



PROJET



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)**

**Appel à projets 2009**

**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

## **RAPPORT FINAL**

**Version finale corrigée**

**Rédacteurs** : Emmanuel Berthier, Juliette Chauveau, Bernard de Gouvello, Marie-Christine Gromaire, Katerine Lamprea, Youssef Nohra, David Ramier, Martin Seidl, Pierre-Antoine Versini

**Coordination TVGEP** :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)



## RESUME

La végétalisation des toitures (principalement des terrasses) est souvent présentée comme offrant de nombreux effets bénéfiques, tant au niveau du bâtiment (amélioration des isolations thermique et acoustique, durabilité de l'étanchéité de la toiture) qu'à l'échelle de la ville (qualité de l'air, réduction de l'îlot de chaleur urbain, biodiversité urbaine, gestion des eaux pluviales). Toutefois, le cadre réglementaire et normatif inhérent à cette technique est limité (DTU applicables aux seules toitures terrasses et règles professionnelles réalisées sous l'égide de la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité) et n'intègre pas une objectivation de ces performances, qui n'a encore souvent pas été démontré scientifiquement. Aujourd'hui, les industriels, comme des acteurs de la construction et des gestionnaires de réseaux d'assainissement, souhaitent que soient qualifiées les performances réelles des TTV en matière de gestion de l'eau, de sorte à en permettre une bonne utilisation et valorisation dans une perspective de développement durable.

Dans ce contexte, l'objectif du projet TVGEP était d'évaluer l'intérêt des toitures terrasses végétalisées (TTV) pour la gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales, en en identifiant leurs atouts et limites à l'échelle de la parcelle et à l'échelle de la ville.

Le projet s'est inscrit dans une démarche multidisciplinaire (sociologie, comportement hydrologie, chimie et hydrologie urbaine) et était porteur d'une double ambition opérationnelle : l'évaluation des produits d'une part (public visé : industriels et évaluateurs), l'impact de la mise en œuvre de ces produits à l'échelle urbaine d'autre part (public visé : collectivités locales, gestionnaires de réseaux d'assainissement). Le projet a également été l'occasion de construire un banc d'essai échelle 1 sur un bâtiment du CETE-IF : ce banc, qui comprend 6 variantes de toitures végétalisées (définies en concertation avec les professionnels du secteur), a permis d'acquérir des données fines sur une longue période et qui demeure fonctionnel au-delà de la fin du projet. Le projet a abouti à plusieurs résultats importants.

- L'analyse sociologique des différents acteurs de la filière réalisée au travers d'une trentaine d'entretiens semi-directifs s'est attachée à identifier les facteurs favorisant (ou freinant) le recours aux TTV sur les projets de construction : elle a montré que la nature très changeante de ces facteurs traduisait un double enjeu de construction d'un marché et de forte évolution des pratiques encadrant cette technique.
- Le banc d'essai a permis de modéliser de façon satisfaisante le comportement des solutions de toitures végétalisées suivies au travers d'un modèle phénoménologique global. Ce modèle a lui-même permis d'élaborer un outil de prédiction de comportement applicable à d'autres variétés de TTV : baptisé FAVEUR, cet outil, encore en développement à la fin du projet, sera mis à la disposition des industriels et des évaluateurs désireux de caractériser la performance hydrologique d'un nouveau produit.
- Les résultats en termes de qualité des eaux sont contrastés en fonction du contaminant étudié. Les concentrations issues des toits végétalisés sont globalement supérieures à celles issues d'un toit nu, notamment dans le cas de la matière organique et du phosphore, mais aussi de certains métaux (cuivre, nickel) et micropolluants organiques (alkylphénols, mecoprop). Toutefois, à l'exception du carbone organique dissous et du phosphore, les concentrations observées restent dans des gammes comparables ou inférieures à celles usuellement observées dans les eaux de ruissellement urbaines.
- Les simulations réalisées sur des bassins réels du département des Hauts-de-Seine ont mis en évidence que la végétalisation des toitures peut contribuer à réduire la fréquence et l'intensité des phénomènes de débordement de réseau et de déversement dès lors que la surface de toit couverte est importante, ce qui ne correspond qu'à certaines situations urbaines. Combinée à d'autres infrastructures, elle représente un potentiel intéressant de réduction du ruissellement urbain dans les années à venir.

# Sommaire du rapport final

<b>RESUME</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS</b> .....	<b>6</b>
<b>Présentation du dispositif expérimental</b> .....	<b>6</b>
<b>Partie 1 : Panorama des techniques et état des lieux des pratiques et des attentes en matière ..</b>	<b>8</b>
<u>Panorama des techniques de TTV (Livrable N°1.1)</u> .....	<b>8</b>
<u>Facteurs et freins au développement des toitures végétalisées (Livrable N°1.2.)</u> .....	<b>8</b>
<b>Partie 2: Observation et modélisation du comportement hydrique des TTV (Livrables N°2.1 et N°2.2)</b> .....	<b>9</b>
<b>Partie 3 : Incidence des TTV sur la contamination du ruissellement</b> .....	<b>11</b>
<u>Emissions par les matériaux constitutifs de la structure (Livrable N°3.1)</u> .....	<b>11</b>
<u>Qualité des eaux de ruissellement issues des toitures végétalisées (Livrable N°3.2.)</u> .....	<b>11</b>
<b>Partie 4: déclinaisons opérationnelles des avancées scientifiques</b> .....	<b>13</b>
<u>Développement d'un outil d'aide à l'évaluation d'une toiture végétalisée (Livrable N°4.1/4.2.)</u> .....	<b>13</b>
<u>Impacts de la diffusion de toitures végétalisées à grande échelle (Livrable N°4.3.)</u> .....	<b>14</b>
<b>LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX DE LA SYNTHESE</b> .....	<b>15</b>
<b>LISTE DES TRAVAUX DE VALORISATION</b> .....	<b>16</b>
<b>ANNEXE : Projet C2D2 TVGEP- Réponses apportées par les partenaires aux observations des évaluateurs</b> .....	<b>19</b>
<b>LIVRABLES</b> .....	<b>28</b>

## INTRODUCTION

Végétaliser les toitures est souvent présenté comme offrant de nombreux effets bénéfiques pour l'environnement urbain et la qualité de vie des citoyens , tant au niveau du bâtiment (amélioration des isolations thermique et acoustique et de la durabilité de l'étanchéité de la toiture) qu'à l'échelle de la ville (amélioration de la qualité de l'air et l'esthétique paysager, réduction de l'îlot de chaleur urbain, accroissement de la biodiversité urbaine ...) avec en particulier une contribution à une meilleure gestion des eaux pluviales (tant quantitative que qualitative).

Concernant la gestion de l'eau, ces effets ne sont toutefois que très partiellement validés scientifiquement alors que les attentes des industriels, comme des acteurs de la construction et des gestionnaires de réseaux d'assainissement sont importantes en la matière dans une perspective de développement durable.

En progression (mais encore peu développé en France au regard de son voisin allemand) et structuré essentiellement autour des toitures terrasses végétalisées extensives (TTV), le marché est susceptible de connaître un envol sensible si le comportement hydrique de ces structures est mieux compris et caractérisé en des termes compatibles avec les attentes des gestionnaires de réseaux d'assainissement qui pourraient alors en promouvoir la mise en place via des mécanismes d'incitation.

Dans ce contexte, le projet TVGEP s'est attaché à évaluer, dans une perspective opérationnelle et prospective, l'intérêt des toitures terrasses végétalisées extensives (TTV) pour la gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales, en identifiant leurs atouts et leurs limites tant à l'échelle de la parcelle qu'à l'échelle de la ville.

Initié au début 2010, le projet s'est achevé en septembre 2013. Il a été structuré en 4 parties dont les composantes, telles que effectivement menées dans le projet, sont synthétisées ci-dessous.

- Partie 1 : *Panorama des techniques et état des lieux des pratiques et des attentes en matière d'utilisation des TTV pour gérer les eaux pluviales.* Cette partie a rempli deux objectifs. D'une part, il s'est agi d'élaborer en lien avec les industriels une typologie des

solutions techniques existantes, laquelle a servi de base pour définir les solutions à mettre en œuvre sur le dispositif expérimental suivi au cours des parties 2 et 3 du projet. D'autre part, à partir d'un travail d'enquête auprès des maîtres d'ouvrage du milieu de la construction et des acteurs de l'urbanisme, l'on a cherché à identifier les facteurs favorisant ou freinant la décision de mettre en œuvre des TTV sur les projets.

- *Partie 2 : Elaboration d'un modèle hydrologique de comportement d'une TTV à l'échelle d'un bâtiment.* Cela a d'abord consisté en la réalisation de suivis expérimentaux détaillés du bilan hydrique de TTV à l'échelle réelle *in situ* : Une demi-douzaine de TTV ont été instrumentées (des contacts avec des maîtres d'ouvrage en IDF ont été pris en ce sens) sur une toiture du CETE-IF qui a été spécialement transformé en dispositif expérimental pour ce projet. Dans un second temps, les données acquises ont permis d'élaborer et de valider un modèle global phénoménologique permettant une représentation parcimonieuse en paramètres des différents flux échangés dans une TTV. en continu et à pas de temps fin du bilan hydrique des TTV :
- *Partie 3 : Caractérisation des flux polluants aux exutoires des TTV.* Dans un premier les émissions par les matériaux constitutifs de la structure (matériaux d'étanchéité, de stockage, de filtration, substrat) et les produits de traitement utilisés lors de la mise en œuvre et la maintenance des TTV ont été caractérisées afin de mettre en évidence ce qui relevait spécifiquement d'une TTV (au regard d'une étanchéité « classique »). Puis, à l'aide du banc expérimental développé au CETE-IF, les effets des TTV sur les flux polluants d'origine atmosphérique ont pu être observés.
- *Partie 4 : Déclinaisons opérationnelles des avancées scientifiques.* Cette dernière partie a compris deux sous-parties assez distinctes. D'une part, sur la base du modèle fonctionnel développé dans le livrable N°2.2 qui permet de reproduire le débit d'eaux pluviales à l'exutoire d'une toiture terrasse végétalisée (TTV) à partir des observations du banc d'essai du CETE-IF à Trappes, un outil d'évaluation à vocation opérationnelle du comportement hydrique des TTV a été élaboré (outil Faveur) : celui-ci est destiné à faciliter l'évaluation, voire la conception de nouveaux produits. D'autre part, les effets de la diffusion des techniques à l'échelle d'un bassin versant sur le fonctionnement des réseaux d'assainissement a été étudié sur la base de deux études de cas menées sur le territoire des Hauts de Seine (partenaire du projet), afin de répondre aux interrogations des

gestionnaires de ces réseaux d'assainissement sur l'intérêt des TTV pour aider à gérer leurs réseaux par temps de pluie.

Le rapport final du projet TVGEP est essentiellement constitué par l'ensemble des livrables produits sur ces quatre parties au cours du projet dans une version qui a été *actualisée* en fin de projet.

En effet, entre la date de production des livrables et la fin du projet, des éléments nouveaux ont conduit à opérer des modifications dans les livrables déjà produits. Ces éléments sont de différentes natures. Il y a eu, en premier lieu, des commentaires de relecture de la part des partenaires internes du projet. Tel est le cas notamment du livrable N°1.2. qui a fait l'objet d'une relecture détaillée de la part de l'ADIVET conduisant à une réunion de travail spécifique au sujet traité plus d'une année après la production de la première version. Certaines des suggestions émises au cours de cette réunion de travail ont conduit à réaliser des modifications dans le document finalement remis. En second lieu, des données complémentaires ont été produites : le banc d'essais fonctionnant au-delà de la date de remise des livrables présentant les résultats expérimentaux, il a été possible d'intégrer ces dernières données dans la version finale de ces livrables. Cela concerne plus particulièrement les livrables N°2.2 et N°3.2. Enfin, les commentaires et critiques adressés par les experts en charge d'évaluer à son terme le projet TVGEP dans le cadre du programme C2D2 ont été prises en compte. En sus de la réponse aux questions et aux demandes de précision adressée aux responsables du programme dans un document spécifique, certains de ces commentaires critiques ont conduit à rajouter ou modifier des passages de plusieurs livrables.

La présentation des différents livrables est précédée de la présente **introduction**, d'une **synthèse des principaux résultats** du projet et de la **liste des travaux de valorisation** réalisés jusqu'à l'été 2014. Ces éléments complémentaires permettront, nous l'espérons au lecteur de se repérer plus aisément au sein du document complet.

## **SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS**

Le projet TVGEP a reposé en grande partie sur la réalisation d'un dispositif expérimental ad hoc construit sur le site du CETE-IF et fondamental pour l'acquisition des données utiles à la réalisation des parties 2 et 3.

C'est pourquoi, cette synthèse présente d'abord le dispositif expérimental mis en place avant d'énoncer, pour chacune des parties, les principaux résultats : la référence des livrables correspondants est à chaque fois précisée.

### **Présentation du dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental est situé à Trappes, à 30 km au Sud-Ouest de Paris. Sa finalité est de permettre la comparaison sur un même site (i.e. dans les mêmes conditions climatiques) de différentes structures de végétalisation extensives, en faisant varier un seul paramètre entre chaque structure. Un toit existant a été divisé en 8 compartiments : 6 compartiments végétalisés de 35 m<sup>2</sup> (7x5 m) et 2 compartiments de référence de 21 m<sup>2</sup> (7x3 m) dont un a été laissé avec seulement l'étanchéité (BI) et un autre avec des graviers (GR).

Les six compartiments végétalisés ont des compositions différentes : choisies en croisant les exigences scientifiques et la représentativité des solutions techniques, définie en concertation avec l'ADIVET, partenaire du projet. La composition florale, l'épaisseur et la nature du substrat, et le type de couche de drainage par compartiment sont explicitées dans la figure 1 et le tableau 1. La composition florale est soit un mélange de sédums (S) comprenant *S. album* (majoritaire), *S. sexagulare*, *S. reflexum*, *S. kamchatikum*, *S. spurium*, *S. acre* (faible quantité), soit un mélange de sédums et de graminées (G) comprenant *Festuca ovina*, *Festuca rubra*, *Dianthus carthusianorum*, *Poa pratensis*, *Koeleria glauca*. Un compartiment est également laissé sans végétation. Les épaisseurs de substrat choisies sont de 3 et 15 cm. Les substrats sont réalisés à partir de pouzzolane, tourbe et compost vert. La différence entre les substrats extensifs (E) et intensif (I) est la teneur massique en matière organique, 3,4 % pour les extensifs et 5,8 % pour l'intensif.



**Figure 1 : Toiture végétalisée expérimentale du CETE IF.**

A droite se trouve la station météo, le pluviomètre est disposé entre les compartiments SE3Y et SE3Z. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets (représentés sur la photo insérée en bas à droite) pour la mesure des débits de ruissellement (partie 2) et la collecte des échantillons à analyser (partie 3)

**Tableau 1 : Nom et composition des différents compartiments**

Code	<i>SE3Y</i>	<i>SE3Z</i>	<i>NE3Y</i>	<i>SE15Y</i>	<i>GE15Y</i>	<i>GI15Y</i>
Plantes	Sédum ( <i>S</i> )		Non végétalisées ( <i>N</i> )	Sédum ( <i>S</i> )	Graminées + Sédum ( <i>G</i> )	
Substrat	Extensif ( <i>E</i> )					Intensif ( <i>I</i> )
Hauteur de substrat	3 cm			15 cm		
Couche de drainage	Polystyrène expansé ( <i>Y</i> )	Pouzzolane ( <i>Z</i> )	Polystyrène expansé ( <i>Y</i> )			

Un pluviomètre (surface de 1000 cm<sup>2</sup> avec une résolution de 0,1 mm), installé sur le toit, permet de mesurer les précipitations. Pour chaque compartiment, les débits de ruissellement sont mesurés à l'aide d'augets d'une résolution de 0,01 mm. Une station météo permet de mesurer température et humidité relative de l'air à 2 m au-dessus de la végétation, vitesse et direction du vent à 3 m au-dessus de la végétation et rayonnement net à 1 m au-dessus de la végétation. L'ensemble des mesures a été acquis en continu du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013.

En fin de projet TVGEP, ce dispositif demeure opérationnel et permet ainsi l'acquisition de données complémentaires pour de futures actions de recherche.

## **Partie 1 : Panorama des techniques et état des lieux des pratiques et des attentes en matière**

### Panorama des techniques de TTV (Livrable N°1.1)

La structure des toitures terrasses végétalisées (TTV) est détaillée en trois parties : une présentation typologique des TTV, le détail des éléments entrant dans la constitution d'une TTV extensive ; et, enfin, la description de quelques ouvrages particuliers mis en œuvre sur des TTV (zone stérile, relevés d'étanchéité...).

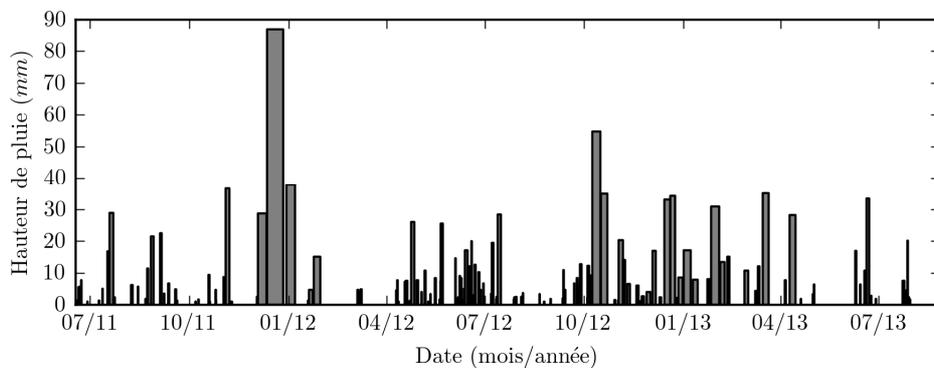
A partir de ce panorama est présenté le choix des structures retenues dans le cadre de cette étude pour intégrer le dispositif expérimental (présenté dans la section précédente). Ce choix a été élaboré plus particulièrement dans le cadre d'une réunion de travail du projet TVGEP qui s'est tenue le 25 mai 2010 sur ce thème spécifique, et de précisions ultérieures apportées par l'ADIVET : il était apparu fondamental que le dispositif expérimental soit validé par les professionnels pour garantir la reconnaissance des résultats qui en émaneraient.

### Facteurs et freins au développement des toitures végétalisées (Livrable N°1.2.)

Le marché des toitures végétalisées en France est aujourd'hui en plein essor. Dans ce contexte, de nombreux professionnels et chercheurs tentent de caractériser leurs performances afin de mieux les exploiter. Associant chercheurs et professionnels, le projet TVGEP s'intéresse plus particulièrement à l'intérêt et aux performances de cette technique en termes de gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales et ce à une double échelle : celle de la mise en œuvre de la technique (le bâtiment/la parcelle) et celle de la gestion des eaux urbaines. L'articulation de ces deux échelles nécessite d'avoir une vision des pratiques et des acteurs potentiellement concernés par cette technique. Ceux-ci sont en effet susceptibles d'en encourager ou au contraire d'en freiner la diffusion. La question des freins et des leviers propres au développement des toitures végétalisées a été abordée par un ensemble d'entretiens menés avec les multiples professionnels concernés (plus de 30 au total). La constante mutation des toitures végétalisées, que ce soit en termes réglementaires, culturels, ou encore financiers, a conduit à reformuler la problématique du développement des toitures végétalisées autour de deux enjeux : la construction du marché des toitures végétalisées d'une part, l'évolution des pratiques encadrant cette technique d'autre part.

## Partie 2: Observation et modélisation du comportement hydrique des TTV (Livrables N°2.1 et N°2.2)

Dans l'objectif d'étudier les différences de comportement entre les six compartiments (cf. Figure 1), les événements pluvieux ont été identifiés comme des périodes pluvieuses qui commencent au début de la pluie et se terminent lorsque les débits de ruissellements sont nuls pendant au moins une heure pour l'ensemble des compartiments. Sur la période de juillet 2011 à juillet 2013, 152 événements pluvieux supérieurs à 1 mm ont été observés, ce qui représente une hauteur cumulée de 1434 mm, soit 92 % de la pluie totale mesurée. La Figure 2 présente l'occurrence de ces 152 évènements. L'évènement pluvieux le plus important a eu lieu du 11 au 26 décembre 2011 et la hauteur de pluie cumulée lors de cet évènement est de 87 mm. La méthode d'identification des événements pluvieux explique la durée très longue de cet événement (15 jours). La succession d'averses au cours de cette période a favorisé la continuité des débits sur l'un ou l'autre des compartiments. Aucun événement exceptionnel n'a été enregistré pendant cette période. Seul deux événements ont une période de retour supérieure à un an dont un a une période de retour supérieure à deux ans.

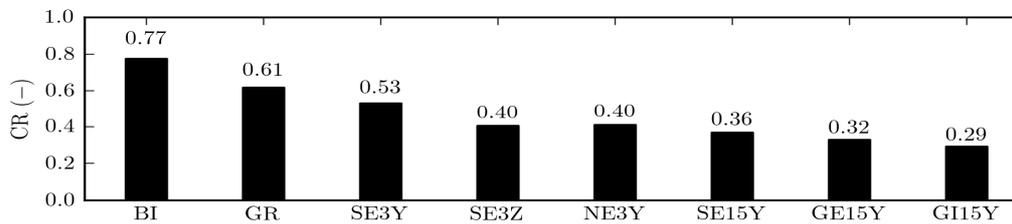


**Figure 2 : Répartition temporelle des événements pluvieux ayant un cumul de pluie supérieur à 1 mm.**

La hauteur de la barre représente le cumul de l'évènement et l'épaisseur de la barre, sa durée.

Le coefficient de ruissellement est utilisé comme critère pour évaluer la capacité des six compartiments à abattre le ruissellement (Figure 3). Ce critère est étudié pour l'ensemble de la période de mesure. Noté  $CR_{an}$ , il est défini, pour chaque compartiment comme le rapport

entre le cumul de la hauteur d'eau ruisselée du compartiment pour tous les événements et le cumul de la pluie de tous les événements.



**Figure 3 : Coefficients de ruissellement annuels pour chaque compartiment.**

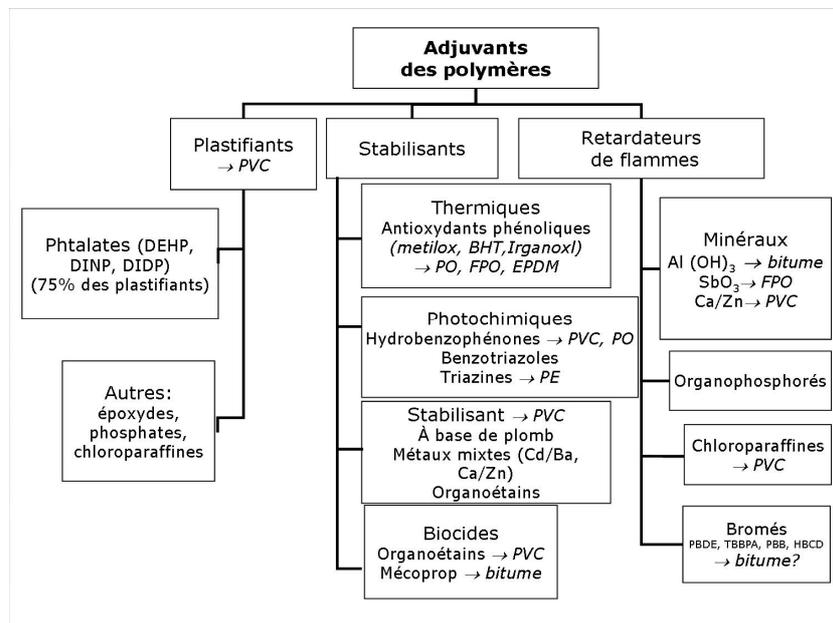
Le chiffre en haut de chaque barre indique le coefficient de ruissellement annuel (CRan).

Toutefois il convient de noter la forte variabilité des capacités d'abattement des toitures végétalisées, les coefficients de ruissellement pouvant varier entre 0 et 1 d'un événement *pluvieux* à *l'autre*. Toutefois, pour la majorité des événements les coefficients de ruissellement sont très faibles (< à 2%). L'observation des résultats met également en évidence que le coefficient de ruissellement est fortement dépendant du cumul de pluie et de la durée de l'évènement.

Sur la base de ces résultats, un modèle de type « réservoir » a été développé (cf. partie 4).

## Partie 3 : Incidence des TTV sur la contamination du ruissellement

### Emissions par les matériaux constitutifs de la structure (Livable N°3.1)



**Figure 4 : Synthèse des adjuvants pouvant être présents dans les polymères utilisés pour les structures de végétalisation et composés chimiques susceptibles d'être émis**

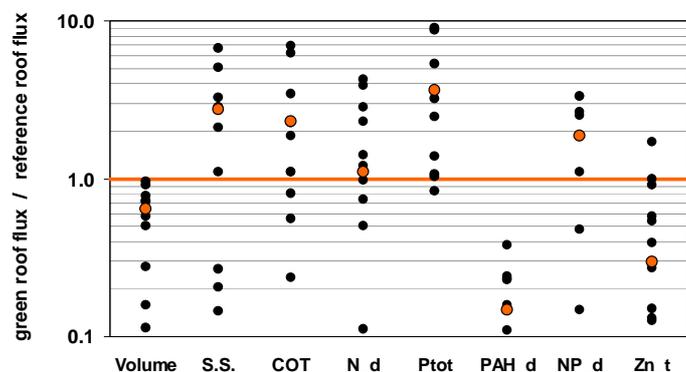
Un travail de bibliographique et des tests de lixiviation et en colonnes ont été réalisés pour identifier et caractériser les émissions des matériaux constitutifs de la structure d'un complexe de toiture végétalisée.

La Figure 4 synthétise les types d'adjuvants pouvant entrer dans la composition des différents matériaux synthétiques des structures de végétalisation, et les composés chimiques susceptibles d'être émis par ces matériaux.

### Qualité des eaux de ruissellement issues des toitures végétalisées (Livable N°3.2)

Des analyses de la qualité des eaux en exutoire des compartiments du banc de Trappes ont été effectuées pour 13 événements pluvieux. Les résultats peuvent être divisés en trois groupes : ceux relatifs aux polluants globaux (nutriments), les métaux (fer, cuivre, zinc) et les polluants organiques (HAP, alkylphénols, nonylphénol, MCPP). Les charges de contaminants émis dépendent du comportement hydrologique du toit et donc des conditions initiales d'humidité du substrat et de la hauteur de la pluie. Le comportement des toitures végétalisées envers les

polluants dépend en outre des caractéristiques du polluant considéré comme son origine et ses propriétés moléculaires. Les toitures végétalisées étudiées apparaissent comme source de matières solides accompagnées de carbone, phosphore et, dans une certaine mesure, d'azote. Comme les toits ont environ six mois au début de l'échantillonnage, le relargage de solides et de nutriments n'est pas très surprenant. Ce comportement est habituel pour les nouvelles toitures et devrait diminuer avec le temps. Cette tendance est également suivie par les principaux métaux comme le fer et le manganèse. Cependant certains métaux comme le zinc et, dans une moindre mesure, le cuivre sont retenus dans la structure (Figure 5). Les micropolluants organiques offrent une image similaire. Certains, comme les HAP, sont retenus et d'autres, comme le nonylphénol, sont libérés. D'une part, ces résultats suggèrent une libération de composants provenant des engrais épandus initialement sur la toiture comme les nutriments ou certains métaux, et la libération des contaminants provenant de la structure de toit comme le nonylphénol ou PPCC. D'autre part, la rétention peut être observée pour certaines substances en lien avec les dépôts atmosphériques comme le zinc et les HAP.



**Figure 5: Relargage et rétention de polluants, exprimés en termes de rapport du flux de la TTV sur le flux de référence (Janvier - Juillet 2012).**

Les résultats en termes de qualité des eaux sont donc contrastés en fonction du contaminant étudié. Les concentrations issues des toits végétalisées sont globalement supérieures à celles issues d'un toit nu, notamment dans le cas de la matière organique et du phosphore, mais aussi de certains métaux (cuivre, nickel) et micropolluants organiques (alkylphénols, mecoprop). A l'exception du carbone organique dissous et du phosphore, les concentrations observées restent dans des gammes comparables ou inférieures à celles usuellement observées dans les eaux de ruissellement urbaines.

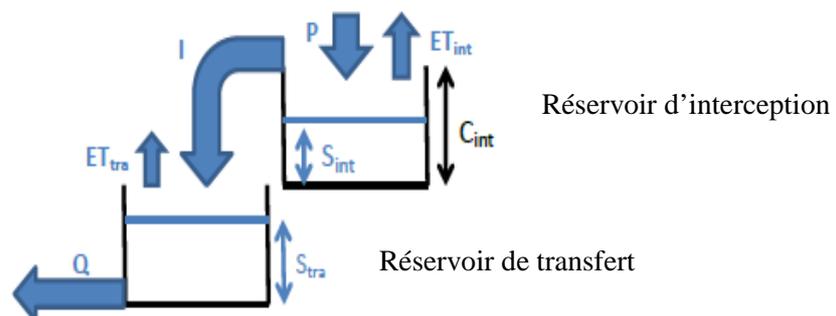
## Partie 4: déclinaisons opérationnelles des avancées scientifiques

### Développement d'un outil d'aide à l'évaluation d'une toiture végétalisée (Livrable N°4.1/4.2.)

Pour contribuer à intégrer la performance hydrologique dans l'évaluation des produits, deux pistes étaient *a priori* possibles en fin de projet. La première consistait à essayer de proposer un protocole d'essai standard de caractérisation des produits. Envisagée en début de projet, cette option a été écartée au profit de la seconde, qui a consisté à développer un outil permettant de caractériser la performance des produits à partir de la déclaration de leurs caractéristiques physiques, cela sur la base du modèle fonctionnel, développé au cours du projet (au cours de la partie 3).

Dénoté FAVEUR (modèle Fonctionnel pour l'évaluation des performances des toitures Végétalisées sur le ruissellement URbain), ce modèle permet de reproduire le comportement hydrologique d'une TTV donnée. Son application sur de longues chroniques de pluie permet de caractériser son comportement hydrologique, via par exemple le calcul de critères, et ensuite de comparer ces critères avec les règles à respecter. Cette démarche permet d'aider les aménageurs (architecte, urbaniste, paysagiste, maîtres d'ouvrages, ...) dans le choix de la meilleure TTV en cohérence avec leurs règles.

Ce modèle fonctionnel est volontairement simple et peu paramétré : il est basé sur une succession de 2 réservoirs assurant respectivement les fonctions d'interception et de transfert (Figure 6).



**Figure 6 : Principe du modèle réservoir FAVEUR dédié au comportement hydrologique des TTV**

FAVEUR a été développé, calibré et validé sur une année et demie d'observations hydrologiques acquises sur 6 configurations différentes de TTV. Des résultats satisfaisants ont

été obtenus en termes de débit et volume de ruissellement, cela à différents pas de temps (de 5 min à l'année) et sur les différentes configurations de TTV.

#### Impacts de la diffusion de toitures végétalisées à grande échelle (Livrabale N°4.3)

A l'échelle du bâtiment, l'utilisation de toitures végétalisées a montré une influence positive en termes de ruissellement (ralentissement et diminution du débit de pointe, diminution du volume ruisselé). Le présent travail a eu pour objectif d'étudier l'éventuel impact de ces toitures à des échelles davantage compatibles avec des problématiques de gestion urbaine (quartier, bassin versant).

Une méthodologie pour évaluer l'impact des toitures végétalisées a été spécifiquement développée. Elle comprend une méthode de définition de scénarios de végétalisation réaliste à l'échelle urbaine et un outil de modélisation capable de représenter le comportement hydrologique d'une toiture et d'être intégré dans le modèle de gestion des eaux pluviales SWMM.

Cette méthodologie a été appliquée sur deux bassins versants des Hauts-de-Seine (France) respectivement soumis à des risques de débordements et de déversements en Seine. Les résultats montrent que la végétalisation des toitures peut réduire la fréquence et l'intensité de ces phénomènes en fonction de la surface de toit couverte. Combinée à d'autres infrastructures, elle représente un potentiel intéressant de réduction du ruissellement urbain dans les années à venir.

\* \*  
\*

## **LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX DE LA SYNTHÈSE**

### **Liste des figures**

Figure 1 : Toiture végétalisée expérimentale du CETE IF.....	7
Figure 2 : Répartition temporelle des événements pluvieux ayant un cumul de pluie supérieur à 1 mm.....	9
Figure 3 : Coefficients de ruissellement annuels pour chaque compartiment.....	10
Figure 4 : Synthèse des adjuvants pouvant être présents dans les polymères utilisés pour les structures de végétalisation et composés chimiques susceptibles d'être émis.....	11
Figure 5: Relargage et rétention de polluants, exprimés en termes de rapport du flux de la TTV sur le flux de référence (Janvier - Juillet 2012). ....	12
Figure 6 : Principe du modèle réservoir FAVEUR dédié au comportement hydrologique des TTV .....	13

### **Liste des Tableaux**

Tableau 1 : Nom et composition des différents compartiments.....	7
--	---

## LISTE DES TRAVAUX DE VALORISATION

### • *Publications*

Berthier E., de Gouvello B., Archambault F., Gallis D., Bilan hydrique des toitures végétalisées : vers de meilleures compréhension et modélisation, *TSM (Techniques Sciences Méthodes)*, 6 (2010) 39–47.

Seidl M., Gromaire M.-C., Saad M., de Gouvello, Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs, *Environmental Pollution*, 183 (2013), 195-213.

Versini P.-A., Ramier D., Berthier E., de Gouvello B., Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale, *Journal of Hydrology* (soumis).

Versini P.-A., Jouve P., Ramier D., Berthier E., de Gouvello B., Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale – Study in the Hauts-de-Seine county (France), *Urban Water Journal* (soumis).

### • *Conférences Internationales*

Berthier E., Ramier D., Versini P.-A., Pinta P., Safitri L., de Gouvello B., 2013, FAVEUR: a functional model to assess hydrological performances of vegetative green roofs, *World Green Infrastructures Congress*, 9-13 september 2013, Nantes.

de Gouvello B., Chauveau J., 2013, Green roofing development in France: evolution of practices and construction of a market, *World Green Infrastructures Congress*, 9-13 september 2013, Nantes.

Versini P.-A., Ramier D., Berthier E., de Gouvello B., 2013, How green roof can impact urban runoff? Hydrological impact study from roof scale to basin scale, *World Green Infrastructures Congress*, 9-13 september 2013, Nantes.

Seidl M., Gromaire M.-C., Mirande C., Saad M., de Gouvello B., Can green roofs improve the run-off water quality?, *World Green Infrastructures Congress*, 9-13 september 2013, Nantes.

Chauveau J., de Gouvello B., 2013, Les perspectives du développement des toitures végétalisées en France: construction d'un marché et évolutions des pratiques, *8th International conference NOVATECH – planning & technologies for sustainable water management*, June 23<sup>rd</sup> – 27<sup>th</sup> 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

Gromaire M.-C., Ramier D., Seidl M., Berthier E., Saad M., de Gouvello B., 2013, Incidence of extensive green roof structures on the quantity and the quality of runoff waters – first results from an experimental test bench in Paris area. *8th International conference NOVATECH – planning & technologies for sustainable water management*, June 23<sup>rd</sup> – 27<sup>th</sup> 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

Versini P.-A., Jouve P., Ramier D., Berthier E., de Gouvello B., 2013, Hydrological impact of green roofs on urban runoff at the watershed scale – Case studies in the Hauts-de-Seine County (France). *8th International conference NOVATECH – planning & technologies for sustainable water management*, June 23<sup>rd</sup> – 27<sup>th</sup> 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

Ramier D., Berthier E., Dussuchale A., de Gouvello B., Determination of influent parameters on green roof hydrological behavior, *9<sup>th</sup> Urban Drainage Modelling*, Belgrade, 3-7 september 2012

Seidl M., Gromaire M.-C., de Gouvello B., The effect of roof and rain-event type on pollutant balance of green roofs, *Urban Environmental Pollution*, Amsterdam, 17-20 june 2012, 21 slides

Berthier E., Ramier D., de Gouvello B., Simulation of green roof hydrological behaviour with a reservoir model, *12nd International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 10-15 September 2011.

Berthier E., de Gouvello B., Archambault F., Gallis D., 2010, Bilan hydrique des toitures végétalisées: vers de meilleures compréhension et modélisation, *7th International conference on sustainable techniques and strategies in urban water management*, June 27<sup>th</sup> – July 1<sup>st</sup> 2010, Lyon: GRAIE, 10 pages.

- **Conférences nationales**

Ramier D., Berthier E., Gallis D., Dussuchale A., Pinta P., Versini P.-A., de Gouvello B., 2013, Analyse du fonctionnement hydrologique de toitures végétalisées: observations et modélisation. Actes du colloque INOGEV & GDEP « Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ? », Nantes, 3-5 décembre 2013, pp. 40-50

Gromaire MC, 2013. Maîtriser la contamination des eaux pluviales par une gestion à la source des eaux de ruissellement ? - Le cas des toitures terrasses végétalisées. Forum Eaux Pluviales, 20-21 mars 2013, Douai.

Gromaire MC, Schwager J., M. Seidl, B. de Gouvello, Irles A., Thiriat J., 2012, Incidence des toitures végétalisées sur la contamination des eaux pluviales urbaines, *Journée technique RST « Gérer durablement les eaux pluviales en zones urbaines : de la recherche vers l'action »*, 1et 2 septembre 2011, Lille.

Bouzouidja R., Ramier D., Berthier E., Claverie R., de Gouvello B., 2012, Evaluation du comportement hydrique et thermique : l'exemple des toitures végétalisées à l'échelle du bâtiment, *Journée technique RST « Gérer durablement les eaux pluviales en zones urbaines : de la recherche vers l'action »*, 1et 2 septembre 2011, Lille

- **Présentations du projet (hors du cadre du programme C2D2)**

de Gouvello B., 2013, TVGEP: Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines. Présentation à la réunion « Prospective Végétale d'ornement » organisée par FranceAgrimer, Montreuil, 20 mars 2013, 31 transparents.

Gromaire M-C., 2011, TVGEP: Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines : présentation du projet et de son avancement. 2èmes rencontres Toitures Végétalisées, La Rochelle, 23 mai 2012, 10 transparents.

de Gouvello B., 2011, TVGEP: Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines, Présentation réalisée pour le master 2 recherche Université de Marne la Vallée / Ecole Nationale des Ponts et Chaussées "Entreprise innovation société", module de cours "techniques urbaines en société" (responsables G. Crague, A. Peerbaye), 13 janvier 2011.

de Gouvello B., 2011, TVGEP: Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines, Présentation réalisée dans le cadre de la rencontre du Pôle de compétitivité Advancity avec le Conseil Général de Seine-Saint-Denis le 28 septembre 2011.

de Gouvello B., 2010, TVGEP: Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines, Séminaire thème 1 de l'observatoire OPUR, 16 décembre 2010, Créteil – Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Val de Marne, 8 transparents.

