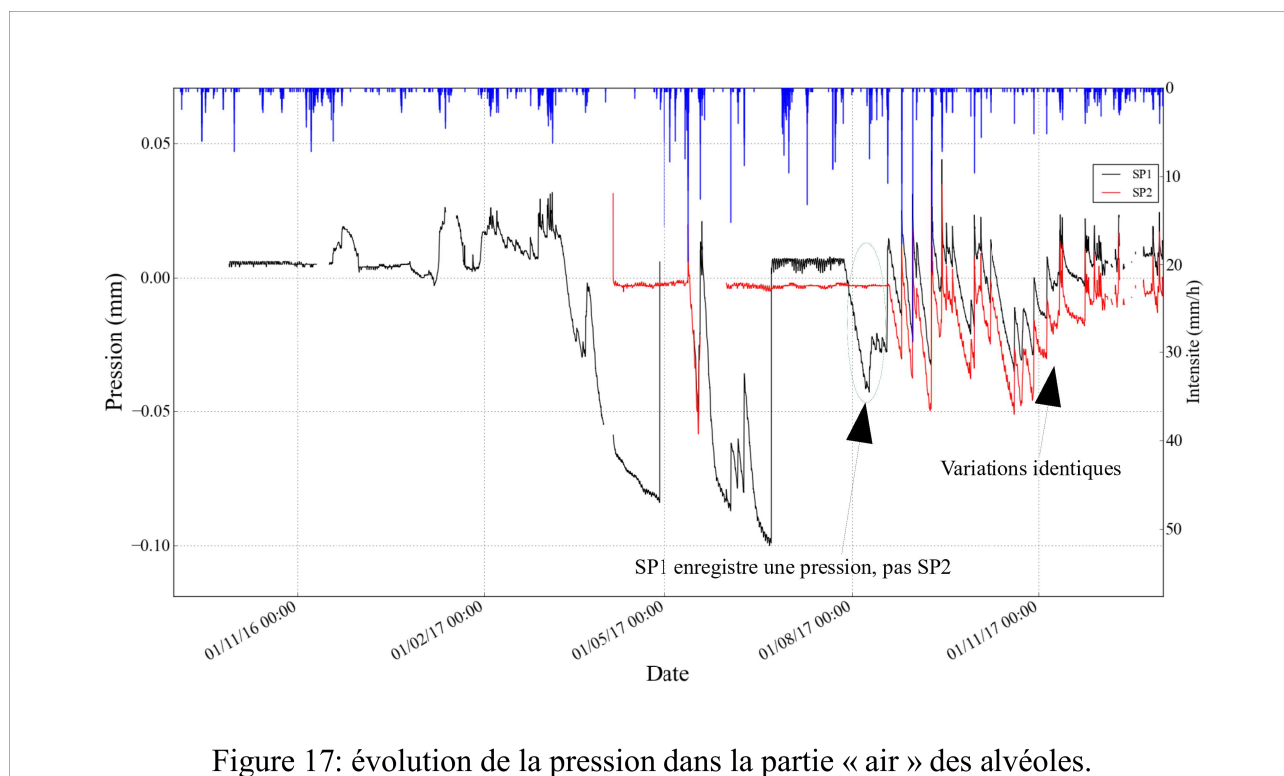


Figure 16: implantation des capteurs de pression dans la partie air des alvéoles.

Le premier capteur a été placé à partir du 28 septembre 2016 plutôt dans la partie centrale de la toiture, proche de l'évacuation des eaux pluviales. Le second a quant à lui été placé en périphérie de toiture à partir du 05 avril 2017 afin de voir la répartition spatiale de l'apparition de cette pression supplémentaire.

La figure 17 présente l'évolution des pressions dans le compartiment air de ces deux alvéoles.



La figure 17 montre que les deux capteurs enregistrent des pressions positives et négatives. Ces enregistrements ne commencent pas forcément au même moment. D'après la figure, le capteur « SP1 » enregistre une variation de pression avant le capteur « SP2 » ce qui peut s'expliquer par le fait que la partie centrale se sature avant la périphérie de la toiture. Il est également à noter que dès que la pression apparaît dans une alvéole, les pressions enregistrées varient de manière identique. Seules les hauteurs d'eau réelles dans les alvéoles sont différentes ce qui explique l'écart entre les deux courbes. Il est important également de noter que cette pression enregistrée ne disparaît pas forcément entre deux événements pluvieux mais peut se maintenir durant plusieurs mois.

La figure 18 montre le pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé. Ce pourcentage a été calculé à partir des données de pluie et de variation de pressions enregistrées selon l'équation suivante :

$$R = \frac{S_{AP}}{(S_{AT} + S_S)} = \frac{(\Delta H - P)}{\Delta H}$$

tel que :

R : pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé ;

S_{AP} : surface d'alvéoles où l'air est piégé ;

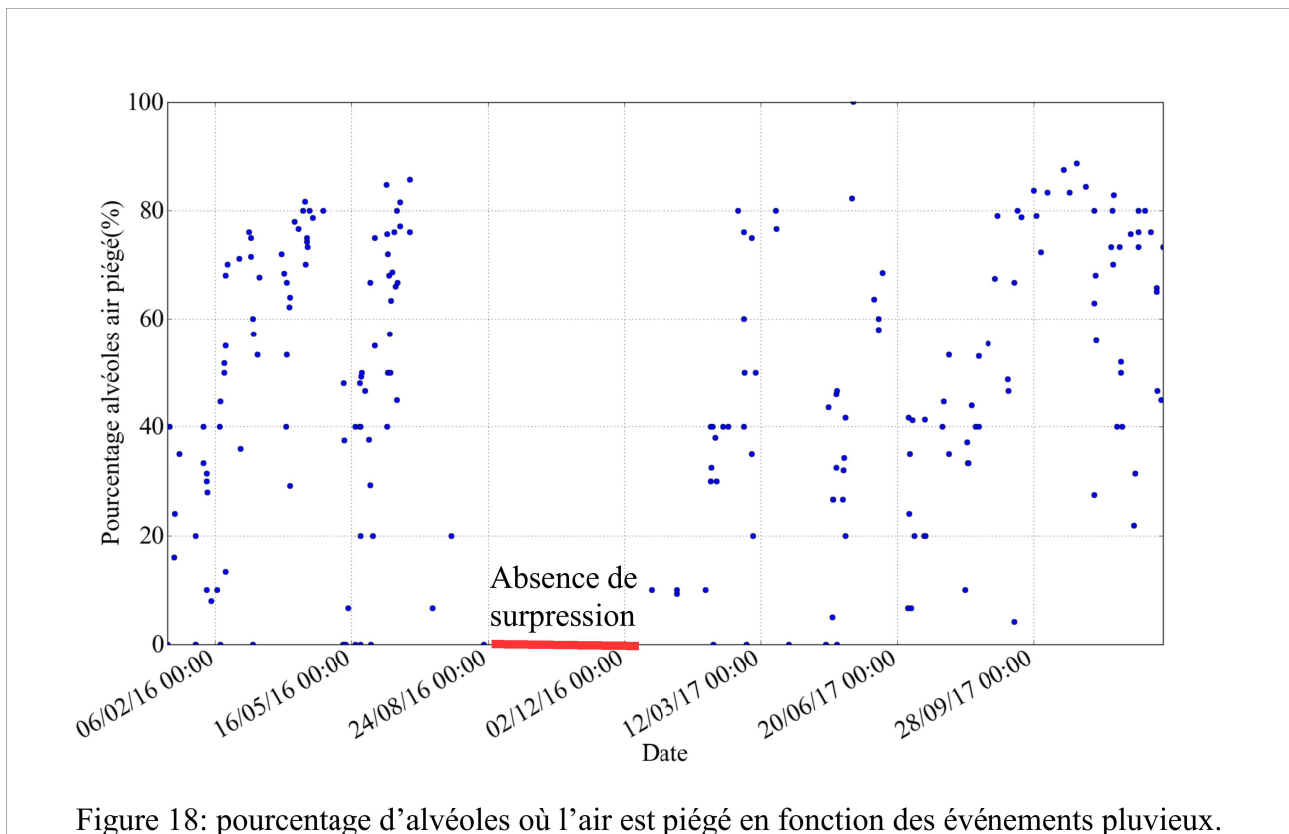
S_{AT} : surface totale d'alvéoles ;

S_S : surface des zones stériles ;

ΔH : variation de pression entre le début et la fin de l'événement pluvieux ;

P : cumul des précipitations lors de l'événement pluvieux.

(l'équation ci-dessus a été obtenue en faisant l'hypothèse dans l'équation de la page 21 que l'infiltration I est égale à la pluie P)



La figure 18 montre que ce pourcentage est très aléatoire (de 0 à 100 %) et difficilement interprétable car dépendant de plusieurs facteurs (intensité de la pluie, configuration du substrat, développement de la végétation, etc.). Toutefois la période où le phénomène de pression supplémentaire est absent au cours de l'été-automne 2016 est bien identifiable sur le graphe.

3.2.4 Conclusion

Les expériences réalisées en laboratoire et les observations ont permis de mieux comprendre le fonctionnement actuel de la toiture. Les enseignements suivants sont à retenir :

- la saturation du substrat et du géotextile piège dans certaines conditions l'air à l'intérieur des alvéoles et génère un phénomène de pression supplémentaire. Cependant ce phénomène n'est pas homogène sur l'ensemble de la toiture et ne concerne qu'un pourcentage des alvéoles. Celui-ci est variable au cours du temps ;
- tant que l'air est bloqué dans les alvéoles, le niveau d'eau à l'intérieur des alvéoles ne varie pas et reste à son niveau initial au début du blocage de l'air.
- l'eau infiltrée dans ces alvéoles rejoint directement les zones où l'air des alvéoles peut circuler au travers du géotextile et du substrat et les zones stériles. La variation du niveau d'eau dans ces zones est donc plus importante et peut favoriser notamment les débordements. Par conséquent, la toiture perd une partie de sa capacité de stockage ;
- la teneur en eau du substrat reste à sa valeur de capacité maximale en eau (CME) tant que l'eau est disponible dans les alvéoles. Ce qui tend à confirmer le flux hydrique entre l'eau stockée dans les alvéoles et le substrat lors des périodes de séchage. Cette conséquence contribue à la bonne alimentation en eau de la végétation et son

développement pendant toute l'année même en période estivale (tant qu'il y a de l'eau stockée dans les alvéoles).

3.3 Performances de la toiture

Afin de déterminer les performances de la toiture à zéro rejet, le volume de débordement a été estimé sur les deux années de suivi. Comme les évacuations d'eaux pluviales n'ont pas été équipées de capteurs pour mesurer le débit, le volume de débordement est estimé à partir des mesures de pressions dans les alvéoles avec les hypothèses suivantes :

- la limite de débordement a été fixée à 140 mm pour le profil n°1 ;
- le volume de débordement est égal au cumul des précipitations pendant les périodes où les valeurs de pressions dépassent ce seuil.

Avec ces hypothèses, les performances estimées de la toiture sont donc les suivantes :

- volume de débordement durant les deux années de suivi : 424,9 mm ;
- cumul de pluie : 1390,3 mm ;
- performance de la toiture sur les deux années de suivi : 69 % d'abattement de la pluie.

En excluant les événements exceptionnels de mai 2016 (débordement estimé à 169,4 mm), la performance de la toiture sur les deux années de suivi est de 79 % d'abattement de la pluie.