- ***Organisation de la journée technique « Quelle place pour les toitures végétalisées dans la ville de demain ? Une approche à double échelle », 20 novembre 2012, Paris.***

Journée organisée par les CETE (Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement) de l'Est et de l'Ile de France, en partenariat avec le LEESU et le CSTB et avec la participation financière du GEMCEA (Groupement pour l'Evaluation des Mesures en Continu dans les Eaux et en Assainissement). Quatre présentations de cette journée ont valorisé les résultats du projet TVGEP :

- Enjeux du développement de la technique : facteurs d'acceptabilité, leviers, cas particulier des techniques de maintenance, J. Schwager (CETE Est) - B. de Gouvello (CSTB-LEESU)
- Modélisation des performances hydrologiques, D. Ramier (CETE IdF)
- Capacité épuratoire des toitures végétalisées, J. Schwager (CETE Est) – M.-C. Gromaire (LEESU)
- Impacts sur la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant urbain, P.A. Versini (LEESU/CSTB)

## ANNEXE : PROJET C2D2 TVGEP- REPONSES APORTEES PAR LES PARTENAIRES AUX OBSERVATIONS DES EVALUATEURS

*Pour chaque observation listée ci-après, précisez la réponse apportée par les partenaires du projet et, le cas échéant, les corrections opérées dans le rapport.*

### Observations générales

· L'état des lieux dressé en lien avec les industriels et les maîtres ouvrages sur les pratiques, les attentes et les freins relatifs au développement de la végétalisation de toitures est particulièrement appréciable. On pourrait regretter que le lien entre cet état des lieux et le contenu du cahier des charges retenu pour le dispositif expérimental n'ait pas été davantage explicité.

Le cahier des charges retenu pour le dispositif expérimental a été défini en concertation avec l'ADIVET. Afin d'assurer le caractère représentatif, les représentants de l'association impliqués dans les réunions du projet ont débattu avec la commission technique de l'association réunissant les professionnels du secteur pour proposer les solutions à tester sur le site expérimental du Cerema (anciennement LROP puis CETE-IF) à Trappes en prenant en compte une double contrainte : d'une part, les différentes variétés testées devaient tourner autour d'une solution de référence, en modifiant un paramètre, de sorte à permettre une bonne compréhension des phénomènes en jeu (cf. tableau 5 du livrable L 1.1.) ; d'autre part, il a également fallu tenir compte des contraintes mécaniques admissibles par la toiture-terrasse porteuse du banc d'essai (ce qui rendait impossible des solutions trop épaisses). Par ailleurs, la mise en œuvre du banc d'essai étant un processus long et incertain (les délais d'autorisation et de mise en œuvre ont d'ailleurs été à l'origine d'un retard dans l'acquisition des données au regard du calendrier initialement prévu), il n'était pas envisageable d'assujettir la définition du cahier des charges de l'expérimentation aux conclusions relatives à l'enquête auprès des acteurs de terrain, d'autant plus que cette enquête ne portait pas essentiellement sur les caractéristiques techniques des produits.

· La déclinaison opérationnelle des résultats du projet, prévue dans le livrable 4, a été ré-aiguillée vers le développement d'un outil de calcul issu de la modélisation. Cet outil apparaît pertinent d'un point de vue applicatif, car il est extrêmement simple à utiliser. Toutefois, il semble prendre appui sur des hypothèses et des données qui gagneraient à être clarifiées.

Le projet TVGEP a été l'occasion de développer une première version du modèle fonctionnel *Faveur* (L 2.2) qui permet de reproduire le débit d'eaux pluviales à l'exutoire d'une toiture terrasse végétalisée (TTV). Les 1<sup>ères</sup> performances de ce modèle, exclusivement évaluées à partir des observations du banc d'essai du Cerema à Trappes (L 2.1 et L 2.2), ont été jugées suffisamment satisfaisantes pour qu'il puisse être utilisé comme un outil d'évaluation à vocation opérationnelle du comportement hydrique des TTV. La version 1.0 de *Faveur*-outil a alors été développée : cette 1<sup>ère</sup> version a un domaine d'application restreint, des TTV de caractéristiques proches de celles présentes sur le banc d'essai à Trappes, et peut être encore améliorée en lien avec des améliorations de *Faveur*-modèle. Ces limites et perspectives, souvent identifiées par les évaluateurs, sont bien rappelées dans la nouvelle version du livrable.

Ainsi, quelle est la durée réelle d'acquisition des données ayant alimenté les références statistiques du programme (celles-ci n'ayant pu être validées, semble-t-il, que du 15 Juin au 1er Juillet 2011, cf. L2.2, page 11) ?

Le modèle FAVEUR a été calé sur la période du 15 juin 2011 au 14 juillet 2012. Ceci a été précisé dans le livrable 2.2, page 29. L'acquisition de données s'est prolongée au-delà de cette période, l'ensemble des données validées au moment de la rédaction du rapport final s'échelonnant jusqu'au 1<sup>er</sup> septembre 2013 (cf. Livrable L 2.2. p. 11).

Qu'en est-il de la non prise en compte de l'épaisseur de substrat des rouleaux préculivés dans les calculs (représentant 40% de l'épaisseur dans le cas des solutions Sedum, 11% dans le cas des graminées) ?

Cette question n'avait pas été identifiée pour la première version du développement des modèle et outil Faveur. Nous remercions l'évaluateur de l'avoir soulevée : cette non-prise en compte peut avoir une influence, spécifiquement pour les faibles épaisseurs de substrat. Cependant, dans la version actuelle de FAVEUR ; cette épaisseur est implicitement prise en compte dans le calage de la capacité du réservoir d'interception. Il faut maintenant intégrer cette épaisseur dans la relation entre la CME (ou un autre critère permettant de prendre en compte la capacité de rétention du complexe de végétalisation) et l'épaisseur du complexe de végétalisation (substrat + tapis végétal). Cette non-prise en compte est une des limites mentionnées pour la version 1.0 de Faveur-outil, et elle constitue une perspective de travail pour la version suivante (cf. ajout en p.15 du L 4.1/4.2)

La végétation des toitures ne semble pas avoir fait l'objet d'un entretien particulier (fertilisation, arrosage en période sèche) – l'incidence des végétaux eux-mêmes sur l'évapotranspiration et le stockage par les plantes ne s'en est-elle pas trouvée réduite ?

Sur le banc expérimental du Cerema à Trappes, nous avons volontairement laissé la végétation évoluer naturellement, sans entretien. Ce parti pris a permis de bien maîtriser les conditions et entrants des compartiments végétalisés (en particulier pour les recherches sur la qualité des eaux de ruissellement, partie 3 du projet). Il est aussi cohérent avec des recommandations techniques, qui sous climat francilien, ne préconisent pas de point d'arrosage. Ces précisions sur les conditions de non-entretien sont rajoutées dans le livrable L 2.2 (p. 8 et p. 31).

Comment la courbe de rétention non linéaire dans l'épaisseur de substrat a-elle été prise en compte pour la mise au point des formules (cf. page 12 du L 4.1/4.2)?

Elle a été prise en compte notamment *via* la relation qui permet d'estimer le paramètre  $C_{int}$  de Faveur-modèle en fonction de la Capacité Maximale en Eau (CME) du substrat et de son épaisseur ( $e$ ) (cf. p.12 du livrable L4.1/4.2). La relation retenue pour la version 1.0 de l'outil a été calée à partir des observations du banc d'essai de Trappes, donc sur des substrats peu épais et peu organiques. Il s'agit de l'une des limites de la version actuelle de l'outil, et une perspective d'amélioration pour la version suivante (cf. ajout p.15 dans le livrable L4.1/4.2).

· La mise en parallèle des travaux du projet avec ceux de la démarche normative CEN en cours a-t-elle pu être finalement conduite ?

Dans le cadre du projet TVGEP des réunions se sont tenues avec des membres du département DER (Département Enveloppe et Revêtements) du CSTB pour analyser les possibles retombées de la recherche en cours sur l'évaluation des produits concernant leur performance en termes de gestion des eaux de pluie. Cela est apparu comme un premier pas préalable à toute action normative sur le sujet. Actuellement, il n'existe pas de DTU propres aux TTV : les référentiels utilisés sont d'une part les DTU relatifs aux terrasses (famille 43) en ce qui concerne les aspects d'étanchéité et les règles professionnelles<sup>1</sup>. Des produits font l'objet d'avis techniques du CSTB, mais ceux-ci visent à permettre à garantir l'aptitude à l'emploi de ces produits, sans entrer dans le volet performanciel relatif à la gestion de l'eau.

Pour contribuer à intégrer la performance hydrologique dans l'évaluation des produits, deux pistes étaient *a priori* possibles en fin de projet. La première consistait à essayer de proposer un protocole d'essai standard de caractérisation des produits<sup>2</sup>. Envisagée en début de projet, cette option été écartée au profit de la seconde, qui a consisté à développer un outil permettant de caractériser la performance des produits à partir des la déclaration de leurs caractéristiques physiques, cela sur la base du modèle élaboré au sein du projet. Il s'agit de l'outil FAVEUR, dont la philosophie et le mode de fonctionnement sont expliqués dans le livrable 4.1/4.2.

---

<sup>1</sup> Les règles professionnelles sur les toitures végétalisées ont été rédigées par la CSFE (Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité) le SNPPA (Syndicat National du Profilage des Produits Plats en Acier) et l'UNEP (Union Nationale des Entrepreneurs du Paysage) en 2002. Elles ont été révisées en 2007 en y associant l'ADIVET (association française des toitures et façades végétales) et la FFB et font actuellement l'objet d'un travail de réflexion en vue d'une nouvelle édition.

<sup>2</sup> Les Belges, au travers du CSTC, se sont essayés à cette approche. Cf. De Cuyper K., Kuborn X., Van den Bossche P., A Standardized method for measuring the attenuating effect of green roofs on storm water discharge, Symposium CIB W062 – Sydney Australia, 8-10 November 2010, 10 p. Les auteurs de ce papier qualifient leur approche de "prometteuse" mais "devant être approfondie".

Si la substance du rapport est globalement d'une qualité très satisfaisante, on regrette qu'une compilation du contenu des livrables présentés n'ait été réalisée afin, d'une part, d'alléger le document final des éléments répétés d'un livrable à l'autre et, d'autre part, d'en homogénéiser la présentation (référencement bibliographique, police, numérotation des figures, etc.) et l'expression.

En accord avec les responsables du programme, le rapport final consiste en un document unique comprenant une introduction générale rappelant les objectifs du projet et une synthèse résumant les principaux résultats et faisant référence aux livrables correspondants intégrés dans la suite du document. Dans la mesure du possible, la présentation des livrables a été harmonisée. Toutefois, une harmonisation totale n'était pas envisageable. D'une part, certains livrables consistent en des notes d'une taille limitée (environ 15 pages) ne requérant pas forcément de bibliographie tandis que d'autres sont des rapports plus conséquents : cela est dû au sujet traité. D'autre part, les compétences spécifiques requises par chacune des parties limite forcément la possibilité d'harmoniser le style de l'expression<sup>3</sup>.

Par ailleurs, la lisibilité de certaines figures et de schémas gagnerait à être améliorée. Enfin, une conclusion générale aurait été appréciée.

Plusieurs figures et schémas ont été revus ou rajoutés avec l'objectif d'en améliorer la lisibilité (signalons entre autres : le schéma des acteurs dans le livrable L 1.2., les graphiques du livrable L 2.2. afin de prendre en compte une plus grande période de données de suivi, le schéma synthétisant les types d'adjuvants entrant dans la composition des différents matériaux synthétiques des structures de végétalisation, et les composés chimiques susceptibles d'être émis par ces matériaux en 2.4 du livrable L 3.1....). Surtout toutes les figures, tableaux et schémas présentés dans les livrables ont été indexés et leur liste intégrées en fin de chaque livrable correspondant.

Il n'a pas été réalisé de conclusion générale, en raison de la structuration du rapport qui a privilégiée une synthèse des principaux résultats. Par ailleurs, un certain nombre de communications et de publications ont été effectuées dans le cadre du projet TVGEP. Celles-ci constituent un moyen particulièrement efficace pour le lecteur d'accéder aux résultats du projet d'une manière plus détaillée que celle de la synthèse sans avoir toutefois à faire une lecture de l'intégralité des rapports.

Nous proposons ci-dessous une liste de références issues du projet TVGEP ayant donné lieu à des textes publiés (communications ou articles).

- Chauveau J., de Gouvello B., 2013, Les perspectives du développement des toitures végétalisées en France: construction d'un marché et évolutions des pratiques, 8th International conference on sustainable techniques and strategies in urban water management, June 23rd – 27th 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

- Gromaire M.-C., Ramier D., Seidl M., Berthier E., Saad M., de Gouvello B., 2013, Incidence of extensive green roof structures on the quantity and the quality of runoff waters – first results from an experimental test bench in Paris area. 8th International conference on sustainable techniques and strategies in urban water management, June 23rd – 27th 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

- Ramier D., Berthier E., Gallis D., Dussuchale A., Pinta P., Versini P.-A., de Gouvello B., 2013, Analyse du fonctionnement hydrologique de toitures végétalisées: observations et modélisation. Actes du colloque INOGEV & GDEP « Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ? », Nantes, 3-5 décembre 2013, pp. 40-50

- Seidl M., Gromaire M.-C., de Gouvello B., Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs, *Environmental Pollution*, 183 (2013), 195-213.

- Versini P.-A., Jouve P., Ramier D., Berthier E., de Gouvello B., 2013, Hydrological impact of green roofs on urban runoff at the watershed scale – Case studies in the Hauts-de-Seine County (France). 8th International conference on sustainable techniques and strategies in urban water management, June 23rd – 27th 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

<sup>3</sup>

En particulier :

- la page de garde de chaque livrable respecte la même présentation ;
- la numérotation des pages des livrables intègre le numéro du livrable concerné, de sorte à permettre au lecteur en quête d'un livrable particulier de se retrouver plus facilement dans le document compilé ;
- pour chacun des livrables la page 1 correspond au sommaire
- la structure du sommaire est identique pour chaque livrable : elle comporte une section listes des figures et tableaux et une section bibliographie.

Le changement de police et l'uniformisation du format des titres n'ont en revanche pas été réalisés, les feuilles de style utilisées par les rédacteurs étant différentes. Mais la cohérence formelle interne de chaque livrable a été vérifiée.

## Remarques particulières

### Sur le livrable 1.1

· Un point sur la réglementation, les règles professionnelles et les pratiques actuelles aurait pu compléter cet état de l'art.

La finalité de la note constituée par le livrable L 1.1. était d'essence purement technique. Il s'agissait de dresser le panorama des différentes techniques existantes en matière de toiture végétalisée (première section de la note) afin de rendre compréhensible les choix qui sont retenus pour opérer l'expérimentation (seconde section de la note).

Les questions relatives à la réglementation, aux règles professionnelles et aux pratiques actuelles des acteurs relèvent plus des préoccupations évoquées dans le livrable L 1.2. Mais il est vrai qu'elles sont alors évoquées comme des éléments d'enjeux et ne sont pas explicitement décrites pour le lecteur découvrant totalement le domaine. Le site de l'ADIVET permet de disposer d'informations générales concernant la réglementation et les règles professionnelles comme en témoigne l'encadré ci-dessous.

#### **I Quelles règles respecter pour la réalisation d'une toiture végétalisée ?**

Tout d'abord, une étude technique doit être menée par une entreprise spécialisée dans la végétalisation des toitures afin de s'assurer de la faisabilité du projet et définir un système de végétalisation adapté qui ne remette pas en cause la pérennité de l'ouvrage (capacité de la structure porteuse à reprendre les charges à CME et garantie sur la pérennité de l'étanchéité (clos et couvert)). Les référentiels techniques reconnus dans les professionnels sont les suivants :

- Norme NF-DTU 43.1 (étanchéité de toiture avec élément porteur en maçonnerie - dalle béton)
- Norme NF-DTU 43.3 (étanchéité de toiture avec élément porteur en tôles d'acier nervurées)
- Norme NF-DTU 43.4 (étanchéité de toiture avec élément porteur en bois)
- Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses végétalisées, éditées par la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité (CSFE)
- Avis Techniques (CSTB) du GS n°5 ou Cahier des Charges prescription de Pose des systèmes de végétalisation bénéficiant d'une Enquête de Technique Nouvelle favorable d'un Bureau de Contrôle.

(source : <http://www.adivet.net/Questions-frequentes>)

Par ailleurs, de nombreuses politiques incitatives aux TTV ont été instituées en Europe ou en Amérique du Nord ; une présentation succincte de ces dernières aurait pu être incluse afin d'en tirer un bilan sur leur efficacité.

Effectuer une présentation des politiques incitatives instituées en Europe ou en Amérique du Nord offre un intérêt, mais cela n'était pas prévu dans le projet. TVGEP s'est en effet focalisé sur le cas français en ce qui concerne les aspects réglementaires et politiques publiques. Il était en revanche prévu dans le projet de lister et de décrire les mécanismes d'incitation à la mise en place de TTV par des collectivités locales en France : cet aspect est évoqué à l'occasion des entretiens réalisés dans le cadre du livrable L 1.2. auprès de plusieurs acteurs, mais il est vrai, plus dans une approche prospective (les incitations peuvent-elles changer la donne ?) que dans une approche descriptive qui se révèle temporellement contingente. Des éléments de nature descriptive sont toutefois apportés en ce qui concerne le département des Hauts de Seine (cf. entretien correspondant en annexe du livrable L 1.2).

· Le choix des solutions constituant le dispositif expérimental, bien qu'évoqué dans la suite du rapport, aurait pu être davantage justifié : quelles caractéristiques/contraintes pour la toiture du CETE-IdF ? Quelles dimensions exactes des compartiments d'essai (sont-ils représentatifs) ? Quels masque, orientation, etc. ?

La mise en place d'un banc expérimental sur une vraie toiture comporte un certain nombre de difficultés. Après discussion entre les partenaires, il est apparu que, pour assurer au mieux un suivi rapproché et la sécurité du banc expérimental, il était préférable que celui-ci se situe au sein d'une enceinte fermée. L'aspect suivi hydrologique primant dans ce projet, cela a conduit naturellement à s'intéresser à l'aptitude des bâtiments du Cerema (anciennement CETE-IF) à recevoir ce banc, cette équipe étant en charge de la partie relative au comportement hydrologique. Plusieurs bâtiments ont été envisagés, mais après une visite sur le terrain avec les professionnels du secteur, il est apparu que seul

le bâtiment n°9 du site pouvait être adapté pour permettre l'expérimentation. Sa géométrie permettait en effet assez facilement la réalisation de compartiments indépendants<sup>4</sup>. Une contrainte subsistait néanmoins : la présence d'une cheminée créant une ombre plus ou moins importante selon la fraction de la toiture concernée. C'est pourquoi, le CETE a réalisé un travail de simulation sur l'ensoleillement relatif du toit concerné. Il est apparu que l'ensoleillement demeurait assez régulier sur l'ensemble du toit, l'effet de masque de la cheminée étant finalement assez cantonné à la fraction de la surface directement attenante à la cheminée. Il a donc été décidé ne pas utiliser cette partie et de consacrer le reste de la toiture à l'expérimentation. Une note a été rajoutée sur ce point dans le livrable (cf. p. 12). Les compartiments réalisés sur le site du Cerema (anciennement CETE-IF) sont de 35 m<sup>2</sup> pour les compartiments 1 à 6 et de 21 m<sup>2</sup> pour les compartiments 7A et 7B (cf. figure 7 du livrable L 1.1, p. 14).

### **1.1.1 Sur le livrable 1.2**

· Le panel d'acteurs contactés est très large ; il aurait pu être complété par des enseignants en école d'ingénieurs par exemple.

En amont de la réalisation de l'enquête menée en 2010 pour cette partie, nous avons cherché à repérer l'existence de formations spécifiques sur les toitures végétalisées au sein d'écoles d'ingénieurs, d'architecture ou de paysagisme. Il est apparu que le thème, lorsqu'il était traité, ne l'était alors que de manière allusive superficielle ou illustrative (par exemple, à l'occasion de projets de Haute Qualité Environnementale). Cela a été confirmé par les responsables interrogés de l'ADIVET qui ont indiqué que l'essentiel (pour ne pas dire l'intégralité) de la formation sur TTV était alors directement assuré par les fabricants et était d'ordre très pratique, à savoir axé sur la bonne mise en œuvre de leurs produits. Par ailleurs, il convient d'ailleurs de noter que les ouvrages techniques de référence sur les TTV sont l'œuvre de professionnels du secteur et non pas du milieu académique<sup>5</sup>.

Il est donc apparu qu'il convenait, pour cette enquête, de se focaliser plus sur le milieu professionnel, y compris pour saisir la réalité des formations en la matière.

· Page 11 : le tableau est intéressant ; la notion d'entretien est cependant insuffisamment détaillée (le « qui fait quoi », durant quelle période ?)

La notion d'entretien n'est pas explicitement présente dans le tableau de la page 11. Nous lui avons préféré celle d'exploitation. La remarque est néanmoins fort pertinente, tant la question de l'entretien est un thème faiblement pensé y compris par la profession. Initialement l'absence d'entretien était même présentée comme un argument censé favoriser le développement de la technique, mais la sinistralité constatée a conduit à la ré-introduction de ce point dans la ré-écriture des règles professionnelles. Toutefois, les modalités de prise en charge de cet entretien, et en particulier les différentes formes possibles d'organisation du système d'acteurs ne sont aujourd'hui pas très claires. L'une des suites envisagées par les partenaires du projet TVGEP est de définir un nouveau projet articulant la thématique de la performance des TTV sur la durée et la thématique de leur entretien. Il s'agira notamment de s'interroger sur la capacité de la filière telle qu'organisée aujourd'hui à faire émerger un entretien de qualité permettant de garantir durablement les performances des produits de TTV.

---

<sup>4</sup> Cette toiture terrasse comporte une ligne de partage des eaux en son centre sur toute sa longueur. Les eaux de pluie sont donc renvoyées de part et d'autre, ce qui rend possible le compartimentage avec une évacuation unique par compartiment située en extérieur du bâtiment. Cette situation, favorable pour l'expérimentation, ne se rencontrait pas dans les autres bâtiments repérés, rendant de facto difficile, voire impossible, l'instrumentation nécessaire à l'expérimentation.

<sup>5</sup> - François Lassalle, Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 2008, Editions Le moniteur, 243 p., 2ème édition ;

- Emmanuel Houssin, Claude Guinaudeau et Jean-Claude Burdloff, 2012, Les toitures végétalisées : conception, réalisation et entretien, 2012, CSTB Editions, 95 p.

François Lassalle et Emmanuel Houssin travaillent chacun dans une grande entreprise d'étanchéité développant des produits de TTV et ont été tous deux présidents de l'ADIVET.

- Page 19, §1 : cette interdiction est désormais elle-même interdite par la loi. Le paragraphe évoqué a été modifié pour tenir compte de la remarque formulée. En effet, avec la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 qui prévoit que le permis de construire « ne peut s'opposer à l'utilisation de matériaux renouvelables ou de matériaux ou procédés de construction permettant d'éviter l'émission de gaz à effet de serre, à l'installation de dispositifs favorisant la retenue des eaux pluviales ou la production d'énergies renouvelables », il est aujourd'hui plus compliqué pour les collectivités ne désirant pas de toitures-terrasses de les refuser dès lors qu'elles sont végétalisées.
- Page 22, point 2, dernière phrase : « l'objectif... » est tout à fait discutable. Si par exemple l'objectif était « la biodiversité à tout prix », l'esthétique pourrait passer au second plan. Le texte a été modifié afin de ne pas laisser entendre que l'esthétique est le seul objectif envisageable.

### **Sur le livrable 2.2**

En préambule aux réponses aux questions sur le livrable 2.2, il convient de préciser que certains résultats ont été mis à jour suite à l'étude d'une période plus longue que celle présentée dans la version précédente. La structure n'a pas été modifiée mais les chiffres et figures ont été actualisés. Pour la partie modélisation, le développement, la paramétrisation et le calage du modèle FAVEUR sont un peu plus détaillés.

- Préciser si un entretien a eu lieu au cours des essais. Y a-t-il eu des obstacles à trouver d'autres toitures pour l'étude ?

Comme cela a été indiqué en réponse aux commentaires généraux, la végétation a évolué naturellement, sans entretien sur le banc expérimental du Cerema à Trappes, pour les besoins de l'expérimentation.

Les contraintes expérimentales sont assez fortes pour réaliser un suivi détaillé du bilan hydrique des toitures végétalisées. Une des plus grandes difficultés a été de trouver des gouttières d'évacuation des eaux pluviales accessibles et qui permettent de faire des mesures de ruissellement. Parmi la liste fournie par nos partenaires, un grand nombre de toitures a ainsi été éliminé. Ensuite, il a fallu trouver des toitures qui n'étaient pas trop encombrées par des dispositifs techniques (climatisations, sorbonnes...).

La précision sur l'entretien a été ajoutée p. 8 du livrable et les obstacles au choix des toitures sont brièvement introduits p. 5.

- La modélisation est sensible à l'épaisseur des substrats : peut-être serait-il intéressant de caractériser finement cette erreur en fonction des solutions constructives réelles.

L'épaisseur du substrat est en effet l'élément majeur dans la rétention des eaux pluviales. Il est donc tout à fait normal que la modélisation y soit sensible. Mais en quoi est-ce une erreur ?

Un important travail, commencé avec FAVEUR et toujours en cours, est de relier justement cette épaisseur et la capacité de rétention du substrat avec une capacité d'interception.

- Quelle incidence l'erreur de détermination de l'évapotranspiration a-t-elle sur les résultats de la modélisation ?

L'objectif était d'avoir un modèle simple et peu paramétré capable de reproduire le ruissellement des toitures végétalisées. Nous pensons que cet objectif est atteint avec FAVEUR. Comme tout modèle simple, un effet de compensation peut avoir lieu dans la représentation des différents processus. Par exemple, une trop forte évapotranspiration l'hiver peut être compensée par une plus faible évapotranspiration l'été mais le ruissellement être très bien estimé sur une année. Ceci peut être le cas avec FAVEUR. Il y a en particulier des périodes où l'évapotranspiration est trop faible et donc le substrat ne sèche pas assez ce qui peut entraîner des ruissellements surestimés. L'inverse est obtenu dans le cas d'une évapotranspiration trop forte. Cependant, les résultats obtenus avec FAVEUR montrent que globalement et même à 30 minutes, les résultats sont assez bons (cf. l'analyse des critères de Nash p. 31) ce qui était l'objectif voulu.

Un paragraphe précisant le rôle de la paramétrisation de l'évapotranspiration a été ajouté page 31.

· Page 19 : les valeurs mentionnées dans le texte en haut de page ne se retrouvent pas dans le tableau 4.

Cette partie a été mise à jour avec l'analyse d'une période légèrement plus longue (cf. pp. 20-21).

· Page 22 (haut) : quantité maximum d'eau théorique (CME).

La modification a été faite page 21

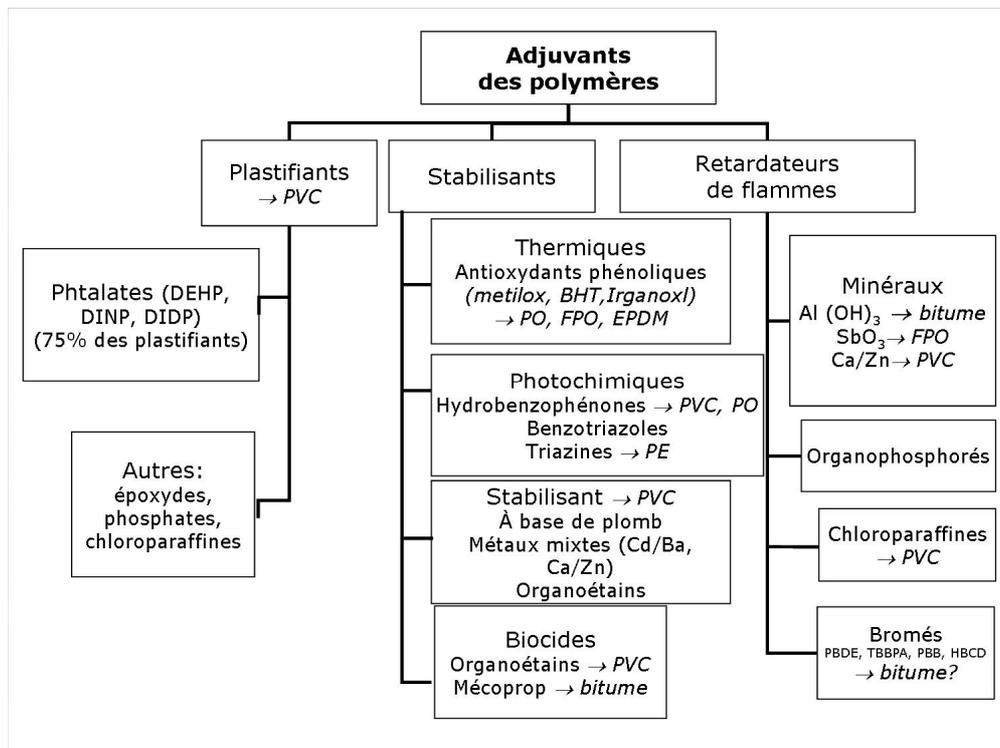
· Les solutions préconisées gagneraient à être mieux explicitées et justifiées dans la partie dévolue à la conclusion.

Un paragraphe explicatif a été ajouté p 32.

### Sur le livrable 3.1

· La partie bibliographique sur les polluants fait appel à des connaissances avancées en chimie ; un tableau récapitulatif gagnerait à être inclus pour les lecteurs moins initiés.

Le schéma suivant, synthétisant les types d'adjuvants pouvant entrer dans la composition des différents matériaux synthétiques des structures de végétalisation, et les composés chimiques susceptibles d'être émis par ces matériaux a été ajouté en 2.4 dans le livrable 3.1.



· En conclusion : quelle structure choisir, quel entretien (fertilisant) préconiser ?

En ce qui concerne les matériaux synthétiques entrant dans la structure des TTV (étanchéité, drainage, couche filtrante), la synthèse bibliographique met en évidence la présence d'une variété d'adjuvants, dont certains présentent un potentiel éco-toxicologique. Les données techniques sur la présence effective de ces composés dans les matériaux commercialisés sont quasi inexistantes. Les données scientifiques sur les facteurs de transfert dans les eaux de ruissellement sont extrêmement lacunaires. Les essais réalisés dans le cadre du projet TVGEP, confirment la présence ubiquiste des deux types de micropolluants organiques recherchés (bisphénolA et alkylphenols) et leur transfert dans les eaux de ruissellement à des concentrations parfois significatives. Le transfert vers les eaux de ruissellement d'autres micropolluants organiques est donc également à craindre. Ces essais démontrent également la

très grande variabilité des matériaux en termes de composition (teneur du composé recherché dans le matériau) et comportement émissif (facteur d'émission du composé dans les eaux de ruissellement). Le choix des matériaux entrant dans la composition des structures devrait donc prendre en considération ce risque de contamination des eaux de ruissellement. Cependant, les éléments actuellement disponibles ne permettent pas d'orienter ces choix de manière objective. La mise en place de procédures standardisées et systématiques de caractérisation des matériaux vis-à-vis de leur potentiel d'émissions de composés dans les eaux de ruissellement est préconisée. La nature des essais à mettre en place n'a pas été définie dans ce projet et nécessite une réflexion complémentaire.

En ce qui concerne les émissions liées aux couches de substrats et de végétaux, les essais réalisés dans le cadre de TVGEP confirment des résultats cités dans la littérature. Au cours des premiers mois après la mise en œuvre de la toiture, les eaux de percolation présentent une forte coloration, et des concentrations importantes en carbone organique et nutriments. Ces concentrations diminuent très rapidement au cours de la 1<sup>ère</sup> année, pour atteindre des niveaux relativement faibles. Des émissions persistantes peuvent cependant être observées pour le carbone organique et le phosphore. Les pratiques de fertilisation des toitures sont susceptibles de générer des concentrations importantes d'azote et surtout de phosphore dans ces eaux.

En conséquence, il convient d'avoir recours à un usage raisonné de la fertilisation. Celle ne devrait pas être pratiquée de façon systématique et répétitive, mais uniquement lorsque l'inspection de la toiture en démontre le besoin. Les quantités de fertilisant apportées doivent être modulées en fonction du type plantes et de leurs besoins.

Enfin, les substrats utilisés en végétalisation de toiture peuvent contenir des matériaux d'origine diverses, y compris dans certains cas des matériaux recyclés. Là encore des procédures standardisées de lixiviation de ces substrats devraient être développées et appliquées de façon systématique à tous les produits commercialisés afin de mieux qualifier le risque de lessivage par les eaux pluviales.

L'ensemble de ces éléments a été ajouté en conclusion du livrable L 3.1.

### ***Sur les livrables 4.1 et 4.2***

· La robustesse de ce modèle a-t-elle été évaluée ?

Faveur-modèle a été calé à partir des données du banc d'essai du Cerema à Trappes. Le modèle est apparu assez robuste dans le sens où : i) les performances en phase de validation sont proches de celles en phase de calage, ii) les paramètres calés ont un sens physique qui est cohérent d'un compartiment à l'autre<sup>6</sup>.

· Page 12 : concernant le choix des 2 seules formules < 50 mm et > 50 mm, comment intervient le drainage hydrorétenteur ? quelle validité au-delà de 150 mm ? l'exploitation d'autres régimes pluviométriques représente-t-elle une complexité dans le modèle ?

La version 1.0 de Faveur-outil est applicable uniquement pour des couches de drainage non -hydro-rétentrices et des substrats peu épais (inférieur ou égal à 15cm). Ces limites sont précisées dans le livrable 4.1/4.2 (p. 15), et constituent de potentielles perspectives pour les versions suivantes.

L'usage d'autres régimes pluviométriques nécessite juste une longue chronique de pluie et d'évapotranspiration potentielle (>10 ans si possible) à un pas de temps fin (5-6 min). L'hypothèse est faite que Faveur-modèle est aussi performant pour ces autres régimes que pour le régime d'Île-de-France où il a été évalué.

· Page 13 : est mentionnée une CME de 15% dans le texte alors que le tableau indique 20%.

Erreur corrigée

---

<sup>6</sup> Des précisions sont apportées dans la communication suivante : Ramier, D., E. Berthier, D. Gallis, A. Dussuchale, P. Pinta, P. A. Versini and B. De Gouvello (2013). Analyse du fonctionnement hydrologique de toitures végétalisées: observations et modélisation. Actes du colloque INOGEV & GDEP« Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ? », Nantes, 3-5 décembre 2013, pp. 40-50.

· Une conclusion partielle sur cette partie aurait été appréciée.  
Le paragraphe 5. du livrable 4.1/4.2 a été renforcé, en particulier la partie conclusive sur le travail de Faveur-outil.

### **1.1.2 Sur le livrable 4.3**

· Page 6 : on ne perçoit pas que le rôle potentiel d'une couche de drainage hydro-rétentrice (ou d'un drainage à réservoir) soit pris en compte dans le « module TTV » (§ 2.2)

Le module TTV comprend 3 réservoirs, chacun représentant le comportement d'une couche de la toiture végétalisée : végétation, substrat et drainage. Deux types de toitures ont été testées pour ce livrable (SE3Y et SE15Y). Ces toitures ont bien une couche de drainage mais qui n'est pas hydro-rétentrice (seul le compartiment SE3Z a une couche de drainage hydro-rétentrice). Le rôle potentiel d'une couche de drainage hydro-rétentrice n'a donc pas été testé dans ce travail. Ce point a été précisé de manière plus explicite dans la nouvelle version du rapport, page 5, juste avant l'équation (4).

· Page 10 : « variable d'ajustement de rang 2 » - qu'en serait-il en cas de configurations de plus fortes épaisseurs ?

Nous avons vu dans ces travaux qu'à l'échelle urbaine le potentiel de végétalisation prévalait sur l'épaisseur de substrat. Si l'on souhaite que les toitures végétalisées impactent véritablement sur le ruissellement urbain, il faudrait couvrir en masse de nombreux bâtiments plutôt que d'épaissir les substrats existants. Il faut aussi garder en tête que la surface de toits en ville excède rarement 50% de la surface totale. D'où l'expression « variable de rang 2 ». Une note de bas de page a été rajoutée dans le rapport page 10 pour apporter cette précision.

## LIVRABLES

- N°1.1 : **Note sur le panorama des techniques de TTV et choix des structures, 18 p.**
- N°1.2 : **Les facteurs favorisant et les freins au développement des TTV dans les constructions, 55 p.**
- N°2.1 : **Bibliographie et plan d'expérience sur le comportement hydrique des toitures végétalisées, 17 p.**
- N°2.2 : **Suivi hydrique de toitures végétalisées et modélisation, 33 p.**
- N°3.1 : **Potentiel polluant des matériaux mis en œuvre dans les TTV, 64 p.**
- N°3.2 : **Qualité des eaux de ruissellement issues des toitures végétalisées – synthèse bibliographique et suivi expérimental, 51 p.**
- N°4.1/4.2 : **Déclinaison opérationnelle des résultats du projet : outil d'évaluation des performances hydrologiques d'une TTV, 16 p.**
- N°4.3 : **Impact de la diffusion des TTV à l'échelle d'un bassin versant, 28 p.**

Note : afin de faciliter au lecteur le repérage dans le document, la numérotation des pages de chaque livrable intègre le numéro du livrable lui-même. (ainsi, par exemple : L 3.2 – 12 indique la page 12 du livrable N°3.2.)

\*       \*

      \*



PROJET



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)**

**Appel à projets 2009**

**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°1  
LIVRABLE N°1.1  
Note sur le panorama des techniques de TTV et  
choix des structures**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :

Youssef Nohra, Marie-Christine Gromaire (partie 1),  
Bernard de Gouvello (partie 2)

Organismes impliqués :

CSTB, LEESU, CETE-IF, ADIVET

Coordination Partie n°1

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

Coordination TVGEP :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

# Sommaire

<i>Introduction</i> .....	2
<b>1</b> <i>Partie 1 : Structure des Toitures Terrasses Végétalisées</i> .....	3
<b>1.1</b> <i>Typologie des toitures végétalisées</i> .....	3
1.1.1 <i>Végétalisation intensive (désigne également la Terrasses Jardin):</i> .....	3
1.1.2 <i>Végétalisation semi intensive :</i> .....	3
1.1.3 <i>Végétalisation extensive :</i> .....	3
<b>1.2</b> <i>Les constituants d'une TTV extensive :</i> .....	4
1.2.1 <i>Le revêtement d'étanchéité :</i> .....	4
1.2.2 <i>La couche de drainage et la couche filtrante :</i> .....	7
1.2.3 <i>Le substrat et la végétation</i> .....	9
1.2.4 <i>Le système « Pack » :</i> .....	10
<b>1.3</b> <i>Ouvrages particuliers :</i> .....	11
1.3.1 <i>La zone stérile :</i> .....	11
1.3.2 <i>Dispositif de séparation :</i> .....	11
1.3.3 <i>Relevés d'étanchéité :</i> .....	12
1.3.4 <i>Evacuation des eaux pluviales :</i> .....	12
<b>2</b> <i>Partie 2 : Choix des solutions à tester dans le cadre de l'étude</i> .....	13
<b>2.1</b> <i>Paramètres à prendre en compte</i> .....	13
<b>2.2</b> <i>Principes adoptés pour le choix des solutions</i> .....	13
<b>2.3</b> <i>Les solutions retenues</i> .....	14
<b>2.4</b> <i>Précisions apportées par l'ADIVET sur les substrats et drainages à mettre en œuvre...</i>	16
<i>Listes des figures et des tableaux</i> .....	17
<i>Bibliographie</i> .....	18

## **INTRODUCTION**

Cette note est organisée en deux parties :

La première s'attache à décrire la structure des toitures terrasses végétalisées (TTV). Elle est subdivisée en trois : une présentation typologique des TTV, le détail des éléments entrant dans la constitution d'une TTV extensive ; et, enfin, la description de quelques ouvrages particuliers mis en œuvre sur des TTV (zone stérile, relevés d'étanchéité...)

La seconde présente le choix des structures retenues dans le cadre de cette étude. Figurent d'une part les décisions prises en la matière dans le cadre de la réunion de travail du projet TVGEP qui s'est tenue le 25 mai 2010 sur ce thème spécifique, et, d'autre part, les précisions apportées par l'ADIVET comme suite de ladite réunion.

# 1 PARTIE 1 : STRUCTURE DES TOITURES TERRASSES VEGETALISEES

Un système de végétalisation de toiture est un ensemble de matériaux et de végétaux mis en place sur une toiture ou toiture-terrasse. La toiture terrasse jardin traditionnelle peut être considérée comme l'ancêtre de la végétalisation des toitures modernes.

## 1.1 Typologie des toitures végétalisées

Nous avons trois types de toitures végétalisées:

### 1.1.1 Végétalisation intensive (désigne également la Terrasses Jardin):

Ce type de végétalisation se caractérise par une épaisseur moyenne de substrat de 50 cm, pouvant atteindre 1 m d'épaisseur. Le substrat utilisé est de la terre naturelle et présente une diversification de plantation (Figure 1). L'entretien de ce type de toiture est très important, dû à la diversité de la végétation et du type du substrat (terre) utilisés (Lassalle 2008)(site1).

### 1.1.2 Végétalisation semi intensive :

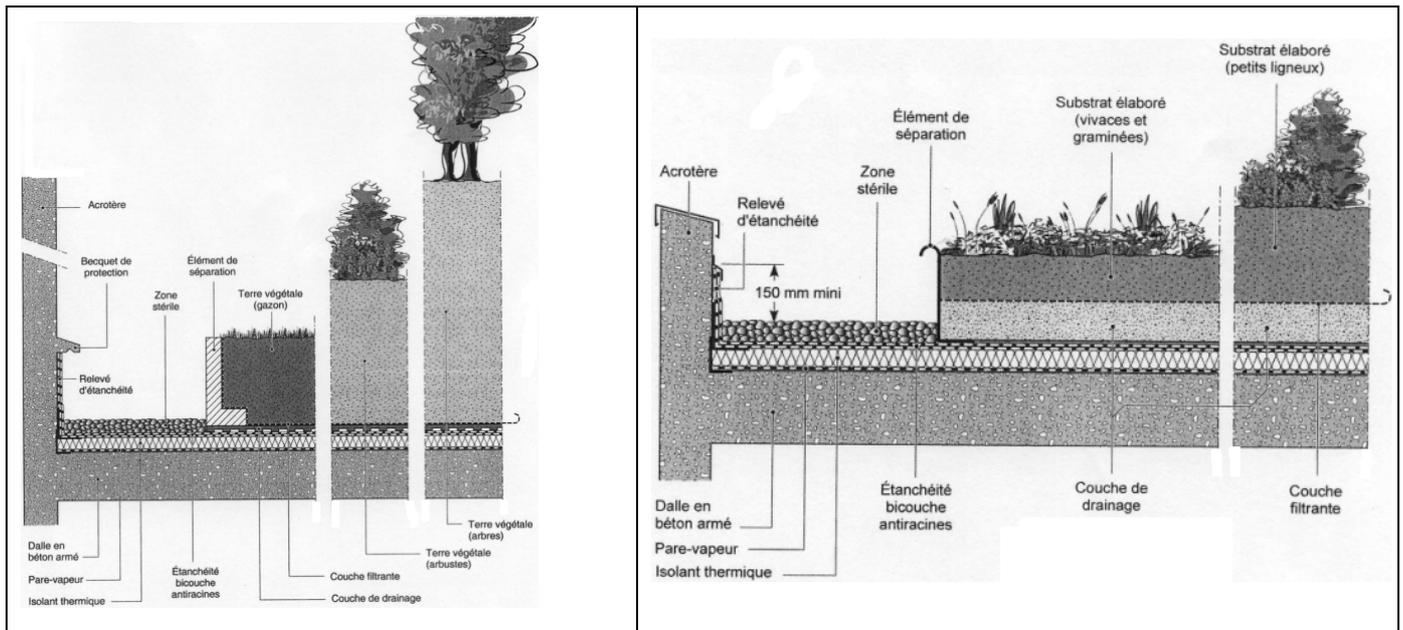
Dans ce type de végétalisation, le complexe de culture présente une épaisseur moyenne de 25 cm, atteignant 40 cm au maximum. La nature du complexe est proche de la terre naturelle, mais c'est un substrat qui est mis en place et non pas une terre naturelle (Figure 1). Le type de plantation est moins diversifié par rapport à celui de l'intensif. L'entretien est modéré, pas aussi important que celui de la végétalisation intensive (Adivet, CSFE et al. 2007; Lassalle 2008) (site1).

### 1.1.3 Végétalisation extensive :

La végétalisation extensive est caractérisée par un substrat léger à dominante minérale, ayant une épaisseur qui varie entre 4 à 15 cm. Le type de végétation pouvant être utilisé est restreint (sedums, succulents...), dans ce type de toiture végétalisée.

L'entretien est faible, voire très faible, du fait du type de plantation utilisée et de l'épaisseur du substrat (Adivet, CSFE et al. 2007; Lassalle 2008) (site1)..

Dans notre travail, nous allons nous intéresser au cas de la végétalisation extensive, et ayant comme pente  $\leq 5\%$ .



**Figure 1: Végétalisation intensive, extensive et semi-intensive (Lassalle 2008)**

A gauche, une coupe type d'une végétalisation intensive (terrasse jardin) avec les composants d'une toiture végétalisée; à droite, une coupe type d'une végétalisation extensive et semi intensive

## 1.2 Les constituants d'une TTV extensive :

Une toiture végétalisée est constituée de différents éléments (Figure 2). Certains sont en contact avec l'eau ruisselant sur les toitures, ce sont ces éléments qui nous intéressent, et d'autres ne le sont pas. Les éléments qui ne sont pas en contact avec l'eau sont l'élément porteur (en béton, en bois, en acier) et le système d'isolation (pare vapeur, isolant thermique) à l'exception des cas traités en isolation inversée.

Les éléments qui sont en contact avec l'eau ruisselant sur les toitures sont: le revêtement d'étanchéité (traité dans la partie I), la couche anti-racine, la couche de drainage, la couche filtrante, le substrat et la plantation (Adivet, CSFE et al. 2007; Lassalle 2008).

### 1.2.1 Le revêtement d'étanchéité :

A la différence des toitures terrasses classiques (A), le revêtement d'étanchéité mis en place sur une toiture terrasse végétalisée, doit présenter un caractère anti-racine pour empêcher la perforation ou bien le contact des racines avec la couche d'étanchéité (B).

### *(A) La fonction d'étanchéité*

L'étanchéité est mise en place pour éviter l'infiltration de l'eau à l'intérieur du bâtiment, et elle est mise en œuvre sur un support d'étanchéité qui peut être l'élément porteur (en béton, bois ou en acier), ou le système d'isolation.

On trouve trois grandes familles d'étanchéités utilisées pour la réalisation des toitures terrasses :

- les étanchéités coulées en asphalte
- les membranes d'étanchéités bitumineuses
- les membranes d'étanchéités synthétiques

Avant les années 1970, nous avons les étanchéités coulées en asphalte et les membranes bitumineuses oxydées qui étaient les plus appliqués et les plus répandus. Puis au début des années 1970, les membranes bitumineuses modifiées sont apparues, qui ont augmenté la fiabilité des étanchéités de toiture. Le mélange entre le bitume et les polymères élastomères SBS (Styrène-Butadiène-Styrène), ou les plastomères APP (polymère polypropylène atactique) produit un des membranes très légères et plus flexibles, extrêmement résistantes aux effets des variations de température et aux différents facteurs de vieillissement (Lassalle 2008).

**Tableau 1: Répartition des ventes de produits d'étanchéité toiture en entretien rénovation en France, par type de matériau, 2001-2005 (MSI 2006)**

Type de Matériau	2001	2002	2003	2004	2005
Membranes Bitumineuses	75%	75%	74%	74%	74%
Membranes Synthétiques	11%	12%	13%	13%	14%
Asphalte	11%	10%	10%	10%	10%
SEL	3%	3%	3%	3%	2%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

**Tableau 2: Répartition des ventes de produits d'étanchéité toiture en construction neuve en France, par type de matériau, 2001-2005 (MSI 2006)**

Type de Matériau	2001	2002	2003	2004	2005
Membranes Bitumineuses	76%	76%	75%	75%	75%
Membranes Synthétiques	15%	16%	18%	18%	19%
Asphalte	8%	7%	6%	6%	5%
SEL	1%	1%	1%	1%	1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Puis avec le temps nous avons vu une nouvelle application dans l'étanchéité des toitures avec l'apparition des membranes synthétiques et des étanchéités liquides (SEL) dont l'application est plus restreinte. Et nous remarquons l'évolution du marché des revêtements d'étanchéité en France entre 2001 et 2005 (Tableau 1 et Tableau 2). Les membranes bitumineuses représentent 75 % du marché, dont, selon MSI, les membranes bitumineuses SBS représentaient 80% du marché des membranes bitumineuses en 2005 et les membranes bitumineuses APP comptaient pour les 20% restants (MSI 2006). Les membranes synthétiques qui concurrencent actuellement les membranes bitumineuses représentent 16 % du marché, dont, selon MSI, les membranes bitumineuses PVC P représentaient 84% du marché des membranes synthétiques en 2005, et les membranes synthétiques FPO et EPDM comptaient respectivement pour 11% et 3% du total au cours de la même année. L'application de ces membranes augmente avec les années, pour remplacer l'asphalte (MSI 2006).

L'utilisation de l'étanchéité asphalte diminue lentement, mais à long terme ce type de revêtement d'étanchéité ne va plus être appliqué. Pour les revêtements d'étanchéités liquides, ils sont récemment introduits au marché, mais leur application est encore restreinte et représente seulement 2 % (MSI 2006).

Les membranes synthétiques sont bien développées, et à long terme vont concurrencer les membranes bitumineuses. Les membranes synthétiques sont intéressantes du fait de leur flexibilité, leur légèreté, leur faible épaisseur, leur coût sur le long terme (MSI 2006).

#### *(B) La fonction anti-racine*

La fonction anti-racine est intégrée dans les revêtements d'étanchéité. Les fournisseurs des revêtements d'étanchéité emploient dans leurs membranes le Preventol B2 (polyglycolester du mécoprop), le Preventol B5 (octylester du mécoprop) ou l'Herbitect (éthylhexylester du mécoprop), dont la fonction anti-racine est assurée par mécoprop (Bucheli, Muller et al. 1998;

Burkhardt, Zuleeg et al. 2010). Ces agents anti-racines sont impliqués dans les membranes bitumineuses.

La norme NF EN 13948 définit la caractéristique de résistance à la pénétration des racines des membranes d'étanchéité.

### *1.2.2 La couche de drainage et la couche filtrante :*

**La couche de drainage** assure l'écoulement des eaux vers les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales, évitant ainsi l'asphyxie des racines. La couche de drainage se trouve entre le revêtement d'étanchéité et le substrat, séparée de ce dernier par un filtre, et l'épaisseur minimale de cette couche dépend de la hauteur maximale des flaches d'eau observés sur la toiture, Sa perméabilité doit être supérieure ou égale à 0,3 cm/s.

Les matériaux pouvant constituer cette couche sont soit des plaques de polystyrène moulées ou alvéolées, soit des agrégats minéraux poreux (pouzzolane, argile expansée, roche volcanique...), soit des éléments synthétiques pouvant former ou non une sorte de réserve d'eau, comme des bacs en polyéthylène recyclé parfois aussi en haute densité. Les matériaux les plus utilisés dans les végétalisations extensives sont les polystyrènes et les polyéthylènes recyclés. Les différents types de couche de drainage sont représentés dans la Figure 2.

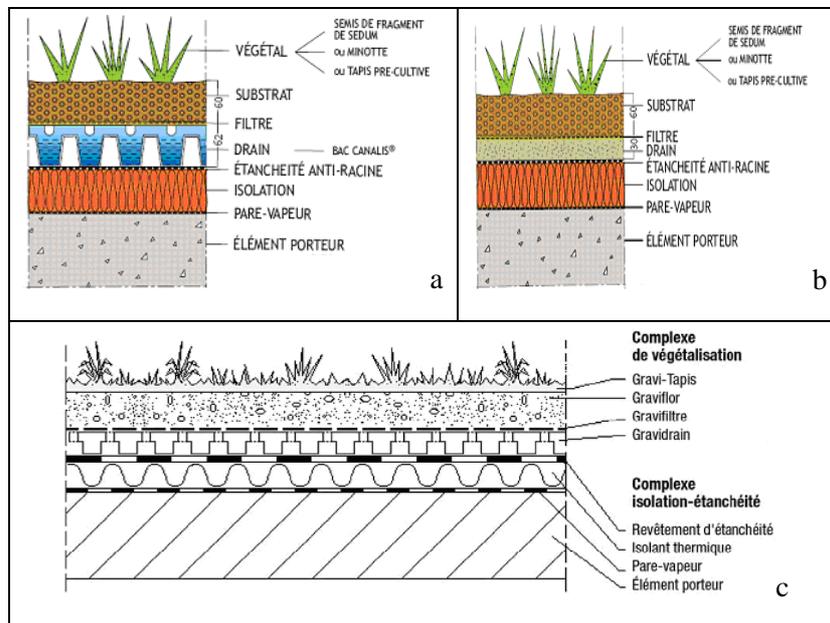
**La couche filtrante** retient les particules fines du substrat et s'interpose entre le substrat et la couche drainante pour éviter son colmatage. Elle retient des particules de diamètre supérieur à 0.063 mm. Le filtre est soit un géotextile en propylène non-tissé, soit un géotextile en polystyrène non-tissé (Adivet, CSFE et al. 2007; Lassalle 2008).

Il existe des cas, généralement pour des pentes supérieures à 5 %, où la couche de drainage et la couche filtrante sont absentes, et la fonction de drainage serait assurée alors par le substrat lui-même, grâce au matériel minéral qui le contient. Dans ce cas on parle de système de végétalisation monocouche. En présence d'une couche de drainage avec filtre on parle d'un système de végétalisation bicouches ou multicouches (Figure 3).

**Tableau 3: Quelques produits utilisés dans le marché en France pour les végétalisation extensives à pente  $\leq 3\%$**

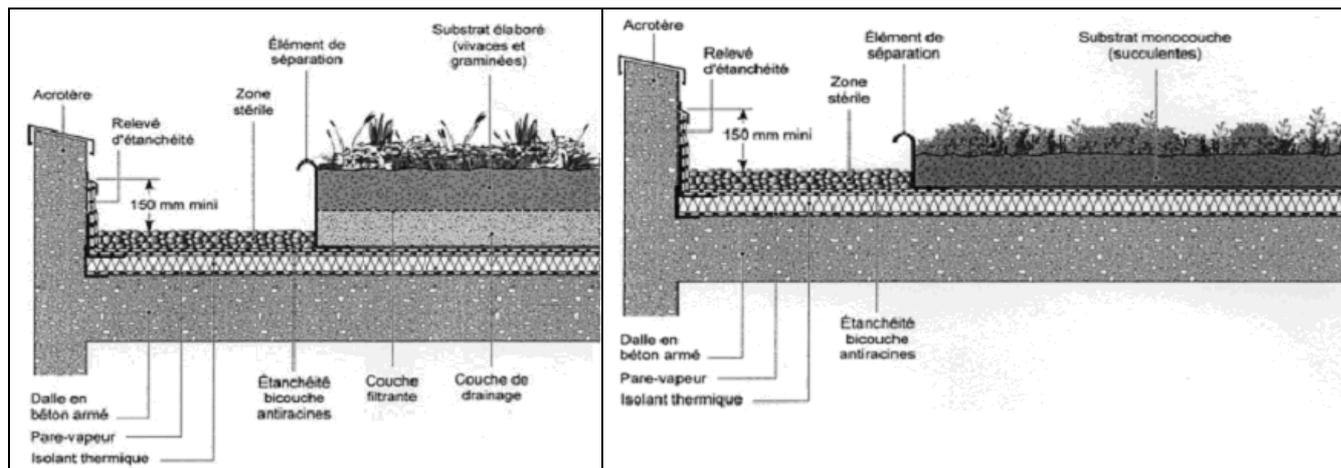
Type	Nom du produit (fournisseur)	Epaisseur	Granulométrie (si existe)	Rétention de l'eau (si présente)
Polyéthylène recyclé	Floradrain FD25 (ECOVEGETAL)	2,5 cm	—	4 l/m <sup>2</sup>
Alvéolés polyéthylène haute densité (PEHD)	Bac Canalis (SMAC)	5 cm	—	15,5 l/m <sup>2</sup>
Polyéthylène recyclé	EcoDrain (PRIEURE)	2,5 cm	—	—
Granulats minéraux: pouzzolane	ID Lite PZ (PRIEURE)	4 cm	5 – 15 mm	5,1 l/m <sup>2</sup>
Polystyrène moulé	Mepdrain (MEPLE) Gravidrain (SIPLAST)	4 cm	—	—

Le produit EcoDrain, entre ces cinq produits, il est le seul à avoir un filtre associé, alors que pour les autres, un filtre est posé pour assurer la filtration.



**Figure 2: Couches de drainage de TTV**

a. La couche de drainage représentée dans cette figure, représente aussi une propriété de rétention de l'eau, avec la fonction du drainage, c'est le cas du Bac Canalis (SMAC 2007); b. la couche de drainage est en granulats minéraux (pouzzolane) assurant la fonction du drainage et la rétention de l'eau, mais moins efficace que la première en tant que rétention (SMAC 2007); c. la couche de drainage assure seulement la fonction du drainage (SIPLAST 2007a)



**Figure 3: Systèmes de végétalisation bicouche et monocouche**

A gauche, nous avons la représentation du système bicouche; à droite nous avons le système monocouche (Lassalle 2008)

### 1.2.3 Le substrat et la végétation

**Le substrat** permet l'ancrage des racines, la rétention en eau et la nutrition des plantes sélectionnées, pour assurer leur pérennité. Comme nous nous intéressons dans notre travail à la végétalisation extensive, l'épaisseur du substrat varie alors entre 4 à 15 cm.

Les constituants du substrat peuvent être un mélange d'environ 80% de matières minérales (pierre ponce, pouzzolane, argile expansée, schiste expansé, roches volcaniques...) et de l'ordre de 20% de matières organiques (tourbes...), afin d'assurer une bonne nutrition à la végétation avec une croissance limitée pour garder le même profil végétal que celui de départ. Le substrat monocouche contient en plus des pouzzolanes, qui permettent de compenser l'absence de la couche de drainage en s'affranchissant de la fonction filtre (Figure 3) (Adivet, CSFE et al. 2007). Le système multicouche est plus appliqué que celui monocouche. Nous remarquons (Tableau 4) qu'il y a des différences, concernant les caractéristiques physiques, entre les deux substrats, la vitesse de perméabilité est plus grande dans le substrat monocouche que dans le multicouche, grâce aux constituants de chaque substrat qui influent aussi la capacité maximale de rétention d'eau qui est plus importante dans le cas de multicouche. Alors que pour la porosité à l'air, le pH, la granulométrie et la teneur en matière organique, nous remarquons une légère différence entre les deux types de substrat.

Au moment de l'entretien, On ajoute, dans les deux substrats, des fertilisants pour soutenir les développements des végétaux (Adivet, CSFE et al. 2007).

**Tableau 4: Caractéristiques des substrats extensifs multicouche et monocouche (Adivet, CSFE et al. 2007)**

Caractéristiques	Unité	Substrats multicouches extensifs	Substrats monocouches extensifs
Perméabilité	cm/s	≥ 0,001	≥ 0,1
pH (CaCl <sub>2</sub> )	—	6,5 à 8	6,5 à 9,5
Rétention maximale en eau (CME)	% vol	≥ 35	≥ 20
Porosité pour l'air à CME	% vol	≥ 10	≥ 10
Fines (< 0,063mm)	% massique	≤ 15 %	≤ 7 %
Matière organique	% de masse sèche si D à sec ≤ 0,8 t/m <sup>3</sup>	≤ 8 %	≤ 6 %
	% de masse sèche si D à sec > 0,8 t/m <sup>3</sup>	≤ 6 %	≤ 6 %
Granulométrie (voir annexe II C)	mm	0 à 20 (0 à 2: sables ; 2 à 20: gravier)	0 à 20 (0 à 2: sables ; 2 à 20: gravier)

**La végétation** appliquée dans les systèmes extensifs, se concentre sur l'association des sedums, graminées et des vivaces. Ils sont mis en places soit par des semis (graines mises dans le substrat) pour les graminées et les vivaces, soit sous forme de fragments de sedums, soit sous forme de dalles (ou tapis) préculтивées de sedums (Tableau 4) et ce type est le plus fréquemment appliqué (ECOVEGETAL 2008).



**Figure 4: Dalles de sedums préculтивées (ECOVEGETAL 2008)**

#### 1.2.4 Le système « Pack » :

Le système Pack (Figure 5) est un système complet de végétalisation extensive, qui assure dans un seul module les fonctions de drainage, filtration, développement de la végétation grâce à un substrat inclus aussi dans ce système. Ce système est mis en place directement sur le revêtement d'étanchéité (PRIEURE 2009).

En France, nous avons remarqué qu'il y a des fournisseurs qui ont déjà adopté ce type de végétalisation dont Le PRIEURE avec HYDROPACK, MEPLÉ avec MANUPLACK, SMAC avec TECFLOR et SIPLAST avec Graviland PACK.

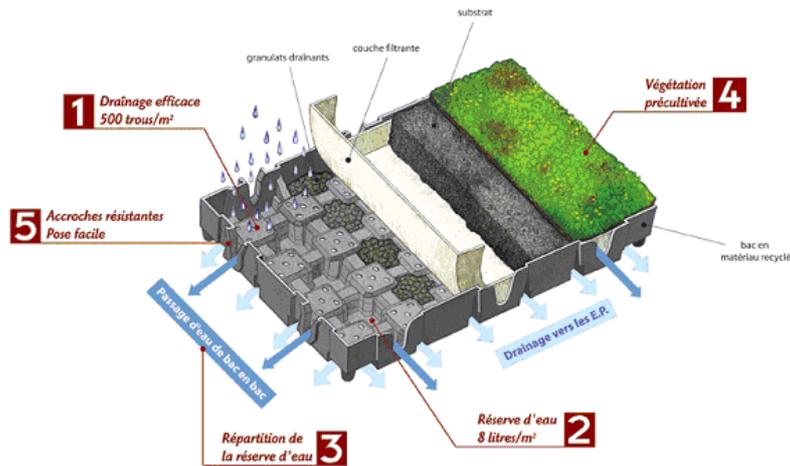


Figure 5: Représentation du système "Pack" (PRIEURE 2009)

### 1.3 Ouvrages particuliers :

#### 1.3.1 La zone stérile :

La zone stérile est un espace aménagé sur la toiture (Figure 1), dont le but est de faciliter l'accès aux relevés d'étanchéité et aux évacuations d'eaux pluviales, pour l'entretien. Cette zone n'est pas considérée comme zone accessible pour la circulation. Elle a une largeur de 0,40 m en présence du complexe de végétalisation, et dans certains cas cette zone est absente.

Le revêtement d'étanchéité est le même revêtement que celui de la zone végétalisée, alors le revêtement d'étanchéité possède une fonction anti-racine dans la zone stérile aussi. Cette zone possède une protection rapportée, dont celle la plus appliquée c'est la protection par une couche de gravillons ayant une granulométrie supérieure à 15 mm, éventuellement recouverts de dalles de béton préfabriquées.

La zone stérile est séparée de la zone végétalisée par un dispositif de séparation (Adivet, CSFE et al. 2007).

#### 1.3.2 Dispositif de séparation :

Les dispositifs de séparation sont utilisés pour séparer la zone stérile de la zone végétalisée. Ils ont aussi comme rôle de maintenir la couche de culture de la zone de végétalisation.

Le dispositif de séparation utilisé dépend du dispositif de drainage de l'eau. Si la couche de drainage est continue sous le dispositif de séparation, alors il peut être formé par des bordures ou murets en béton ou en brique. Si la fonction de drainage est assurée par le substrat ou si la couche drainante est interrompue, le matériel utilisé est alors constitué de bandes ajourées avec association d'un filtre qui est identique à celui utilisé dans le complexe de végétalisation.

Ces bandes sont plutôt métalliques, en alliage d'aluminium, en acier inoxydable ou en zinc (Adivet, CSFE et al. 2007).

### *1.3.3 Relevés d'étanchéité :*

Le relevé d'étanchéité est de même type que l'étanchéité utilisée pour le revêtement de la toiture. Il a une hauteur minimale de 15 cm, il est généralement autoprotégé, ou bien protégé par des bandes métalliques qui peuvent être en aluminium, ou acier inoxydable.

### *1.3.4 Evacuation des eaux pluviales :*

Les évacuations des eaux pluviales se situent généralement dans la zone stérile. Nous avons les entrées d'eaux pluviales, constituée d'une platine et d'un moignon, et des trop-pleins, qui se raccordent sur les descentes d'eau pluviale.

Les entrées d'eaux pluviales et les trop pleins peuvent être : en plomb, en acier inoxydable, en cuivre, en aluminium ou en autre matériau adapté pour le cas des membranes synthétiques, en PVC à titre d'exemple (CANEPARO 1979). Les tuyaux assurant la descente de l'eau, sont formés des mêmes éléments que les gouttières (CANEPARO 1979).

Les trop-pleins ou boîtes à eau récupèrent les eaux excédentaires afin d'éviter l'inondation des toitures.

## 2 PARTIE 2 : CHOIX DES SOLUTIONS A TESTER DANS LE CADRE DE L'ETUDE

### 2.1 Paramètres à prendre en compte

En phase avec la structure des toitures végétalisées présentée en premier partie de ce rapport, la discussion qui s'est tenue lors de la réunion de travail du 25/05/2010 a tout d'abord conduit à lister l'ensemble des paramètres à prendre en compte.

Cela a abouti à la liste suivante :

- nature des végétaux,
- nature et épaisseur du substrat,
- présence ou non d'une couche filtrante (i.e. monocouche ou multicouche),
- nature et épaisseur de la couche de drainage,
- existence ou non d'un dispositif complémentaire de rétention.

### 2.2 Principes adoptés pour le choix des solutions

Afin d'organiser la mise en cohérence de tous ses paramètres, trois principes ont été adoptés :

- **1er principe** : le nombre et le choix des solutions techniques à tester est conditionné par le dispositif expérimental central, à savoir le banc d'essai vrai grandeur mis en œuvre sur le bâtiment 9 du CETE-IF<sup>1</sup>. Les solutions retenues sur ce banc d'essai seront également celles qui feront l'objet de tests à l'échelle des petits dispositifs de 1 m<sup>2</sup> (cf. plans d'expérience respectif des parties 2 et 3 du projet dans les livrables correspondant). La suite du raisonnement conduisant au choix des solutions tient donc compte des contraintes induites par les caractéristiques du bâtiment 9.

- **2ème principe** : afin d'avoir des portions de toitures suffisamment grandes et suffisamment nombreuses l'on opte pour le compartimentage de la toiture en 8 portions, dont 7 pourront être utilisés (le 8ème étant le plus affecté par l'ensoleillement). Le 7ème compartiment sera

---

<sup>1</sup> Plusieurs bâtiments du site ont été envisagés, mais après une visite sur le terrain avec les professionnels du secteur, il est apparu que seul le bâtiment n°9 pouvait être adapté pour l'expérimentation. Sa géométrie permettait en effet assez facilement la réalisation de compartiments indépendants. Une contrainte subsistait néanmoins : la présence d'une cheminée créant une ombre plus ou moins importante selon la fraction de la toiture concernée. C'est pourquoi, le CETE a réalisé un travail de simulation sur l'ensoleillement relatif du toit concerné. Il est apparu que l'ensoleillement demeurerait assez régulier sur l'ensemble du toit, l'effet de masque de la cheminée étant finalement assez cantonné à la fraction de la surface directement attenante à la cheminée. Il a donc été décidé ne pas utiliser cette partie et de consacrer le reste de la toiture à l'expérimentation.

lui-même sous-divisé en 2 parties (notées A et B) et sera consacré aux solutions étanchéité nue et étanchéité + gravier seul

- **3ème principe** : Le principe retenu est de définir une solution type de référence faisant consensus qui est mise en œuvre sur l'une des portions de la toiture. Les autres portions disponibles de la toiture sont alors dotées de variantes de cette solution de référence. L'on fait varier un ou deux paramètres à la fois/solution de référence.

- **4ème principe** : La composition des différents composants de la solution de référence et des variantes doit faire l'objet d'un consensus de la part des parties prenantes au projet. Afin de garantir la représentativité des solutions testées, la définition des caractéristiques techniques de certains composants a été confiée à l'ADIVET.

## 2.3 Les solutions retenues

Dans le cadre de la réunion du 25/05/2010, il a été possible de définir les solutions retenues ainsi leur emplacement prévus sur le toit du CETE-IF. Le tableau ci-dessous synthétise ces décisions.

**Tableau 5: Détail des différentes solutions retenues**

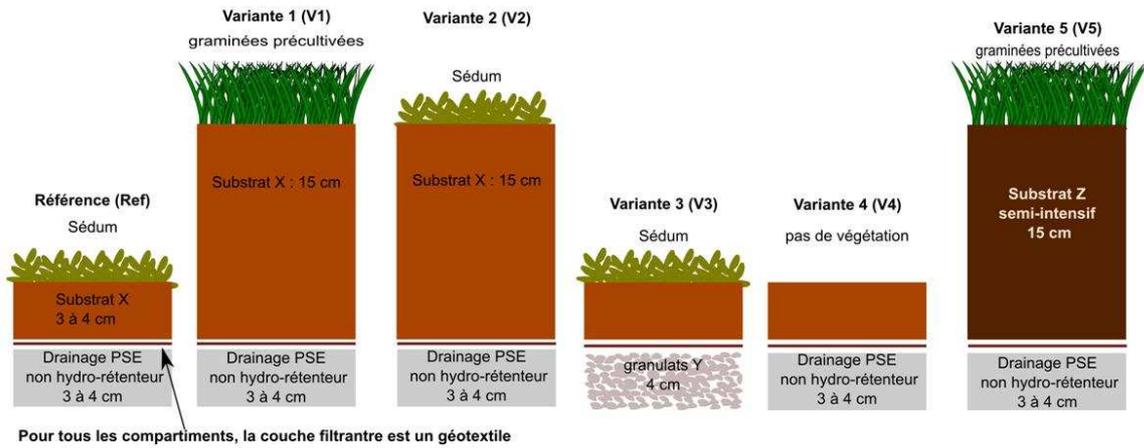
(source : Compte-rendu réunion TVGEP du 25/05/2010)

Nom de solution testée	Type	Emplacement	Description solution
Référence	extensif	compartiment 2	Végétalisation : sedum précultivé Substrat : X <sup>(*)</sup> , de 3 à 4 cm, encore à préciser Couche filtrante : géotextile Drainage : PSE (Polystyrène expansé), 3 à 4 cm (PSE non hydro-rétenteur)
variante 1 : graminées	extensif	compartiment 5	Végétalisation : graminées précultivées (dominante) Substrat : X, 15 cm (obligation d'épaissir le substrat pour accueillir les graminées) Reste : idem référence
variante 2 : épaisseur substrat	extensif	compartiment 1	Idem Référence hormis épaisseur substrat X : 15 cm
variante 3 : drainage	extensif	compartiment 3	Idem Référence hormis Drainage : granulat Y <sup>(†)</sup> , 4 cm
variante 4 : nu		compartiment 6	Idem référence, mais sans végétation.
variante 5 : semi-intensif		compartiment 4	Variante 1 avec substrat semi-intensif 15 cm Z <sup>(‡)</sup> dédié
Blancs : nu + graviers		compartiment 7.A	Revêtement auto-protégé nu
		compartiment 7.B	revêtement auto-protégé + gravier

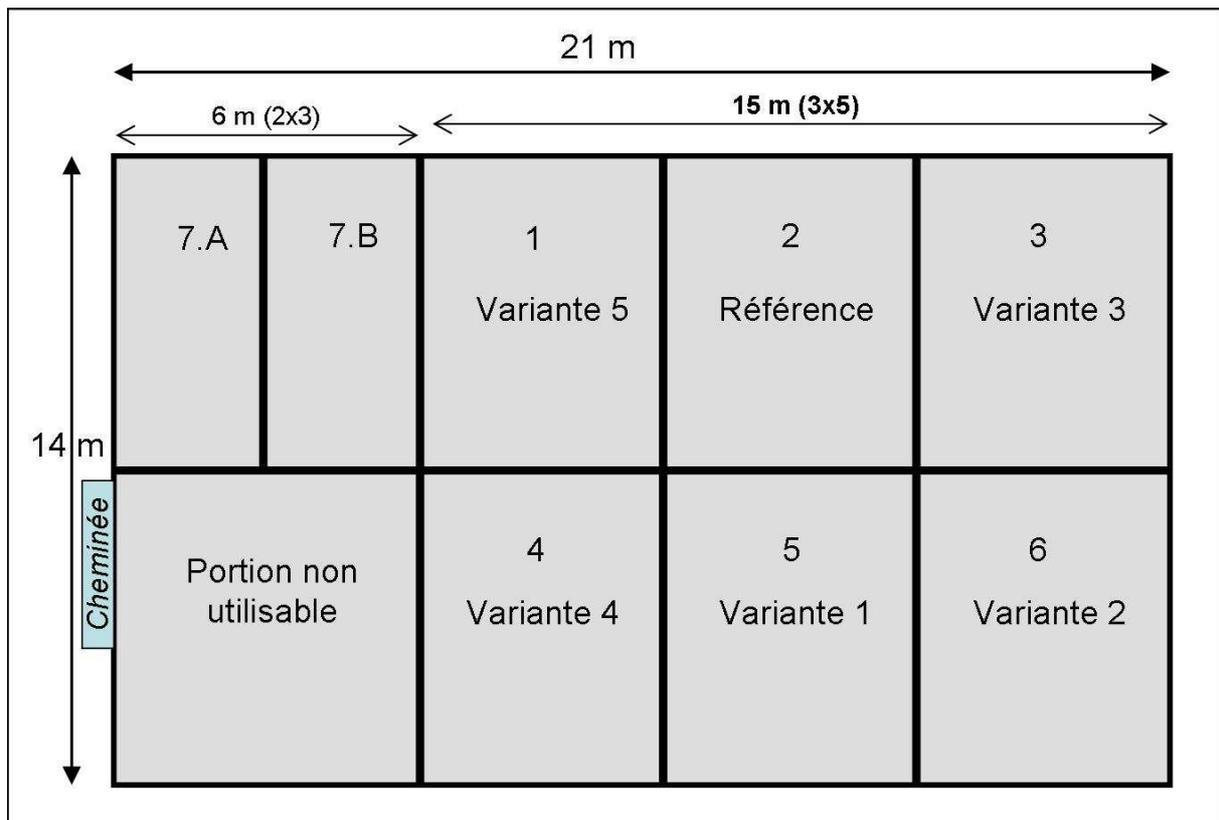
<sup>(\*)</sup> : Le substrat X est défini et apporté par l'ADIVET.

<sup>(†)</sup> : Le granulat Y est défini et apporté par l'ADIVET.

<sup>(‡)</sup> : Le substrat S.I. Z est défini et apporté par l'ADIVET



**Figure 6: Représentation des différentes solutions retenues**  
(source : CETE-IF)



**Figure 7: Organisation de la toiture du bâtiment 9 du CETE pour l'expérimentation**  
(source : Compte-rendu de réunion TVGEP du 25/05/2010)

## 2.4 Précisions apportées par l'ADIVET sur les substrats et drainages à mettre en œuvre

Lors de la réunion du 25/05/2010 il a été arrêté que l'ADIVET devait proposer des solutions pour les substrats X et Z ainsi que pour le granulat de drainage Y.

Après diverses réunions et débats en interne, l'association, au travers d'un mail de son président F. Lassalle nous a fait part des solutions finalement retenues concernant le substrat extensif (i.e. X) et le granulat Y. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

**Tableau 6: Caractéristiques des éléments X et Y**

(source : mail de F. Lassalle du 23/12/2010)

<i>Caractéristiques du Substrat extensif X</i>	<i>Granulat de drainage Y</i>
* Poids à la livraison: environ 1000 kg/m <sup>3</sup> * Poids à CME: environ 1450 kg/m <sup>3</sup> * CME : 40% vol.environ * Perméabilité: comprise entre 0,01 et 0,1 cm/s * Composition: Fraction minérale: roches volcaniques Fraction organique: compost d'écorces, compost vert et tourbe	* Poids à la livraison: environ 1000 kg/m <sup>3</sup> * Poids à CME: environ 1300 kg/m <sup>3</sup> * CME : 16 % vol.environ * Perméabilité: comprise entre 0,1 et 1,0 cm/s * Composition: roches volcaniques

L'ADIVET n'a en revanche pas fourni d'indications concernant le substrat Y semi-intensif. Son choix sera donc laissé à l'appréciation des expérimentateurs.

## LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

<i>Figure 1: Végétalisation intensive, extensive et semi-intensive (Lassalle 2008).....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2: Couches de drainage de TTV.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 3: Systèmes de végétalisation bicouche et monocouche .....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4: Dalles de sedums précultivées (ECOVEGETAL 2008).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5: Représentation du système "Pack" (PRIEURE 2009).....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 6: Représentation des différentes solutions retenues .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7: Organisation de la toiture du bâtiment 9 du CETE pour l'expérimentation.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 1: Répartition des ventes de produits d'étanchéité toiture en entretien rénovation en France, par type de matériau, 2001-2005 (MSI 2006) .....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2: Répartition des ventes de produits d'étanchéité toiture en construction neuve en France, par type de matériau, 2001-2005 (MSI 2006) .....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 3: Quelques produits utilisés dans le marché en France pour les végétalisation extensives à pente <math>\leq 3</math> % .....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 4: Caractéristiques des substrats extensifs multicouche et monocouche (Adivet, CSFE et al. 2007).....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 5: Détail des différentes solutions retenues .....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 6: Caractéristiques des éléments X et Y.....</i>	<i>16</i>

## BIBLIOGRAPHIE

- Adivet, CSFE, SNPPA and UNEP (2007). Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées.
- Bucheli, T.D., S. R. Muller, A. Voegelin and R.P. Schwarzenbach (1998). "Bituminous Roof Sealing Membranes as Major Sources of the Herbicide (R,S)-Mecoprop in Roof Runoff Waters: Potential Contamination of Groundwater and Surface Waters." Environmental Science & Technology **32**.
- Burkhardt, M., S. Zuleeg, R. Vonbank, P. Schmid, S. Hean, X. Lamani, K. Bester and M. Boller (2010). Leaching of additives from construction materials to urban storm water runoff. Eawag.
- CANEPARO, R. (1979). "Evacuation des eaux pluviales." Technique de l'ingénieur **C1075**.
- ECOVEGETAL (2008). CPP pour pente  $\leq 20\%$ , Procédés de végétalisation extensive et semi-intensive pour les terrasses et les toitures végétalisées. Rapport d'Enquête SOCOTEC.
- Lassalle, F. (2008). Végétalisation extensive des terrasses et toitures.
- MSI (2006). Le Marché des Matériaux de Couverture de Toits en France. MSI Marketing Research for Industry Ltd. Lyon: 223.
- PRIEURE (2009). Solutions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives, Procédé: "TOITURES VEGETAL i.D." Systèmes Multi-couches Vegetal i.D. et HydroPack.
- SIPLAST (2007a). Gravidand S, Système d'étanchéité et de végétalisation pour terrasses et toitures, Etanchéités des toitures inaccessibles végétalisées. Enquête de Technique Nouvelle SOCOTEC.
- SMAC (2007). TECFLOR / ECOFLOR.



PROJET



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)  
Appel à projets 2009**

**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°1  
LIVRABLE N°1.2  
Les facteurs favorisant et les freins au  
développement des TTV dans les constructions**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :  
Organismes impliqués :  
Coordination Partie n°1 :

Juliette Chauveau, Bernard de Gouvello  
CSTB, LEESU - ENPC  
Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

Coordination TVGEP :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU  
[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

## Sommaire

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>I- PANORAMA ET CLASSIFICATION DES ACTEURS</b> .....	<b>6</b>
A) UN PANORAMA DES ACTEURS .....	6
B) VERS UNE CLASSIFICATION DES ACTEURS .....	7
1- <i>Un schéma des acteurs</i> .....	7
2- <i>La définition des acteurs</i> .....	8
3- <i>Quelle classification des comptes-rendus d'entretien ?</i> .....	11
a) Les maîtres d'ouvrage .....	11
b) Les maîtres d'œuvre.....	11
c) Les fabricants et fournisseurs .....	12
d) Les installateurs.....	12
e) Les « gardiens » de la qualité et des métiers .....	12
<b>II- METHODOLOGIE DE RECHERCHE</b> .....	<b>13</b>
A) LA TECHNIQUE DE RECUEIL DE DONNEES : LES ENTRETIENS SEMI-DIRECTIFS .....	13
B) L'ORGANISATION DES ENTRETIENS .....	13
C) DES COMPTES-RENDUS SYNTHETIQUES .....	14
<b>III- SYNTHESE DES ENTRETIENS</b> .....	<b>14</b>
INTRODUCTION .....	14
A) DES OBSTACLES INSURMONTABLES ?.....	16
1- <i>Un surcoût parfois dissuasif</i> .....	16
2- <i>Les concurrences : De l'occupation de la cinquième façade à la concurrence entre les métiers</i> .....	16
3- <i>L'acceptation des toitures terrasses, un frein indirect pour les toitures végétalisées</i> .....	17
4- <i>La garantie décennale, une assurance chère et difficile à obtenir</i> .....	17
5- <i>La formation : une déformation professionnelle</i> .....	18
6- <i>Une remise en cause des professionnels sur l'absence d'entretien des toitures végétalisées</i> .....	19
B) DES LEVIERS DEFINITIVEMENT ACQUIS ?.....	19
1- <i>Une multitude de performances supposées</i> .....	19
2- <i>L'esthétique : un atout partagé entre les usagers</i> .....	20
3- <i>Les toitures végétalisées comme enjeu du développement durable</i> .....	20
C) LA REGLEMENTATION : UNE MUTATION CONSTANTE DES OBSTACLES ET DES LEVIERS .....	21
<b>LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX</b> .....	<b>23</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>24</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>25</b>
ANNEXE 1 : .....	26
ANNEXE 2 : .....	27

## Introduction

### Contexte

Connu depuis des siècles, les toitures végétalisées sont en plein essor dans le monde (USA, Japon, Allemagne). Elles se développent plus particulièrement depuis le 20<sup>ème</sup> siècle avec l'architecture contemporaine et le développement des toits plats<sup>1</sup>.

Au milieu des années 80, l'Allemagne est à l'origine d'une solution novatrice, dite « **végétalisation extensive des toitures** ». Cette technique connaît un fort développement dans ce pays, puis dans les pays limitrophes (Suisse, Belgique ...). A partir du milieu des années 90, le principe de végétalisation extensive de toitures est conceptualisé par le groupe de travail de la FLL « Végétalisations de toiture » à travers un document intitulé « *Principes pour les végétalisations de toiture* »<sup>2</sup>.

Par rapport à l'Allemagne, les toitures végétalisées extensives connaissent, en France, un développement de moindre importance. La raison peut être due en partie au « syndrome de Versailles<sup>3</sup> » qui impose un jardin à la française, strict, droit et vert<sup>4</sup>. L'aspect visuel est mis en avant pour expliquer ce retard dans ce marché.

Il faut attendre les années 2000 pour que le concept se développe en France, notamment autour de la démarche HQE et l'intégration de la notion de développement durable et de respect de l'environnement dans les projets d'aménagement et les constructions.

Devant l'engouement pour les toitures végétalisées, la CSFE<sup>5</sup> prend l'initiative en 2002 d'élaborer des règles professionnelles sur ce sujet<sup>6</sup>. En 2003, l'association pour la promotion des toitures végétalisées, l'ADIVET, est créée, permettant de rassembler des professionnels intéressés et venant de tous les horizons, du secteur de l'étanchéité à celui du paysage, mais aussi des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre, bureaux d'études et architectes. En 2007, les règles professionnelles<sup>7</sup> sont révisées et intègrent désormais la végétalisation semi-intensive et l'entretien/la maintenance de ces toits.

La première partie du programme de recherche TVGEP va traiter exclusivement la problématique des toitures végétalisées extensives. Il est nécessaire de les distinguer des toitures végétalisées dites semi-intensives (Complexes légers d'épaisseur moyenne, entretien après installation de la végétation modéré, arrosage régulier indispensable<sup>8</sup>) et intensives (véritable jardin sur le toit, cette

---

<sup>1</sup> Lassalle F., Végétalisation extensive des toitures et terrasses. L'école du Bauhaus et Le Corbusier en sont les précurseurs

<sup>2</sup> Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) est un organisme de recherche en développement du paysage et en architecture du paysage. Leur activité, qui ne se limite pas aux TTV, est d'élaborer des documents à caractère normatif sur le sujet du paysage (équivalent de l'Afnor pour le paysage).

<sup>3</sup> Entretien avec un architecte, Maria Lopez Diaz

<sup>4</sup> Ibid.

<sup>5</sup> Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité.

<sup>6</sup> « Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », édition n°1, 2002. 27 pages.

<sup>7</sup> « Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, 2007. 37 pages

<sup>8</sup> Ibid. page 7.

végétalisation se compose de pelouse, d'arbustes et d'arbres, est accessible aux usagers et nécessite un entretien constant<sup>9</sup>).

Les toitures végétalisées extensives sont définies dans le livre de référence de François Lassalle<sup>10</sup> comme une association végétale autonome, adaptée à des situations climatiques extrêmes, que l'on peut installer sur des toitures plates ou en pente avec une charge admissible faible. Elles ont une faible exigence en matière de nutrition, un haut pouvoir d'auto-régénération, et ne nécessitent pas ou peu d'entretien. Les règles professionnelles définissent ainsi la végétalisation extensive comme un complexe léger à faible épaisseur, dont l'entretien après installation de la végétation est très faible à faible, alors que l'association ADOPTA (Association DOuaisienne pour la Promotion des Techniques Alternatives) la définit comme une « toiture recouverte d'une végétation et des diverses couches nécessaires au développement de cette dernière »<sup>11</sup>.

### **Constats**

Dans un contexte où la notion de développement durable est omniprésente, de nombreuses initiatives voient le jour afin de limiter l'impact des constructions et de l'imperméabilisation des sols sur l'environnement. Des solutions sont donc proposées, notamment dans le cadre d'une architecture écologique, proche de la nature.

Les constructions HQE sont un des moyens pour développer de nouveaux matériaux, de nouvelles solutions en vue de limiter la consommation d'énergie, de gérer l'eau, de maintenir la biodiversité et la qualité de l'environnement alentour ... Les toitures végétalisées entrent dans ce cadre grâce aux diverses qualités et performances qui lui sont allouées. En effet, elles participent aux économies d'énergie induites par le rôle d'isolation thermique (cible 4), au confort thermique d'été grâce à l'hygrométrie du complexe de végétalisation et de l'isolation thermique de la toiture (cible 8), à l'amélioration de la qualité du paysage, à la biodiversité et à l'intégration du bâtiment dans son environnement (cible 1), au ralentissement et à la limitation du rejet des eaux d'orage dans les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales (cible 5) et à l'utilisation responsable des matériaux en utilisant des produits renouvelables et nécessitant peu d'entretien (substrat naturel de faible épaisseur, espèces végétales peu consommatrice d'eau et d'engrais) (cible 2). La réponse à ces différentes cibles de la démarche HQE en fait aujourd'hui une solution avantageuse pour les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre désirant s'inscrire dans une démarche de qualité environnementale.

Le marché des toitures végétalisées extensives est ainsi en pleine expansion depuis plusieurs années. Les chiffres de l'association ADIVET indiquent que leur nombre est passé de 80 000 m<sup>2</sup> de toitures végétalisées en 2002, à 550 000 m<sup>2</sup> en 2008 et 860 000 m<sup>2</sup> en 2009<sup>12</sup>.

Le projet TVGEP (Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales Urbaines) s'inscrit dans ce contexte. Suite à l'appel à projet « Concevoir et construire pour un développement durable » (du Réseau Génie Civil et Urbain), le projet TVGEP a pour finalité la connaissance des atouts

---

<sup>9</sup> Ernewein Antoine, *Analyse socio-économique des freins et leviers pour le développement des toitures végétalisées en France : application à l'agglomération nancéienne*, rapport de stage Master 1, CETE de l'Est, Nancy-Université, août 2010. Page 30.

<sup>10</sup> Lassalle F., 2008, page 28.

<sup>11</sup> Fiche technique n°8, La toiture verte, site Internet d'ADOPTA

<sup>12</sup> Chiffres du recensement de l'ADIVET auprès de ses membres.

et des limites des toitures végétalisées extensives pour la gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales, à l'échelle de la parcelle et de la ville. L'objectif est d'avoir une vision des pratiques et des acteurs concernés par ce sujet afin de développer des méthodes et des outils pour optimiser la conception et la construction des toitures végétalisées. A travers des entretiens semi-directifs menés auprès des acteurs identifiés (voir ci-après), la partie 1 de ce programme de recherche va particulièrement s'intéresser aux pratiques et aux acteurs, et notamment à l'identification des obstacles et des leviers pour le développement et l'insertion des toitures végétalisées dans les projets.

### **Problématique**

L'accent est aujourd'hui positionné sur l'aspect technique des toitures végétalisées. Dans une logique de développement durable, les questions socio-économiques doivent aussi être abordées afin de comprendre l'ensemble des enjeux attachés à cette pratique en plein essor. En effet, même si de nombreux obstacles semblent empêcher le développement des toitures végétalisées tels que le prix, l'entretien ..., de nombreuses possibilités de leviers sont aussi à la disposition des acteurs ou en train d'être mis en place.

Le fait d'identifier, via des entretiens, les freins et les leviers pour le développement des toitures végétalisées nous permettra de comprendre la logique de chaque acteur et les points réglementaires, culturels, financiers ... à faire progresser.

Les questions auxquelles nous allons nous attacher se divisent en deux parties :

- Quels sont les obstacles identifiés empêchant l'intégration des toitures végétalisées dans les projets de construction ?
  - o Y a-t-il des obstacles réglementaires et normatifs au développement de cette pratique ? Les outils de planification urbaine peuvent-ils empêcher durablement le développement des toitures végétalisées ?
  - o Le prix est-il un obstacle rédhibitoire ?
  - o Comment faire la part des choses entre les diverses performances ? Sont-elles avérées ?
  - o Des formations existent-elles ? Quel est l'impact sur la qualité des toitures végétalisées ?
  - o L'entretien des toitures végétalisées peut-il poser un problème à long terme pour les maîtres d'ouvrage ?
  
- Quels sont les leviers existants ou à mettre en place pour permettre le développement des toitures végétalisées ?
  - o Y a-t-il un marché ? Peut-on organiser une filière autour des toitures végétalisées ?
  - o La multitude de vertus allouées aux toitures végétalisées est-elle toujours un atout ?
  - o Les avantages « esthétiques » des toitures végétalisées s'apprécient plutôt en milieu urbain dense, où le minéral prime et où le végétal est recherché. En quoi l'image « verte » des toitures végétalisées permet-elle d'améliorer le cadre de vie en milieu urbain ?
  - o La facilité d'installation des toitures végétalisées est-elle un avantage par rapport à des pratiques plus lourdes comme la végétalisation intensive ?

## **Bibliographie / Références**

Depuis quelques années, les ouvrages, les rapports et les études se multiplient autour des toitures végétalisées. Des études techniques ont pour objet d'avérer ou non les performances attribuées aux toitures végétalisées, comme par exemple les études du CSTC sur l'évacuation des eaux pluviales (CSTC, 2006), celles sur les espèces utilisables du CRITT Horticole de La Rochelle (ARRDHOR/CRITT Horticole, 2010), sur l'impact de ces toitures sur la biodiversité (Tisseront, 2010) ou encore les diverses études thermiques dont celles du CSTB<sup>13</sup>.

Au-delà de ces travaux de recherches, des travaux d'étudiants ont récemment été menés au CETE de l'Est sur les aspects socio-économiques des toitures végétalisées (Ernewein, 2010) et à l'Institut Français d'Urbanisme sur l'état des lieux du développement des toitures végétalisées en France (Journée, 201). Ces travaux viennent en complément d'ouvrages plus généraux comme ceux de Thierry et Marie-France Houdart (2004), Marie-Pierre Dubois-Petroff (2007), François Lassalle (2008) ou encore des rapports tels celui du CETE du Sud-Ouest (Deyris et Dugougeon, 2009), qui traitent le sujet des toitures végétalisées dans son ensemble, des contraintes réglementaires, jusqu'à l'entretien des toitures végétalisées, en passant par leur histoires, leur conception et leur mise en œuvre. Ces ouvrages constituent une base riche en éléments techniques, réglementaires, opérationnels et financiers tout en posant un regard très général sur ces techniques.

## **Plan**

Le présent rapport est décomposé en trois parties suivies d'annexes.

La première partie est composée de trois sections. La première section analyse, au travers d'un panorama, les acteurs identifiés et interrogés. Cette analyse permettra de proposer une classification de ces acteurs afin de comprendre leurs interactions, place et rôle dans le développement du marché des toitures végétalisées. La liste des personnes interviewées y est retranscrite en fonction de la classification élaborée, tandis que des exemples de comptes-rendus sont consignés en annexe 2. La seconde section présente très succinctement la méthodologie de recherche, à savoir l'organisation des entretiens ainsi que la démarche choisie pour les traiter. La troisième section propose une synthèse quant aux freins et leviers relatifs à l'utilisation et au développement des toitures végétalisées en France.

Parallèlement à l'étude, Mickaël Journée, étudiant de Master 2 à l'Institut Français d'Urbanisme, a travaillé sur les toitures végétalisées pour son mémoire de fin d'études co-encadré par M. Bernard de Gouvello<sup>14</sup>. Dans le cadre de ce travail il a aussi réalisé des entretiens. Une réunion de travail s'est tenue afin de répartir les entretiens menés par Juliette Chauveau et ceux effectués par Mickaël Journée et certains en commun. Cette répartition se justifiait par deux motifs : d'une part, éviter de solliciter à trop de reprises les mêmes acteurs ; d'autre part, multiplier les sources d'information. La liste des acteurs interviewés par M. Journée ainsi que leur structure et leur poste est dressée en annexe 1.

---

<sup>13</sup> Cf. Entretien avec Salem Farkh, chargé de l'étude thermique sur les toitures végétalisées au CSTB.

<sup>14</sup> Journée M., 2010, *Quelles perspectives de développement pour les toitures végétalisées en France ?* Mémoire Master 2 « Urbanisme », mention « ville durable » de l'Institut Français d'Urbanisme (sous la direction de Eric Charmes et Bernard de Gouvello), 117 pages.

## I- Panorama et classification des acteurs

### A) Un panorama des acteurs

Le marché des toitures végétalisées regroupe un grand nombre d'acteurs, tant dans leur conception que dans leur mise en œuvre et leur exploitation. Le fait d'être une technique considérée comme nouvelle, en adéquation avec le thème du développement durable, ne fait qu'accroître les questions sur leur intérêt, notamment dans des projets urbains<sup>15</sup>.

Un panorama des acteurs est nécessaire afin de comprendre les enjeux de cette technique et le rôle de chaque professionnel dans le processus de développement de ce « nouveau » marché.

Lors d'une réunion TVGEP, une première présentation de la partie 1 du projet a permis aux professionnels participants au programme de recherche de faire un premier tour de la profession et des acteurs impliqués dans le sujet des toitures végétalisées. Ces professions n'ont pas toutes le même rôle dans le développement des toitures végétalisées et sont impliquées directement ou indirectement en fonction de leurs intérêts (économiques, réglementaires, écologiques ...) et de leur intervention dans les projets d'aménagement.

Le tableau ci-dessous présente ces divers acteurs. Les premiers entretiens avec les professionnels prenant part au projet de recherche, ont permis de constituer de nouveaux contacts auprès d'autres professionnels. Cette prise de contact nous a épargné un temps précieux dans la recherche d'acteurs, et a été nécessaire pour multiplier les entretiens et être reçus rapidement par ces professionnels. La liste de ces acteurs fera l'objet d'une annexe (annexe 2)

Liens directs avec les TTV	Liens indirects avec les TTV
Fournisseurs de systèmes de toitures végétalisées Installateurs de systèmes de toitures végétalisées Fabricants de systèmes d'étanchéité Les applicateurs de systèmes d'étanchéité Associations et syndicats professionnels en relation avec l'objet « TTV » (ADIVET, CSFE, UNEP,...) Fournisseurs de composants (drainages, filtres, substrats, fertilisants...) Architectes-Paysagistes, entreprises d'espaces verts, horticulteurs Bureaux d'études techniques Economistes de la construction Architectes/Urbanistes Collectivités/SEM (maîtrise d'ouvrage) Bureaux de contrôle CSTB / comité d'experts (Avis technique) Assureurs	Associations d'usagers / associations écologiques Professionnels du BTP Autres associations professionnelles Foncières/Bailleurs/Syndicats de copropriétés Juristes Gestionnaires des réseaux d'assainissement Promoteurs immobiliers Etablissements de formation Centres de recherche

**Tableau 1 : Catégorisation des acteurs concernés par les TTV**

<sup>15</sup> La plupart des architectes et des bureaux d'études s'intéressent à cette technique dans le but de répondre à plusieurs cibles HQE.

De nombreux acteurs ont été très rapidement disponibles et nous ont accordé beaucoup de leur temps. C'est le cas, par exemple, des entreprises ou institutions membres du projet TVGEP, tels que les professionnels des toitures végétalisées, les professionnels de l'étanchéité, l'association professionnelle en charge des toitures végétalisées ou encore les collectivités associées au projet.

D'autres acteurs ont été facilement abordés, et particulièrement ceux trouvant des intérêts à donner leurs avis sur le développement et les avantages/inconvénients des toitures végétalisées. C'est le cas pour les maîtres d'œuvre en général (architectes, bureaux d'études, entreprises d'étanchéité), les maîtres d'ouvrage (collectivités locales), les bureaux de contrôle, les assureurs (spécialisés dans les BTP, les artisans, l'étanchéité ...), et les syndicats ou fédérations représentant les artisans, les étancheurs, les paysagistes ...

Néanmoins, tous les acteurs n'ont pu être interrogés à l'instar des paysagistes et des installateurs. Nous nous sommes appuyés sur d'autres acteurs très proches qui ont pris le risque de parler en leur nom, tel un assureur spécialisé dans l'accompagnement des paysagistes, l'union des entreprises de paysage (Unep) et la fédération française du paysage (FFP). Le choix a également été fait de ne pas interviewer d'enseignants en école d'ingénieurs ou en école d'architecture susceptibles d'aborder ce sujet. En effet, il s'est avéré, lorsque l'étude a été menée, que les TTV ne faisaient pas l'objet d'un enseignement spécifique. Si des formations sont organisées au sein de ces établissements, elles sont principalement assurées par les fabricants de TTV et abordent les TTV d'un point de vue très pratique.

## **B) Vers une classification des acteurs**

### **1- *Un schéma des acteurs***

Les nombreux types d'acteurs en rapport avec les toitures végétalisées nous a amené à réaliser un schéma afin de comprendre à quel(s) moment(s) ces acteurs interviennent dans la conception et la mise en place de ces toitures. Ce schéma nous permet aussi de savoir si les interviews réalisées sont représentatives d'un projet d'aménagement dans son ensemble, s'il existe une transversalité entre les acteurs et une hiérarchie dans le choix et la mise en œuvre de ces toitures.

Ce schéma a été constitué à partir de plusieurs sources<sup>16</sup>, et se situe dans le cadre d'un projet d'aménagement ou de construction. Il nous permet de cartographier les acteurs tout au long d'un projet de construction. L'objectif est de faciliter l'analyse des entretiens en repérant rapidement qui intervient, avec qui et à quel moment et permettre ainsi de localiser les obstacles et les leviers potentiels, liés aux acteurs.

La légende du schéma s'interprète ainsi :

- Les pointillés englobent les acteurs indirectement liés au projet de construction ou d'aménagement. Ils se situent en amont de tout projet, c'est-à-dire avant même que le

---

<sup>16</sup> Les étapes d'un projet architectural en France : Armand, J et Raffestin, Y.140 séquences pour mener une opération de construction. Page 37 ; et les définitions du site Internet : <http://www.marche-public.fr/Marches-publics/Definitions/Entrees/APS.htm>.

projet ne soit conçu et que les toitures végétalisées ne soient envisagées. Ce sont des acteurs essentiels dans le développement de ces pratiques puisqu'ils s'occupent de la formation, de la promotion et de la fabrication des toitures végétalisées.

- Les flèches à doubles sens indiquent les acteurs intervenants à différents stades du projet, tels que les maîtres d'œuvre dont la charge est d'accompagner la mise en œuvre du projet, lancer les appels d'offres, consulter les entreprises, ou tels que les contrôleurs techniques dont la charge est de contrôler la bonne réalisation du chantier. Ces deux acteurs ont pour mission de faire en sorte que les toitures végétalisées soient correctement mises en place et qu'elles n'entraînent en aucun cas de dysfonctionnement du bâtiment (notamment pour l'étanchéité).
- La flèche pleine, en fin de schéma, prend en compte l'importance de l'exploitation, de l'entretien des constructions à long terme. Elle rappelle que les toitures végétalisées doivent être suivies, au même titre qu'un bâtiment traditionnel.

## **2- La définition des acteurs**

Malgré le schéma, il n'est guère aisé de classer ces acteurs en catégories représentatives de leur mission, de leur importance, et de leur impact sur les toitures végétalisées. En effet, chaque acteur a un rôle précis dans le développement de cette technique. Mais doit-on les classer en fonction de leur rôle en matière de prescription ? Doit-on les classer en fonction de leur pouvoir de décision ? Ou doit-on les classer en fonction de leur métier et de leur intervention sur un projet ?

Avant de classer ces acteurs, il est nécessaire de les présenter :

- Les maîtres d'ouvrage. Ils sont de deux types : publics (collectivités locales, départements ...) et privés (bailleurs, propriétaires de locaux d'habitation industriels, de bureaux ...). Ils décident de lancer un projet de construction, le finance et fixe les grandes lignes du cahier des charges (exemple : bâtiment HQE, économie d'énergie, gestion des eaux pluviales ...).
- Les maîtres d'œuvre :
  - Les cabinets d'architectes. Ils répondent aux appels d'offres, accompagnent les maîtres d'ouvrage dans leurs choix techniques et suivent l'ensemble du chantier, depuis le programme jusqu'à la réception.
  - Les bureaux d'études pluridisciplinaires. Associés généralement à un architecte lors de l'appel d'offres, ils définissent les études à réaliser, accompagnent les maîtres d'ouvrages dans leur choix et suivent l'ensemble du chantier. Ils peuvent aussi être qualifiés d'assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO), notamment quand ils accompagnent le maître d'ouvrage dans la rédaction du cahier des charges et de l'appel d'offre.
  - Les bureaux d'études techniques. Ils sont chargés des études liées au projet (études VRD, énergétiques ...), en amont (lors de la conception) ou au cours

de la réalisation du projet. En ce qui concerne les TTV, cette fonction est, pour l'heure, internalisée par les fournisseurs de systèmes.

- Les contrôleurs techniques. Ils peuvent être considérés comme des maîtres d'œuvre car ils conseillent les maîtres d'ouvrage, suivent le chantier, vérifient le travail des entreprises, recommandent des modifications si nécessaire...
- Les applicateurs ou poseurs. Ils réalisent la pose du système de végétalisation. Il peut s'agir d'entreprises d'étanchéité, d'entreprise du paysage ou d'entreprise dont c'est l'unique spécialité
- Les fournisseurs de systèmes. Ils innovent, fabriquent et proposent des produits aux maîtres d'œuvre et aux maîtres d'ouvrage.
- Les assureurs. Indispensables à tous les acteurs, les assurances protègent les entreprises, les personnes et les ouvrages. Leur objectif est de limiter les sinistres dus à de mauvaises pratiques ou de mauvais produits et de déterminer la part de responsabilité des professionnels. A ce jour, les toitures végétalisées sont considérées comme une protection de l'étanchéité et présente un risque de nature décennale. A ce titre les travaux entrent dans le cadre de l'article 1792 du Code civil et doivent être couverts par une garantie décennale (loi 78.12 du 4/1/78) Les syndicats, les fédérations. Leur rôle est de promouvoir les savoir-faire, les métiers qu'ils représentent, d'assister leurs membres quand ils en ont besoin et de les informer sur les formations, les innovations, les nouveaux métiers ...
- Les organismes de formation. Ils sont la garantie de la qualité du travail, d'un savoir-faire. A noter cependant qu'il n'existe aujourd'hui aucun « référentiel métier » en matière de pose de toitures végétalisées et que les formations proposées sur le marché sont très en-deçà des besoins de qualifications.
- Les centres de recherche. Ils contribuent notamment à l'innovation, à l'amélioration la connaissance du fonctionnement des systèmes de végétalisation, à la connaissance de l'interaction des différentes composants, et à l'objectivation des performances des produits au travers de suivis d'installations et de plans d'expérimentations.

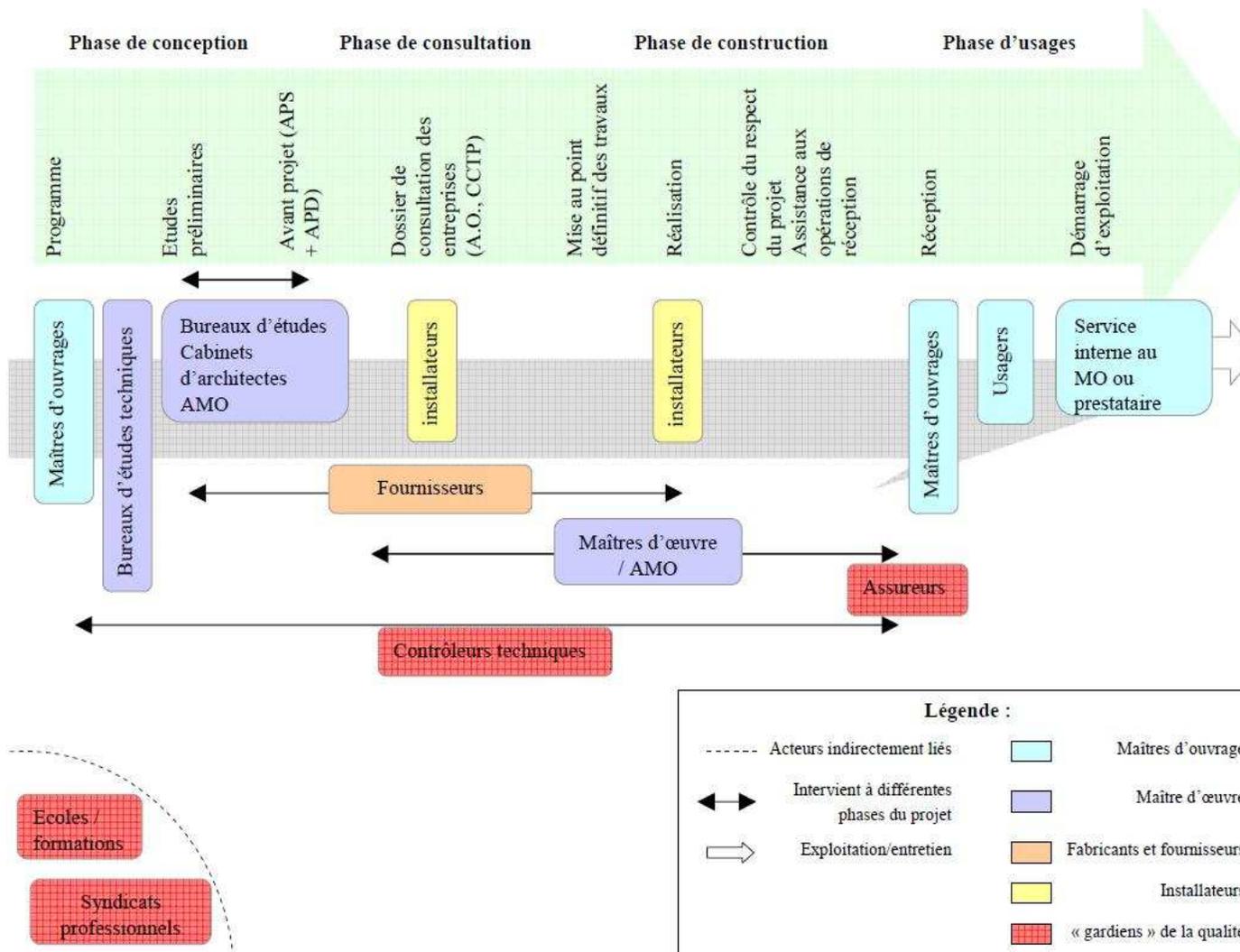


Figure 1 : Agencement des acteurs de la filière TTV

### 3- Quelle classification des comptes-rendus d'entretien ?

Le schéma étant basé sur la mise en place d'un projet d'aménagement classique, nous nous efforcerons de classer les acteurs en fonction de leur hiérarchie par rapport à la mise en place du projet, et de leur importance dans le choix d'intégrer ou non une toiture végétalisée dans un projet.

Quatre classes ressortent :

- Les maîtres d'ouvrage, publics ou privés. C'est eux qui décident.
- Les maîtres d'œuvre (bureaux d'études techniques, AMO, architectes, bureaux d'études pluridisciplinaires...). Ils conseillent les maîtres d'ouvrage dans leur choix, appliquent les décisions et suivent.
- Les fabricants et fournisseurs. Par leurs innovations, leurs produits et leurs conseils, ils accompagnent les décideurs à recourir aux toitures végétalisées.
- Les installateurs (entreprises de pose, artisans). Ils réalisent le chantier
- Les « gardiens » de la qualité et des métiers (contrôleurs techniques, assureurs, syndicats professionnels, organismes de formation). Ils promeuvent une nouvelle technique, un nouveau métier, un savoir-faire.

#### a) Les maîtres d'ouvrage

- Cécile Guyot ([cecile.guyot@paris.fr](mailto:cecile.guyot@paris.fr)), Mairie de Paris - Direction du Patrimoine et de l'Architecture, 23 juin 2010.
- Christophe Lehoucq<sup>17</sup> ([clehoucq@cg92.fr](mailto:clehoucq@cg92.fr)), Département des Hauts-de-Seine - Direction de l'eau, 1<sup>er</sup> juin 2010.
- Nadine Aires ([aires.nadine@aesn.fr](mailto:aires.nadine@aesn.fr)), Agence de l'eau Seine-Normandie, 23 août 2010.
- Philippe Jacob ([philippe.jacob@paris.fr](mailto:philippe.jacob@paris.fr)), Mairie de Paris - Direction des Espaces Verts - Agence de l'Ecologie Urbaine, 19 août 2010.
- Xavier Houzelle ([xavier.houzelle@mairie-nanterre.fr](mailto:xavier.houzelle@mairie-nanterre.fr)), Mairie de Nanterre - Direction de l'Architecture, 22 septembre 2010.
- Thierry Maytraud et Ronan Quillien ([rquillien@cg93.fr](mailto:rquillien@cg93.fr), [tmaytraud@cg93.fr](mailto:tmaytraud@cg93.fr)), Département de la Seine-Saint-Denis - Direction de l'eau et de l'assainissement, 9 juin 2010.

#### b) Les maîtres d'œuvre

- Bruno Sébenne ([svassocies@wanadoo.fr](mailto:svassocies@wanadoo.fr)), Cabinet AABB - architecte DPLG, 21 septembre 2010.
- Frédéric Gadan ([bvfg@valerogadan.fr](mailto:bvfg@valerogadan.fr)), Cabinet Bernard Valéro et Frédéric Gadan - architecte DPLG, 20 septembre 2010.
- Gérard Sénior<sup>18</sup> ([gseunior@club-internet.fr](mailto:gseunior@club-internet.fr)), Cabinet AETIC - architecte DPLG, 16 août 2010.

---

<sup>17</sup> Compte-rendu en annexe 2

<sup>18</sup> Compte-rendu en annexe 2

- Jean-Pierre Destas ([scoping@scoping.fr](mailto:scoping@scoping.fr)), Bureau d'études Scop'ing - Conducteur de travaux, 26 août 2010.
- Maria Lopez-Diaz, Architecte, 10 août 2010.
- M. Marchal ([paris@beterem.fr](mailto:paris@beterem.fr)), Bureau d'études BETEREM - Directeur d'agence, 24 août 2010.
- Serge Colas ([serge.colas@culture.gouv.fr](mailto:serge.colas@culture.gouv.fr)) SDAP Paris - Architecte des Bâtiments de France, 5 octobre 2010.

c) Les fabricants et fournisseurs

- Bruno Montagnon ([bruno.montagnon@netafim-fr.com](mailto:bruno.montagnon@netafim-fr.com)), NETAFIM, 7 juillet 2010.
- Carmen Carboneras ([ccarboneras@ecovegetal.fr](mailto:ccarboneras@ecovegetal.fr)), Ecovegetal, 16 juin 2010.
- Anne-Marie Gandon ([agandon@soprema.fr](mailto:agandon@soprema.fr)), Soprema - département Sopranature, 6 août 2010.
- Lionel Vermandel ([lionel.vermandel@meple.com](mailto:lionel.vermandel@meple.com)), Meple, 8 septembre 2010.
- Philippe Bonnet<sup>19</sup> ([bonnet.philippe@fr.sika.com](mailto:bonnet.philippe@fr.sika.com)), SIKA France SA, 2 juin 2010.

d) Les installateurs

- Dominique Debray ([d.debray@orange.fr](mailto:d.debray@orange.fr)), Entreprise ISOCHAPE, 23 septembre 2010.

e) Les « gardiens » de la qualité et des métiers

- François Michel ([francois.michel@fr.bureauveritas.com](mailto:francois.michel@fr.bureauveritas.com)), Bureau Veritas - contrôleur technique, 8 juillet 2010.
- Michel Grand ([michel.grand@fr.bureauveritas.com](mailto:michel.grand@fr.bureauveritas.com)), Bureau Veritas - contrôleur technique, 12 août 2010.
- Annie Boudon ([annie\\_boudon@smabtp.fr](mailto:annie_boudon@smabtp.fr)) et Christian Garcia ([christian\\_garcia@socabat.fr](mailto:christian_garcia@socabat.fr)), SMABTP - Assurance BTP et SOCABAT - expert en assurance, 6 septembre 2010.
- Alexandre Degoul ([alex.degoul@riskpart.com](mailto:alex.degoul@riskpart.com)), Risk Partenaires – expert en assurance, 17 septembre 2010.
- Ariane Delilez ([arianedelilez@aol.com](mailto:arianedelilez@aol.com)), Fédération Française du Paysage, 21 septembre 2010.
- Claire Grosbellet ([cgrosbellet@unep-fr.org](mailto:cgrosbellet@unep-fr.org)), Unep, 2 juin 2010.
- Didier Michaud ([contact@gppep.org](mailto:contact@gppep.org)), GPPEP, 4 juin 2010.
- Francis Boullard ([f.boullard@cnatp.org](mailto:f.boullard@cnatp.org)), CNATP, 17 août 2010.
- François Lassalle<sup>20</sup> ([flassalle@soprema.fr](mailto:flassalle@soprema.fr)), ADIVET, 17 juin et 5 juillet 2010.
- Isabelle Quintin ([i.quintin@capeb.fr](mailto:i.quintin@capeb.fr)), CAPEB, 13 août 2010.
- Olivier Damas ([olivier.damas@plante-et-cite.fr](mailto:olivier.damas@plante-et-cite.fr)), Plante et Cité, 3 août 2010.