4 Modélisation du fonctionnement de la toiture

L'apparition d'une pression supplémentaire dans une partie des alvéoles rend difficile le développement d'un modèle intégrant ce phénomène. Dans le cadre de son stage de Master 2, Toufik DJAOUI a développé un modèle conceptuel intitulé « TTV0R », il sera appelé « Faveur-0R » dans la suite du présent document. Ce modèle simule le fonctionnement de la toiture sans tenir compte du phénomène de pression supplémentaire.

Pour des raisons de compréhension, dans la suite de ce chapitre, le terme « hauteur observée » sera utilisé pour décrire la hauteur dans les alvéoles même si celle-ci comprend une pression supplémentaire liée à l'air.

4.1 Description du modèle « Faveur-0R »

Le modèle « Faveur-0R » est composé de deux réservoirs représentant les deux fonctions principales de la toiture végétalisée à zéro rejet :

- le premier réservoir représente l'interception de la végétation et du substrat, qui retient une partie de la pluie et participe à la diminution du volume qui rejoint le réservoir alvéolaire (grâce à la rétention et à l'évapotranspiration par la végétation et le substrat).
- le second réservoir représente le réservoir alvéolaire qui stocke la quantité d'eau qui s'infiltrate à travers le substrat.

Le schéma du modèle est illustré dans la figure 19.

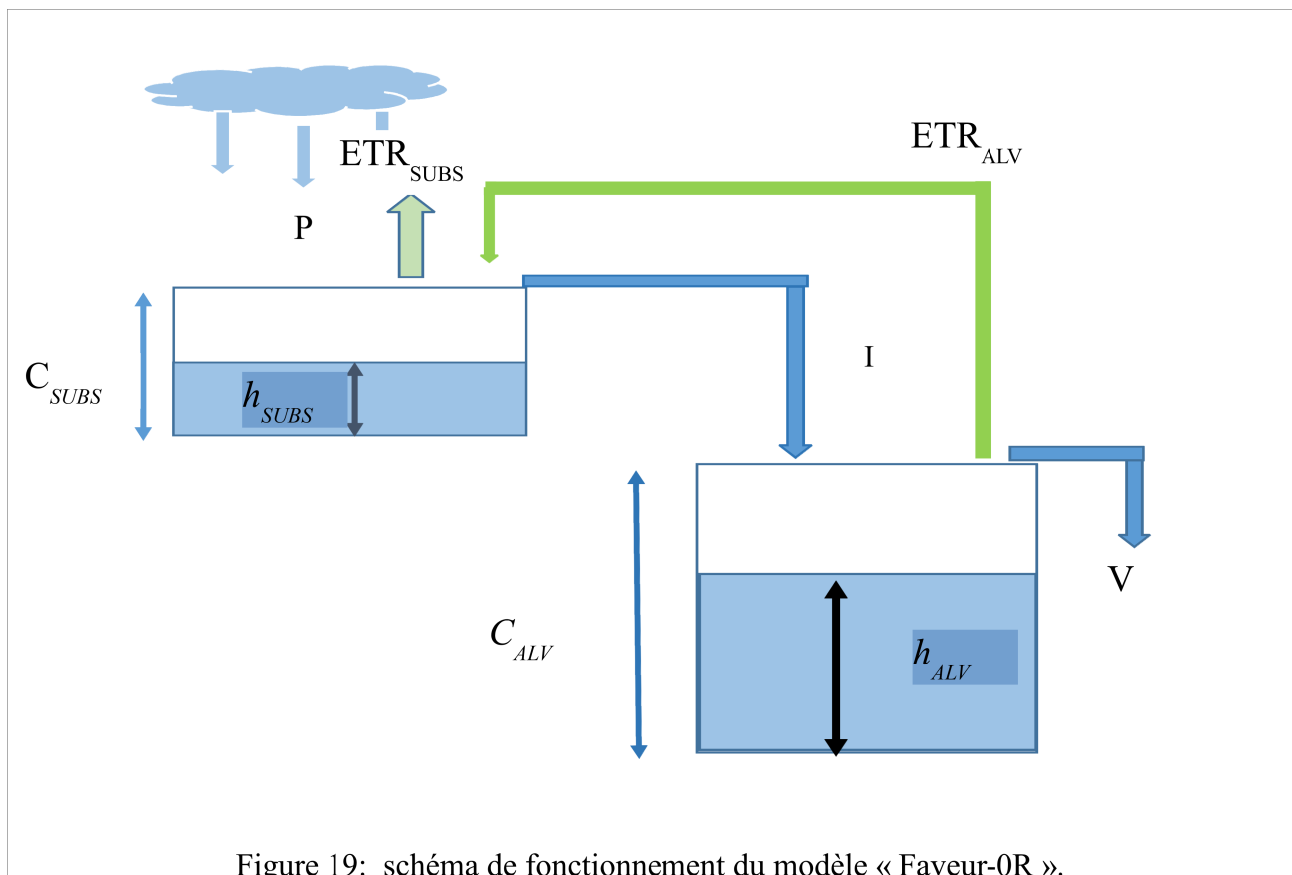


Figure 19: schéma de fonctionnement du modèle « Faveur-0R ».

Les données d'entrée du modèle sont :

- la chronique de pluie (P);
- la chronique d'évapotranspiration potentielle (ETP);

En sortie, le modèle donnera les résultats suivants :

- la hauteur d'eau stockée dans les alvéoles (h_{ALV}).
- la hauteur d'eau débordée (V) vers les évacuations d'eaux pluviales.

Le fonctionnement du modèle est le suivant :

- le premier réservoir est caractérisé par une capacité de stockage (capacité d'interception de la végétation et du substrat C_{SUBS}). Son stock (h_{SUBS}) varie au cours du temps. Lorsque le stock dépasse la capacité du réservoir d'interception, la quantité d'eau supplémentaire alimente le second réservoir représentant les alvéoles (via le flux I). Le remplissage du réservoir du substrat se fait par les pluies et par l'évapotranspiration du réservoir alvéolaire (ETR_{ALV}) situé en dessous. La vidange se fait par l'effet de l'évapotranspiration (ETR_{SUBS}) du stock d'eau contenu dans le substrat ;
- le deuxième réservoir représente le réservoir alvéolaire de la toiture. Ce dernier est caractérisé par une capacité de stockage (capacité de stockage d'eau dans les alvéoles C_{ALV}), et il est alimenté par le débordement du premier réservoir. Son stock (h_{ALV}) (pour le stockage du réservoir alvéolaire) varie au cours du temps. La vidange du réservoir alvéolaire se fait par évapotranspiration du stock d'eau vers le premier réservoir représentant le substrat et par débordement éventuel vers l'évacuation d'eaux pluviales dès que le stock dépasse la capacité de stockage du réservoir.

Les équations utilisées par le modèle sont rappelées ci-après.

Capacité de stockage maximale du réservoir substrat-végétation

La capacité de stockage maximale du substrat dépend des caractéristiques propres au substrat et de l'épaisseur mis en œuvre.

$$C_{SUBS} = Ep * (CME - \Theta_r) \quad (\text{mm})$$

Ep : épaisseur du substrat (mm) ;

CME : capacité maximale en eau du substrat (%) ;

Θ_r : point de flétrissement du substrat (%).

Capacité de stockage des alvéoles

La capacité de stockage maximale des alvéoles dépend des caractéristiques de la structure alvéolaire mise en œuvre.

$$C_{ALV} = H_{ALV} * VIDE \quad (\text{mm})$$

H_{ALV} : hauteur des alvéoles (mm) ;

$VIDE$: indice de vide de la structure alvéolaire (%).

Évapotranspiration réelle de la toiture

L'évapotranspiration réelle est calculée à partir des données d'évapotranspiration potentielle. Le coefficient K_{SAISON} permet de moduler l'évapotranspiration potentielle suivant les périodes hivernale (01 octobre-31 mars) et estivale (01 avril-30septembre). Il s'apparente à un coefficient cultural pour une végétation de type sédum.

$$ETP_{TTV} = K_{SAISON} * ETP \quad (\text{mm})$$

K_{SAISON} : coefficient de correction variant entre 0,1 et 1 suivant la saison ($K_{été}$ et K_{hiver}) ;

ETP : Évapotranspiration potentielle (mm), entrée du modèle (valeur estimée avec des mesures météorologiques)

À partir de cette équation les flux d'évapotranspiration des deux réservoirs peuvent être déterminés.

Flux d'évapotranspiration de l'eau contenue dans les alvéoles vers le substrat :

L'analyse des données montre que ce flux est lié à la hauteur d'eau disponible dans les alvéoles. Le coefficient K_{ALV} permet de moduler l'évapotranspiration réelle suivant la hauteur d'eau dans les alvéoles.

$$ETR_{ALV} = \max(K_{ALV} * ETP_{TTV}, h_{ALV}) \quad (\text{mm})$$

K_{ALV} : coefficient de vidange du réservoir alvéolaire par le flux d'évapotranspiration $K_{ALV} = \left(\frac{h_{ALV}}{C_{ALV}}\right)^\alpha$. Ce

coefficient est caractérisé par le paramètre α ;

ETP_{TTV} : évapotranspiration potentielle de la toiture (mm) ;

h_{ALV} : hauteur d'eau dans les alvéoles (mm).

Flux d'évapotranspiration du substrat et de la végétation vers l'atmosphère :

À partir des observations, l'hypothèse a été faite que la teneur en eau du substrat est à sa capacité maximale tant que de l'eau est disponible dans les alvéoles et commence à diminuer quand les alvéoles sont vides. Cela se traduit dans les équations par les deux cas suivants :

$$h_{ALV} > 0 \quad \longrightarrow \quad ETR_{SUBS} = ETR_{ALV} \quad (\text{mm})$$

$$h_{ALV} = 0 \quad \longrightarrow \quad ETR_{SUBS} = \min(ETP_{TTV}, h_{SUBS}) \quad (\text{mm})$$

ETR_{ALV} : flux d'évapotranspiration de l'eau contenue dans les alvéoles vers le substrat (mm) ;

ETP_{TTV} : évapotranspiration potentielle (mm).

Flux d'infiltration entre le réservoir d'interception et le réservoir alvéolaire :

La quantité d'eau supplémentaire du réservoir d'interception rejoint directement le réservoir alvéolaire. Cette quantité d'eau est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$I = \max(h_{SUBS} + P - ETR_{SUBS} + ETR_{ALV} - C_{SUBS}, 0) \quad (\text{mm})$$

h_{SUBS} : stock dans le réservoir d'interception (mm) ;

P : pluie (mm);

ETR_{SUBS} : flux d'évapotranspiration du substrat et de la végétation (mm). ;

ETR_{ALV} : flux évapotranspiration du réservoir alvéolaire (mm) ;

C_{SUBS} : capacité maximale du réservoir d'interception (mm).