---

<sup>19</sup> Compte-rendu en annexe 2

<sup>20</sup> Compte-rendu en annexe 2

- Philippe Driat ([Driatp@csfe.ffbatiment.fr](mailto:Driatp@csfe.ffbatiment.fr)), CSFE, 14 juin 2010.
- Antoine Demarque ([antoine.demarque@cstb.fr](mailto:antoine.demarque@cstb.fr)), CSTB, 12 juillet 2010.
- Salem Farkh ([salem.farkh@cstb.fr](mailto:salem.farkh@cstb.fr)), CSTB, 6 juillet 2010.

## **II- Méthodologie de recherche**

**Les entretiens et les comptes-rendus ont été réalisés par Juliette Chauveau, chargée d'études au Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains, ENPC, de juin à octobre 2010.**

### **A) La technique de recueil de données : les entretiens semi-directifs**

L'objectif premier était d'utiliser le principe de l'entretien non directif avec un thème : les freins et les leviers pour le développement des toitures végétalisées. Mais étant confronté, dès le départ, à des interviewés peu disponibles et qui ne souhaitent pas faire de longs entretiens, le principe des entretiens semi-directifs, nous a semblé plus pertinent.

Contrairement à l'entretien directif, l'entretien semi-directif permet de laisser à l'interviewé des possibilités de sortir de la grille d'entretien préalablement définie.

Le choix de réaliser des entretiens semi-directifs a permis d'amener les interviewés à approfondir leurs propres certitudes sur le sujet, de rentrer dans des problématiques plus essentielles pour eux (différents du discours commercial et de la littérature connue), mais aussi de rebondir sur des idées, des expressions afin d'approfondir certains sujets, plus ou moins sensibles. Cette technique d'entretien a permis d'aborder des sujets que les acteurs eux-mêmes n'avaient pas définis comme digne d'intérêts.

### **B) L'organisation des entretiens**

Les entretiens n'ont pas été réalisés dans des conditions identiques. Nous avons dû nous adapter en fonction de chacun, l'objectif étant d'avoir un échantillon représentatif d'acteurs, venant d'horizons divers. Dans ce contexte, la plupart des entretiens ont été fait par téléphone pour des raisons de commodités (situations géographiques éloignées ...) mais aussi pour des raisons de disponibilités (les acteurs sont plus disponibles pour un entretien par téléphone que pour des entretiens de vive voix).

Ce type d'exigences n'a pas empêché le bon déroulement des entretiens et a permis dans certains cas une implication accrue des participants. Ainsi, les entretiens téléphoniques ont permis à certains acteurs de se laisser aller à des confidences, notamment sur leurs attentes futures pour le marché des toitures végétalisées (de nouvelles fonctionnalités comme par exemple un espace de vie ...)

Les interviews ont duré entre 20 min et 1h15 selon les acteurs, les points à aborder, les rebondissements, mais surtout les disponibilités. Par ailleurs, tous les entretiens n'ont pas été enregistrés, soit par choix des acteurs (gêne vis-à-vis de l'enregistrement), soit par manque de matériel.

Les comptes-rendus ont ensuite été envoyés pour relecture aux interviewés, certains l'ayant demandé avant même le début de l'entretien. Cela s'est traduit par des compléments d'information, d'une part, et par une atténuation de certains propos d'autre part. A savoir : l'idée reste mais l'on constate un lissage, une reformulation plus précautionneuse des propos tenus.

Le parti pris a été d'envoyer les comptes-rendus avec des questions supplémentaires pour certains acteurs. Ces questions complémentaires seront indiquées à la fin des comptes-rendus et indiquées comme telles.

Dans tous les cas, si l'acteur ne fait pas de retour, le compte-rendu a été considéré comme validé par l'interviewé.

### **C) Des comptes-rendus synthétiques**

La retranscription des entretiens ne rentre pas sous le coup d'une grille d'analyse quantitative mais correspond à une analyse qualitative dont l'objectif est de prendre en considération toutes les idées et les réflexions des interviewés, sans pour autant se laisser envahir par un certain nombre de détails peu ou pas utiles et utilisables pour l'analyse.

Nous avons commencé la phase d'analyse à proprement parler, en choisissant de faire des comptes-rendus d'entretiens synthétiques. L'objectif étant de ne pas dénaturer les propos de chacun mais de les mettre en valeur.

Cette forme de compte-rendu a permis de restructurer les discours des interviewés par le regroupement des idées, des réflexions et des thèmes identifiés tout au long de l'entretien, dans un même paragraphe. Pour chaque paragraphe, un titre résume la réflexion phare de la discussion. Ce travail a été réalisé pour chaque entretien, l'idée étant de mettre en avant les thèmes récurrents entre les différentes interviews (par exemple le thème de la formation), sans pour autant choisir le même titre. L'objectif étant de garder la spécificité de chacune des discussions.

## **III- Synthèse des entretiens**

### **Introduction**

Le marché des toitures végétalisées est en plein essor et évolue constamment, dans le domaine technique et dans la pratique. Nous pouvons constater par ailleurs que tous les acteurs concernés par ce marché ne sont pas au même niveau de connaissances, de pratiques et d'intérêts. En effet, si en premier lieu ce sont les étancheurs qui se sont intéressés à ce système de végétalisation de toiture, d'autres métiers s'y sont intéressés comme les paysagistes, les architectes, les bureaux

d'études, et plus récemment les couvreurs et les architectes-paysagistes<sup>21</sup>, qui voient en cette technique une nouvelle filière mais aussi une nouvelle manière de pratiquer leur art.

Actuellement, la promotion des toitures végétalisées est portée par une association, l'ADIVET, qui, à son origine, comptait une majorité d'entreprises d'étanchéité, avant de s'ouvrir plus largement aux professions du paysage.

Les entretiens réalisés démontrent une certaine disparité entre ces acteurs. Certains définissent les toitures végétalisées comme un symbole du développement durable et sont centrés dans des préoccupations immédiates<sup>22</sup> (projets d'aménagement à court terme, réponses à des promesses électorales, participation à l'année de la biodiversité ...). D'autres se concentrent plus particulièrement sur le futur de cette technique, l'heure étant aux chiffres et à l'estimation de leurs performances (développement à long terme, structuration du marché, fiabilité des systèmes ...). L'objectif étant d'organiser et de développer le marché durablement<sup>23</sup>. D'autres encore commencent à peine à découvrir le thème et peinent à se positionner<sup>24</sup>.

Les questionnements abordés dans l'introduction générale du rapport ont été abordés tout au long des entretiens et ont parfois trouvé des réponses, et parfois amené d'autres questions. Cette synthèse se propose de faire le tour de ces questionnements, des thèmes abordés par les acteurs et des attentes des chercheurs. Ces questions concernaient d'un côté, les obstacles et d'un autre côté les leviers. Cette distinction entre obstacles et leviers semble finalement ne pas être appropriée. En effet, les premiers enseignements qui se dégagent de ces entretiens indiquent qu'il est difficile de statuer sur ce qui relève de l'obstacle ou du levier, tant la technique et les pratiques évoluent constamment. Ainsi en est-il de la question de l'esthétique, présentée dans les leviers de cette synthèse. L'histoire des toitures végétalisées montre que l'un des obstacles à leur développement a toujours été l'aspect visuel, non accepté en particulier par les usagers. En effet, ces toitures ne correspondent pas au jardin à la française telle que pratiquée en France, représenté par un aspect strict, droit et vert<sup>25</sup>. Mais cet obstacle s'est estompé au fil du temps, notamment avec l'essor du développement durable, du retour de la nature en ville ... L'esthétique est ainsi devenue<sup>26</sup> particulièrement importante de nos jours dans le choix et les décisions des maîtres d'ouvrage.

La synthèse va tout de même se partager entre ces deux premières notions avec plus ou moins de modération et d'ouverture. En effet, les obstacles présentés disposent parfois de leviers potentiels en émergence, tandis que les leviers doivent parfois faire face à l'arrivée de nouveaux obstacles. Dans ce contexte, la synthèse se conclura par une présentation de la réglementation, que l'on peut qualifier d'« inclassable », révélatrice de la nécessité de dépasser la dichotomie obstacle/levier et de se tourner vers les enjeux propres à ces différentes thématiques.

---

<sup>21</sup> Les architectes-paysagistes ou paysagistes-concepteurs sont des donneurs d'ordre, concepteurs et maîtres d'œuvres sur les aménagements paysagers. Souvent associés à des urbanistes, ils aménagent des espaces intérieurs et extérieurs.

<sup>22</sup> Les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre

<sup>23</sup> Les fabricants, les entreprises de pose et les syndicats

<sup>24</sup> Les architectes-paysagistes et les couvreurs principalement

<sup>25</sup> Entretien avec Maria Lopez-Diaz

<sup>26</sup> Présentation ci-après

## **A) Des obstacles insurmontables ?**

### **1- *Un surcoût parfois dissuasif***

Le prix des toitures végétalisées est une problématique qui ressort constamment des entretiens, et notamment d'un certain nombre de fabricants (les membres de l'ADIVET). Cet aspect est minimisée par plusieurs maitres d'ouvrage publics (Mme Guyot, M. Houzelle). Mais d'une manière générale, avant même que le projet soit conçu, le prix des toitures végétalisées est un élément à prendre en compte en fonction du budget alloué au projet. En effet, le surcoût entraîné par cette technique n'est pas négligeable par rapport à une étanchéité traditionnelle. Selon une grande majorité des fabricants d'étanchéité et de syndicats de la profession (M. Lassalle, M. Driat, Mme Grosbellet), le surcoût induit serait ainsi la principale cause de la suppression des toitures végétalisées lors de la conception d'un projet. Les maitres d'ouvrage publics sont tout de même plus ouverts à cette technique (Mme Guyot, M. Houzelle, M. Lehoucq), ayant mis en place une politique environnementale qui valorise des systèmes « écologique » tels que la végétalisation de toiture. Un des leviers pour lever ce problème de prix est donc cette image verte, mais aussi une prise en charge financière plus importante. En effet, les subventions sont aujourd'hui rares, les organismes, les collectivités et autres financeurs potentiels, préférant financer les panneaux solaires, l'isolation ou encore les cuves de récupération d'eau de pluie (voir le crédit d'impôts ...).

### **2- *Les concurrences : De l'occupation de la cinquième façade à la concurrence entre les métiers***

La concurrence, déclinée sous plusieurs points, est aussi un point de blocage au développement des toitures végétalisées. D'une part, la concurrence des terrasses, où plusieurs équipements tels que les panneaux solaires, les locaux techniques, les antennes, ... sont en concurrence directe avec les toitures végétalisées. La plupart des professionnels (M. Debray, certains membres de l'Adivet, M. Michaud) ne voient pas les panneaux solaires comme une vraie concurrence car il y a assez de terrasses pour tout le monde selon les chiffres (M. Lassalle indique qu'il y a, par an, 850000 m<sup>2</sup> de toitures végétalisées, quelques centaines de milliers de m<sup>2</sup> de panneaux solaires, pour plus de 24 millions de membranes d'étanchéité posées). Mais la concurrence est présente, notamment dans les projets « écologiques » de constructions neuves et de réhabilitation, les choix se portant principalement sur les panneaux solaires, (M. Houzelle, les architectes) pour leur capacité d'amortissement mais aussi pour l'engouement qu'ils suscitent.

D'autre part, il y a une forte concurrence entre les professions, notamment depuis la croissance exponentielle des demandes de toitures végétalisées. Beaucoup de métiers veulent se positionner, à l'instar des paysagistes qui se sentent concernés puisque cela touche le végétal. Mais il y a aussi les couvreurs (Mme Quintin) qui travaillent principalement sur des toits en pente et qui s'y intéressent, bien que les règles professionnelles ne s'intéressent pour l'heure qu'aux pentes inférieures à 20%.

### **3- L'acceptation des toitures terrasses, un frein indirect pour les toitures végétalisées**

Même si les documents de planification ne peuvent interdire les toitures terrasses, de nombreux permis sont aujourd'hui refusés pour cette raison. Dans beaucoup de cas, ce n'est pas la végétalisation qui est en cause mais le fait que la mise en place de toitures-terrasses n'est pas acceptée. Les toitures végétalisées subissent indirectement des choix politiques locaux à travers le refus d'une architecture contemporaine, constituée de terrasses plus ou moins accessibles.

Toutefois, avec la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 qui prévoit que le permis de construire « ne peut s'opposer à l'utilisation de matériaux renouvelables ou de matériaux ou procédés de construction permettant d'éviter l'émission de gaz à effet de serre, à l'installation de dispositifs favorisant la retenue des eaux pluviales ou la production d'énergies renouvelables », il est aujourd'hui plus compliqué pour les collectivités ne désirant pas de toitures-terrasses de les refuser dès lors qu'elles sont végétalisées.

Enfin, les décisions des architectes des bâtiments de France dans les ZPPAUP (devenues AVAP depuis fin 2011)<sup>27</sup>, au nom de la sauvegarde de la cohérence historique d'un quartier, constituent encore un obstacle à la diffusion des toitures végétalisées, et sont dénoncées par la plupart des étancheurs et des maîtres d'œuvre (tous les membres de l'Adivet, tous les architectes DPLG, les deux bureaux d'études).

### **4- La garantie décennale, une assurance chère et difficile à obtenir**

La question de la garantie décennale<sup>28</sup> est au cœur des débats. Elle oppose les métiers de l'étanchéité et du paysage principalement, l'enjeu étant, pour les paysagistes (Mme Grosbellet), de s'imposer comme les seuls capables de prendre en charge la partie végétalisation des toitures. Dans ce cas, les artisans paysagistes doivent s'adapter et travailler avec une assurance spécifique, la garantie décennale, puisque leur travail touche à l'étanchéité d'un bâtiment. Cette assurance est chère et difficile à obtenir pour beaucoup d'entre eux car ce ne sont pas des habitués de cette assurance (M. Degoul). Par exemple, ils doivent faire l'objet d'un audit par des experts en assurance pour espérer pouvoir l'obtenir, audit permettant de mettre en avant l'expérience, la formation et la qualité de ces professionnels.

---

<sup>27</sup> Les ZPPAUP (Zones de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager) ont pour objet d'assurer la protection du patrimoine paysager et urbain et mettre en valeur des quartiers et sites à protéger pour des motifs d'ordre esthétique ou historique en exprimant l'ambition d'améliorer la notion de champ de visibilité (« périmètre de 500 m » aux abords d'un monument historique) en lui substituant un « périmètre intelligent ». Fin 2011, les ZZPAUP ont laissé la place aux AVAP (Aires de mise en Valeur de l'Architecture et du Patrimoine) : un décret publié au JO du 21 décembre 2011 « définit le contenu et la procédure d'établissement d'une aire de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine et précise les modalités de délivrance d'une autorisation de travaux dans cette aire ».

<sup>28</sup> Ce dispositif a fait l'objet de la Loi 78-12 du 4 janvier 1978 (dite Loi Spinetta). Les constructeurs garantissent le maître d'ouvrage pendant dix ans à compter de la réception des travaux, contre les vices et malfaçons compromettant la solidité de l'ouvrage, affectant l'un de ses éléments constitutifs (ouvrages de viabilité, de fondation, d'ossature, de clos et de couvert) ou d'équipement (quel qu'il soit) rendant l'immeuble impropre à sa destination normale, ou compromettant la solidité d'un élément d'équipement lorsqu'il fait indissociablement corps avec un élément constitutif. La végétalisation est considérée dans les règles professionnelles et par les professionnels de l'étanchéité comme faisant indissociablement corps avec l'étanchéité.

Les artisans étancheurs ont plus de facilité puisqu'ils ne peuvent travailler sur les toitures terrasses sans cette garantie. C'est leur cœur de métier et dans ce sens, la végétalisation est généralement considérée par les assurances comme une protection de l'étanchéité<sup>29</sup> (M. Garcia et Mme Boudon, modération par M. Degoul). Pour la plupart des entreprises, et notamment les plus expérimentées (Mme Boudon et M. Garcia), cette technique est considérée comme une technique traditionnelle et n'engendre pas ou peu de surprimes d'assurance.

Le problème de la réglementation pour le travail en hauteur est aussi à prendre en considération (Mme Boudon, M. Garcia, Mme Grosbellet). Les toitures végétalisées sont un métier à part entière, très proche du métier des étancheurs, voire des couvreurs, mais beaucoup plus éloigné des paysagistes qui doivent acquérir de nouvelles compétences et de nouvelles assurances pour garantir cette activité.

Dans ce contexte, les assurances sont réticentes et réservées quant à assurer des techniques où les retours d'expérience sont trop peu nombreux (Mme Boudon, M. Garcia, M. Degoul). Les surprimes et les refus d'assurer sont donc assez courants à l'heure actuelle, même si de documents techniques, tels que les avis techniques et les ATEx, semble être une solution pour résoudre ce problème. Mais sont-ils suffisamment pertinents pour répondre durablement aux exigences des assurances ?

### ***5- La formation : une déformation professionnelle***

Les toitures végétalisées requiert des compétences hybrides (M. Lassalle, Mme Carboneras), englobant les professionnels de la toiture et les professionnels du végétal, qui n'ont jamais ou rarement travaillé ensemble et n'ont pas les mêmes compétences. Elles se trouvent au croisement du bâtiment, de l'étanchéité et de l'horticulture. Il y a deux obstacles à la formation des professionnels sur les toitures végétalisées.

Ces formations se déroulent soit dans les entreprises des fabricants soit dans des centres de formations spécialisés, et portent essentiellement sur les aspects qui intéressent un type de public particulier au détriment d'autres aspects essentiels (formations Tecomah, Ecovegetal, Soprema ...). Par exemple, il existe une primauté des formations par les fabricants, formations qui s'arrêteront principalement sur la mise en place du complexe d'étanchéité et beaucoup moins sur l'aspect végétal. Des formations incomplètes peuvent avoir des conséquences sur le marché et il est nécessaire de proposer une formation complète dans les années à venir (M. Lassalle).

La formation a aussi pour objectif de résorber un obstacle récurrent : le changement d'habitudes. Les innovations entraînent des changements d'habitudes qui ne sont pas toujours acceptés. Par exemple, un constat touche la limite de compétences des étancheurs en ce qui concerne les végétaux. Une majorité des fabricants recourent à un seul type de végétaux, et sont réticents aux innovations proposées par des professionnels du végétal (Mme Grosbellet et M. Damas). Le changement d'habitude touche aussi le métier en lui-même. Par exemple, la plupart des couvreurs n'ont pas encore le réflexe de proposer cette technique, notamment par peur du changement ou des problèmes générationnels (Mme Quintin)... L'habitude est un frein important pour certains acteurs. D'où l'importance de la formation et de l'information.

---

<sup>29</sup> Voir la définition de la note numéro 38

## **6- Une remise en cause des professionnels sur l'absence d'entretien des toitures végétalisées**

L'un des obstacles le plus récurrent évoqué par les interviewés concernent l'entretien, la maintenance des toitures végétalisées. Il semble que cela soit la préoccupation actuelle de l'ensemble des acteurs, depuis les fabricants jusqu'aux maîtres d'ouvrage. Historiquement, après avoir prôné pendant de nombreuses années l'absence d'entretien, la majorité des professionnels sont revenus sur leur position et incitent aujourd'hui les maîtres d'ouvrage à un minimum d'entretien. Ce revirement de situation n'est pas en faveur des fabricants et des installateurs car beaucoup de maîtres d'ouvrage choisissent les toitures végétalisées pour cette absence d'entretien (Mme Guyot, M. Houzelle, appuyé par les architectes et les bureaux d'études).

L'entretien renvoie finalement à la qualité. Le souci de la majorité des fabricants est de véhiculer une image très positive des toitures végétalisées. Or, les sinistres (perçement de l'étanchéité ...), l'échec du développement de la végétalisation dans certains cas (le développement inégal des plantes, un taux de couverture inférieur à 50% ...), les toitures abandonnées (amoncellement de déchets, mort des végétaux suite à une importante sécheresse ...) entraînent une vision négative. Pour pallier cette vision, l'entretien doit être obligatoire selon eux (tous les membres de l'Adivet sont d'accord sur ce point, désormais inscrit dans les règles professionnelles).

### **B) Des leviers définitivement acquis ?**

#### **1- Une multitude de performances supposées**

L'un des leviers en faveur du développement des toitures végétalisées est la multitude des performances qui leur est prêtées par la plupart des acteurs. Le côté plurifonctionnel des toitures végétalisées est un atout pour beaucoup d'entre eux car cela permet aux maîtres d'œuvre (du fabricant au bureau d'étude) de rebondir sur plusieurs aspects, en fonction des besoins des maîtres d'ouvrage.

Ainsi, les acteurs invoquent dans leur discours ces vertus pour développer leur action et en faire des arguments de vente. La grande majorité des fournisseurs communique auprès des médias et de leurs clients sur les nombreuses vertus de la végétalisation. La plupart des maîtres d'œuvre met en avant des arguments comme la valorisation du patrimoine, la réponse aux cibles HQE... Les maîtres d'ouvrage insistent sur leur visibilité et la réponse à plusieurs enjeux de leur politique environnementale. Cette plurifonctionnalité a permis la mise en place de subventions à des échelles et pour des objectifs différents. C'est le cas de l'agence de l'eau Seine-Normandie ou du département des Hauts-de-Seine qui financent les toitures végétalisées pour la gestion des eaux pluviales et pour la région parisienne qui considère ce système en termes thermique principalement.

Les multiples avantages attribués aux toitures végétalisées constituent *a priori* un atout en termes de développement durable. La multiplication des avantages permet de jouer sur plusieurs tableaux. Le

coût qu'elles impliquent est accepté par les maîtres d'ouvrage en partie grâce à tous les avantages que cela représente.

Mais les différents acteurs mettent plus ou moins en avant ces performances. En effet, assez peu de travaux les vérifient et les valident. L'un des obstacles au développement de ces systèmes est le fait que ces performances ne sont pas avérées. Pourtant, hormis les attentes très précises, les exigences de performances de certains acteurs, le discours écologique actuel convainc une grande partie des acteurs.

## ***2- L'esthétique : un atout partagé entre les usagers***

L'esthétisme des toitures végétalisées s'apprécie plutôt en milieu urbain dense, où le minéral prime et où le végétal est recherché. Cela fait partie de l'image de bien-être et d'un retour au vert, à la nature qui se développe aujourd'hui en milieu urbain, issue d'une volonté politique forte de valorisation du patrimoine, du cadre de vie (M. Houzelle, les architectes). Les maîtres d'ouvrage y recourent pour, par exemple, permettre aux immeubles d'habitation alentours de valoriser leur vis-à-vis, d'offrir aux usagers une vue sur un espace vert.

Les questions de citoyenneté et de partage sont ainsi très importantes. La toiture végétalisée, quand elle est réalisée sur une toiture inaccessible, n'est pas vue par les maîtres d'ouvrage, notamment par les propriétaires privés. Dans ce cas, c'est un acte de partage, de générosité envers les bâtiments alentours, que beaucoup de personnes ne sont pas prêtes à offrir (Mme Carboneras, Mme Lopez-Diaz, M. Debray, les architectes ...). La notion de visibilité est donc très importante car, d'une part, la végétalisation n'est pas visible pour les propriétaires ou les usagers d'un bâtiment, et d'autre part, les toitures végétalisées n'étant pas visibles, les usagers ne se sentent pas concernés (M. Maytraud).

Par ailleurs, l'enjeu de cette esthétique repose sur un enjeu qualitatif. Au-delà du fait que ce ne sont pas des « jardins à la française », les toitures végétalisées se doivent d'être propres et entretenues au risque de ressembler à des « terrains vagues ». La qualité de la végétation et son amélioration sont donc un sujet qui ne doit pas être mis de côté, l'un des objectifs étant de proposer un espace vert abouti, proposant des essences végétales originales, multiples et visuellement agréables à regarder.

## ***3- Les toitures végétalisées comme enjeu du développement durable***

Au-delà de ce caractère plurifonctionnel, il y a une image « verte » qui s'appuie sur cette pluri-fonction. Un consensus autour d'un objet « bon pour la planète » (M. Debray, M. Sébenne, M. Bonnet ...) relègue chaque performance individuelle dans une palette de vertus globale, répondant à un effet de mode, une sensibilité écologique que de plus en plus de personnes partagent. Seuls les acteurs qui ont une attente très précise sur une performance particulière ne partagent pas ce consensus.

Ainsi, le marché des toitures végétalisées s'appuie sur l'évolution de la société en faveur du développement durable et communique sur l'image « verte » que véhicule la végétalisation. Il y a un engouement pour l'écologie urbaine, la démarche HQE de la part des médias, des politiques. C'est

sur ce point que certains fabricants travaillent, en utilisant les toitures végétalisées au profit d'un marketing écologique (M. Lassalle, rôle de l'Adivet). L'essor que connaît cette technique depuis quelques années prouvent que la démarche commerciale de ces fabricants est efficace.

Par ailleurs, certaines collectivités, de même que des entreprises, jouent sur l'image écologique et pédagogique de ces toitures. En effet, une végétalisation de toitures est directement associée à un bâtiment HQE, à l'écologie urbaine, aux éco-quartiers. C'est une vitrine pour ceux qui veulent montrer qu'ils œuvrent pour la planète. Mais il faut aussi faire attention de ne pas tomber dans le Greenwashing (Mme Gandon), au détriment des performances réelles de ces toitures.

### **C) La réglementation : une mutation constante des obstacles et des leviers**

Un point peu abordé dans cette synthèse est la réglementation. Elle ne peut être considérée ni comme un obstacle, ni comme un levier dans la mesure où celle-ci évolue régulièrement au détriment ou en faveur des toitures végétalisées.

Le choix d'un cadre réglementaire peut s'avérer être un obstacle à long terme. En effet, la pose de toitures végétalisées est aujourd'hui encadrée par des règles professionnelles. De plus en plus d'Avis Techniques sont aussi demandés par certains fabricants pour appuyer leur technique et renforcer leur crédibilité. Mais il y a tout de même une opposition entre un certain nombre de fabricants et de syndicats, qui pensent que les règles professionnelles sont suffisantes, et ceux (la CAPEB, les maîtres d'œuvre (architectes, bureaux d'études et entreprises de pose), les contrôleurs techniques, les maîtres d'ouvrage) qui veulent un cadre plus strict, pour des raisons d'assurance, mais aussi pour fiabiliser la technique, empêcher les malfaçons, et maintenir la bonne réputation de la végétalisation de toitures. Le problème est que la technique n'est pas encore stabilisée et est en constante évolution. L'exemple type est la définition dans les règles professionnelles d'une pente maximale de 20%, qui réduit le champ d'action de certains professionnels comme les couvreurs.

Néanmoins, la réglementation évolue dans le sens du développement durable. Si les acteurs soulevaient, dans un premier temps, ce problème, il semble que la « mode » du développement durable ait fait tomber quelques obstacles. Par exemple, le code de l'urbanisme évolue dans ce sens. L'article 4 du Grenelle de l'Environnement II rend les matériaux écologiques, les dispositifs de rétention des EP..., soumis par les demandeurs dans les permis de construire, non opposable, de plus en plus de collectivités (Mme Guyot, Paris) intègrent dans leur règlement d'urbanisme (article 4 et 13) les toitures végétalisées comme une solution envisageable ...

Enfin, à partir du moment où le CSTB a commencé à valider des avis techniques sur ces systèmes, la technique a été reconnue auprès de tous les acteurs concernés. La multiplication des avis techniques va enclencher le processus pour la formulation d'un DTU, ultime document permettant la reconnaissance de la qualité et de la fiabilité d'une technique (M. Demarque).

A l'instar de ce que l'on a pu constater pour la réglementation, rares sont les thèmes définis uniquement par un obstacle ou un levier. Les toitures végétalisées se développent constamment, entraînant la mutation des frontières entre les thématiques liées à ce sujet telles que les aspects réglementaires, organisationnels, qualitatifs ...

Dans ce contexte, plus qu'en termes dichotomiques opposant obstacles et leviers, il paraît plus pertinent de caractériser les enjeux fondamentaux relatifs aux toitures végétalisées, et notamment au regard des court, moyen et long termes. Une telle caractérisation nous semble plus opérante qu'une approche statique (au sens d'une photographie instantanée) de ce qui apparaît aujourd'hui obstacles ou leviers.

# LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Tableau 1 : Catégorisation des acteurs concernés par les TTV .....	6
Figure 1 : Agencement des acteurs de la filière TTV .....	10

# BIBLIOGRAPHIE

- ARMAND J., RAFFESTIN Y., 140 séquences pour mener une opération de construction. Coll. Méthodes, éd. Le moniteur, Paris, 1997. 283 pages.
- ARRDHOR – CRITT Horticole, *Espèces utilisables en végétalisation extensive de toiture, résultats d'essais 2009-2010*, présentation lors des 1ères rencontres techniques nationales « Toitures Extensives Végétalisées », 22 septembre 2010, Rochefort sur Mer. 72 pages.
- CSFE, SNPPA, Unep, « Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », 2002. 27 pages
- CSFE, Adivet, FFB, SNPPA, Unep, « Règles professionnelles pour la conception et la réalisation de terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, 2007. 37 pages.
- CSTC, *Toitures vertes : évacuation des eaux pluviales*, Les dossiers du CSTC, cahier n°2, mars 2006.
- DEYRIS T., DUGOUGEON R., *La toiture végétalisée*, document support interne, CETE du Sud-Ouest, département Aménagement-Infrastructures, septembre 2009. 111 pages.
- DUBOIS-PETROFF M-P., *La nouvelle vie des toits*, coll. Recette d'architecte, Paris : éd. Charles Massin, 2007. 96 pages.
- ERNEWEIN A., *Analyse socio-économique des freins et leviers pour le développement des toitures végétalisées en France : application à l'agglomération nancéienne*, rapport de stage Master 1, CETE de l'Est, Nancy-Université, août 2010. 126 pages.
- HOUDART, T et M. F., *La prairie sur le toit, technique de végétalisation des toitures en pente*, Paris : Editions Maïade, 2004. 131 pages.
- JOURNEE M., *Quelles perspectives de développement pour les toitures végétalisées en France*, Master 2 Urbanisme et Aménagement, Institut Français d'urbanisme, Septembre 2010. 117 pages.
- LASSALLE F., *Végétalisation extensive des toitures et terrasses, guide technique*, édition le moniteur, Paris, 2008, 244 pages.
- MUCCHIELLI A., *Les méthodes qualitatives*, coll. Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, Paris : mai 1991, 126 pages.
- TISSERONT F., *Etude sur la contribution des toits verts dans la mise en place de la trame verte urbaine*, rapport de stage Master 2 Ecologie Biodiversité Evolution, Université Paris-Sud 11, octobre 2010. 39 pages.
- [www.adopta.fr](http://www.adopta.fr), Fiche technique n°8, *La toiture verte*. Np.

# ANNEXES

## **Annexe 1 :**

### **Entretiens réalisés par M. Journée dans le cadre de son mémoire de Master 2 « Ville Durable » de l'Institut Français d'Urbanisme (mémoire co-encadré par B. de Gouvello)**

Personnes interviewées exclusivement par M. Journée

- Alexandre Nezeys, Mairie de Paris - Direction de la Propreté et de l'Eau, 29 mai 2010
- Emmanuel Houssin, SIPLAST : 21 mai 2010
- Lise Boussert, CSFE, 20 mai 2010
- Raphaël Lamé, Société Le Prieuré, 24 juin 2010

Personne ayant fait l'objet d'une interview commune

- Cécile Guyot, Mairie de Paris, Direction du Patrimoine et de l'architecture, 23 juin 2010

Personnes interviewées par M. Journée ayant été également interviewées séparément par J. Chauveau.

- Antoine Demarque, CSTB, 21 juin 2010
- Ronan Quillien, DEA 93, 4 juillet 2010

**Annexe 2 :**  
**Quelques comptes-rendus d'entretiens**

- Christophe Lehoucq, Direction de l'Eau du Conseil Général des Hauts de Seine (1<sup>er</sup> juin 2010)
- Gérard Sénior, Architecte, directeur du Cabinet AETIC (16 août 2010)
- Philippe Bonnet, Société Sika France (2 juin 2010)
- François Lassalle, Soprema et Adivet (17 juin et 5 juillet 2010)

\* \*

\*

## ***Compte-rendu d'entretien Christophe LEHOUCQ***

Entretien enregistré le 1er juin 2010

Compte-rendu relu par M. Lehoucq

De formation universitaire (maîtrise sciences et techniques de gestion de l'environnement, DEA éco-éthologie), M. Lehoucq est adjoint au chef du service études et contrôle de la délégation, à la direction de l'eau du conseil général des Hauts de Seine.

### Sommaire :

La problématique des eaux pluviales dans un département fortement urbanisé

Les solutions mises en place dans le département depuis 20 ans

Des conventions de gestion coordonnée de l'assainissement avec les communes

L'étude Sépia Conseil pour recenser les toitures végétalisées

Les outils d'intervention : sensibilisation et accompagnement pour la régulation des eaux pluviales

Le département comme prescripteur et financeur

Des aides financières en faveur des techniques alternatives

Les toitures végétalisées doivent participer à la régulation des eaux pluviales

Etre en cohérence avec la réglementation : le DTU 43

La nécessité d'encadrer et de fiabiliser les toitures végétalisées

Des liens indirects avec les industriels

L'existence d'une concurrence avec les panneaux photovoltaïques

Une sensibilisation auprès des élus et des architectes de bâtiments de France

Les toitures végétalisées rendent les toitures plates visuellement acceptables

Des vertus à valoriser auprès des aménageurs

L'intérêt des toitures végétalisées dans un espace très urbanisé

Imposer les toitures végétalisées dans le PLU

Les principaux freins au développement des toitures végétalisées

Les attentes du projet TV GEP : l'abattement des pluies d'orage

## **La problématique des eaux pluviales dans un département fortement urbanisé**

La problématique de base au sein de la direction de l'eau et du conseil général, outre le fait d'être propriétaire de réseaux d'assainissement (spécificité de la petite couronne), est que le département est très urbanisé (notamment depuis les 50 dernières années). Le réseau départemental est majoritairement unitaire, avec uniquement au sud un réseau séparatif. Les réseaux unitaires ont été calibrés pour recevoir les eaux usées et un peu les eaux pluviales. Mais du fait de l'urbanisation et de l'imperméabilisation des sols, le département a été confronté à une double problématique : des risques de débordements de réseaux d'assainissement lors d'évènements pluvieux importants, et des déversements vers le milieu naturel par le biais de déversoirs d'orage le long de la Seine, afin de soulager les réseaux unitaires pour éviter ces débordements (et donc entraîne la pollution du milieu récepteur).

## **Les solutions mises en place dans le département depuis 20 ans**

Depuis une 20aine d'années, voire il y a encore 10-15 ans, la solution était de créer de gros bassins de stockage d'eau pluviale et de surverse de réseaux unitaires. Au tout début des années 2000, s'est posée la problématique de gérer les eaux pluviales à la source et d'essayer d'avoir une conception plus environnementaliste et plus écologique de la gestion de l'eau et du cycle de l'eau. Ceci nécessite de sensibiliser les acteurs sur cette problématique, ce qui permettra d'une part de soulager les stations d'épuration (et notamment leur rendement vis-à-vis de la concentration de la pollution qui n'est pas la même lors des évènements pluvieux) et d'autre part de réduire les investissements en évitant le tout-tuyau.

Au début des années 2000, il a été mis en place la limitation du ruissellement à la parcelle qui s'applique à toute nouvelle construction (suite à des études capacitaires du réseau). Dans le cadre des permis de construire, toute nouvelle construction qui se raccorde au réseau départemental doit appliquer une limitation du ruissellement : 15l/s/ha sur l'ensemble du réseau, excepté dans la vallée de la Bièvre (10l/s/ha) et à Rueil-Malmaison (3l/s/ha).

En 2004-2005, l'élaboration du schéma départemental d'assainissement a été faite en concertation avec l'ensemble des partenaires du département : les communes (qui récoltent), le département (qui transporte) et le SIAAP (qui épure). Il y a 10% des branchements qui sont fait directement sur le réseau du département et le reste se fait au niveau communal. Donc pour qu'il y ait une cohérence de gestion tout au long du système épuratoire, il fallait une rencontre avec les partenaires situés à l'amont du réseau départemental pour mettre en place une politique cohérente et avoir des objectifs communs quant à la gestion de l'assainissement.

A l'issue de ces rencontres, un nouveau schéma a été rédigé et ce dernier a été voté en décembre 2005 par l'unanimité des élus. Une nouvelle limitation du ruissellement a été inscrite: 2 l/s/ha vers le réseau unitaire et 10 l/s/ha vers le réseau séparatif qui se rejette dans le milieu naturel.

## **Des conventions de gestion coordonnée de l'assainissement avec les communes**

A l'issue de la concertation, il a été décidé de mettre en place des conventions de gestion coordonnée de l'assainissement avec les communes. En 2010, 80% des communes ont signé ces

conventions, sachant qu'elles n'ont pas toutes adopté la même limitation de ruissellement que le département.

### **L'étude Sépia Conseil pour recenser les toitures végétalisées**

M. Lehoucq a aussi travaillé avec Sépia Conseil. Ce bureau d'études a réalisé un recensement de ce qui a été fait au niveau européen sur les toitures végétalisées, ainsi que le recensement des ouvrages existants dans les Hauts-de-Seine et en Seine-Saint-Denis.

### **Les outils d'intervention : sensibilisation et accompagnement pour la régulation des eaux pluviales**

La direction de l'eau a réalisé des plaquettes de sensibilisation sur toutes les techniques alternatives, dont les toitures végétalisées. La plaquette concernant les toitures végétalisées décrit les différentes sortes de végétalisation, les atouts de cette technique ainsi que la manière de les mettre en œuvre et de quoi elles se composent (plaquette « Végétaliser les toitures »).