Stock des réservoirs d'interception et alvéolaire et débordement du réservoir alvéolaire :

Après la détermination des flux d'évapotranspiration (du substrat, de la végétation, et des alvéoles) et la détermination du flux d'infiltration vers le réservoir alvéolaire, une étape de mise à jour des hauteurs d'eau dans les deux réservoirs est indispensable. De plus, lorsque la quantité d'eau du réservoir alvéolaire dépasse sa capacité de stockage, l'excédent est évacué par les évacuations d'eaux pluviales.

$$h_{SUBS} = \min(h_{SUBS} + P - ETR_{SUBS} + ETR_{ALV} - I, C_{SUBS}) \quad (\text{mm})$$

$$V = \max(h_{ALV} - ETR_{ALV} + I - C_{ALV}, 0) \quad (\text{mm})$$

$$h_{ALV} = \min(h_{ALV} - ETR_{ALV} + I, C_{ALV}) \quad (\text{mm})$$

h_{SUBS} : stock dans le réservoir d'interception (mm) ;

P : pluie (mm);

ETR_{SUBS} : flux d'évapotranspiration du substrat et de la végétation (mm). ;

ETR_{ALV} : flux évapotranspiration du réservoir alvéolaire (mm) ;

I : flux d'infiltration entre le réservoir d'interception et le réservoir alvéolaire (mm) ;

C_{SUBS} : capacité maximale du réservoir d'interception (mm) ;

C_{ALV} : capacité maximale du réservoir alvéolaire (mm) ;

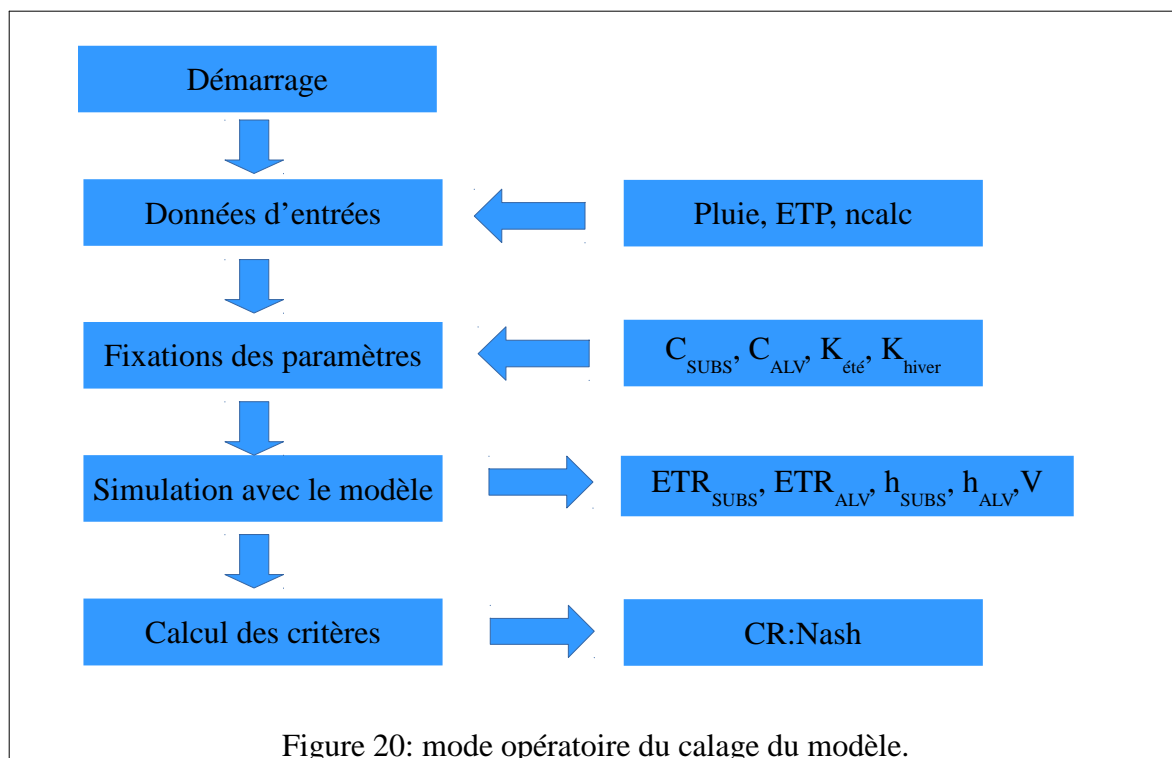
h_{ALV} : hauteur d'eau dans les alvéoles (mm) ;

4.2 Calage du modèle « Faveur-0R »

Afin de reproduire le comportement de la toiture végétalisée à zéro rejet de la façon la plus fidèle possible, une étape de calage des paramètres est indispensable. En effet, le calage des paramètres permet de représenter au mieux les hauteurs d'eau dans le réservoir alvéolaire.

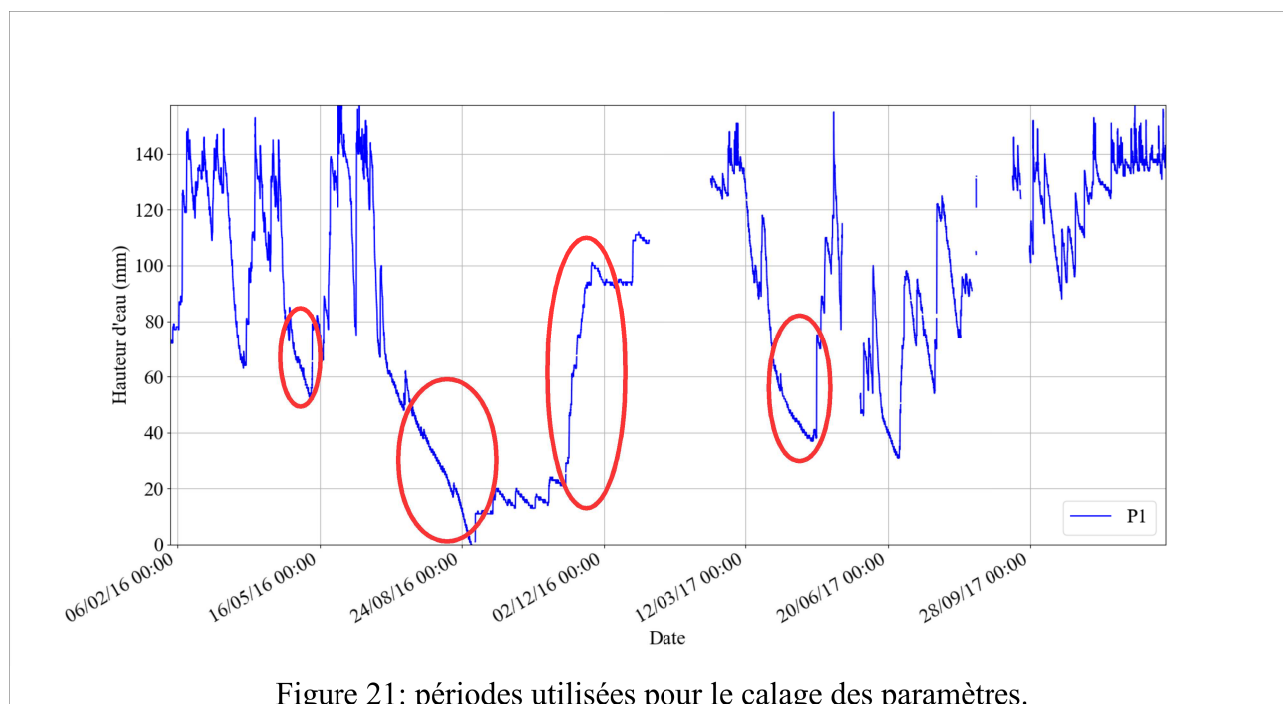
Les paramètres à caler sont essentiellement ceux liés au calcul des flux d'évapotranspiration, à savoir : $K_{été}$, K_{hiver} et α .

La figure 20 décrit le mode opératoire utilisé.



Le modèle développé ne tient pas compte du phénomène de pression supplémentaire. Les paramètres ont donc été calés sur les périodes où ce phénomène n'apparaît pas.

La figure 21 indique les périodes sélectionnées.



Les quatre périodes correspondent aux dates suivantes :

- 28/04/2016 00 :00 :00 – 09/05/2016 12 :00 :00 ;
- 28/07/2016 12 :00 :00 – 16/08/2016 12 :00 :00 ;
- 07/11/2016 12 :00 :00 – 12/11/2016 00 :00 :00 ;

- 06/04/2017 22 :00 :00 – 27/04/2017 12 :00 :00.

Pour caler les paramètres, 200 simulations ont été réalisées en faisant varier les paramètres sur les intervalles suivants :

- $K_{été}$ sur l'intervalle]0,1] par pas de 0,1 ;
- α sur l'intervalle]0 ; 2] par pas de 0,1.

Dans les périodes retenues pour le calage, une seule se situe en hiver où très peu de séchage est constaté. Suite à quelques simulations et en se basant sur l'expérience du Cerema Ile-de-France notamment dans le cadre du développement du modèle Faveur le paramètre K_{hiver} a été fixé à 0,5.

Le critère de Nash défini ci-dessous permet de déterminer le jeu de données qui reproduit le mieux le comportement de la toiture. Une valeur supérieure à 0,6 est acceptable et elle est parfaite lorsqu'elle vaut 1.

$$C_{Nash} = 1 - \frac{\sum (H_{osbs} - H_{simu})^2}{\sum (H_{osbs} - H_{simu}^-)^2}$$

Les résultats des simulations effectuées avec le modèle ont donnés les paramètres optimums présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : paramètres optimums retenus suite aux simulations.

$K_{été}$	K_{hiver}	α
1	0,5	1

Le critère de Nash défini obtenu pour ce jeu de paramètres est de 0,97.

La figure 22 présente l'évolution des hauteurs d'eau simulées et des hauteurs d'eau observées avec l'application des résultats de calage des coefficients d'évapotranspiration sur les quatre périodes utilisées pour le calage du modèle :

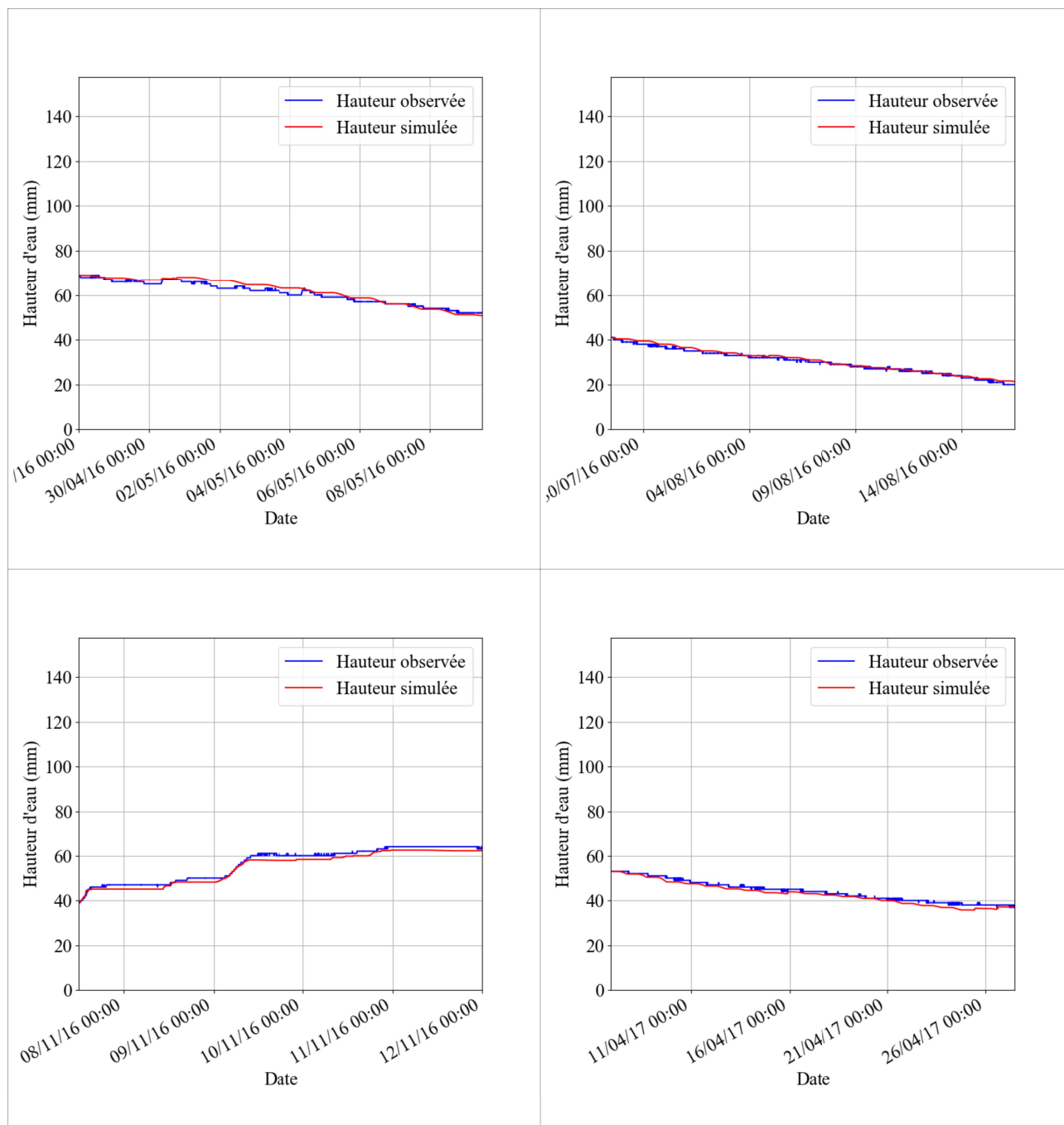


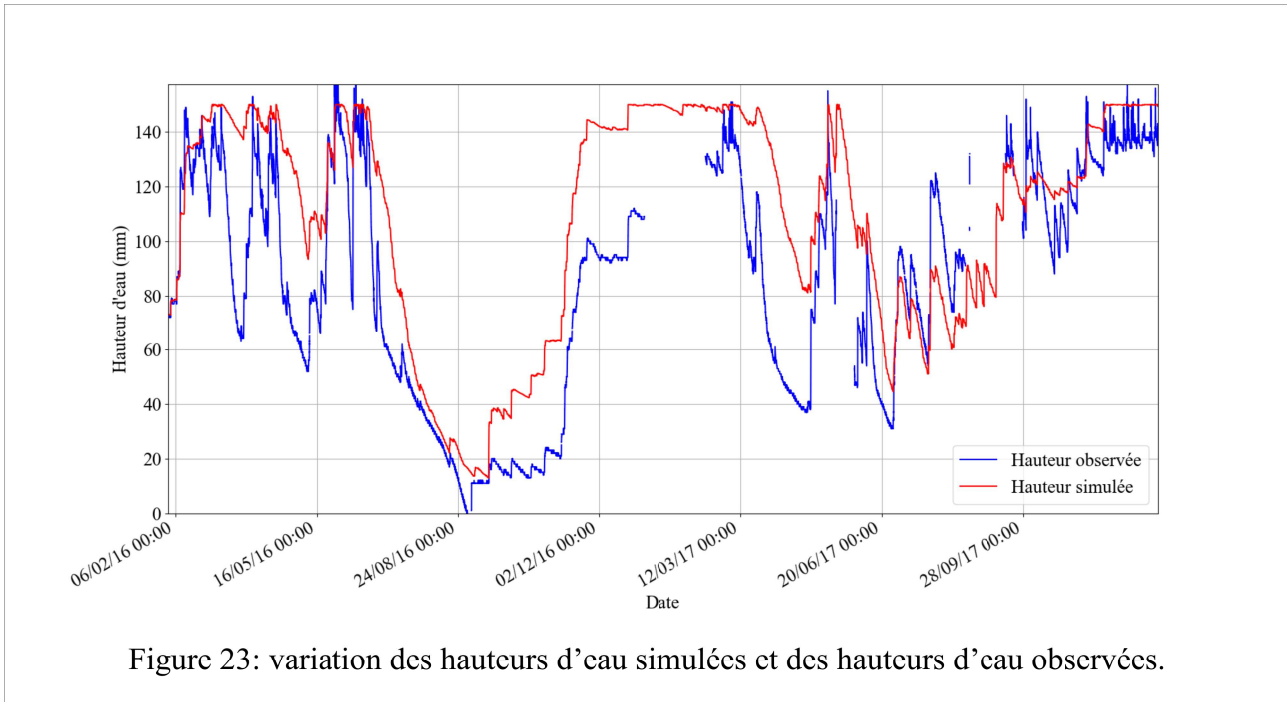
Figure 22: comparaison des hauteurs d'eau simulées et pressions observées sur les quatre périodes de calage des paramètres.

Les graphes présentés sur la figure 22 permettent de valider les paramètres retenus.

4.3 Résultats du modèle « Faveur-0R »

4.3.1 Résultats du modèle avec les deux années de données d'Orléans

La figure 23 montre la variation des hauteurs d'eau simulées et observées avec les paramètres retenus pendant les presque deux ans d'observations.



La figure 23 montre que le modèle reproduit bien la tendance de séchage, de recharge et de séchage. Mais en termes de volume, il évapore moins.

4.3.2 Résultats du modèle avec des données issues de la région Île-de-France pour la période juillet 1993 – décembre 2011

A titre indicatif, le modèle a été testé avec une chronique de pluie et d'évapotranspiration (ETP) issue de la région d'Ile-de-France sur la période juillet 1993 – décembre 2011 (avec une absence de données pour l'année 1996).

La figure 24 montre la variation des hauteurs simulées pour ces chroniques de pluie et d'ETP.

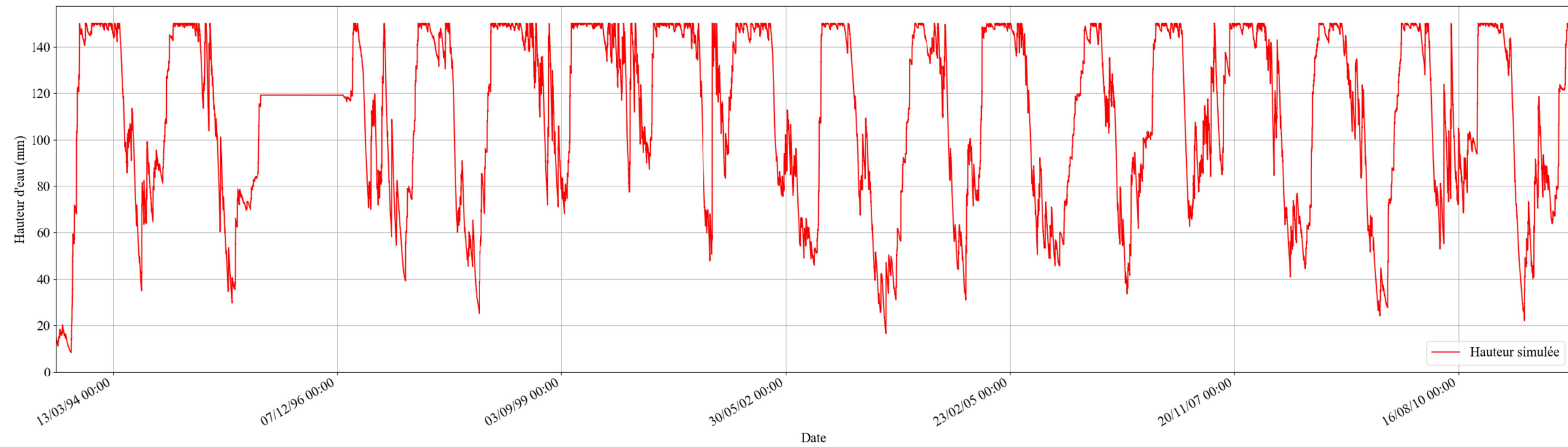


Figure 24: hauteur simulée pour des chroniques de pluie et d'ETP issues de la région Île-de-France sur la période 1993-2011.

La figure 24 montre que sur la période juillet 1993 – décembre 2011, des débordements sont constatés chaque hiver. Elle montre également que les alvéoles ne se sont jamais vidées. Le minimum de hauteur constaté est d'un peu moins de 20 mm lors de la canicule de 2003.

4.4 Performances de la toiture à partir du modèle « Faveur-OR »

4.4.1 Performances du modèle avec les deux années de données d'Orléans

Les performances de la toiture estimées à partir des volumes surversés simulés par le modèle sont donc les suivantes :

- volume de débordement durant les deux années de suivi : 367,7 mm ;
- cumul de pluie : 1390,3 mm ;
- performance de la toiture sur les deux années de suivi : 74 % d'abattement de la pluie sur une chronique de pluie mesurée en continue sur deux ans.

Les résultats de la simulation montrent un stockage supplémentaire de 5 % par rapport aux observations sur l'ensemble des deux années.

Il est à noter que la date de départ dans le modèle a été placée au 01 février 2016 afin de pouvoir comparer correctement les performances de celui-ci avec les performances observées. En effet au cours du mois de janvier 2016, la toiture a été vidangée afin de partir avec une hauteur d'eau la plus faible possible. Le modèle ne prend pas en compte cette vidange.

4.4.2 Performances du modèle avec des données issues de la région Île-de-France pour la période juillet 1993 – décembre 2011

A titre indicatif, les performances affichées par le modèle « Faveur-OR » sur les chroniques de pluie et d'ETP issues de la région d'Ile-de-France sur la période juillet 1993 – décembre 2011 ont été calculées et comparées à celles de trois toitures végétalisées extensives calculées à partir du modèle « Faveur » (faveur.cerema.fr).

La configuration de la toiture à capacité de stockage importante TTV0R est la même que celle d'Orléans à savoir :

- capacité maximale en eau de 30 % ;
- végétation de type sédum ;
- épaisseur de substrat : 6 cm ;
- hauteur d'alvéoles : 15 cm .

La configuration des toitures végétalisées extensives TTV testées est la suivante :

- capacité maximale en eau de 30 % ;
- végétation de type sédum ;
- épaisseur de substrat : 6 cm, 21 cm et 30 cm.

Le choix des épaisseurs testées est le suivant : 6 cm pour avoir la même épaisseur de substrat que celle d'Orléans mais sans les alvéoles, 21 cm de substrat pour avoir une épaisseur de substrat équivalente à celle de l'ensemble substrat + alvéoles et 30 cm correspondant à l'épaisseur maximale de validité du modèle « Faveur ».

La figure 25 et le tableau 4 montrent les résultats obtenus.