Pour les projets d'aménagement, le département n'intervient pas sur la technique en elle-même, mais il peut intervenir à la demande d'un aménageur sur une zone à aménager en regardant les différentes solutions adaptables pour le projet. Par contre, il demande dans tous les cas une régulation des eaux pluviales sur la toiture. Et s'il n'y a pas de régulation prévue au niveau de la toiture, il faut qu'il y ait un autre ouvrage à l'aval pour compenser. Le département applique tout de même un coefficient de ruissellement bas pour les toitures végétalisées, même s'il n'y a pas de système de régulation, car il considère qu'il y a un abattement naturel grâce à la végétation et au substrat.

### **Le département comme prescripteur et financeur**

La direction de l'eau ne travaille pas sur la réglementation et elle s'est vraiment concentrée sur la régulation des eaux pluviales. Leur plaquette présente uniquement un profil type d'une toiture terrasse végétalisée. La direction de l'eau n'a jamais été maître d'ouvrage d'une toiture végétalisée mais plutôt le prescripteur et le financeur pour les eaux pluviales. Il regarde donc uniquement le résultat et si cela correspond à leurs propres critères.

### **Des aides financières en faveur des techniques alternatives**

Le conseil général a mis en place des aides financières pour que la gestion des eaux pluviales (techniques alternatives et ouvrages de régulation des eaux pluviales) soit prise en compte en amont des réseaux. Ces subventions favorisent les techniques alternatives (ou techniques douces) telles que les noues, les bassins à ciel ouvert, l'infiltration et les toitures végétalisées. Le particulier ou la commune choisissent leur solution pour gérer leurs eaux pluviales, mais parmi les aides, le département favorise tout ce qui est techniques alternatives.

Le taux de subvention est différent en fonction du type d'ouvrage. Si c'est un bassin enterré traditionnel c'est une participation à 10%, si ce sont des noues, de l'infiltration, un bassin à ciel ouvert c'est 30%, ... Pour les toitures végétalisées, le taux a changé tout récemment. Il s'élève à 30%, avec un plafond de 60 euros/m<sup>2</sup> de surface active. Jusqu'ici, il n'y a que des communes qui ont recouru à cette subvention pour des toitures végétalisées extensives. Le nombre de projets

subventionnés pour les toitures végétalisées par rapport aux autres techniques subventionnées représente environ 13 % des projets.

M. Lehoucq ne sait pas si les communes ont mis en place des subventions sur ce sujet mais ne pense pas que ça soit le cas. Par contre, ce qui est demandé par le département, quelle que soit la technique, concerne le financement d'un particulier. Si le département finance un particulier, il demande aux collectivités et intercommunalités de financer le projet au même taux que lui. Pour obtenir ces subventions complémentaires, cela se passe au cas par cas. Le département indique aux particuliers qu'ils peuvent faire une demande à leur commune et cette dernière accepte ou non. Il n'y a pas eu beaucoup de dossiers depuis que le département a mis en place ce dispositif (moins de 10, sur des projets de techniques alternatives, hors toiture végétalisée).

### **Les toitures végétalisées doivent participer à la régulation des eaux pluviales**

La direction de l'eau du département suit les chantiers en général mais n'est pas toujours invitée aux comités de pilotage. Par contre, elle impose des contrôles de conformité à l'issue du chantier pour vérifier que l'ouvrage est bien conforme à ce qui était prévu afin de verser la subvention (suite à la réception de l'ouvrage par la collectivité). Ce contrôle vient s'ajouter au contrôle fait par le bureau de contrôle mandaté par le maître d'ouvrage.

Le département effectue un contrôle par rapport à la problématique de régulation et de l'existence des ouvrages de stockage des eaux pluviales. Pour cela il fait appel à son délégataire, SEVESC (Société des Eaux de Versailles-Saint-Cloud), l'exploitant du réseau d'assainissement. Ils vont vérifier la présence de la toiture végétalisée et la mise en place d'une régulation à l'exutoire de cette toiture (comme l'a expliqué T. Maytraud, on équipe l'exutoire d'une rehausse sur laquelle on perce trois trous pour le débit puis passe par-dessus à 40 mm, comme une surverse).

Comme le département fait des contrôles de conformité de tous les branchements sur le réseau départemental, pendant ces contrôles, l'existence d'ouvrages respectant la limite des 2l/s/ha est vérifiée. Dans le cas d'une toiture végétalisée raccordées au réseau communal, leur conformité est vérifiée si l'ouvrage a bénéficié d'une subvention départementale.

### **Etre en cohérence avec la réglementation : le DTU 43**

La direction de l'eau a contacté un contrôleur chez Veritas sur la régulation des eaux pluviales sur les toitures terrasses, et sur le fait que temporairement il y ait une certaine lame d'eau sur la toiture. Le contrôle semble se baser sur une liste de critères à vérifier, identifié dans le DTU. Si un des critères n'existent pas, le contrôleur indique qu'il n'a pas d'avis car dans ses critères ce point n'existe pas. Si par contre, un constructeur ou une association comme l'Adivet, font entrer de nouveaux critères dans le DTU, à ce moment là le contrôleur devra vérifier ces nouveaux points.

### **La nécessité d'encadrer et de fiabiliser les toitures végétalisées**

Concernant la réglementation, M. Lehoucq ne pense pas qu'il y aura une loi. Mais par contre c'est une nécessité qu'il y ait un bon encadrement sur les normes techniques pour fiabiliser la technique, et notamment en ce qui concerne l'étanchéité et le poids (poids des végétaux, de l'eau et de la neige). En effet, le poids au mètre carré est important même pour l'extensif. Il faut que les constructeurs fassent attention à cela pour éviter certains désagréments et certaines catastrophes.

Cet avis est renforcé par le fait que le département demande un stockage des eaux pluviales. Il préférerait qu'il y ait des normes fiables pour les aménageurs et les gens intéressés, qui puissent faciliter le travail pour le département, notamment dans la promotion de ces techniques et pour rassurer l'aménageur.

### **Des liens indirects avec les industriels**

Le département ne travaille pas directement avec les constructeurs de toitures végétalisées. Par contre, M. Lehoucq a rencontré des membres de l'ADIVET sur la régulation des eaux pluviales par les toitures végétalisées il y a déjà deux-trois ans.

### **L'existence d'une concurrence avec les panneaux photovoltaïques**

Par ailleurs, étant très lié à l'assainissement, M. Lehoucq n'a pas la visibilité sur les autres utilisations des toitures. Par contre, il y a une direction de l'aménagement et du développement durable qui promeut la HQE, dont les panneaux photovoltaïques, qui peuvent avoir un rôle un peu compétiteur vis-à-vis des toitures végétalisées (ils prennent la lumière et l'espace). Il a conscience de ça, mais n'a jamais été confronté à ces problématiques là.

### **Une sensibilisation auprès des élus et des architectes de bâtiments de France**

Dans un contexte bien urbanisé, avec de surcroît des toits plats, cette technique est bien perçue. Par contre, il peut y avoir dans certains PLU une interdiction de faire des toits plats. Il y a donc un travail à faire sur la sensibilisation des élus mais aussi sur la sensibilisation des architectes des bâtiments de France.

Au niveau des collectivités, à part aller voir les élus et les convaincre sur l'intérêt des toitures végétalisées en ce qui concerne la gestion de l'eau, mais aussi les vertus acoustiques et thermiques, le département n'a pas vraiment de marche de manœuvre.

Par ailleurs, s'il y a un périmètre historique qui impose un style des maisons, il est inutile d'insister. D'un autre côté, il y a très peu de constructions neuves dans ces zones là et ce ne sont plus les élus qu'il faut convaincre mais les architectes des bâtiments de France.

### **Les toitures végétalisées rendent les toitures plates visuellement acceptables**

M. Lehoucq ne pense pas qu'il y ait de freins d'un point de vue esthétique, au contraire. Surtout dans le 92 où il y a beaucoup de toitures plates. Dans des zones avec de grandes résidences ou du tertiaire, on a souvent des toitures terrasses. La question n'est donc pas la même que s'il n'y avait que des résidences avec des toitures en pente. Pour donner un exemple peu conventionnel, à Suresnes, il y a une toiture terrasse avec des végétaux en plastique. Cela montre l'intérêt esthétique que cela peut induire.

### **Des vertus à valoriser auprès des aménageurs**

M. Lehoucq n'est pas assez au fait des problématiques auxquelles sont confrontés les aménageurs et les constructeurs en termes de réglementation.

Mais le département est très au fait des vertus attribuées aux toitures végétalisées. Quand il propose à un aménageur de faire une toiture végétalisée, il indique aussi que cela permettra également

d'avoir un bon isolant thermique et acoustique et donc de réduire la chaleur en été et d'isoler en hiver. Les aménageurs prennent ces éléments en compte car ce sont des critères connus.

Les toitures végétalisées se développent bien en région parisienne et pour M. Lehoucq, ça ne peut qu'aller dans le bon sens. Même si ces toitures ne sont pas régulées, elles permettent quand même un abattement de l'événement pluvieux et des surfaces qui présentent un peu de végétation et améliorent la biodiversité.

### **L'intérêt des toitures végétalisées dans un espace très urbanisé**

Tout d'abord, les toitures végétalisées, avec les techniques alternatives, permettent d'offrir une palette de solutions techniques à un aménageur, correspondant le mieux au projet.

La deuxième raison, qui correspond le plus à la situation des Hauts-de-Seine et de certains secteurs en particulier, est que l'espace est très contraint et qu'il n'y a que peu d'espaces verts ou de zones perméables à proximité. Les solutions pour limiter le ruissellement des eaux pluviales sont, soit de créer un bassin de stockage enterré au niveau du parking soit utiliser les surfaces disponibles pour faire du stockage. D'un point de vue économique et esthétique, il est plus simple d'arriver à effacer une surface en créant une toiture végétalisée avec régulation des eaux pluviales qu'à créer un bassin enterré.

Par rapport au coût, si une toiture végétalisée est prévue dès l'amont des projets, c'est plus intéressant d'un point de vue économique qu'un bassin enterré. Si le choix se porte sur un bassin enterré, cela comprend l'acheminement des canalisations jusqu'au bassin et un système de pompage pour renvoyer les eaux vers le réseau. Si le choix se porte sur une toiture végétalisée, d'un point de vue gravitaire, les eaux pluviales iront directement dans le réseau.

### **Imposer les toitures végétalisées dans le PLU**

Le PLU peut dans un sens interdire les toitures végétalisées mais aussi les imposer. C'est par exemple le cas du PLU de Levallois-Perret, qui impose les toitures végétalisées sur les constructions neuves

[Notre PLU est également une opportunité pour inciter à l'optimisation de la gestion des eaux pluviales pour limiter les rejets au réseau public : - En ayant recours aux toitures végétalisées (inscrites aux documents d'urbanismes depuis près de 10 ans), à la récupération de l'eau pour l'arrosage des espaces verts, le nettoyage des sols... » PADD, page 39].

### **Les principaux freins au développement des toitures végétalisées**

Les problèmes d'étanchéité et de poids.

L'intégration nécessaire dès l'amont des projets

Si c'est une toiture accessible, on ne peut pas faire de stockage (voir le DTU).

Les toitures végétalisées sont plus ou moins accessibles. Pour un entretien régulier ce n'est pas idéal mais a priori la végétalisation extensive ne nécessite pas vraiment d'entretien.

### **Les attentes du projet TV GEP : l'abattement des pluies d'orage**

L'attente du conseil général des Hauts-de-Seine sur le projet est d'avoir une notion plus précise de l'abattement que permet une toiture végétalisée. Cela lui permettra, sur les différents bassins versants des Hauts-de-Seine, de répertorier les toitures terrasses et les toitures végétalisées afin d'appliquer un coefficient d'imperméabilisation un peu différent grâce à l'évaluation de cet abattement.

## ***Compte-rendu d'entretien Gérard Sénior***

Entretien téléphonique non enregistré, le 16 août 2010

Compte-rendu non relu

M. Sénior est Architecte, directeur du Cabinet AETIC

### **Sommaire :**

La démarche HQE doit être gratuite et intégrée dans les pratiques au quotidien

Les toitures végétalisées ne sont pas source de discussions au sein de l'UNSA

La toiture végétalisée est un moyen d'arriver à un certain nombre d'objectifs

Les toitures végétalisées ont du sens en milieu urbain

Des toitures végétalisées pour tous les bâtiments

Un visuel valorisable

L'arbitrage coût/intérêt

L'arbitrage financier en défaveur des toitures végétalisées

Le coût comme premier frein au développement des toitures végétalisées

L'architecte propose les toitures végétalisées, le maître d'ouvrage les accepte

La place de conseil des architectes paysagistes

La question de l'entretien est importante pour les maîtres d'ouvrage

L'adaptation des étancheurs sur le marché, au même titre que le solaire

Les freins concernent aussi la structure du bâtiment

Pour agir sur la biodiversité, il faut une vision à l'échelle de la ville

Une vision globale nécessaire

Imposer une vision globale dans les documents d'urbanisme

La problématique de la garantie décennale : la nécessité d'un seul intervenant

Après les toitures, les façades végétalisées

### **La démarche HQE doit être gratuite et intégrée dans les pratiques au quotidien**

M. Senior s'intéresse aux toitures végétalisées depuis environ 10 ans. Il s'y intéresse en termes d'approche environnementale du bâtiment, de démarche HQE, de réponse à des objectifs nécessaires à atteindre. On vient le voir car c'est un spécialiste dans le domaine du développement durable. Il est par ailleurs conseil HQE pour la ville de Paris sur toutes leurs opérations.

Il est sollicité et répond à des appels d'offres, à la fois en tant que UNFSA et au sein de son cabinet (qui a une partie recherche et développement). 10 personnes travaillent dans son cabinet. Il est à la fois conseil, recherche, maître d'œuvre et bureau d'études (il a des ingénieurs dans l'équipe).

Il est spécialisé dans la HQE mais ne fait pas que ça. Pour lui, la HQE doit être fondue dans le métier, elle doit être intégrée dans les pratiques quotidiennes, à chaque échelon d'un projet. Il milite pour la HQE à un euro. Il souhaite qu'elle soit intégrée au bâtiment, au même titre que la sécurité incendie par exemple.

### **Les toitures végétalisées ne sont pas source de discussions au sein de l'UNFSA**

Ce n'est pas une source de discussion au sein de l'UNFSA. La toiture végétalisée est utilisée au même titre que certains types de matériaux, dans une stratégie sur le plan énergétique ou autre. L'UNFSA n'a pas de position. Les toitures végétalisées font partie d'une approche environnementale. C'est un des moyens pour répondre à des exigences, notamment dans la démarche HQE.

### **La toiture végétalisée est un moyen d'arriver à un certain nombre d'objectifs**

Les toitures végétalisées peuvent être un moyen de parvenir à retenir l'eau, de participer à la gestion des eaux pluviales à la parcelle ou à l'échelle de la municipalité, qui a des réseaux d'assainissement problématiques et qui impose un débit de fuite très faible. L'objectif est de retenir l'eau de plus possible pour freiner l'arrivée des eaux pluviales dans les réseaux publics.

On a besoin d'un certain nombre de technique pour répondre aux problèmes de rétention des eaux pluviales (c'est un bon moyen), mais aussi pour capter les poussières et participer à la lutte contre les îlots de chaleur urbains.

Mais aussi, les toitures végétalisées protègent l'étanchéité et participent à l'isolation du bâtiment.  
« L'important c'est le résultat, pas les moyens ».

### **Les toitures végétalisées ont du sens en milieu urbain**

Jusqu'à présent M. Senior n'en a pas fait. On peut s'y intéresser sans pour autant en faire. Dernièrement, il a travaillé sur un bâtiment HQE. Une toiture végétalisée était envisagée mais du fait du surcoût trop important et de la localisation de l'usine en pleine campagne, cette idée a été abandonnée. Ça n'avait aucun sens. « Mettre 100 000 euros ou 150 000 euros la dessus c'est inintéressant ».

Les toitures végétalisées ont du sens en milieu urbain pour lutter contre les îlots de chaleur, retenir les poussières, mais pas en pleine campagne. M. Senior a du faire un arbitrage lui-même car c'était une demande du maître d'ouvrage. La toiture végétalisée fait partie des clichés, c'est-à-dire que si un

bâtiment a une toiture végétalisée, c'est forcément un bâtiment HQE. C'est comme les panneaux photovoltaïques.

C'est en milieu urbain que ça a du sens, et non dans un milieu diffus, en milieu rural.

### **Des toitures végétalisées pour tous les bâtiments**

M. Senior propose les toitures végétalisées pour toutes les surfaces, et pas uniquement pour les grandes surfaces. A chaque fois qu'il peut en proposer, il le fait.

### **Un visuel valorisable**

C'est aussi un signe vis-à-vis de l'environnement. Pour un client c'est valorisable, notamment pour des bâtiments de type tertiaire. C'est quelque chose qui va bien se vendre.

C'est une des façades vues par les voisins ou par les habitants eux-mêmes, une cinquième façade qu'il faut bien traiter.

### **L'arbitrage coût/intérêt**

On lui demande souvent de faire des toitures végétalisées. C'est quasiment systématique maintenant.

Il faut alors faire l'arbitrage entre le coût et l'intérêt que cela apporte au bâtiment.

Par exemple, pour le bâtiment industriel, il avait beaucoup de moyens pour gérer l'eau à la parcelle. Une toiture végétalisée n'était donc pas nécessaire.

Par exemple, ils ont préconisé une toiture végétalisée sur une crèche en milieu urbain car on ne pouvait pas infiltrer l'eau de pluie du fait de la nature du sol (gypse).

### **L'arbitrage financier en défaveur des toitures végétalisées**

C'est un surcoût. Ce n'est pas plus cher, mais c'est un surcoût. A un moment donné d'un projet, il faut faire des arbitrages et ce n'est pas en faveur des toitures végétalisées quand il faut faire des économies.

Mais il y a plusieurs arbitrages possibles. En effet, si on se concentre sur la rétention d'eau par exemple, une toiture végétalisée peut faire économiser sur une cuve ou une solution plus chère que la végétalisation de toiture.

### **Le coût comme premier frein au développement des toitures végétalisées**

Le surcoût, du fait de la nature de l'étanchéité et du poids sur le bâtiment, est le frein le plus important dans le développement des toitures végétalisées. Sur cette option là, le surcoût peut être chiffré.

Après c'est plus compliqué de chiffrer les avantages d'une toiture végétalisée. On peut dire que la durée de vie est plus grande pour l'étanchéité car les toitures végétalisées sont une protection aux intempéries, aux variations de température, ... . Tout dépend de ce que le client veut favoriser pour faire le maximum d'économie sur un temps donné (5 ans, 10 ans, ...).

## **L'architecte propose les toitures végétalisées, le maître d'ouvrage les accepte**

Jusqu'à présent c'est lui qui propose aux clients. Ce ne sont jamais les clients qui viennent demander. Ca fait partie de leur travail. Les maîtres d'ouvrage ont des objectifs d'obtention de labels, de certifications, ... et les moyens d'y arriver sont laissés à la propre stratégie de l'architecte. Il n'a jamais rencontré de maître d'ouvrage lui demandant absolument une toiture végétalisée.

## **La place de conseil des architectes paysagistes**

M. Senior a des contacts avec les architectes paysagistes. Souvent, il les fait intervenir sur les espaces extérieurs. C'est donc naturellement qu'il pose aussi des questions sur les toitures végétalisées. Mais ce n'est pas spécifiquement pour la toiture.

C'est un bon moyen pour trouver des compromis avec le photovoltaïque. Il est dit que l'on ne peut pas mettre les deux mais M. Senior pense le contraire. Cela concerne les panneaux photovoltaïques inclinés. Avec son paysagiste, ils ont trouvé des plantes qui supportent l'ombre. Il y a même plusieurs espèces qui ont supporté cette contrainte, au contraire.

C'est intéressant de travailler avec les architectes paysagistes afin d'articuler les contraintes techniques avec les possibilités qu'ils ont pour répondre à ces difficultés.

## **La question de l'entretien est importante pour les maîtres d'ouvrage**

Un des soucis principaux des clients est l'entretien mais M. Senior les rassure sur le peu d'entretien nécessaire : « non, il n'y a pas de problème, il n'y a pas d'entretien à avoir, on n'a pas de tonte, etc. »

Le problème du client est aussi le coût de l'entretien. Mais il n'y a pas d'entretien particulier. Il parle de l'entretien de la toiture comme étant moins important qu'avec une toiture traditionnelle du fait de la protection de l'étanchéité par la végétalisation. De plus, l'étanchéité est plus solide, mieux protégée et donc pérenne et durable.

## **L'adaptation des étancheurs sur le marché, au même titre que le solaire**

M. Senior s'adresse aux étancheurs qui s'y mettent. Ça l'a d'ailleurs surpris qu'ils répondent favorablement à ses demandes. Ils sont bien relayés par les fabricants, et cela ne concerne que les gros étancheurs (ex : 30000 m<sup>2</sup> sur des bâtiments industriels). Ils se sont adaptés comme pour le photovoltaïque intégré à l'étanchéité.

## **Les freins concernent aussi la structure du bâtiment**

Une toiture végétalisée entraîne quand même un poids important pour un bâtiment neuf. Il faut intégrer dans les calculs le surpoids propre et le surpoids du fait de la quantité d'eau retenue (notamment sur la charpente).

Sur l'existant, il y a des problèmes d'acrotères à surélever. Cette contrainte peut être minimisée puisque dans les réfections, il y a souvent une hausse de l'isolant, ce qui oblige à surélever les acrotères. Donc ça vaut peut être le coup de passer à la toiture végétalisée. De plus, même s'il faut faire des calculs, M. Senior pense que sur les bâtiments à ossature béton (qui regroupe une grande partie des bâtiments aujourd'hui), il n'y a aucun problème car la toiture végétalisée n'est finalement pas très lourde.

## **Pour agir sur la biodiversité, il faut une vision à l'échelle de la ville**

Si on veut agir sur la biodiversité, il faut l'inclure à l'échelle de la ville, dans les documents d'urbanisme et là ça peut avoir du sens. Au niveau d'un territoire, cela a du sens. C'est à l'échelle du territoire qu'il faut regarder les toitures végétalisées. Au niveau d'une toiture ça n'apporte rien mais au niveau de la ville, d'un territoire, c'est là que ça a du sens.

## **Une vision globale nécessaire**

Il souhaite une vision plus globale. Si on veut agir, c'est à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes, pas à l'échelle du bâtiment. Le bénéfice est nul à l'échelle du bâtiment. Le bâtiment restera un étendard de la HQE parce qu'il a une toiture végétalisée. Cela fait partie des oriflammes mis en avant pour montrer qu'on fait un bâtiment HQE mais M. Senior pense que ce n'est pas la bonne problématique.

C'est juste une question d'image aujourd'hui. Si on reste à l'échelle du bâtiment, ce n'est pas l'addition des bonnes volontés qui va faire quelque chose à l'échelle d'une ville. Il faut une vision plus élargie pour la collectivité.

Il faudrait alors prendre une carte Google, voir toutes les toitures qui seraient susceptibles d'être végétalisées et se donner des objectifs (10%, 15 % à végétaliser, les bénéfices qu'on en attend pour la collectivité, ...).

## **Imposer une vision globale dans les documents d'urbanisme**

Cette vision doit être imposée dans les documents d'urbanisme car c'est à cette échelle que l'on traite les besoins communs. La participation de chacun est nécessaire. Quand M. Senior préconise une toiture végétalisée sur le toit d'une crèche de 300 m<sup>2</sup> à Paris, on peut sortir le discours habituel, mais ce discours n'est pas vrai. Par contre, si sur l'ensemble des surfaces, on atteint 10 000 m<sup>2</sup>, 20000 m<sup>2</sup>, ça commence à prendre du sens. Mais il faut au moins 100 à 200 projets. Ce n'est pas la même chose que les panneaux photovoltaïques qui se comptent au kilowatt/heure. Il faut un effet de masse.

## **La problématique de la garantie décennale : la nécessité d'un seul intervenant**

L'association du complexe d'étanchéité et du complexe de végétalisation n'est pas un sujet qui a été abordé dans la garantie décennale. De son côté, M. Senior demande à l'étancheur de faire l'ensemble, même s'ils sous-traitent une partie, pour éviter les contradictions des assureurs et des intervenants.

C'est un sujet qu'il n'a pas fouillé pour les toitures végétalisées mais il l'a fouillé pour les panneaux photovoltaïques et c'est un aspect compliqué. Ce n'est pas du tout au point au niveau juridique aujourd'hui. Ce n'est peut être pas pareil pour les toitures végétalisées car le problème pour le solaire est que l'on a des intervenants qui prennent possession des installations avec, un propriétaire du bâtiment d'un côté, et un locataire de la partie photovoltaïque qu'il va installer de l'autre.

M. Senior prend le parti de ne pas multiplier les acteurs. Il préfère demander à l'étancheur pour qu'il n'y ait qu'un seul intervenant, quitte à ce que l'étancheur sous-traite ensuite à une entreprise du

paysage. C'est toujours à l'interface que se pose le problème dans le bâtiment. Où est-ce que s'arrête l'entreprise qui fait les VRD, le plombier, ... C'est toujours à la jonction que ça pose problème.

### **Après les toitures, les façades végétalisées**

M. Senior s'intéresse aussi aux façades végétalisées qui sont aussi intéressantes comme élément d'architecture. Les toitures végétalisées se sont démocratisées donc maintenant c'est au tour des façades d'être traitées, mais pas uniquement comme les façades de Patrick Blanc mais aussi des végétalisations « traditionnelles », à l'ancienne.

## ***Compte-rendu d'entretien Philippe Bonnet***

Entretien téléphonique non enregistré, le 2 juin 2010

Compte-rendu relu par M. Bonnet

M. Bonnet représente l'entreprise Sika France SA., fabricant d'étanchéité. Il est, par ailleurs, membre de la commission Communication de l'ADIVET.

### Sommaire :

L'entreprise vue par Internet

La place des toitures végétalisées dans l'entreprise

Des chantiers de toutes les tailles

Le développement des toitures végétalisées en France

Un problème de frontières entre extensif et intensif pour les paysagistes

Recourir à un avis technique pour valoriser son produit

Un métier d'étancheurs avant tout

Une qualification requise pour la pose de l'étanchéité pour les toitures végétalisées

Une formation en interne centrée sur l'étanchéité

Une formation type est-elle possible ?

La végétalisation comme la protection de l'étanchéité

Le rôle des bureaux de contrôle

Un contrat d'entretien vivement recommandé

Une normalisation difficile à mettre en place

Des performances thermiques non avérées

Les toitures végétalisées comme image du développement durable

L'ouverture des documents d'urbanisme en faveur des toitures végétalisées

Une disparité nord/sud

Questions complémentaires par téléphone

## **L'entreprise vue par Internet**

Sika est un groupe suisse indépendant, fondé à Zürich en 1910. Ses actions sont cotées à la bourse de Zürich (SWX) depuis 1968. Le groupe Sika est présent à l'échelle mondiale avec 104 filiales (production et commercialisation) dans 71 pays. L'activité du groupe dans le domaine des produits chimiques de spécialité se répartit entre les métiers de la construction et de l'industrie auxquels Sika propose des solutions pour construire, assembler, aménager et réparer tous types de structures (<http://www.sika.fr/>).

## **La place des toitures végétalisées dans l'entreprise**

Sika France est une filiale du groupe Suisse Sika AG. Cette entreprise a une division qui fabrique des membranes d'étanchéité synthétiques (PVC ou FPO). Elle ne pose pas ses produits. Ces membranes sont compatibles avec les toitures végétalisées (c'est un produit de « qualité environnementale »). Par ailleurs, Sika a déjà des connaissances sur cette technique, grâce aux entreprises du groupe basées en Allemagne et en Suisse. Dans ce contexte, l'entreprise a développé un produit, SARNAVERT, et a obtenu un avis technique qui comprend l'étanchéité, le drainage, le substrat et la végétalisation (extensive). Sika fait exclusivement de l'extensif.

## **Des chantiers de toutes les tailles**

En ce qui concerne l'installation de ce produit, ce sont les particuliers qui les installent ou des entreprises de pose. L'entreprise évalue son activité à 100-150 dossiers par an, pour des chantiers de 30 m<sup>2</sup> à 7000 m<sup>2</sup>. Un chantier est considéré comme intéressant quand il concerne une surface de 300 m<sup>2</sup>. Ces chantiers concernent essentiellement des bâtiments publics et notamment des établissements scolaires.

## **Le développement des toitures végétalisées en France**

En 2002, la demande de toitures végétalisées extensives augmente en France, notamment de la part des architectes. La filiale française de Sika a donc testé le marché sur la région Alsace (6 mois) pour ensuite se développer sur l'ensemble du territoire national.

Ce marché est en forte croissance puisqu'en 2002, 80 000 m<sup>2</sup> de toitures végétalisées ont été installées sur l'année, 550 000 m<sup>2</sup> en 2008 et 860 000 m<sup>2</sup> en 2009 (chiffre du recensement de l'ADIVET auprès de ses membres).

## **Un problème de frontières entre extensif et intensif pour les paysagistes**

Au sein de Sika, il n'y a que des spécialistes de l'étanchéité. Mais M. Bonnet a déjà fait des interventions dans des cellules locales de l'UNEP (syndicat des entreprises du paysage) sur la végétalisation. Le problème avec l'UNEP est qu'il n'y a pas de dissociation du marché, notamment entre intensif et extensif. Ce qui entraîne des problèmes juridiques complexes.

## **Recourir à un avis technique pour valoriser son produit**

L'entreprise a très rapidement demandé un avis technique pour son produit SARNAVERT. En 2005, lors d'un chantier public, l'entreprise a recouru à un ATEX. Cet ATEX a perduré jusqu'en 2006-2007.

Suite à cela, une demande d'avis technique pour son système de végétalisation des toitures « SARNAVERT Sarnafil TG 66 F sous végétalisation extensive » a été déposée (AT n° 5/06-1911). Cet avis est enregistré depuis le 10 avril 2007 (jusqu'au 30 novembre 2010).

### **Un métier d'étancheurs avant tout**

Sika fait partie de la CSFE (syndicat des étancheurs) et considère qu'aujourd'hui, il n'y a que peu de petits artisans qui font de l'étanchéité car cela nécessite une qualification et implique la garantie décennale. Par ailleurs, le mandataire dans les projets est souvent l'étancheur car c'est lui qui implique sa garantie décennale.

Il y a deux intervenants : le fabricant (SIKA) et le client, c'est à dire l'installateur dont le métier est l'étanchéité, la couverture, et parfois la charpente. En effet, il y a trois grands supports pour les toitures végétalisées selon les règles professionnelles : le béton, l'acier et le bois. Ce dernier matériau est en plein essor et fait un « bon mariage » avec les toitures végétalisées.

### **Une qualification requise pour la pose de l'étanchéité pour les toitures végétalisées**

Concernant les entreprises de pose, SIKA demande que l'entreprise soit agréée pour tout ce qui concerne l'étanchéité (le personnel doit être formé). Pour la végétalisation, SIKA peut prodiguer des conseils de pose mais c'est un système simple qui ne nécessite pas la présence d'un paysagiste. Si ce sont des semis, un prestataire extérieur pourra intervenir.

### **Une formation en interne centrée sur l'étanchéité**

Concernant l'étanchéité, il y a deux centres de formation en interne où la végétalisation des toitures est abordée très succinctement. De plus, sur la question du végétal, il n'y a pas de formation, ni une « culture » horticole au sein de l'entreprise. Il connaît uniquement un système simple et il fait appel à des experts extérieurs s'il a des difficultés sur ce sujet (car leurs compétences sont plus limitées en terme de végétalisation).

### **Une formation type est-elle possible ?**

Selon M. Bonnet, le contenu d'une formation sur les toitures végétalisées comprendrait la connaissance de l'étanchéité et de ses risques, la connaissance des dispositifs propres aux toitures végétalisées (via les règles professionnelles), la différenciation des types de toitures végétalisées, ...

Une formation généraliste est difficile à mettre en place car il y a différents types de produits existants et le public n'est pas le même et n'a donc pas les mêmes besoins (particuliers, entreprises, auto-constructeurs ...). Toutefois, l'ADIVET travaille sur ce sujet au travers d'une commission formation. Des réflexions y sont menées sur le contenu de la formation et la possibilité de faire appel à des organismes de formation extérieurs.

### **La végétalisation comme la protection de l'étanchéité**

Aujourd'hui, les assureurs considèrent la végétalisation comme une couche de protection, permettant de limiter les risques dans le temps. Pour l'entreprise, il n'y a aucune difficulté pour faire assurer le produit. De même pour les installateurs, dont l'assurance garantie l'utilisation du procédé.

Les toitures végétalisées extensives n'aggravent pas les risques sur la toiture, ce qui est plutôt rassurant pour les assurances. C'est différent avec les panneaux solaires par exemple.

M. Bonnet n'a jamais rencontré de problèmes majeurs pour se faire assurer.

Pour les questions de responsabilité, M. Bonnet indique qu'il ne faut pas dissocier tout le complexe. Dans ce sens, il s'appuie sur les règles professionnelles en vigueur.

### **Le rôle des bureaux de contrôle**

La mission que les maîtres d'ouvrage attribue aux bureaux de contrôle se limite plus à la lecture des documents qu'à la visite sur le terrain. Ils ne viennent pas souvent sur les chantiers, et contrôlent de ce fait plutôt les papiers que l'étanchéité en elle-même. Ils peuvent participer aux réunions de chantier mais ne montent plus beaucoup sur les toits.

C'est un passage obligé mais pas un soutien. Si un contrôleur a un doute, il émet une réserve, un avis négatif. Ils sont nécessaires du point de vue du principe de précaution mais ils peuvent aussi être potentiellement un frein à l'innovation technologique.

### **Un contrat d'entretien vivement recommandé**

Les plantes parasites sont très rares dans l'extensif car c'est un substrat très maigre. Pourtant, M. Bonnet conseille de faire un contrat d'entretien (une ou deux fois par an) pour contrôler les eaux pluviales, le développement des végétaux et fertiliser si nécessaire.

Si pendant les deux premières années, la période de confortement oblige un suivi, un contrat avec l'entreprise de pose ou une entreprise du paysage est vivement recommandé au-delà de ces deux ans. Un suivi régulier est tout de même nécessaire et conseillé par l'entreprise.

### **Une normalisation difficile à mettre en place**

Aujourd'hui il y a un projet de norme européenne lancé par les Italiens. Il faut être prudent car la normalisation dans ce domaine doit tenir compte de beaucoup de paramètres et notamment celui du climat. « Le végétal est lié au climat. Et il y a différents climats en Europe, donc c'est idiot de faire une norme européenne. C'est déjà compliqué au sein même de la France ».

### **Des performances thermiques non avérées**

Par ailleurs, M. Bonnet fait partie de ceux qui ne croient pas ou peu aux bienfaits des toitures végétalisées en termes thermique. En effet, si le substrat est humide, c'est un mauvais isolant en hiver. Seules les performances en été sont moins négligeables et peuvent être prises en compte. De plus, il n'y a pas de quantification précise aujourd'hui, même s'il y a des études. Il vaut mieux s'appuyer sur la rétention d'eau.

De plus, peu de pays prennent en compte ces aspects et ils mettent en œuvre des toitures végétalisées depuis plus longtemps que la France. Il n'y a donc pas d'incitations réglementaires car il n'y a pas de preuves pour appuyer ces « vertus ».

### **Les toitures végétalisées comme image du développement durable**

Les clients sont globalement ravis. Il n'y a jamais eu de réclamations majeures. Cela passe par un travail d'explication, de pédagogie. C'est un jardin naturel, dont la réussite réside dans un bon couvert végétal.

Par ailleurs, il y a une vraie volonté, notamment dans les bâtiments publics, soutenue par les architectes, la politique environnementale des collectivités, ...

La toiture végétalisée n'est pas une solution qui s'amortit. C'est une démarche différente qui ne rapporte rien, qui n'a pas de rendement en terme économique. Intégrée dans une démarche de développement durable c'est très positif pour les communes. On voit beaucoup de petites communes recourir à cette démarche pour leur image mais aussi pour faire passer des messages pédagogiques (sur la biodiversité, ...).

### **L'ouverture des documents d'urbanisme en faveur des toitures végétalisées**

Les toitures végétalisées commencent à être imposées ou fortement recommandées dans les grandes villes comme Paris ou Grenoble.

Par ailleurs, un permis de construire pouvait être refusé à cause d'une toiture végétalisée. Mais normalement, avec le Grenelle de l'environnement II, les toitures végétalisées ne seront plus sources de refus (plus opposables). Le Moniteur du 9 mai 2010 a fait un article sur ce sujet : l'article 4 du Grenelle II va modifier l'article L 111-6-2 du code de l'urbanisme, où les matériaux, dont les toitures végétalisées, ne seront plus opposables, sauf autour des bâtiments classés (les architectes devront pas ailleurs justifier leur refus). Le premier texte de loi nommait directement les toitures végétalisées mais maintenant il parle de rétention d'eau (cela concerne plus particulièrement la maison individuelle).

### **Une disparité nord/sud**

Aujourd'hui il y a une émulation autour des toitures qui ne sont pas utilisées. Mais concernant les toitures végétalisées, le frein est géographique. Dans le sud de la France, considéré comme très ensoleillé, il y a une majorité d'installations solaires, avec un climat difficile pour les toitures végétalisées qui nécessitent tout de même une irrigation, notamment en été. Dans le nord de la France, c'est le contraire. La concurrence est donc moins rude pour le développement des toitures végétalisées et le climat plus propice à leur pérennité.

### **Questions complémentaires par téléphone**

Même si les performances techniques ne sont pas probantes, il reste la rétention d'eau. Cette performance est une certitude car il y a des études dans d'autres pays sur ce sujet. Par ailleurs, concernant la captation des poussières par la végétalisation, c'est une vérité connue depuis longtemps. Il n'y a pas de preuves matérielles flagrantes mais ça ne peut que s'améliorer.

La notion d'esthétique est importante. Si l'entreprise propose les toitures végétalisées c'est parce qu'il y a une demande. C'est une des raisons, un argument fort, notamment pour la valorisation du patrimoine, mais il n'y a pas que ça.

Concernant leur avis technique, le maître d'ouvrage d'un chantier important avait fait la demande d'un ATEX. C'était pour l'entreprise l'occasion de sauter le pas et de demander un avis technique

(c'est le cheminement type pour aller vers un avis technique). Cet avis technique va être révisé à la fin de l'année et ils vont proposer un élargissement pour les toits en pente (moins de 20%). Par contre, concernant les pentes de plus de 20%, ils ont recouru à des cahiers des charges validés par les contrôleurs techniques car ces solutions ne sont pas dans les règles professionnelles. De plus, cela permet de garder une certaine confidentialité par rapport aux concurrents (les cahiers des charges ne sont pas publics), notamment s'ils n'ont pas encore déposé de brevet.