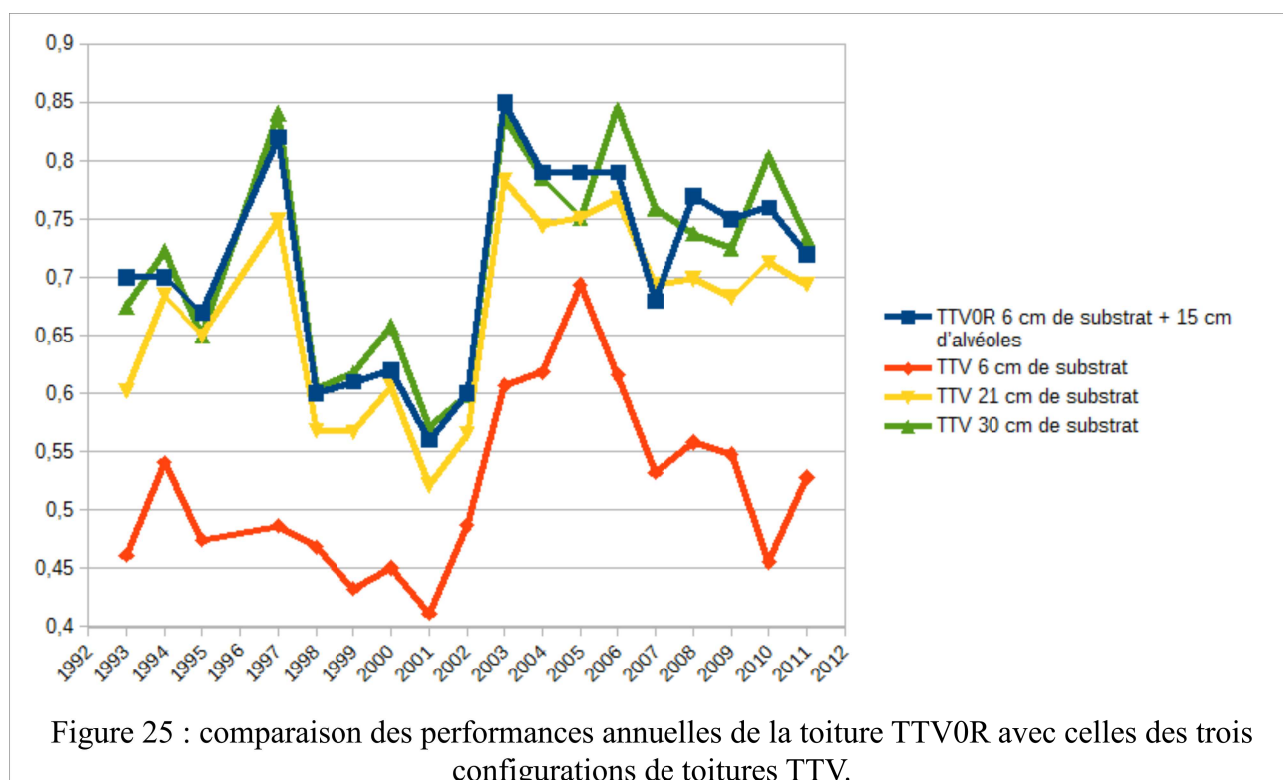


Tableau 4: performances globales affichées sur les chroniques de pluie et d'ETP issues de la région Ile-de-France sur la période 1993-2011 par le modèle « Faveur-OR » pour la toiture d'Orléans et celles affichées par le modèle « Faveur » pour le trois autres configurations.

toiture	abattement (%)
TTV0R 6 cm de substrat + 15 cm d'alvéoles	70
TTV 6 cm de substrat	51
TTV 21 cm de substrat	66
TTV 30 cm de substrat	71

Les résultats du tableau 4 montrent que globalement les performances de la toiture avec une capacité de stockage importante sont meilleures que celles d'une toiture végétalisée extensive de même épaisseur de substrat (6 cm) et celles d'une toiture végétalisée extensive avec une épaisseur de substrat équivalente à l'épaisseur alvéoles + substrat (21 cm). Une épaisseur d'au moins 30 cm de substrat est nécessaire à une toiture extensive pour atteindre ce niveau de performances.

La figure 25 montre que les écarts de performances observés varient en fonction de l'année et peuvent même s'inverser notamment entre celles de la toiture à forte capacité de stockage et celles avec une épaisseur de substrat de 30 cm.

4.5 Sensibilité du modèle « Faveur-0R »

Afin de visualiser la sensibilité du modèle aux différents paramètres utilisés, les valeurs de ceux-ci ont été testées pour les cas les plus extrêmes.

Le tableau 5 présente les différents cas testés.

Tableau 5: différents cas étudiés pour montrer la sensibilité du modèle.

	Paramètres optimums	Cas 1 : variation du paramètre K_{hiver}	Cas 2 : variation du paramètre $K_{été}$	Cas 3 : variation du paramètre α
$K_{été}$	1	1	0,5	1
K_{hiver}	0,5	1	0,5	0,5
α	1	1	1	0

La figure 26 présente la comparaison des hauteurs pour les différents jeux de paramètres étudiés.

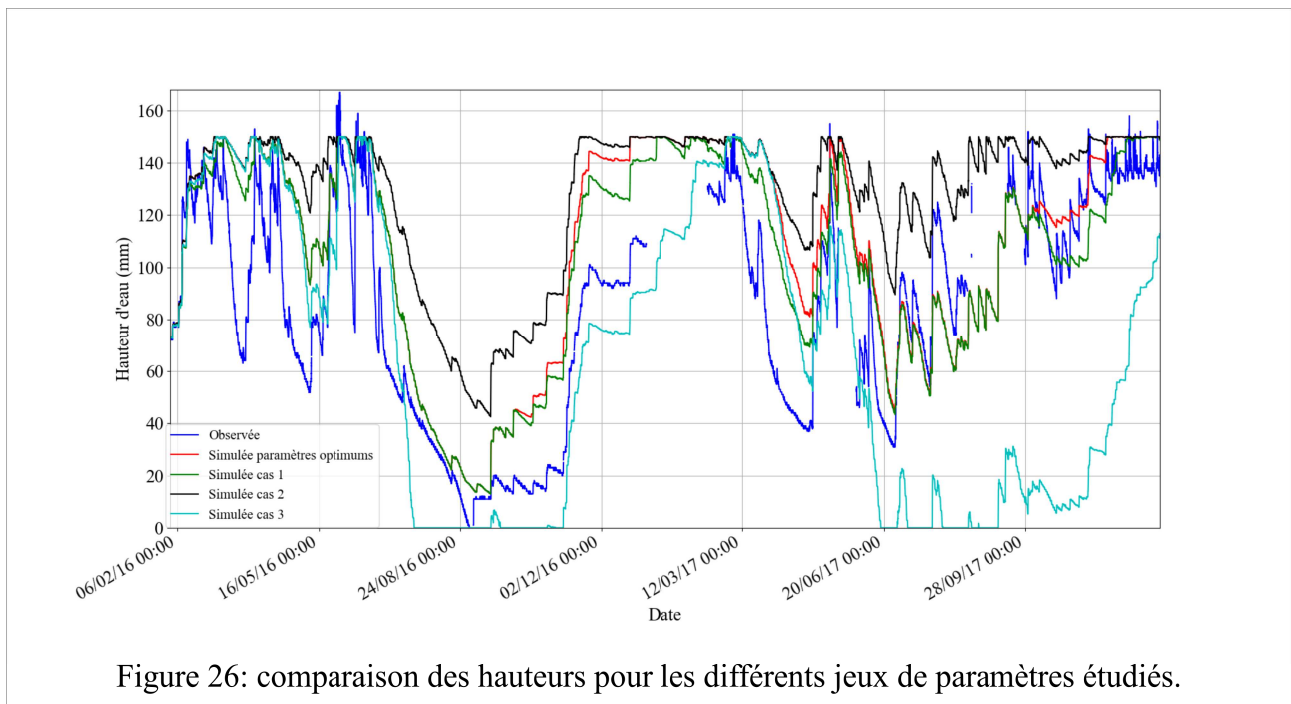


Figure 26: comparaison des hauteurs pour les différents jeux de paramètres étudiés.

La figure 26 montre l'importance du coefficient α pour le calcul de l'évapotranspiration des alvéoles. En effet un coefficient α nul traduit que la valeur de l'évapotranspiration est indépendante de la hauteur d'eau dans les alvéoles. Le graphe montre qu'une telle situation entraînerait une vidange du stock des alvéoles beaucoup trop rapide par rapport aux observations.

Les paramètres K_{hiver} et $K_{été}$ ont une influence sur les performances de la toiture. En effet ces deux paramètres entraînent un séchage plus ou moins performant selon les valeurs retenues.

Le tableau 6 présente les performances de la toiture pour les différents jeux de paramètres testés.

Tableau 6: comparaison des performances de la toiture pour les différents jeux de paramètres étudiés.

	Débordement (mm)	Abattement (%)	Écart d'abattement par rapport à l'observée (%)
Observée	424,9	69	0
Simulée paramètres optimums	367,7	74	5
Simulée cas 1	277	80	11
Simulée cas 2	584,7	58	-11
Simulée cas 3	200,5	86	17

Le tableau 6 montre l'importance du calage des paramètres retenus sur les performances de la toiture. En effet l'écart d'abattement par rapport à l'observée varie entre -11 et 17 % soit quasiment 1/3 d'abattement de la pluie.

Conclusion :

La figure 26 et le tableau 6 montrent l'importance de ces différents paramètres sur les performances de la toiture et la nécessité de les caler rigoureusement à partir de longues périodes d'observations. Dans le cas de la présente étude, ces paramètres ont été calés sur de très courtes périodes lors des mesures où le phénomène de l'air piégé est moindre, voire une seule période pour le calage du K_{hiver} . La justesse du calage des paramètres et la robustesse du modèle développé ne sont donc pas assurées. Il est donc recommandé de valider ce modèle et de caler ses paramètres sur la base de longues périodes d'observations.

4.6 Prise en compte du phénomène de surpression dans le modèle « Faveur-0R »

Afin de se rendre compte de l'importance du phénomène de surpression et de son influence sur la fréquence et le volume des débordements, le modèle a été modifié en intégrant la possibilité de fixer un pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé en prenant comme hypothèse que ce pourcentage reste constant pendant toute la durée de la modélisation (cette hypothèse est justifiée par les graphes de la figure 17 qui montrent que l'air peut rester piégé dans l'alvéole pendant de longues durées)

Cela se traduit dans le modèle par la modification des deux équations suivantes :

$$ETR_{ALV} = \max\left(K_{ALV} * ETP_{TTV} + K_{ALVP} * ETP_{TTV} * \left(\frac{P_{ALVP}}{1 - P_{ALVP}}\right), h_{ALVP}\right)$$

$$I = \max\left((h_{SUBS} + P - ETR_{SUBS} + ETR_{ALV} - C_{SUBS}) * \left(1 + \frac{P_{ALVP}}{1 - P_{ALVP}}\right), 0\right)$$

$$V = \max\left((h_{ALV} - ETR_{ALV} + I - C_{ALV}) * \left(1 + \frac{P_{ALVP}}{1 - P_{ALVP}}\right), 0\right)$$

Avec :

$$K_{ALVP} = \left(\frac{h_{ALVP}}{C_{ALV}} \right)^\alpha$$

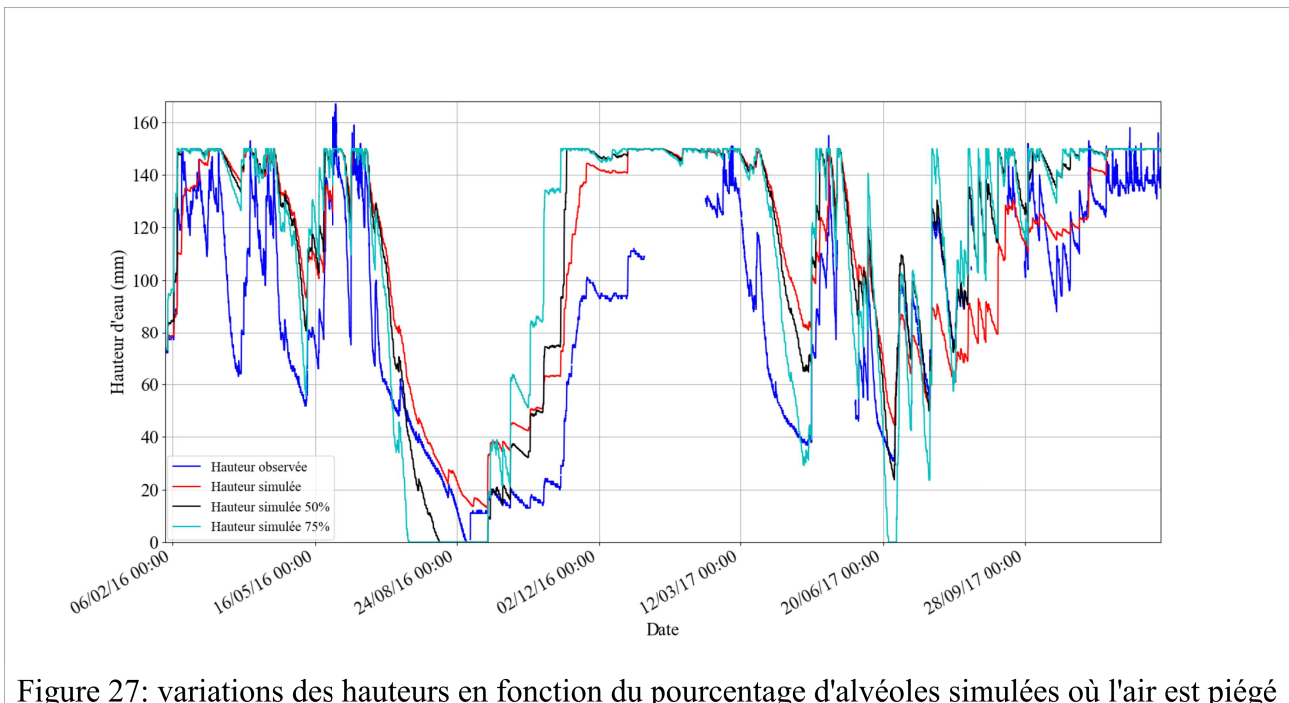
P_{ALVP} : pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé ;

h_{ALVP} : hauteur constante dans les alvéoles où l'air est piégé.

Les deux pourcentages suivants ont été étudiés pour le pourcentage d'alvéoles :

- 50 % d'alvéoles ;
- 75 % d'alvéoles.

La figure 27 montre les variations des hauteurs obtenues en comparaison avec le fonctionnement normal.



La figure 27 montre que plus le pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé est élevé et plus les cycles de recharge et de séchage se font rapidement. Il est de ce fait difficile d'estimer à priori l'impact de ce phénomène sur les performances de la toiture.

Le tableau 7 présente les performances de la toiture pour les différents cas étudiés.

Tableau 7: comparaison des performances de la toiture pour les différents cas étudiés de pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé.

	Débordement (mm)	Abattement (%)	Écart d'abattement par rapport à l'observée (%)
observée	424,9	69	0
simulée sans air piégé	367,7	74	5
simulée avec 50 % alvéoles avec air piégé	638,2	54	-15
simulée avec 75 % alvéoles avec air piégé	803,5	42	-27

Les résultats indiqueraient que les performances sont globalement réduites par le phénomène de blocage d'air : sans blocage le modèle indique un abattement supérieur de 5 % et avec 75 % des alvéoles avec air piégé l'abattement serait bien réduit. Ces résultats sont à considérer avec prudence car les résultats du modèle avec air piégé dépendent de la hauteur initiale dans les alvéoles et le modèle ne représente pas la redistribution des hauteurs lorsque les alvéoles où l'air n'est pas piégé sont vides.

5 Conclusion et perspectives

Les deux années de suivi ont mis en évidence la capacité de la toiture à abattre 69 % des précipitations, période qui intègre un évènement exceptionnel au mois de mai 2016 dont la période de retour est supérieure à 100 ans (79 % hors cet évènement exceptionnel). A titre de comparaison, pour une toiture végétalisée extensive classique, il faudrait une épaisseur de 30 cm de substrat pour atteindre ce niveau de performance. L'eau stockée est évapotranspirée au cours des périodes sèches tout en maintenant une teneur en eau du substrat importante tant que les alvéoles contiennent de l'eau. Cette teneur en eau relativement constante participe à la bonne alimentation de la végétation tout au long de l'année.

Les résultats analytiques montrent que la tendance générale est la même, en termes d'impact sur la qualité des eaux que celle issue de la bibliographie sur les toitures végétalisées. Par contre les valeurs de DCO et phosphore sont plus élevées que celles constatées sur les toitures végétalisées classiques. De nouvelles campagnes de prélèvements sur les eaux de débordement permettraient de mieux caractériser la qualité des eaux issues de ce type de toiture. Ces nouvelles campagnes pourraient si possible être réalisées dans quelques années une fois la toiture stabilisée.

Les observations ont mis en évidence l'apparition d'une pression supplémentaire dans les compartiments « air » de certaines alvéoles due à l'emprisonnement de l'air dans les alvéoles entre le niveau d'eau dans les alvéoles et le géotextile. Ce phénomène complique l'interprétation des processus mis en jeu sur la toiture et ses performances.

Un modèle numérique « Faveur-OR » a été développé pour représenter le comportement de la

toiture sans phénomène de pression supplémentaire. Les résultats du modèle font ressortir un abattement de 74 % des précipitations soit 5 % de plus que les observations. Les paramètres conditionnant l'évapotranspiration de ce modèle ont été calés sur de courtes périodes d'observations où le phénomène « d'air bloqué » n'était pas présent. L'étude de sensibilité de ces paramètres a montré l'importance de ceux-ci sur les résultats des performances de la toiture et donc l'intérêt de bien les caler sur de longues périodes d'observations.

L'élimination du phénomène de pression supplémentaire aurait un intérêt pour le fonctionnement de la toiture et ses performances. L'ajout d'une couche de drainage au-dessus des alvéoles pourrait permettre d'équilibrer ces pressions (figure 28).

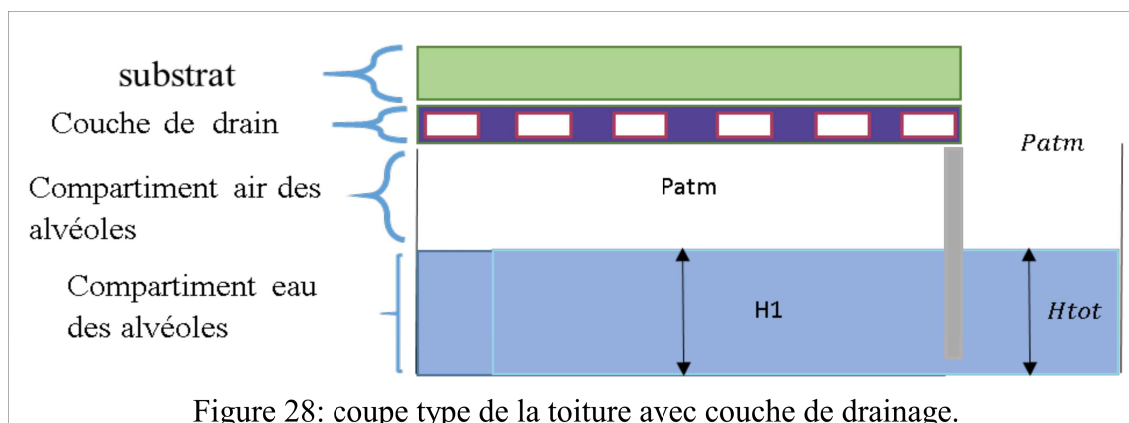


Figure 28: coupe type de la toiture avec couche de drainage.

Les performances de ces toitures à haute capacité de rétention sont supérieures à celles d'une toiture végétalisée extensive de faible/moyenne épaisseur. Ce type de toiture peut jouer un rôle majeur dans un concept « zéro rejet » de gestion des eaux à la parcelle. Des dispositifs complémentaires permettant de réduire voire supprimer les débordements non-régulés par un dispositif à débit limité placé dans la hauteur de rétention peuvent être envisagés. Les débits de rejets (surversés et régulés) seraient ensuite gérés par d'autres techniques alternatives.

Liste des figures

Figure 1: schéma en plan de la toiture.....	6
Figure 2: coupe type de la toiture à proximité d'une évacuation des eaux pluviales (source Siplast).....	6
Figure 3: implantation des centrales d'acquisition et des profils de mesure.....	7
Figure 4: implantation des capteurs pour un profil de mesures.....	7
Figure 5: hyétogramme enregistré sur la toiture au cours des deux années de suivi.....	9
Figure 6: précipitations mensuelles pour l'année 2016.....	9
Figure 7: précipitations mensuelles pour l'année 2017.....	10
Figure 8: comparaison entre l'évènement pluvieux du 30/05/2016 06:35:00 au 31/05/2016 15:10:00 et des hauteurs de pluie estimées pour différentes périodes de retour.....	11
Figure 9: évolution des pressions à la base des alvéoles pour les trois profils de mesures et au niveau de l'évacuation d'eaux pluviales pour les années 2016 et 2017. P1, P2 et P3 représentent les pressions pour chacun des trois profils de mesures. EEP représente la hauteur d'eau au niveau de l'évacuation d'eaux pluviales.....	12
Figure 10: évolution de la teneur en eau volumique du substrat pour les trois profils de mesures.....	13
Figure 11: comparaison entre la teneur en eau et la pression dans l'alvéole pour les profils de mesures P1 et P3 lors de la seule période où les alvéoles étaient quasiment vides.....	14
Figure 12 : teneur en eau des profils de mesures P1 et P3 lors de la seule période où les alvéoles étaient quasiment vides.....	15
Figure 13: dispositif expérimental.....	20
Figure 14: répartition des trois zones.....	22
Figure 15: fonctionnement de la toiture lors d'un évènement pluvieux.....	22
Figure 16: implantation des capteurs de pression dans la partie air des alvéoles.....	23
Figure 17: évolution de la pression dans la partie « air » des alvéoles.....	24
Figure 18: pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé en fonction des évènements pluvieux.....	25
Figure 19: schéma de fonctionnement du modèle « Faveur-0R ».....	27
Figure 20: mode opératoire du calage du modèle.....	31
Figure 21: périodes utilisées pour le calage des paramètres.....	31
Figure 22: comparaison des hauteurs d'eau simulées et pressions observées sur les quatre périodes de calage des paramètres.....	33
Figure 23: variation des hauteurs d'eau simulées et des hauteurs d'eau observées.....	34
Figure 24: hauteur simulée pour des chroniques de pluie et d'ETP issues de la région Île-de-France sur la période 1993-2011.....	35
Figure 25 : comparaison des performances annuelles de la toiture TTV0R avec celles des trois configurations de toitures TTV.....	37
Figure 26: comparaison des hauteurs pour les différents jeux de paramètres étudiés.....	39
Figure 27: variations des hauteurs en fonction du pourcentage d'alvéoles simulées où l'air est piégé.....	41
Figure 28: coupe type de la toiture avec couche de drainage.....	43