Le marché est aujourd'hui banalisé. Il est étonné que les contrôleurs techniques ne demandent pas systématiquement un avis technique. En effet, alors que sur l'étanchéité, les avis négatifs sont fréquents s'il n'y a qu'un cahier des charges, concernant l'encadrement de la végétalisation il n'y a pas ou peu d'avis négatifs.

Il est nécessaire que le lot étanchéité comprenne aussi la végétalisation car un problème de compatibilité peut être mis en avant. Si la toiture végétalisée n'est pas un tout unique, cela peut poser des problèmes de compatibilité, notamment en ce qui concerne la couche de drainage (par exemple, une couche de drainage en polystyrène ne peut être mise sur une couche de PVC).

Il est nécessaire que les toitures végétalisées soient mises en place par des professionnels de l'étanchéité. La question de la réputation est importante. Le problème des gens qui ne font que du végétal est qu'ils ont une compétence limitée au niveau de l'étanchéité et cela peut entraîner des dégâts. S'il y a des dégâts, les toitures végétalisées auront une mauvaise réputation et cela nuira au marché.

## ***Compte-rendu d'entretien François Lassalle***

Entretiens téléphoniques les 17 juin et 5 juillet 2010

Compte-rendu relu par M. Lassalle

M. Lassalle a fait une école d'architecture. Il crée en 1989, le département des toitures végétalisées au sein de Soprema où il est directeur R&D à Sopranature. Il est co-fondateur de l'ADIVET en 2002 et son président de 2002 à 2008, et de nouveau en 2010.

### Sommaire :

D'une association de passionnés à une association de promotion du concept pour les entreprises

Les missions de l'ADIVET

Les toitures végétalisées ne disposent que de peu de valeurs caractérisant leurs performances à ce jour

Une performance avérée mais mise sous silence : la protection de l'étanchéité

Les freins : du prix à la notoriété

Concurrence des toits : de la place pour tous les usages

Une palette de métiers large, représentée dans l'association et rassemblée autour d'un projet écologique

Pas de formation officielle et commune à tous les acteurs, mais des formations individuelles

Labels, certifications, règles professionnelles, DTU : pour la valorisation des toitures végétalisées

Les bureaux de contrôle impliqués dans les règles professionnelles

La garantie décennale concerne avant tout l'étanchéité

Urbanisme : la communication auprès des communes comme objectif de l'association

Des freins psychologiques qui se sont estompés avec la notion de développement durable

Des attentes pour la banalisation des toitures végétalisées

## **D'une association de passionnés à une association de promotion du concept pour les entreprises**

2000 : L'histoire officielle de l'ADIVET démarre avec Pierre Georgel. Ce dernier contacte François Lassalle. Ce sont deux acteurs importants dans le domaine de la toiture végétalisée, avec un intérêt commun à les promouvoir.

Sopranature (entreprise Soprema à laquelle M. Lassalle appartient) avait déjà fait un bout de chemin sur ce sujet (depuis 1989), avec un niveau de développement modeste. Mr Georgel avait également commencé à développer son entreprise Ecovegetal. L'objectif était alors de faire quelque chose ensemble, une prescription commune.

Après réflexion, l'association a été préférée.

2002 : Après la création de l'association, chacun y a amené des personnes intéressées, dont quelques personnes passionnées, issues de la société civile, et qui ne sont pas intéressés par les aspects économiques de la végétalisation des toitures.

Fin 2002 : L'association regroupe 4 représentants d'entreprises (dont deux représentants invités par les deux premières entreprises), et 4 personnes de la société civile. Une charte et des statuts sont élaborés. Les actions ont commencé avec beaucoup d'ambition mais sans aucune visibilité sur leur influence. Dans ce contexte, les membres sont allés frapper à la porte du CSTB et de la CSFE (notamment grâce à leur notoriété personnelle en ce qui concerne le CSTB). Ils ont rencontré M. Burdloff au CSTB ainsi que Maria Lopez Diaz (architecte qui a rédigé un état de l'art sur le sujet). Deux à trois réunions publiques, sur 2 ans, sous la forme de journée technique, ont eu lieu avec le CSTB et la CSFE, qui ont rassemblé près de 100 personnes. Les objectifs tournaient autour de la promotion des toitures végétalisées et des aspects techniques. Ces réunions ont contribué à augmenter la crédibilité de l'association, notamment en regroupant de plus en plus d'entreprises concurrentes intéressées par la démarche.

Ces entreprises, venues d'elle-même, ont adhéré à l'association au fil des réunions techniques jusqu'à regrouper 6 à 8 entreprises. En tant que président de l'association, M. Lassalle a élargi l'association à l'ensemble des acteurs présents, ainsi qu'au monde du paysage. Le rôle de l'association a évolué, passant de la promotion stricte à un rôle plus technique. Avec l'élargissement de ce groupe, les représentants de la société civile sont partis, ne se retrouvant plus dans l'association. Mais l'engagement de l'association va au-delà du simple business. Ce n'est pas un syndicat professionnel mais une association de promotion du concept.

2004-2005 : La phase suivante après ce premier rapport entre les entrepreneurs est l'échange d'adhésion avec la CSFE. L'association a aussi adhéré à la WGIN, une association de niveau mondial (qui est basée à Toronto). Avec l'adhésion à la CSFE, l'association s'est structurée sous sa forme actuelle.

2007 : Elle regroupe principalement des entreprises de fournisseurs mais accepte aussi depuis environ 3 ans les entreprises de pose, qui sont de plus en plus nombreuses, et notamment les entreprises de paysage. Il y a aussi une ouverture aux maîtres d'œuvre et aux collectivités mais seule une commune y a adhéré à l'heure actuelle. Il y a environ 40 adhérents aujourd'hui.

Cette même année, les règles professionnelles (de 2002) ont été révisées au sein de la CSFE, dans la commission végétalisation des toitures-terrasses avec la participation de l'ADIVET, alors membre de cette commission. Cette refonte a fini de rendre crédible l'association.

Parallèlement, une promotion auprès des collectivités territoriales a été lancée afin que les PLU notamment prennent en compte les toitures végétalisées. Le succès a cependant été restreint.

Mars 2010 : Une refonte des statuts de l'association conforte la prise de responsabilité dans la durée du collège des fournisseurs (il y a une place pour les autres entreprises mais les fournisseurs gardent la main sur l'association puisqu'ils en sont à l'origine).

Les missions ont été, tout d'abord, de rassembler et publier les premières documentations, puis de créer le site Internet et en même temps d'organiser des réunions techniques (au travers de commissions).

### **Les missions de l'ADIVET**

L'ADIVET s'implique aussi au niveau de la recherche avec le programme TVGEP, la demande d'une étude à Tribu Energie sur la thermique et la participation à une mission de calcul du ministère au CSTB sur la thermique (pour la RT 2012), partiellement financée par l'association.

En aparté, M. Lassalle indique que l'objectif futur est d'élargir l'association à la façade car aujourd'hui la végétalisation des façades a quasiment une plus grande notoriété que les toitures végétalisées.

### **Les toitures végétalisées ne disposent que de peu de valeurs caractérisant leurs performances à ce jour**

M. Lassalle considère les performances des toitures végétalisées de la manière suivante :

- La plus importante : On parle d'efficacité thermique. En hiver c'est très restreint mais par contre en été il y a quelque chose de significatif (inertie thermique). C'est encore mal étudié et cela reste encore dans une présentation superficielle car il y a peu de données.

- La plus pertinente : la gestion de l'eau. En ce qui concerne le volume de rétention d'eau, il n'y a pas de notion de dynamique, ni de relation avec le temps. La question est de savoir ce que l'on peut économiser en bassin de rétention. Il y a un coefficient de ruissellement pour les toitures végétalisées (mais peu encadré en France) dans les règles professionnelles. La notion d'effet de retard sur les débits sortants a fait l'objet d'une étude privée à Sopranature. Il y a une performance mais pas de chiffre. Ce sujet fait l'objet du programme TVGEP.

- Le côté esthétique compte mais c'est en train de s'estomper (il a fallu longtemps pour faire accepter les toitures végétalisées aux architectes). Ce n'est plus un sujet problématique aujourd'hui. Les clients sont tenus informés et sensibilisés mais ce n'est plus un débat et les toitures végétalisées entrent dans la culture petit à petit.

- La notion de biodiversité est mise en avant depuis quelques années. Cela devrait devenir un sujet important dans la promotion organisée par l'association.

### **Une performance avérée mais mise sous silence : la protection de l'étanchéité**

La protection de l'étanchéité est mise sous silence. En effet, c'est très efficace et c'est le point le plus certain et le plus décisif dans l'installation d'une toiture végétalisée. Mais d'un autre côté, c'est le moins pris en compte car cela entraîne une potentielle demande de garantie des clients, et les fournisseurs ne veulent pas s'impliquer en proposant une extension de garantie même si l'efficacité est prouvée.

### **Les freins : du prix à la notoriété**

Le prix à l'origine a pu constituer un frein, ce n'est plus réellement le cas aujourd'hui. Le prix moyen aujourd'hui (indication ADIVET) est de 50 euros HT / m<sup>2</sup> fourni-posé. Cela paraissait très cher il y a quelques années, mais aujourd'hui il y a une acceptation qui existe, notamment du fait des nombreux avantages qui peuvent être pris en compte. Dans les premières années de développement du concept, lorsque le budget manquait, c'étaient les toitures végétalisées qui étaient éliminées. Mais ce n'est plus le cas aujourd'hui, même s'il n'y a pas de baisse de prix significative.

De plus, il y avait un parallèle avec les terrasses jardins, qui n'a plus cours aujourd'hui, parce que les toitures végétalisées sont prises en compte distinctement.

Les clients (les architectes notamment) prennent aujourd'hui en compte l'ensemble des toitures végétalisées et leurs avantages. Par exemple, leur objectif peut être d'amener du vivant là où il n'y a que du minéral.

En faisant un parallèle avec les façades végétalisées, très chères mais entraînant beaucoup d'engouement, il s'avère qu'en fait on en parle plus qu'on en fait par rapport aux toitures végétalisées. Un travail de communication est donc nécessaire. L'ADIVET envisage de prendre cette dimension en compte.

### **Concurrence des toits : de la place pour tous les usages**

M. Lassalle ne pense pas qu'il y ait de concurrence. Les panneaux solaires, les membranes photovoltaïques et les toitures végétalisées sont installées sur les mêmes surfaces, mais les celles-ci sont très importantes en France. Par exemple, 24 millions de m<sup>2</sup> de membranes d'étanchéité sont installés par an, et le solaire ne concerne que quelques centaines de milliers de m<sup>2</sup>. Il reste encore de la place pour les toitures végétalisées.

Par contre, les agriculteurs sont financés pour les membranes photovoltaïques (avec un objectif financier uniquement), et négligent donc la solution de la toiture végétalisée.

De plus, la concurrence est plus importante sur des bâtiments que sur des maisons individuelles.

M. Lassalle ne pense pas qu'il y ait de concurrence car le marché potentiel est énorme, et si on parle de panneaux photovoltaïques, il y a une possibilité de les associer à la végétalisation (cela permet d'augmenter les performances des panneaux en réduisant la chaleur ambiante (ce qui favorise la productivité des panneaux)).

### **Une palette de métiers large, représentée dans l'association et rassemblée autour d'un projet écologique**

Les métiers directement concernés sont :

Les étancheurs (fabrication et pose de membranes d'étanchéité)

Les fournisseurs de systèmes complets de végétalisation

Les entreprises du paysage (mise en œuvre)

Les fabricants de substrat, les fournisseurs de plantes, de semences

Les fabricants d'isolants et de matériaux de drainage, de géotextiles, de matériels d'irrigation...

Les métiers concernés indirectement sont :

Les architectes

Les bureaux d'études techniques

Les économistes

Les bureaux d'études spécialisés en hydrologie

Les entreprises spécialisées dans l'irrigation

Les collectivités locales

Les contrôleurs techniques

Le CSTB, L'INRA

Cette palette aussi large est représentée depuis 3 ans dans l'ADIVET. Par ailleurs, faire travailler ensemble tous ces acteurs ne pose pas de problèmes particuliers car le travail se fait en commissions. Malgré quelques « coups de gueule », tout le monde va globalement dans le même sens, c'est-à-dire la promotion des toitures végétalisées.

On est dans un développement bon pour la planète et donc chacun a une tendance, une fibre écologique plus ou moins forte. M. Lassalle y veille en tant que président de l'association.

### **Pas de formation officielle et commune à tous les acteurs, mais des formations individuelles**

Il n'y a actuellement pas de formation de longue durée. On peut tout de même citer : CFPPA (Aix-en-Provence) et TECOMAH (le plus sérieux).

[Titre de la formation de TECOMAH : Démarche développement durable : les toitures végétalisées (se situe avec une formation sur l'éco-maintenance des espaces enherbés et une autre sur les nouvelles tendances du fleurissement). La formation s'adresse aux responsables de chantier, agents, techniciens territoriaux et toute personne en charge de la maintenance, de la programmation et de la gestion des aménagements. Concernant les toitures végétalisées, les objectifs sont de sensibiliser à quelques pratiques et techniques du concept des toitures végétalisées. La formation se tient sur 2 jours (14h) pour un prix de 300 euros par personne. Le programme est alors :

Historique

La végétalisation extensive des toitures de quoi s'agit-il ?

Aspect réglementaire

Les procédés

Les techniques de construction

Le végétal et les toitures

La maintenance]

M. Lassalle anime par ailleurs des séminaires dans les écoles d'architecture ou d'autres organismes. D'autre part, chacun fait sa formation de son côté sans nécessairement informer l'Association, ce qui n'est pas idéal. On est dans un métier hybride, au croisement du bâtiment, de l'étanchéité et de l'horticulture, où la consultation des uns et des autres est nécessaire.

L'idée est alors qu'une formation spécialisée émane de l'ADIVET. C'est aussi une idée pour participer au financement de l'association qui est très limité. (Il n'y a aucun salarié jusqu'à maintenant, mais l'embauche d'un Délégué Général est prévue). Mr Lassalle voudrait se tourner vers ce qui se fait aux USA et au Canada, c'est-à-dire une formation payante avec modules et examens. Pour ce qui est du contenu, la commission formation de l'ADIVET est aujourd'hui en stand-by, et il n'y a pas encore consensus à ce jour. Ce sera une des missions du futur Délégué Général de relancer cette réflexion.

### **Labels, certifications, règles professionnelles, DTU : pour la valorisation des toitures végétalisées**

Les Règles Professionnelles pour les Toitures et Terrasses végétalisées (2ème édition parue enfin 2007) constituent une avancée très importante pour la reconnaissance de l'activité des Toitures végétalisées. Le document a été étudié et validé au conseil des professions. Dans les 2-3 premières pages, tous les documents de référence y sont recensés.

Elles se situent un peu à part du corpus général réglementaire du bâtiment, qui s'articule principalement autour des DTU (Documents Techniques Unifiés).

Mr Lassalle considère que ces Règles Professionnelles doivent être améliorées et précisées.

Les DTU n'intègrent pas les procédés de végétalisation. Il pourrait y avoir à terme un DTU « terrasses végétalisées », mais ce n'est pas évident que les organismes concernés (AFNOR) aillent un jour dans ce sens. Aujourd'hui il y a un DTU pour chaque section d'ouvrage de construction, par exemple le DTU 43.1 « revêtements d'étanchéité sur support béton ».

Dans ce contexte, l'objectif est plutôt de valoriser les Règles Professionnelles telles qu'elles sont.

Il y a actuellement deux Avis Techniques et plusieurs Cahiers de Prescription de Pose (validés par les bureaux de contrôle), qui représentent, au niveau des fabricants, les documents de référence, complémentairement aux Règles Professionnelles.

En ce qui concerne la qualification professionnelle, qui intéresse les entreprises pour la mise en œuvre, l'application, ce sont les organismes professionnels tels que tels que l'UNEP et la CSFE qui peuvent la délivrer. .

Les sujets les plus importants aujourd'hui sont la recherche et la valorisation des atouts des toitures végétalisées.

### **Les bureaux de contrôle impliqués dans les règles professionnelles**

Les Bureaux de Contrôle ont été très impliqués dans les règles professionnelles, ils y ont joué un rôle essentiel.

Au quotidien, l'association n'a pas de lien avec les Bureaux de Contrôle, contrairement aux entreprises (au niveau des chantiers). Ces derniers vont vérifier l'ouvrage avec les Avis Techniques et les Cahiers des Charges des entreprises ainsi qu'avec les Règles Professionnelles.

### **La garantie décennale concerne avant tout l'étanchéité**

La garantie décennale, qui a été imposée par la loi Spinetta, concerne l'ouvrage d'étanchéité et sa protection. Celle-ci, dans le cas de la Terrasse-Jardin, est réputée être constituée de la couche de drainage et de la couche filtrante, (la terre végétale et les plantations restant de la responsabilité de l'entreprise de paysage). Dans le cas des toitures végétalisées extensives, c'est l'ensemble du système qui est considéré comme la protection de l'étanchéité mais cela embarrasse les entreprises de paysage, qui souhaitent dissocier le complexe de végétalisation.

La garantie décennale concerne avant tout l'ouvrage d'étanchéité.

Il n'y a pas de discussion sur ce sujet pour le moment au niveau de l'association. M. Lassalle sait que cette question préoccupe l'UNEP, mais rien ne filtre sur ce sujet sensible.

### **Urbanisme : la communication auprès des communes comme objectif de l'association**

La question urbaine a été une des premières grandes missions de l'association, il y a 4 ans. Lors du remplacement des POS par les PLU (loi SRU, 2000), l'association (mission pilotée par Pierre Georgel) a lancé un mailing sur de nombreuses communes (notamment celles de plus de 10 000 habitants) pour les intéresser et leur proposer leur aide sur la question des toitures végétalisées. Il y a eu un effet mais sans forcément être très significatif. Il y a eu des demandes comme la ville de Lille, notamment pour des réunions d'informations.

M. Lassalle pense que c'était un peu trop tôt. Mais l'association est toujours intéressée par cet aspect et la communication auprès des collectivités reste dans ses objectifs.

### **Des freins psychologiques qui se sont estompés avec la notion de développement durable**

Au début, il y a toujours un mouvement de recul sur le fait que cette végétalisation (extensive) ne soit pas vraiment verte, car cela ne ressemble pas au gazon que les gens s'attendent à voir. Mais les choses ont beaucoup changé car l'idée que « c'est bon pour la planète » fait son chemin. Les gens ont une intuition, une sensibilité par rapport aux bienfaits des toitures végétalisées. Ils font l'impasse sur le côté esthétique.

Il y a quinze ou vingt ans, les architectes novateurs voulaient toujours du gazon. Aujourd'hui tout le monde admet qu'il s'agisse d'autre chose, et les entreprises sont opérationnelles sur la technique. Il y a une valorisation du concept notamment par les architectes. Cela entre dans les mœurs. Par exemple,

le carrefour de Chambourcy a opté pour une toiture végétalisée :  
<http://www.carrefourproperty.com/fr/qui-sommes-nous/actualites>

On passe aujourd'hui par le condensé argumentaire : « c'est bon pour la planète ».

### **Des attentes pour la banalisation des toitures végétalisées**

M. Lassalle attend du projet TVGEP une caractérisation détaillée des mécanismes et des valeurs. Cela va permettre de crédibiliser le volet eaux pluviales et permettre de faire enfin des données franco-françaises. Il faut « juste » faire la même chose sur le thermique et la biodiversité.

Ses attentes futures sont de faire des toitures végétalisées une technique banalisée, ce qui paraît possible. Par exemple, à Paris, il y a beaucoup de possibilités sur les toitures plates. On peut, dans ce sens, arriver à multiplier les surfaces de toitures végétalisées par 10.



PROJET



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)  
Appel à projets 2009**

**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°2  
LIVRABLE N°2.1  
Bibliographie et plan d'expérience sur le  
comportement hydrique des toitures  
végétalisées**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :

David Ramier, Emmanuel Berthier

Organismes impliqués :

CETE-IF

Coordination Partie n°2

Emmanuel Berthier, CETE-IF

Coordination TVGEP :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

## Sommaire

<b>1 Synthèse bibliographique .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Généralités sur les toitures végétalisées .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Présentation des travaux .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Résultats expérimentaux .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 La modélisation .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Discussion .....</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Conclusion .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Dispositif expérimental .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Observations à échelle réelle .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Banc d'essai du CETE IF .....	9
2.1.2 Toitures réelles .....	12
<b>2.2 Observations à échelle réduite .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Mesure de l'évapotranspiration : la chambre de transpiration .....</b>	<b>13</b>
<b>Listes des figures et des tableaux .....</b>	<b>15</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>15</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>15</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>16</b>
<b>Liste de sites Internet .....</b>	<b>16</b>
<b>Références .....</b>	<b>16</b>

L'objectif de la partie 2 du projet TVGEP est d'étudier le comportement hydrique des toitures végétalisées. Ce document présente une synthèse bibliographique de travaux publiés sur le sujet ainsi que le dispositif expérimental qui sera mis en place dans le cadre de cette partie 2.

## 1 Synthèse bibliographique

Les toitures végétalisées connaissent un développement important. Des études, de plus en plus nombreuses, sont réalisées afin d'étudier l'intérêt de celles-ci. Ceux-ci sont nombreux : isolations thermique et sonore, aspects écologique et esthétique, gestion des eaux pluviales. Dans le cadre de la partie 2 du projet TVGEP, cette synthèse bibliographique est focalisée sur les études concernant le comportement hydrique.

### 1.1 Généralités sur les toitures végétalisées

Afin de faciliter la lecture de cette synthèse, il est brièvement rappelé quelques notions concernant les toitures végétalisées. Pour plus de détails, il est possible de se référer au livre de Lassalle (2008). Un complexe de végétalisation est généralement composé de la manière suivante (du haut vers le bas) :

- de la végétation ;
- une couche de substrat permettant le développement de la végétation ;
- un filtre en géotextile qui permet de retenir le substrat mais laisse passer l'eau ;
- une couche de drainage qui permet l'évacuation rapide de l'eau.

Il existe également des complexes de végétalisation dont la couche de substrat et la couche de drainage est une seule et même couche, on parle alors de toitures végétalisées monocouches.

Il existe différents systèmes de végétalisation : extensif (*TVE*), semi-intensif (*TVSI*), intensif (*TVI*). Les toitures extensives sont des complexes légers et à faible épaisseur. Ce sont les plus économiques et les plus faciles d'entretien. La couche de substrat est inférieure à 15 cm et la végétation est souvent composée de variétés de *Sedum*. Ce sont également des structures légères qui conviennent bien pour la végétalisation de bâtiments existants. Les toitures semi-intensives ont des couches de substrat d'épaisseur allant de 12 à 30 cm. La végétation est plutôt constituée de vivaces, de graminées ou de plantes arbustives à faible développement. Elles nécessitent un entretien et un arrosage régulier. Enfin, les toitures intensives ou toitures-terrasses jardin sont des complexes de fortes épaisseurs et nécessitent un entretien important. Le substrat est généralement de la terre végétale et la végétation peut-être diversifiée et de grande hauteur (arbres). Il est considéré que les toitures sont des toitures terrasses lorsque la pente est inférieure à 3 %.

Le coefficient de ruissellement (*CR*) est généralement utilisé pour évaluer la performance hydrique d'une toiture végétalisée. Il est défini comme le rapport entre le volume d'eau ruisselé et le volume de pluie. En ce qui concerne les toitures végétalisées, le ruissellement est la quantité d'eau issue de la couche de drainage, c'est à dire la partie de la pluie qui s'est infiltrée dans le substrat et ressort de la toiture par la couche de drainage. Lors d'un événement pluvieux, il est rarement observé un écoulement d'eau au-dessus du substrat. Si un tel cas se présente, on parlera alors de ruissellement de surface.

## 1.2 Présentation des travaux

Les études publiées sont majoritairement réalisées en Europe et en Amérique du Nord et concernent principalement des climats continentaux. Certains travaux récents concernent le climat méditerranéen (Palla et al., 2009, 2008, 2010) et il existe également quelques études faites en climat tropical (Kidd, 2005; Köhler et al., 2001). Cependant les résultats des travaux de Köhler et al. (2001) n'ont pas été retrouvés. Les observations sont faites pour des échelles de temps événementielles ou annuelles. La chronique observée la plus longue est de 2 ans (Uhl et Schiedt, 2008). Il est à noter que peu de ces travaux expérimentaux sont associés à des modélisations poussées. Bien que les approches soient sensiblement différentes, les observations tendent vers des conclusions similaires. Cette synthèse présente donc les travaux les plus pertinents et fait ressortir les principaux paramètres qui ont un impact sur le comportement hydrique.

Les travaux expérimentaux servant de base à cette synthèse sont regroupés dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 1 présente le contexte général de chaque étude alors que le tableau 2 détaille les toitures observées et synthétise les observations sur le ruissellement (si des travaux de modélisation sont associés aux observations, les résultats sur le ruissellement ne sont pas repris ici).

La grande majorité des toitures végétalisées instrumentées sont des toitures extensives (notée *TVE*, les toitures semi-intensives seront notées *TVSI*). Ce sont également pour la plupart des toitures terrasses. Les résultats obtenus sur les toitures végétalisées sont souvent comparés à des toits terrasses non-végétalisés (noté *TT*).

L'instrumentation consiste généralement en un suivi pluie-débit, avec la mesure de paramètres météo. Cependant, Bass et Baskaran (2003), Hilten et al., (2008), Palla et al., (2009, 2008, 2010) ont ajouté des mesures de teneur en eau dans le substrat.

Les principaux paramètres étudiés sont l'épaisseur du substrat, le type de la végétation, la pente. Les principales conclusions issues de ces travaux sont résumées dans la section suivante (section 1.3).

Aux travaux résumés dans les tableaux 1 et 2, il convient d'ajouter le travail de Mentens et al., (2006) qui présente une compilation de 18 travaux allemands. A partir des données recueillies, les auteurs étudient l'effet des toitures sur les coefficients de ruissellement annuels et saisonniers. Leur base de données leur permet de comparer toitures extensives, intensives et non-végétalisées. En ruissellement annuel, ils trouvent un *CR* de 91 % pour les toitures non-végétalisées et de 15 % pour les toitures intensives. Pour les toitures extensives, ils trouvent des *CR* moyens de 50 % (avec un minimum de 19 %, un maximum de 73 % et une médiane à 55 %).

**Tableau 1: Liste des auteurs et de leurs travaux**

Auteurs	Lieu	Pluviométrie (mm)	Durée	Echelle d'analyse	Nbre de toits	Pente	Surface (m <sup>2</sup> )	Modélisation
VanWoert et al., (2005), étude 1	Michigan (USA)	556	14 mois (28/08/02-13/10/03)	annuel + catégorie d'événement (faible, moyen, intense)	9 (3 configurations répétées 3 fois)	2 %	1,63	
VanWoert et al., (2005), étude 2	"	"	"	"	12 (3 configurations répétées 3 fois)	2 et 6 %	6	
Berghage et al., (2007)	Pennsylvanie (USA)	artificielle		étude de l'évapotranspiration	16 lysimètres (4 configurations répétées 4 fois)		0,567	2 modèles réservoirs : un annuel et un événementiel
Carter et Rasmussen (2007)	Georgie (USA)	1079	13 mois (11/03-11/04)	événement (31)	2	<2 %	42,64	
Uhl et Schiedt (2008)	Allemagne	686-696	2 ans (10/10/95-13/10/97)	événement, saison, annuelle	23	0% ; 1,7% ; 26,8%	8,7 à 25,1	régression linéaire
Baraglioli et al., (2008)	Ile de France		Base de données de 30 ans de pluie	journalier	8	0%		Modèle réservoir
Hilten et al., (2008)	Georgie (USA)		janvier - août 2005	événement	1	0%	37	Hydrus1D
Palla et al., (2009, 2008, 2010)	Italie	638	17 mois (05/07-12/08)	événement	1	2%	182	réservoir, SWMM, SWMS_2D
Stovin (2009)	Sheffield (UK)	printemps 2006		événement (11)	1 (banc d'essai)	1,5 °	3	réservoir (Kasmin et al., 2010)

**Tableau 2 : Caractéristiques des toits étudiés**

Auteurs	Type de toit	Végétation	Substrat (cm)	Drainage	CR moyen	Délai du pic de ruissellement
VanWoert et al., (2005), étude 1	TVE	Sedum sans végétation	2,5	synthétique	39	
	TVE		"	(1,5 cm)	49	
	TT		"	"	73	
VanWoert et al., (2005), étude 2	TVE	Sedum	2,5 (pente 2 %)	synthétique	30	
	"	"	4 (pente 2 %)	(1,5 cm)	29	
	"	"	4 (pente 6,5 %)	"	34	
	"	"	6 (pente 6,5 %)	grave (2 cm)	32	
Berghage et al., (2007)	TVE	Sedum spurium	8,9 cm	synthétique		
	"	Sedum sexangulare	"	(1,2 cm)		
	"	Delosperma	"	"		
	"	nubigenum (80 %) + Sedum album (10 %) sans végétation	"	"		
Carter et Rasmussen (2007)	TVE	Sedum et Delosperma	7,65	synthétique	78 (min 39 – max 100)	34,9 min
	TT			0,48 cm + 3,81 cm grave (5 cm)		
Uhl et Schiedt (2008)	TVE (18)	mousses-Sedum-fanes, sedum-graminées- fanes, herbacées	5, 8, 10, 15	ardoise 2/10 et 8/10 (5, 10, 15 cm)	annuel : 20 ; été : 24 ; printemps- automne : 39 ; hiver : 51 annuel : 31 (min 23 – max 39)	
	TT (5)			graves (5 cm) x 2 'tuiles' rien x 2		
Baraglioli et al., (2008)	TVE		6, 8,5, 20, 100	alvéoles (5 mm)x4 + 4 complexes monocouches	modélisé et dépend de l'évapotranspiration	
Hilten et al., (2008)	TVE	Sedum	10	drains Ø 1 cm		
Palla et al., (2009, 2008, 2010)	TVSI	herbacées	20 (lapillus, purnice, zeolite et tourbe)	lapillus (15 cm)	32 (min 5 –max 100) sur 13 mois et 78 (min 0 – max 100) sur 4 mois (hiver)	abattement moyen du pic 68 % et délai > 80 min
Stovin (2009)	TVE (banc d'essai)	Sedum	8	synthétique 'egg box'	66 %	43 % d'abattement du pic

### **1.3 Résultats expérimentaux**

Toutes les études tendent à montrer que les toitures végétalisées sont efficaces pour la diminution du ruissellement, comme le montre les coefficients de ruissellement présentés dans le tableau 2. Cet abattement du ruissellement est dû au stockage dans le substrat et à l'évapotranspiration. Une *TVE* peut diminuer le ruissellement de 20 à 30 % par rapport aux toits non-végétalisés (Carter et Rasmussen, 2007; VanWoert et al., 2005). Cependant la capacité des toitures végétalisées à abattre le ruissellement serait maximum pour les événements faibles (en volume) et les plus fréquents (Carter et Rasmussen, 2007; VanWoert et al., 2005). Toujours, d'après Carter et Rasmussen (2007), le maximum de l'abattement se ferait en début d'événement. La toiture végétalisée agit donc comme un espace de stockage, avec une capacité de rétention. Lorsque celle-ci est atteinte, la toiture végétalisée retrouve un comportement proche d'un toit non-végétalisé.

La saison joue un rôle important (Baraglioli et al., 2008; Mentens et al., 2006; Stovin, 2009; Uhl et Schiedt, 2008). L'étude de 3 saisons par Uhl et Schiedt (2008) réparties de la manière suivante : période chaude (été) du 1er mai au 30 septembre, mi-saison (printemps-automne) du 15 mars au 30 avril et du 10 octobre au 15 novembre et la période froide (hiver) du 15 novembre au 15 mars, a montré que le ruissellement était moins important l'été. Les auteurs expliquent ceci par une évapotranspiration plus importante et donc une capacité de stockage plus importante pendant cette période malgré une occurrence des pluies plus grande.

L'augmentation de l'épaisseur du substrat semble favoriser l'abattement du volume ruisselé (Baraglioli et al., 2008; Uhl et Schiedt, 2008). Cependant, d'après Mentens et al., (2006), cet effet semble également plus important l'été (1 mai - 30 septembre) que l'hiver (16 novembre - 15 mars) ou à la mi-saison (16 mars - 30 avril, 1 octobre - 15 novembre). Pour des toitures avec des substrats variant de 50 à 150 mm, les *CR* obtenus sont de 30 % l'été, 67 % l'hiver et 51 % pour les autres mois.

VanWoert et al. (2005) montre que le substrat aurait l'impact le plus important dans la réduction du ruissellement même si la végétation apporte un plus par son influence sur l'évapotranspiration (Berghage et al., 2007).

Presque toutes les observations montrent également qu'une toiture végétalisée permet une diminution et un décalage temporel du pic de ruissellement (Carter et Rasmussen, 2007 ; Palla et al., 2009; Uhl et Schiedt, 2008). Cette diminution est également fonction de la capacité de stockage et donc du cycle pluie-évapotranspiration (Uhl et Schiedt, 2008).

Il fut également observé que la présence d'une couche de drainage a tendance à accélérer le drainage du substrat et ainsi à augmenter le ruissellement pendant les périodes froides (Uhl et Schiedt, 2008).

L'effet de la pente semble partagé. Alors que Uhl et Schiedt (2008) et Mentens et al., (2006) trouvent que celle-ci a peu d'effet, les résultats de VanWoert et al., (2005) montrent au contraire que l'augmentation de la pente (pourtant faible dans ses essais, entre 2 et 6,5 %) diminue la capacité de rétention. Les différences entre ces travaux peuvent être attribuées aux différences entre les substrats utilisés.

Enfin, il semble que l'âge et la taille des toitures végétalisées n'aient pas d'influences sur les coefficients de ruissellement (Mentens et al., 2006).

## 1.4 La modélisation

Les travaux de modélisation réalisés vont de modèles simples et conceptuels à des modèles plus détaillés à base physique.

A partir des données collectées, Mentens et al., (2006) ont déterminé des équations de régression permettant d'obtenir le ruissellement en fonction de la pluie et de l'épaisseur du substrat. A partir de ces équations, ils ont calculé la réduction du ruissellement si Bruxelles avait 10 % de ses toits végétalisés. Ils montrent ainsi que pour l'ensemble de la ville la réduction obtenue serait de 2,7 %, mais de 3,5 % si l'on considère seulement le centre-ville, de 5,4 % si l'on s'intéresse seulement aux bâtiments et de 54 % à l'échelle d'un bâtiment.

Kidd (2005) a développé un modèle permettant de dimensionner des toitures végétalisées pour la ville de Brisbane en Australie. Son approche est simple puisqu'elle repose sur l'utilisation de pluies locales et la simulation de l'évapotranspiration et de la capacité de rétention du substrat. Sa méthode est assez peu détaillée, cependant il arrive à la conclusion qu'une toiture extensive 'idéale' pour Brisbane aurait un substrat de 10 cm. Cela permettrait de retenir 42 % du ruissellement annuel. La toiture intensive 'idéale' aurait un substrat de 60 cm permettant une réduction de 80 % du ruissellement annuel.

Dans d'autres travaux, les toitures végétalisées sont représentées de manière simple comme étant des réservoirs (Baraglioli et al., 2008; Kasmin et al., 2010). Si le modèle de Kasmin et al. (2010) permet de représenter le ruissellement de manière satisfaisante, il a aussi permis de caler différentes formulations de l'évapotranspiration qui semble être le processus clé entre deux événements pluvieux et donc ayant un impact important sur la capacité de rétention de la toiture végétalisée.

Le modèle développé par Bass et Baskaran (2003) fait intervenir une représentation plus détaillée des processus physiques. Ce modèle est capable de simuler les événements neigeux et prend en compte l'interception de la pluie par la végétation. L'évapotranspiration est calculée selon la formule de Priestley-Taylor ou celle de Penman-Monteith. L'infiltration peut être calculée par la formule de Horton ou de Green-Ampt ou encore de manière plus détaillée à partir de la formule de Richards. Des simulations du ruissellement ont été validées à partir de données obtenues sur une toiture terrasse. Les auteurs montrent que les simulations correspondent bien aux observations. Pour un événement courant, ils trouvent que 57 % de la pluie ruisselle et dans le cas d'un événement extrême, 71 % de la pluie ruisselle avec apparition, en fin d'événement, d'un ruissellement de surface de l'ordre de 7 % de la pluie.

Palla et al., (2009, 2008, 2010) ont utilisé différents modèles, le modèle SWMS\_2D qui est un modèle à base physique et un modèle réservoir. Les débits sont correctement représentés par les deux modèles et le modèle SWMS\_2D permet également de bien reproduire le profil de teneur en eau. Cependant, les calculs n'ont été réalisés qu'à l'échelle de l'événement. Le constat est le même pour les travaux de Hilten et al., (2008) qui n'ont réalisé que des simulations à l'échelle de l'événement et pour certaines hauteurs de pluie. Leurs résultats montrent qu'Hydrus1D tend à surestimer le ruissellement.

## **1.5 Discussion**

Toutes les observations montrent donc la capacité des toitures végétalisées à abattre le ruissellement et à diminuer et retarder le pic de ruissellement. Cependant, ces observations mettent également en évidence une grande variabilité de comportement avec des coefficients de ruissellement variant entre 0 et 100 % pour une même toiture végétalisée (Hilten et al., 2008; VanWoert et al., 2005). Les principales variables explicatives seraient la hauteur de pluie et les conditions hydriques initiales, donc la période de temps sec précédant l'événement (Stovin, 2009).

L'évapotranspiration semble donc être un processus majeur dans le comportement hydrique des toitures terrasses végétalisées. Diestel et Schmidt (2004) ont estimé un taux d'évapotranspiration de 60 à 75 % de la pluie annuelle sur les toits végétalisés à Berlin. Hormis les travaux de Berhage et al. (2007), qui ont étudié l'influence du type de végétation, l'évapotranspiration n'est jamais mesurée. Les modèles à base physique sont généralement utilisés à l'échelle de l'événement et ne prennent donc pas en compte l'évapotranspiration de la période de temps sec précédant l'événement et les travaux de modélisation sur une longue période de Kasmin et al. (2010) mettent en évidence la difficulté de paramétrer ce processus.

Enfin, comme le soulignent Mentens et al., (2006), les différents résultats sont valides uniquement pour le climat de la région étudiée et il faut encore plus d'observations pour bien comprendre l'impact des toits végétalisés sur l'hydrologie urbaine. Car si les toits végétalisés sont efficaces pour la gestion des eaux pluviales à l'échelle de l'objet (le toit), leur efficacité globale diminuerait si l'on s'éloigne des centres urbains denses (Barbera et Messina, 2010 ; Carter et Rasmussen, 2007 ; Mentens et al., 2006).