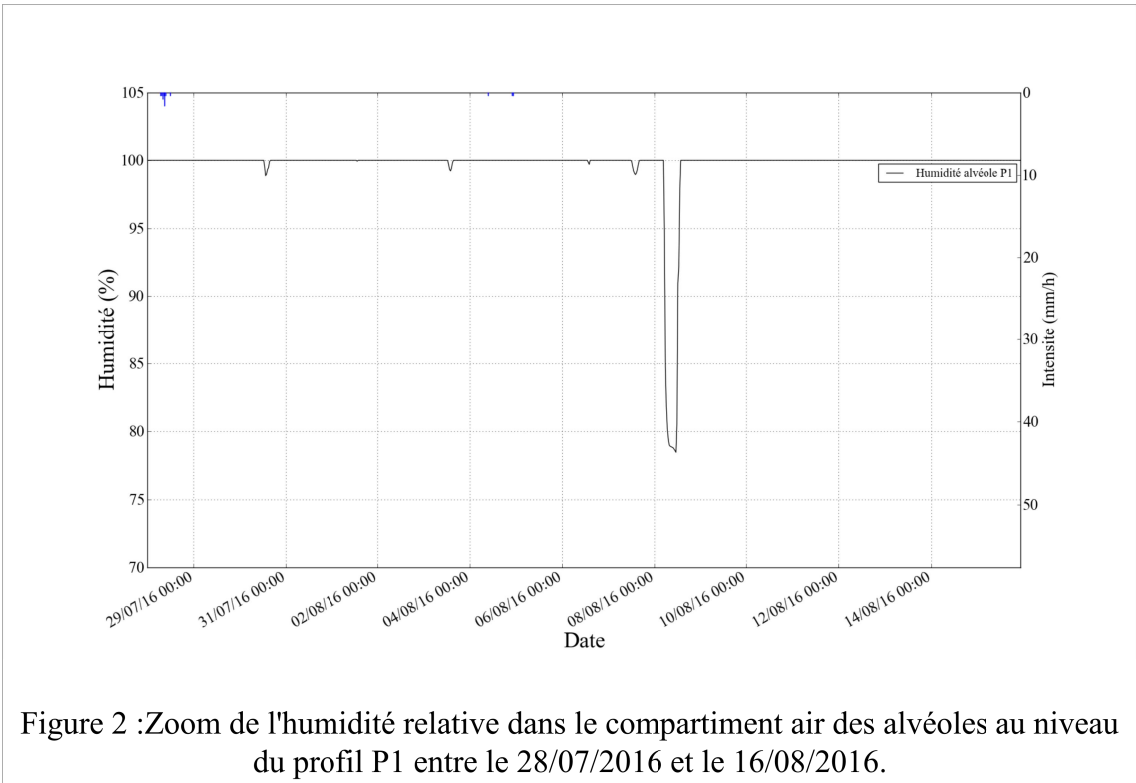
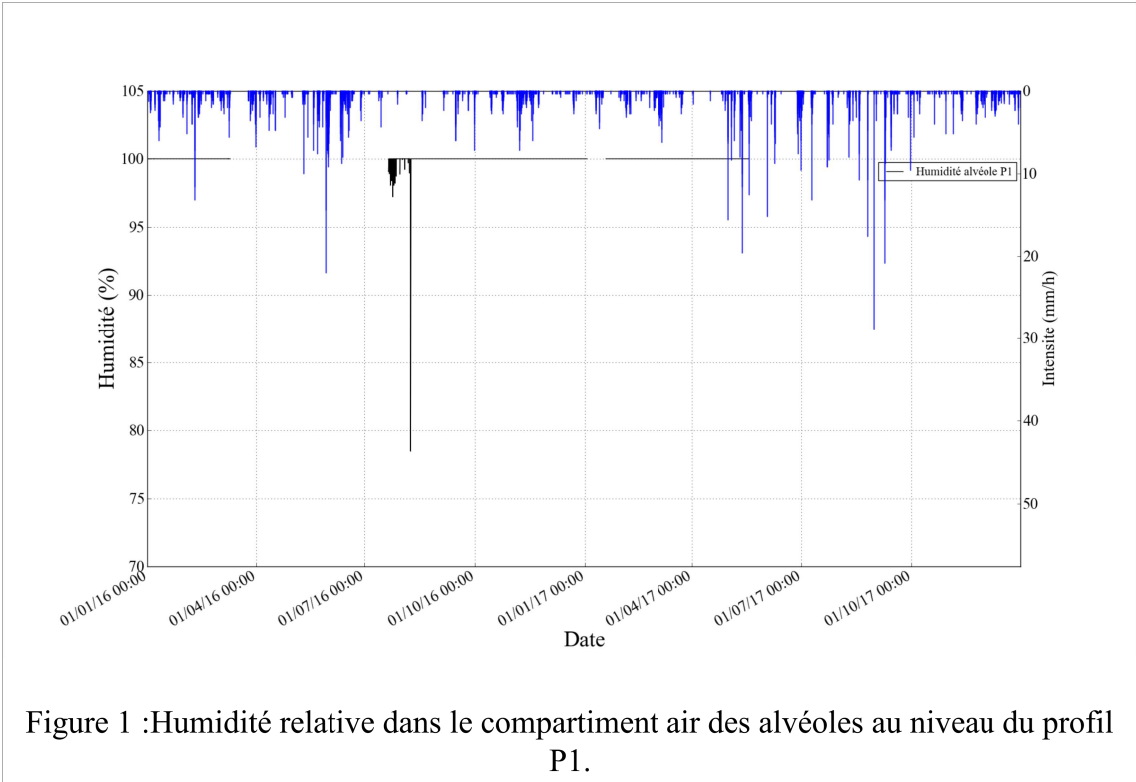
Liste des tableaux

Tableau 1: ratios concentrations moyennes de l'eau des alvéoles et concentrations moyennes de l'eau de pluie. Pour les cellules grisées, les valeurs étant inférieures à la limite de quantification pour la pluie et l'eau des alvéoles, le ratio n'a pas été calculé.....	17
Tableau 2: évolution des concentrations moyennes des polluants présents dans l'eau des alvéoles entre les quatre campagnes de prélèvements. Pour les cellules grisées, les valeurs étant inférieures à la limite de quantification, le ratio n'a pas été calculé.....	18
Tableau 3 : paramètres optimums retenus suite aux simulations.....	32
Tableau 4: performances globales affichées sur les chroniques de pluie et d'ETP issues de la région Ile-de-France sur la période 1993-2011 par le modèle « Faveur-OR » pour la toiture d'Orléans et celles affichées par le modèle « Faveur » pour le trois autres configurations.....	37
Tableau 5: différents cas étudiés pour montrer la sensibilité du modèle.....	39
Tableau 6: comparaison des performances de la toiture pour les différents jeux de paramètres étudiés.....	40
Tableau 7: comparaison des performances de la toiture pour les différents cas étudiés de pourcentage d'alvéoles où l'air est piégé.....	42

Liste des annexes

Annexe 1 : graphes d'humidité relative dans le compartiment air des alvéoles.....	47
Annexe 2 : plages de données manquantes complétées avec les données de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle de Météo-France.....	48
Annexe 3 : résultats des analyses d'eau.....	49
Annexe 4 : composition de l'engrais mis en œuvre.....	55
Annexe 5 : photos des racines dans les alvéoles.....	56

Annexe 1 : graphes d'humidité relative dans le compartiment air des alvéoles.



Annexe 2 : plages de données manquantes complétées avec les données de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle de Météo-France.

Pluviométrie :

01/01/2016 01:00:00 au 04/01/2016 23:55:00

04/01/2017 18:05:00 au 05/01/2017 09:25:00

08/01/2017 02:35:00 au 08/01/2017 07:45:00

10/01/2017 22:05:00 au 13/01/2017 11:25:00

14/01/2017 06:35:00 au 14/01/2017 08:25:00

15/01/2017 01:35:00 au 17/01/2017 09:55:00

28/02/2017 12:05:00 au 08/03/2017 10:55:00

05/04/2017 08:35:00 au 05/04/2017 10:25:00

18/05/2017 14:35:00 au 31/05/2017 13:55:00

07/12/2017 05:35:00 au 08/12/2017 08:55:00

10/12/2017 08:35:00 au 10/12/2017 10:25:00

10/12/2017 15:05:00 au 12/12/2017 08:55:00

13/12/2017 01:05:00 au 22/12/2017 08:55:00

Évapotranspiration :

02/01/2016 00:00:00 au 16/01/2016 18:00:00

27/01/2016 13:30:00 au 30/01/2016 18:30:00

10/02/2016 14:00:00 au 10/02/2016 15:30:00

22/06/2016 09:00:00 au 23/06/2016 14:00:00

04/01/2017 18:30:00 au 05/01/2017 09:00:00

10/01/2017 22:30:00 au 13/01/2017 11:00:00

14/01/2017 07:00 00 au 14/01/2017 08:00:00

15/01/2017 02:00:00 au 17/01/2017 09:30:00

28/02/2017 12:30:00 au 08/03/2017 09:30:00

05/04/2017 09:00:00 au 05/04/2017 10:00:00

18/05/2017 15:00:00 au 31/05/2017 08:30:00

04/12/2017 20:30:00 au 06/12/2017 10:30:00

07/12/2017 05:30:00 au 08/12/2017 09:00:00

10/12/2017 08:30:00 au 10/12/2017 10:30:00

10/12/2017 15:00:00 au 12/12/2017 09:00:00

13/12/2017 01:00:00 au 22/12/2017 09:00:00

Annexe 3 : résultats des analyses d'eau.

Les résultats des analyses ont été comparés (à titre indicatif) pour les paramètres dont des valeurs seuils sont définies dans le guide technique relatif à l'évaluation des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau) de Mars 2016³.

Ce guide décrit les règles d'évaluation de l'état écologique et chimique des eaux de surface continentales et s'appuie pour établir le diagnostic sur des valeurs seuils de paramètres physico-chimiques généraux et de polluants spécifiques et leurs normes environnementales. Ces valeurs seuils (classes, limites inférieure et supérieure, concentration maximale admissible, concentration moyenne) sont définies de manières différentes suivant le paramètre concerné.

Les tableaux 8 à 11 rappellent les définitions des valeurs-seuils pour chacun des paramètres.

Tableau 1: valeurs des limites des classes d'état pour les paramètres physico-chimiques généraux pour les cours d'eau (source : annexe 5 du guide)

Paramètres par élément de qualité	Limites des classes d'état			
	Très bon / Bon	Bon / Moyen	Moyen / Médiocre	Médiocre / Mauvais
Bilan de l'oxygène				
DBO5 (mg O2/l)	3	6	10	25
Nutriments				
P total (mg P/l)	0,05	0,2	0,5	1
Acidification				
pH minimum	6,5	6	5,5	4,5
pH maximum	8,2	9	9,5	10

Tableau 2: valeurs des limites inférieure et supérieure pour les paramètres physico-chimiques complémentaires (source :annexe 13 du guide)

Paramètres	Limites supérieure et inférieure du bon état
Bilan de l'oxygène	
DCO (mg/l O2)]20 – 30]
NKJ (mg/l N)]1 – 2]
Particules en suspension	
MES (mg/l)]25 – 50]
Acidification	
Aluminium (dissous) (µg/l) pH =< 6,5]5 – 10]
Aluminium (dissous) (µg/l) pH > 6,5]100 – 200]

3– Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (Mars 2016). Guide technique relatif à l'évaluation des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau).

Tableau 3: valeurs seuils en concentration maximale admissible des substances pour l'évaluation de l'état chimique des eaux de surfaces (source annexe 12 du guide).

Nom de la substance	NQE-CMA Eaux de surface intérieures
Anthracène (µg/l)	0,1
Benzo(a)pyrène (µg/l)	0,27
Benzo(b)fluoranthène (µg/l)	0,017
Benzo(ghi)perylène (µg/l)	$8,2 \cdot 10^{-3}$
Benzo(k)fluoranthène (µg/l)	0,017
Fluoranthène (µg/l)	0,12
Naphtalène (µg/l)	130
Cadmium et ses composés dureté eau classe 1 (µg/l)	=<0,45
Cadmium et ses composés dureté eau classe 2 (µg/l)	0,45
Cadmium et ses composés dureté eau classe 3 (µg/l)	0,6
Cadmium et ses composés dureté eau classe 4 (µg/l)	0,9
Cadmium et ses composés dureté eau classe 5 (µg/l)	1,5
Nickel et ses composés (µg/l)	34
Plomb et ses composés (µg/l)	14

Tableau 4: valeurs seuils des polluants spécifiques non synthétiques pour l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau et plans d'eau (source annexe 6)

Nom de la substance	NQE en moyenne annuelle - Eaux douces de surfaces
Zinc	7,8
Cuivre	1
Chrome	3,4

Les résultats des analyses ont été comparés aux valeurs seuils définis dans le tableau 1 à 4 pour les quatre campagnes de mesures réalisés. Les tableaux 5 à 7 présentent les résultats des analyses.

Tableau 5: résultats des analyses de la campagne n°1 du 22/06/2016.

Paramètres	Unités	Pluie	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Polluants globaux					
Conductivité à 25°C	µS/cm	-	94,6	69,7	84,5
DBO5	mg O2/l	-	11	<2	<2
DCO micro méthode	mg/l O2	-	80	34	40
MES	mg/l	-	25	<2	<2
NK	mg/l N	-	1,17	<1	<1
P total	mg P/l	-	5,17	1,69	2,59
pH	-	-	6,05	6,15	5,9
Micro-polluants					
Acenaphène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Acenaphtylène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Anthracène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(a)anthracène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(a)pyrène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(b)fluoranthène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(ghi)perylène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(k)fluoranthène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
C10-C40 hydrocarbures totaux	mg/l	-	<0,064	<0,061	<0,061
Chrysène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Dibenzo(ah)anthracène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Fluoranthène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Fluorène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Naphtalène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Phénanthrène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Pyrène	µg/l	-	<0,01	<0,01	<0,01
Aluminium (dissous) pH<=6,5	µg/l	-	811	303	379
Aluminium (dissous) pH>6,5	µg/l	-			
Cadmium et ses composés dureté eau classe 1	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 2	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 3	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 4	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 5	µg/l	-	<1	<1	<1
Chrome	µg/l	-	<5	<5	<5
Cuivre	µg/l	-	<5	<5	<5
Fer	µg/l	-	1168	195	289
Nickel et ses composés	µg/l	-	7,97	5,26	5
Plomb et ses composés	µg/l	-	<10	<10	<10
Zinc	µg/l	-	26,7	20,5	505

Légende en fonction des paramètres

classe définie dans le tableau 1
valeur hors intervalle définie dans le tableau 2
valeur supérieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
valeur dans l'intervalle définie dans le tableau 2
valeur inférieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
limite de quantification supérieure à la valeur-seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
valeur seuil non définie

Tableau 6 : résultats des analyses de la campagne n°2 du 15/02/2017.

Paramètres	Unités	Pluie	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Polluants globaux					
Conductivité à 25°C	µS/cm	51	282	240	739
DBO5	mg O2/l	4	34	34	42
DCO micro méthode	mg/l O2	22	92	85	89
MES	mg/l	5	<2	<2	<2
NK	mg/l N	<1	<1	<1	8,37
P total	mg P/l	0,1	1,48	1,07	2,66
pH	-	7,2	6,25	6,45	4,6
Micro-polluants					
Acenaphtène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Acenaphtylène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Anthracène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Benzo(a)anthracène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Benzo(a)pyrène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Benzo(b)fluoranthène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Benzo(ghi)perylène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Benzo(k)fluoranthène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
C10-C40 hydrocarbures totaux	mg/l	0,126	<0,112	<0,111	<0,107
Chrysène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Dibenzo(ah)anthracène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Fluoranthène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Fluorène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Naphtalène	µg/l	0,011	0,006	<0,0051	0,027
Phénanthrène	µg/l	0,014	0,007	<0,0051	<0,0053
Pyrène	µg/l	<0,0053	<0,0051	<0,0051	<0,0053
Aluminium (dissous) pH<=6,5	µg/l		338	357	1440
Aluminium (dissous) pH>6,5	µg/l	8,49			
Cadmium et ses composés dureté eau classe 1	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 2	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 3	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 4	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 5	µg/l	<1	<1	<1	<1
Chrome	µg/l	<5	<5	<5	<5
Cuivre	µg/l	8,71	8,11	5,73	8,93
Fer	µg/l	7,46	166	195	381
Nickel et ses composés	µg/l	6,56	20,8	17,8	19,5
Plomb et ses composés	µg/l	<10	<10	<10	<10
Zinc	µg/l	2600	36,2	34	1950

Légende en fonction des paramètres

classe définie dans le tableau 1
valeur hors intervalle définie dans le tableau 2
valeur supérieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
valeur dans l'intervalle définie dans le tableau 2
valeur inférieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
limite de quantification supérieure à la valeur-seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
valeur seuil non définie

Tableau 7 : résultats des analyses de la campagne n°3 du 27/09/2017.

Paramètres	Unités	Pluie	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Polluants globaux					
Conductivité à 25°C	µS/cm	7	175	170	261
DBO5	mg O2/l	<3	<3	<3	<3
DCO micro méthode	mg/l O2	15,8	187	133	202
MES	mg/l	6	2	2	3
NK	mg/l N	1,57	1,67	<1	1,76
P total	mg P/l	<0,1	4,59	1,74	5,79
pH	-	6,95	6,25	6,05	6
Micro-polluants					
Acenaphène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Acenaphthylène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Anthracène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Benzo(a)anthracène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Benzo(a)pyrène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Benzo(b)fluoranthène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Benzo(ghi)perylène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Benzo(k)fluoranthène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
C10-C40 hydrocarbures totaux	mg/l	<0,054	<0,005	<0,057	<0,053
Chrysène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Dibenzo(ah)anthracène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Fluoranthène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Fluorène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Naphtalène	µg/l	<0,006	0,026	<0,008	0,01
Phénanthrène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Pyrène	µg/l	<0,006	<0,005	<0,008	<0,006
Aluminium (dissous) pH<=6,5	µg/l		1203	640	979
Aluminium (dissous) pH>6,5	µg/l	2,68			
Cadmium et ses composés dureté eau classe 1	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 2	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 3	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 4	µg/l	<1	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 5	µg/l	<1	<1	<1	<1
Chrome	µg/l	<5	<5	<5	<5
Cuivre	µg/l	7,61	8,07	7,39	8,08
Fer	µg/l	25,6	2537	497	2156
Nickel et ses composés	µg/l	5	12	6,69	12,4
Plomb et ses composés	µg/l	<10	<10	<10	<10
Zinc	µg/l	489	15	31	284

Légende en fonction des paramètres

classe définie dans le tableau 1
valeur hors intervalle définie dans le tableau 2
valeur supérieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
valeur dans l'intervalle définie dans le tableau 2
valeur inférieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
limite de quantification supérieure à la valeur-seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
valeur seuil non définie

Tableau 8 : résultats des analyses de la campagne n°4 du 27/06/2018.

Paramètres	Unités	Pluie	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Polluants globaux					
Conductivité à 25°C	µS/cm	-	74,7	69,6	78
DBO5	mg O2/l	-	18	19	32
DCO micro méthode	mg/l O2	-	104	76,5	179
MES	mg/l	-	2	<2	9
NK	mg/l N	-	1,69	1,45	2,8
P total	mg P/l	-	2,08	1,54	2,26
pH	-	-	6,7	6,54	6,48
Micro-polluants					
Acenaphtène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Acenaphtylène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Anthracène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Benzo(a)anthracène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Benzo(a)pyrène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Benzo(b)fluoranthène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Benzo(ghi)perylène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Benzo(k)fluoranthène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
C10-C40 hydrocarbures totaux	mg/l	-	<0,0058	<0,056	<0,055
Chrysène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Dibenzo(ah)anthracène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Fluoranthène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Fluorène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Naphtalène	µg/l	-	0,006	<0,006	0,01
Phénanthrène	µg/l	-	<0,006	<0,006	0,006
Pyrène	µg/l	-	<0,006	<0,006	<0,006
Aluminium (dissous) pH<=6,5	µg/l	-			
Aluminium (dissous) pH>6,5	µg/l	-	719	501	736
Cadmium et ses composés dureté eau classe 1	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 2	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 3	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 4	µg/l	-	<1	<1	<1
Cadmium et ses composés dureté eau classe 5	µg/l	-	<1	<1	<1
Chrome	µg/l	-	<5	<5	<5
Cuivre	µg/l	-	5,72	5,22	5,52
Fer	µg/l	-	944	456	805
Nickel et ses composés	µg/l	-	<5	<5	5,3
Plomb et ses composés	µg/l	-	<10	<10	<10
Zinc	µg/l	-	9,91	24,1	114

Légende en fonction des paramètres

classe définie dans le tableau 1
valeur hors intervalle définie dans le tableau 2
valeur supérieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
classe définie dans le tableau 1
valeur dans l'intervalle définie dans le tableau 2
valeur inférieure à la valeur seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
limite de quantification supérieure à la valeur-seuil définie dans les tableaux 3 ou 4
valeur seuil non définie

Annexe 4 : composition de l'engrais mis en œuvre.

g+S+Fe,Zn

FR	ENGRAIS CE	Poids Net: 25 KG
	ENGRAIS Complexe NPK 14-14-17+(2MgO, 17SO₃) Contient des Oligo-éléments	
	Azote total dont :	(N) 14%
	Azote nitrique	(N-NO ₃) 4.8 %
	Azote ammoniacal	(N-NH ₄) 9.2 %
	Anhydride Phosphorique soluble dans l'eau et le citrate d'ammonium neutre	(P ₂ O ₅) 14%
	Anhydride Phosphorique soluble dans l'eau	(P ₂ O ₅) 13%
	Oxyde de Potassium soluble dans l'eau	(K ₂ O) 17%
	Anhydride Sulfurique	(SO ₃) 17%
	Oxyde de Magnésium total	(MgO) 2%
	Oxyde de Magnésium soluble dans l'eau	(MgO) 1.6%
	Fer soluble dans l'eau	(Fe) 0.10%
	Zinc soluble dans l'eau	(Zn) 0.02%
	Pauvre en chlore	
	A n'utiliser qu'en cas de besoin reconnu. Ne pas dépasser les doses adéquates.	
	Distributeur: HAIFA France 1127, avenue de la République 34400 LUNEL VIEL Tel: 04 67 83 50 70 Fax: 04 67 71 90 51	

ES	ABONO CE	Masa neta 25 KG
	Abono NPK (Mg, S) con hierro (Fe) y zinc (Zn) Complejo	
	Nitrógeno total	(N) 14%
	Nitrógeno Nítrico	(N-NO ₃) 4.8%
	Nitrógeno amoniacal	(N-NH ₄) 9.2%

Annexe 5 : photos des racines dans les alvéoles.







Cerema Ile-de-France

12 rue Teisserenc de Bort - CS 20600 – 78197 Trappes-en-Yvelines Cedex
Tel : 01 34 82 12 34 – Fax : 01 30 50 83 69 – mel : dteridf.cerema@cerema.fr

www.cerema.fr