## **1.6 Conclusion**

Cette synthèse bibliographique basée sur des travaux récents montre que les toitures végétalisées permettent de diminuer le ruissellement par rapport aux toitures non-végétalisées. Bien que les processus permettant cette réduction soient connus (stockage, évapotranspiration), leur dépendance vis-à-vis des caractéristiques des toitures végétalisées (type de substrat, végétation,...) reste largement inconnue. En effet, les abattements du ruissellement observés sont très variables pour une même toiture végétalisée. La hauteur de pluie et la période de temps sec précédant l'événement pourraient être les variables les plus explicatives.

Le développement d'un modèle qui permettra de prévoir le ruissellement sortant des toitures végétalisées sous différents climats et pour différents systèmes de végétalisation, mais aussi de dimensionner ces toitures et de les intégrer dans une stratégie globale de gestion des eaux pluviales, nécessite encore de faire des observations sur de longues durées.

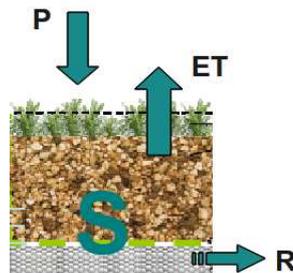
## **2 Dispositif expérimental**

L'étude bibliographique a donc montré que le développement d'un modèle capable de représenter différentes toitures végétalisées sous des conditions climatiques variées, nécessite encore de bien étudier et comprendre le comportement hydrique de celle-ci. Pour cela, il faut compléter les travaux déjà présentés avec :

- des mesures du bilan hydrique sur des chroniques longues ;
- des mesures du bilan hydrique détaillées pour plusieurs types de toitures végétalisées.

Les observations sur des chroniques longues permettront de mieux comprendre et paramétrer les processus des périodes de temps sec précédant les événements pluvieux. L'évapotranspiration est un processus important de cette période aussi les observations détaillées devront avoir comme objectif la mesure de celle-ci.

Par mesure du bilan hydrique, il est entendu de suivre et d'observer les différents processus qui le composent (cf. figure 1) : la pluie ( $P$ ), le ruissellement ( $R$ ), l'évapotranspiration ( $ET$ ) et le stockage ( $S$ ).



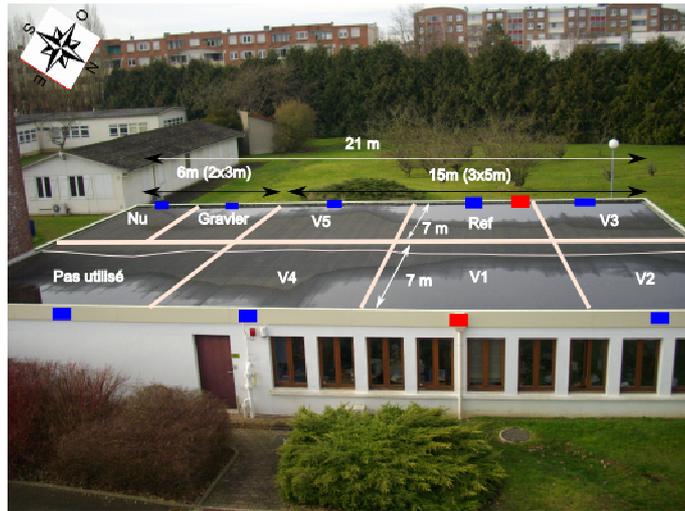
**Figure 1 : Représentation schématique du bilan hydrique**

Afin de réaliser ces mesures, le dispositif expérimental comportera plusieurs 'sites'. Deux sites de mesures à échelle réelle permettront d'observer et de comparer sur le long terme (18 mois) différentes toitures végétalisées. Un site à échelle réduite à partir duquel seront obtenues des mesures fines de tous les termes du bilan hydrique. Enfin un moyen de mesure de l'évapotranspiration sera développé. L'ensemble de ce dispositif est détaillé ci-dessous.

## **2.1 Observations à échelle réelle**

### **2.1.1 Banc d'essai du CETE IF**

Un banc d'essai permettant d'avoir différentes configurations au même endroit (i.e. soumises aux mêmes conditions climatiques) sera mis en place au CETE IF à Trappes. Afin de se placer dans des conditions réelles, ce banc d'essai sera installé sur le toit d'un des bâtiments du CETE IF. Le toit choisi (cf. figure 2) a une surface d'environ 300 m<sup>2</sup>.



**Figure 2 : Schéma du banc d'essai du CETE IF**

La surface de ce toit sera séparée en plusieurs compartiments afin de recevoir plusieurs complexes de végétalisation. Il a été décidé de faire varier la hauteur et la nature du substrat, le type de végétation, le type de couche de drainage. Ainsi, 6 configurations de végétalisation ont été choisies (cf. figure 3) :

- une première configuration sera la configuration de référence (*ref*), elle sera composée du substrat typique d'une toiture végétalisée extensive, d'épaisseur 4 cm, de Sedum et d'une couche de drainage en polystyrène extrudé ;
- la variante *V1* sera identique à la référence mais avec une hauteur de substrat différente (15 cm) et une végétation différente, composée de graminées ;
- pour la variante *V2*, on fera varier la hauteur de substrat par rapport à la référence ;
- pour la variante *V3*, la couche de drainage sera modifiée par rapport à la variante, en remplaçant le polystyrène extrudé par 4 cm de granulats ;
- la variante *V4* sera sans végétation ;
- la variante *V5* sera obtenue en modifiant le type de substrat pour un substrat caractéristique des toitures semi-intensives de 15 cm et en changeant la végétation pour des graminées.

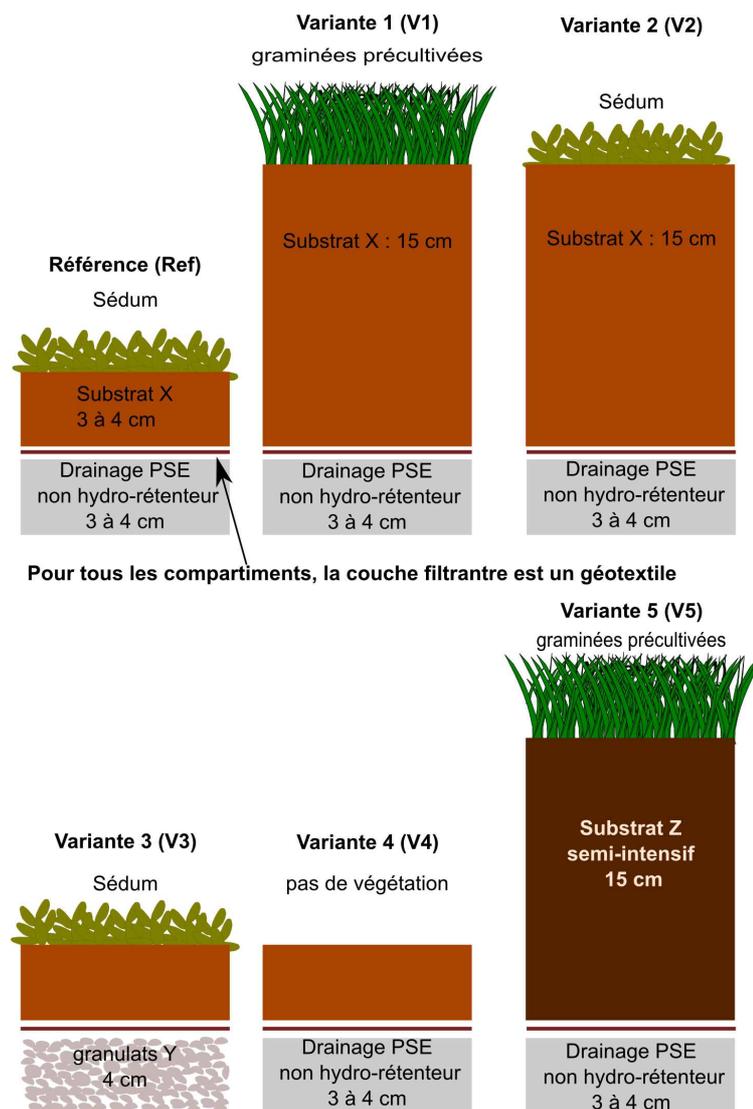


Figure 3 : Schéma des différentes variantes végétalisées du banc d'essai du CETE IF

Ces 6 configurations seront placées sur l'étanchéité et comparées à deux autres configurations non-végétalisées (cf. figure 2), une avec des graviers sur l'étanchéité et une autre avec seulement l'étanchéité (autoprotégée). Il est à noter qu'une partie du toit ne sera pas utilisée à cause de la présence d'une cheminée qui fait de l'ombre. Les parties végétalisées auront une surface de 35 m<sup>2</sup> et les parties non-végétalisées de 21 m<sup>2</sup>.

L'objectif d'étudier le comportement hydrique de ces différentes configurations implique de suivre le maximum de termes composant le bilan hydrique. Pour cela, la stratégie choisie est de mesurer la pluie et le ruissellement mais aussi la teneur en eau dans le substrat ainsi que la hauteur d'eau dans la couche de drainage (cf. figure 4). Le pluviomètre aura une précision de 0,1 mm (pluviomètre précis-mécanique, France). Le ruissellement sera mesuré par des augets ayant une précision de 0,01 mm, réalisés au CETE IF. La teneur en eau dans le substrat sera mesurée par des sondes capacitatives (modèle ECHO-5 et ECHO-10 de Decagon, USA). Pour les configurations avec des substrats de 4 cm (i.e. variantes *ref*, V3 et V4), 2 sondes réparties horizontalement seront installées. Pour les autres épaisseurs de substrat, 2 profils verticaux de 3 sondes sont envisagés. Pour la mesure de la hauteur d'eau dans la couche de drainage, des capteurs de pression UNIK 5000 (GE Sensing, USA), avec une précision de 0,04 mm seront utilisés. Enfin, une station météo avec

température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent et rayonnement net viendra compléter l'instrumentation.

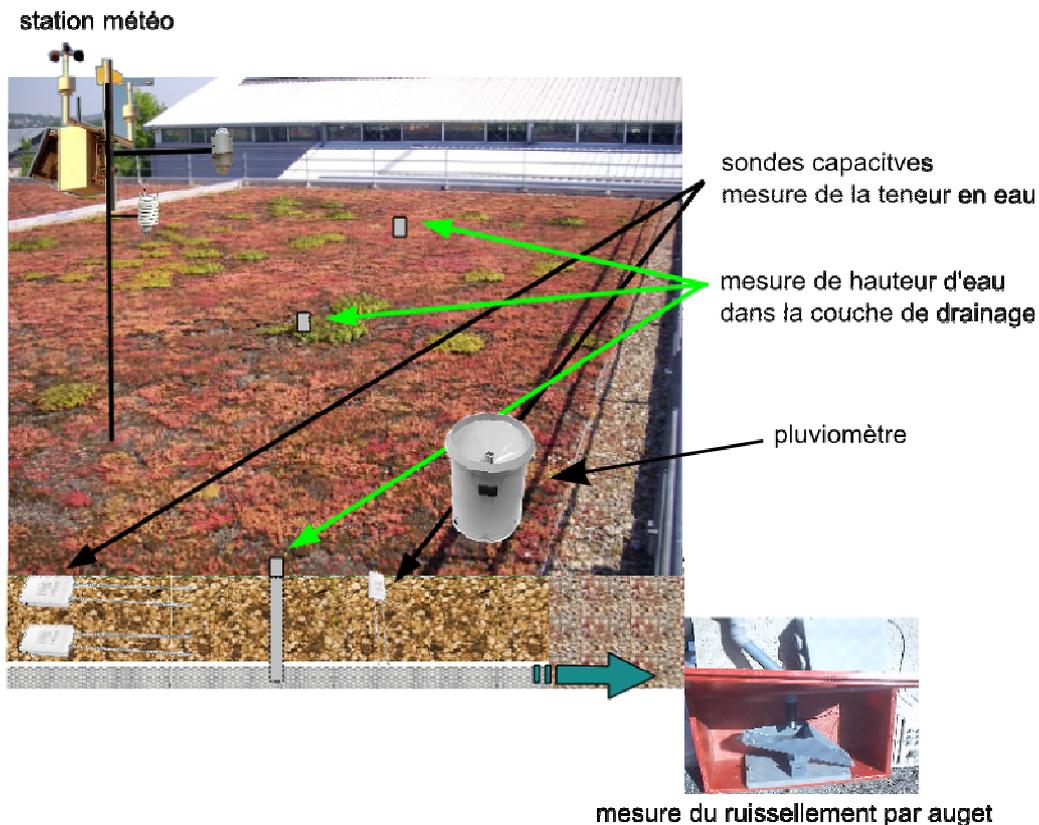


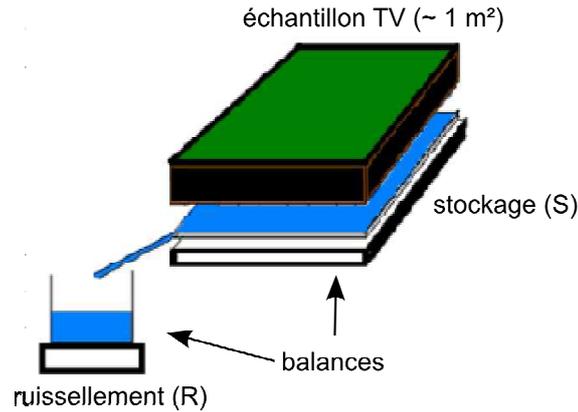
Figure 4 : Instrumentation envisagée pour l'échelle réelle

## 2.1.2 Toitures réelles

Le dispositif du CETE IF sera complété par le suivi de toitures végétalisées existantes. L'intérêt de ce complément est d'étudier des toitures plus âgées avec des superficies plus grandes. 3 toitures supplémentaires seront instrumentées. Cependant, l'instrumentation sera allégée puisque les paramètres météo et la hauteur d'eau dans la couche de drainage ne seront pas mesurés directement.

## 2.2 Observations à échelle réduite

Pour mesurer tous les termes du bilan hydrique, des observations à échelle réduite compléteront les mesures à échelle réelle. Pour cela, un lysimètre par pesée sera utilisé. Ce principe fut déjà utilisé pour étudier le comportement hydrique de tronçons de voirie (Ramier et al., 2004). Le principe est simple et consiste à peser un échantillon de toiture végétalisée ainsi que le ruissellement sortant de cet échantillon (cf. figure 5).



**Figure 5 : Schéma de principe du lysimètre**

Ce dispositif permet de mesurer le stockage d'eau ( $S$ ) dans et sur l'échantillon de toiture végétalisée ainsi que le ruissellement ( $R$ ). Les balances choisies (Mettler-Toledo, USA) ont une capacité de 150 kg pour le stockage avec une précision de 2 g et de 30 kg pour le ruissellement avec une précision de 2 g également. La précision ainsi obtenue pour la mesure de hauteur d'eau est de 0,004 mm.

En faisant le bilan de masse de l'échantillon, il est possible d'estimer la pluie ( $P$ ) et surtout l'évapotranspiration ( $ET$ ) de l'échantillon. En effet :

$$\Delta S^j = P^j - R^j - ET^j \quad (1)$$

Où  $j$  est le pas temps.

En travaillant à un pas de temps fin (i.e. 1 min), il est supposé que si le stockage est positif alors il est uniquement dû à la pluie et s'il est négatif alors c'est la conséquence de l'évapotranspiration. Soit :

$$\text{Si } \Delta S^j > 0 \text{ alors } \Delta S^j = P^j \quad (2)$$

$$\text{Si } \Delta S^j < 0 \text{ alors } \Delta S^j = -ET^j \quad (3)$$

Ainsi, il est possible de mesurer tous les termes du bilan hydrique et donc l'évapotranspiration. Deux lysimètres seront utilisés, à partir desquels il sera possible de tester différentes configurations sous conditions naturelles ou contrôlées.

### **2.3 Mesure de l'évapotranspiration : la chambre de transpiration**

Dans le but de mesurer directement l'évapotranspiration au-dessus des toitures végétalisées, une chambre de transpiration sera développée au CETE IF. Il s'agit d'une enceinte qui peut être fermée ou ouverte (Fang et Moncrieff, 1998; Loustau et al., 1991), dans laquelle l'augmentation de la vapeur d'eau est mesurée ce qui permet de déduire le flux d'évapotranspiration ( $E$ , cf. figure 6). Ce flux est déduit de la manière suivante (Guyot, 1999) :

$$E = \frac{\rho_a V_{ch}}{A_{ch}} \frac{dq}{dt} \quad (4)$$

Où  $V_{ch}$  est le volume de la chambre,  $A_{ch}$  est la surface de la chambre,  $\rho_a$  la densité de l'air,  $q$  l'humidité spécifique de l'air,  $t$  le pas de temps.

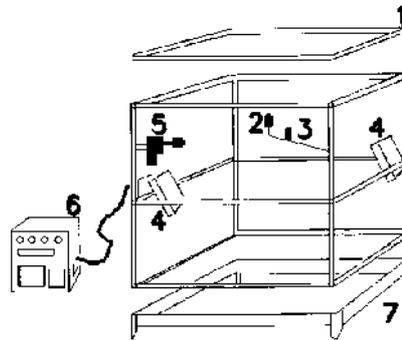


Fig 2. Schéma général de la chambre. 1 : couvercle, 2 : pyranomètre, 3 : sonde PT 100; 4 : ventilateurs; 5 : hygromètre à point de rosée; 6 : boîtier de commande, incluant batteries et centrale d'acquisition; 7 : socle enterré.

Figure 6 : Schéma d'une chambre de transpiration d'après Loustau et al. (1991)

Ce type de dispositif a déjà été utilisé avec succès pour la mesure d'évapotranspiration au-dessus de couvert végétaux (Loustau et al., 1991; Reicosky et Peters, 1977; Stannard et Weltz, 2006). Le principe est de mesurer à un pas de temps rapide et sur une courte période de temps, les variations d'humidité.

Dans le cadre de TVGEP, un modèle de chambre fermée, plus simple à mettre en oeuvre, sera développé. Les variations d'humidité seront mesurées par un hygromètre à points de rosée (hygromètre DEW-10 de GE Sensing, USA). Le rayonnement net sera également suivi à l'intérieur de l'enceinte afin de s'assurer de la continuité des conditions énergétiques entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte. Deux ventilateurs seront également ajoutés pour assurer le brassage de l'air (Loustau et al., 1991).

L'inconvénient de ce système est qu'il ne permet pas de faire des mesures en continu et les données sont "ponctuelles" (mesure sur 1 m<sup>2</sup>). Cependant, la facilité de mise en oeuvre de la chambre permettra de faire des mesures en plusieurs points au-dessus de la végétation et ces mesures seront répétées pour différentes journées types (en fonction de la saison pendant les 18 mois de mesures).

## Listes des figures et des tableaux

### *Liste des figures*

Figure 1 : Représentation schématique du bilan hydrique.....	9
Figure 2 : Schéma du banc d'essai du CETE IF .....	10
Figure 3 : Schéma des différentes variantes végétalisées du banc d'essai du CETE IF .....	11
Figure 4 : Instrumentation envisagée pour l'échelle réelle.....	12
Figure 5 : Schéma de principe du lysimètre .....	13
Figure 6 : Schéma d'une chambre de transpiration d'après Loustau et al. (1991) .....	14

### *Liste des tableaux*

Tableau 1: Liste des auteurs et de leurs travaux .....	4
Tableau 2 : Caractéristiques des toits étudiés .....	5

## Bibliographie

### *Liste de sites Internet*

<http://greenroofs.org>

<http://www.greenroofs.com>

<http://www.green-siue.com>

### *Références*

Baraglioli, A., Guillon, A., Kovacs, Y. et Senechal, C. 2008. Studies on the quantity impacts of green roofs. In 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland.

Barbera, A. et Messina, G. 2010. Can extensive green roofs solve the stormwater runoff problem in the highly urbanized cities in Sicily ? In 12th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, volume 2, 1194 - 1195, Venice, Italy.

Bass, B. et Baskaran, B. 2003. Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. A020, NRC-CNRC, Montreal, Canada. 111p.

Berghage, R., Beattie, D., Kelley, K., Husain, S., Rezai, F., Long, B., Negassi, A., Cameron, R. et Hunt, W. 2007. Quantifying Evaporation and Transpirational Water Losses from Green Roofs and Green Roof Media Capacity for Neutralizing Acid Rain. Green Roof Research at the Pennsylvania State University. 94p.

Carter, T. L. et Rasmussen, T. C. 2007. Hydrologic behavior of vegetated roofs. Journal of the American Water Resources Association 42, 1261 - 1274.

Diestel, H. et Schmidt, M. 2004. Integrated runoff management in urban areas with and without sewer systems. In proceeding of 1st Conference on Rainwater Harvesting.

Fang, C. et Moncrieff, J. B. 1998. An open-top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure difference on CO<sub>2</sub> efflux measurement. Functional Ecology 12, 319-325.

Guyot, G. 1999. Climatologie de l'environnement. Sciences Sup. Dunod, Paris, France. 525p.

Hilten, R. N., Lawrence, T. M. et Tollner, E. W. 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. Journal of Hydrology 358, 288-293.

Kasmin, H., Stovin, V. R. et Hathway, E. A. 2010. Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. Water Science & Technology 62, 898-905.

Kidd, J. 2005. Optimum green roof for Brisbane. Bachelor's of engineering, University of Queensland. 39p.

Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F. W., Laar, M. et Gusmao, F. 2001. Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate. In 38<sup>th</sup> IFLA World Congress, Singapore.

- Lassalle, F. 2008. Végétalisation extensive des terrasses et toitures. *Le Moniteur*. 243p.
- Loustau, D., Cochard, H., Sartore, M. et Guédon, M. 1991. Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia coerulea* (L.) Moench). *Annales des Sciences Forestières* 48, 29 - 45.
- Mentens, J., Raes, D. et Hermy, M. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century ? *Landscape and Urban Planning* 77, 217-226.
- Palla, A., Gnecco, I. et Lanza, L. 2009. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of Hydrology* 379, 193-204.
- Palla, A., Lanza, L. G. et Barbera, P. L. 2008. A green roof experimental site in the Mediterranean climate. In 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland.
- Palla, A., Sansalone, J., Gnecco, I. et Lanza, L. G. 2010. Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. In Novatech, Lyon, France.
- Ramier, D., Berthier, E. et Andrieu, H. 2004. An urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 29, 839-847.
- Reicosky, D. C. et Peters, D. B. 1977. A Portable Chamber for Rapid Evapotranspiration Measurements on Field Plots. *Agron J* 69, 729-732.
- Stannard, D. I. et Wertz, M. A. 2006. Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber. *Water Resour. Res.* 42, W02413.
- Stovin, V. 2009. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal*, 24, 192-199.
- Uhl, M. et Schiedt, L. 2008. Green Roof Water Retention - Monitoring Results. In 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland.
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T. et Xiao, L. 2005. Green Roof Stormwater Retention : Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth. *J Environ Qual* 34, 1036-1044.



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)**

**Appel à projets 2009**

PROJET



**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°2  
LIVRABLE N°2.2  
Suivi hydrique de toitures végétalisées et  
modélisation**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :

David Ramier

Organismes impliqués :

Cerema (ex-CETE IF)

Coordination Partie n°2

Emmanuel Berthier, Cerema (ex-CETE IF)

Coordination TVGEP :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

## Sommaire

<b>1. Dispositif expérimental</b> .....	2
1.1. La toiture végétalisée du CETE IF .....	2
1.2. Les autres toitures.....	6
1.2.1. DEA CG93 .....	6
1.2.2. Clamart .....	7
<b>2. Analyse des données obtenues au CETE IF</b> .....	7
2.1. Climatologie de la période .....	7
2.2. Les événements pluvieux .....	9
2.3. Coefficients de ruissellement .....	13
<b>3. Modélisation</b> .....	17
3.1. Hydrus1D .....	17
3.1.1. Equations principales .....	17
3.1.2. Discrétisation spatiale et temporelle .....	18
3.1.3. Paramètres nécessaires .....	19
3.1.4. Premiers résultats .....	19
3.2. Modèle réservoir fonctionnel – FAVEUR-Modèle.....	21
3.2.1. Présentation de FAVEUR-Modèle.....	22
3.2.2. Sensibilité et calage de FAVEUR-Modèle.....	24
<b>4. Conclusion</b> .....	26
<b>Listes des figures et des tableaux</b> .....	28
<i>Liste des figures</i> .....	28
<i>Liste des tableaux</i> .....	29
<b>Bibliographie</b> .....	30

L'objectif de la partie 2 du projet TVGEP est d'étudier le comportement hydrique des toitures végétalisées.. Dans le cadre de ce projet, trois toitures végétalisées ont été choisies. Ce choix s'est trouvé limité par les contraintes expérimentales. En effet, les toitures et les gouttières d'évacuation des eaux pluviales doivent être facilement accessibles afin de mesurer le ruissellement et veiller à la maintenance des instruments. . Ce document fait le point sur les dispositifs expérimentaux mis en place sur ces différentes toitures végétalisées et présente les données obtenues et leur analyse pour la toiture du CETE IF. L'avancement de la modélisation et le développement du modèle FAVEUR sont également introduits.

## 1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'un banc d'essai sur le site du CETE Ile-de-France (CETE IF)<sup>o</sup> à Trappes et de deux autres toitures végétalisées.

### 1.1. La toiture végétalisée du CETE IF

Depuis le mois de juin 2011, une toiture végétalisée est installée au CETE IF (Figure 1).



Figure 1 : Toiture végétalisée du CETE IF à Trappes. A droite du toit se trouve la station météo, à gauche de cette station, le pluviomètre. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets pour la mesure des débits de ruissellement

L'objectif de ce banc d'essai est de comparer sur un même site (i.e. même conditions climatiques) différentes structures de végétalisation, en faisant varier un seul paramètre entre chaque structure. Ainsi, 6 compartiments végétalisés furent réalisés. Le système d'appellation choisi pour chaque compartiment en fonction de ces différents paramètres est décrit dans le Tableau 1 et la position et la description des compartiments sont présentées à la Figure 2.

La notation utilisée pour référencer les différentes structures est la suivante : la première lettre correspond au type de végétation : S pour sédums, G pour le mélange graminées – sédums, N pour le compartiment sans végétation ; la deuxième lettre indique le type de substrat, E pour extensif, I pour semi-intensif ; le chiffre correspond à l'épaisseur du substrat 3 cm et 15 cm. Enfin, la dernière lettre correspond au type de couche de drainage Y pour polystyrène et Z pour la pouzzolane.

Tableau 1 : Nom et composition des différents compartiments

Nom	Type de végétation	Type de substrat	Epaisseur du substrat (cm)	Type de couche de drainage
<b>SE3Y</b>	Sédums	Extensif	3	polystyrène expansé
<b>SE3Z</b>	Sédums	Extensif	3	hydrorétentrice (pouzzolane)
<b>N3EY</b>	Non	Extensif	3	polystyrène expansé
<b>SE15Y</b>	Sédums	Extensif	15	polystyrène expansé
<b>GE15Y</b>	Graminées + sédums	Extensif	15	polystyrène expansé
<b>GI15Y</b>	Graminées + sédums	semi-Intensif	15	polystyrène expansé

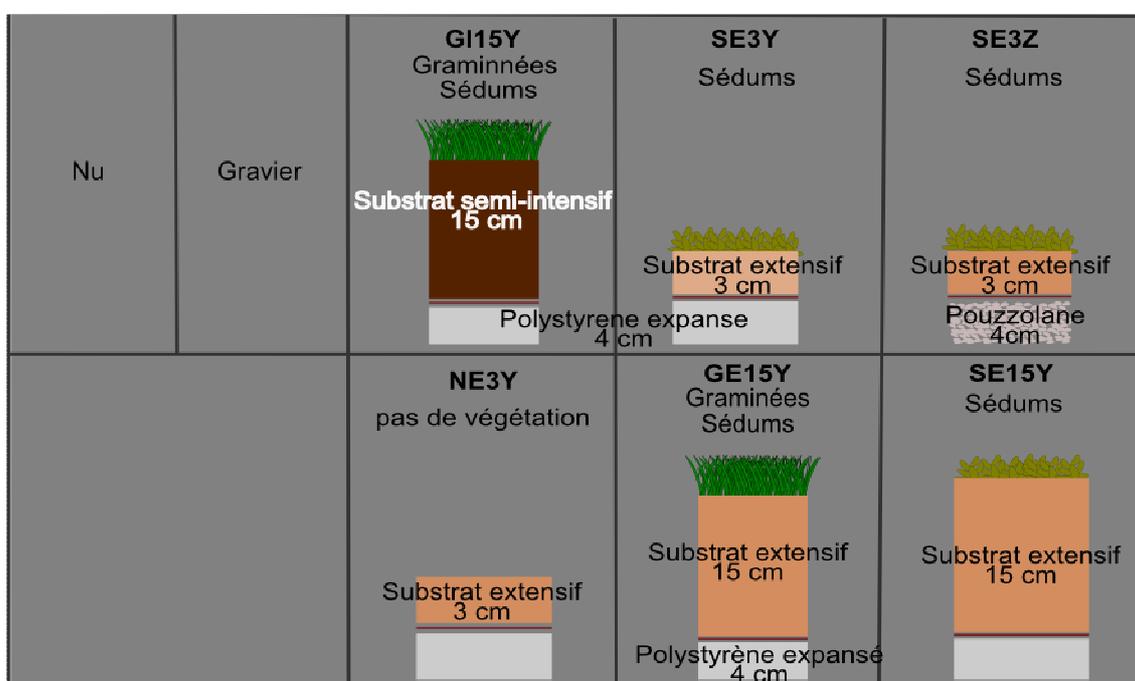


Figure 2 : Schéma des 6 compartiments et composition des différentes structures végétalisées de la toiture du CETE Ile-de-France

Le détail des compartiments est donné ci-après :

- un premier compartiment qui est notre référence, **SE3Y**, composé d'un substrat typique d'une toiture végétalisée extensive, d'épaisseur 3 cm, de sédums et d'une couche de drainage en polystyrène expansé de 4 cm;
- la variante **GE15Y** est identique à la référence mais avec une hauteur de substrat différente, 15 cm et une végétation composée d'un mélange graminées - sédums ;
- pour la variante **SE15Y**, nous avons fait varier la hauteur de substrat par rapport à la référence ;
- pour la variante **SE3Z**, la couche de drainage est composée de 3 cm de billes de pouzzolane qui ont la propriété d'être hydrorétentrice ;
- la variante **NE3Y** n'a pas de végétation ;

- la variante **GI15Y** est obtenue en modifiant le type de substrat pour un substrat caractéristique des toitures semi-intensives de 15 cm et en changeant la végétation pour un mélange graminées-sédums.

L'épaisseur totale des différents compartiments (substrat + couche de drainage) est de 7cm et 19 cm (suivant l'épaisseur du substrat).

Pour comparer l'effet des structures végétalisées par rapport aux toitures terrasses traditionnelles, un compartiment a été laissé avec seulement l'étanchéité (**Nu**, Figure 2) et un autre avec des graviers (**Gravier**).

La végétation extensive de sédums est un mélange des espèces suivantes : *S. album* (majoritaire), *S. sexagulare*, *S. reflexum*, *S. kamchatikum*, *S. spurium*, *S. acre* (faible quantité). Les graminées sont constituées de *Festuca ovina*, *Festuca rubra*, *Dianthus carthusianorum*, *Poa pratensis*, *Koeleria glauca*.

Pour chaque compartiment, les flux hydriques sont mesurés. Un pluviomètre, installé sur le toit, permet de mesurer les précipitations, une station météo mesure les paramètres nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle. Pour chaque compartiment, la teneur en eau volumique et le ruissellement sont mesurés, ainsi qu'un profil de température. La Figure 3 détaille le choix de l'emplacement de ces différentes sondes.

La teneur en eau est mesurée par des sondes capacitives : deux modèles ont été choisis. Un modèle avec une longueur de 5 cm (sondes ECHO-5, cf. Tableau 2 et sondes de couleur bleu sur la Figure 3) est utilisé pour les épaisseurs de substrat de 3 cm. Pour les substrats de 15 cm, nous avons utilisé, pour des questions d'homogénéité des mesures, les mêmes sondes de 5 cm et nous avons également ajoutés des sondes de 10 cm (sondes HS10, cf. Tableau 2 et sondes de couleur rouge sur la Figure 3). La longueur des sondes modifie le volume du sol sur lequel se fera la mesure. Avec une épaisseur de 3 cm, il n'était pas possible d'utiliser des sondes de 10 cm. En revanche, sur 15 cm, il était possible d'échantillonner un volume de sol plus important et donc de mettre les deux types de sondes. De plus pour les substrats de 15 cm, il a été possible de réaliser des profils verticaux. Avec les sondes de 10 cm, la mesure se fait à 2 positions différentes (-5cm et -10cm, la référence de hauteur étant le haut du substrat) et avec les sondes de 5 cm, les mesures se font à 3 profondeurs différentes (-2,5 cm, -7,5 cm et -12,5 cm). La différence entre les deux profils verticaux s'explique par la distance minimum devant être respectée entre chaque sonde pour éviter les interférences entre les mesures. Cette distance minimum augmente avec la taille de la sonde (5 cm pour les sondes HS10 et 2 cm pour les sondes ECHO-5). Pour les substrats de 3 cm, les sondes sont placées à peu près au milieu du substrat. La faible épaisseur de ces substrats ne permettant pas de faire des profils verticaux. Enfin la Figure 3, montre également que les différentes sondes et profils verticaux sont répartis horizontalement. L'ensemble de ce dispositif permet ainsi d'observer une éventuelle répartition spatiale des teneurs en eau.

Les températures sont mesurées par des thermocouples de type T (Cuivre-Constantan). Un profil de température est enregistré à partir de mesures sur l'étanchéité, sous le substrat (entre le géotextile et le substrat), sur le substrat (entre le substrat et la végétation) et dans la végétation. Des mesures sont aussi réalisées sur l'étanchéité du compartiment **Nu** et dans les graviers du compartiment **Gravier**.

Le ruissellement est mesuré pour chaque compartiment avec des augets basculants d'un volume de 350 ml pour les compartiments végétalisées ayant une surface de 35 m<sup>2</sup> et de 210 ml pour les compartiments **Nu** et **Gravier** qui ont une surface de 21 m<sup>2</sup>. Ces volumes ramenés aux surfaces des compartiments permettent d'avoir une sensibilité sur la mesure la hauteur d'eau équivalente de 0,01 mm. Les avaloirs sont situés au milieu de chaque compartiment, le bas de l'avaloir étant situé au niveau de l'étanchéité.

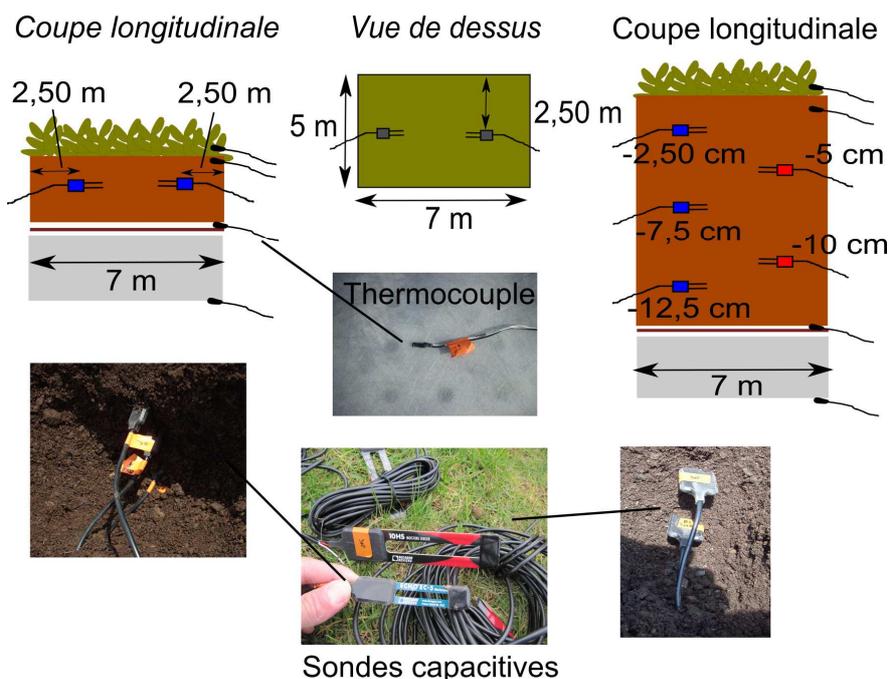


Figure 3 : Emplacement des sondes capacitives et des thermocouples de la toiture végétalisée du CETE. (en rouge les sondes HS10, et en bleu les ECHO-5, cf. Tableau 2)

L'ensemble des mesures a été mis en place progressivement à partir du 15 juin 2011. Le tableau 2 résume l'ensemble du matériel, les pas de temps d'acquisition et la date de début des mesures. Pendant la période d'observation du projet, il a été volontairement décidé de ne faire aucun entretien de la toiture végétalisée. Ceci a pu avoir un effet sur le développement de la végétation et sans doute sur la capacité évapotranspiratoire des toitures.

Tableau 2 : Liste des capteurs de la toiture végétalisée du CETE IF

Type de capteur, modèle (marque, pays)	Paramètre mesuré	Pas de temps d'acquisition	Position par rapport à la surface (la référence est le haut du substrat)	Date de début d'acquisition
pluviomètre (Précis-Mécanique, France)	précipitations (intensité et cumul)	à chaque basculement	1,50 m au-dessus de la végétation	15/06/11
auge basculant (CETE IF)	débits et cumul de ruissellement	à chaque basculement		15/06/11
sondes capacitives ECHO-5 (Decagon, USA)	teneur en eau volumique du substrat	1 min	si substrat de 15 cm : - 2,5 cm, - 7,5 cm, - 12,5 cm si substrat de 3 cm : - 1,5 cm	15/06/11
sondes capacitives HS10 (Decagon, USA)	teneur en eau volumique du substrat	1 min	- 5 cm, - 10 cm	15/06/11
sonde Précis Mécanique puis CS215 (Vaisala, Finland)	température et humidité relative de l'air	1 min	2 m au-dessus de la végétation	06/08/11 (changée le 26/04/12)
anémomètre - girouette Précis-Mécanique puis moniteur de vent 05103 (Young, USA)	vitesse et direction du vent	1 min	3 m au-dessus de la végétation	06/08/11 (changé le 26/04/12)
thermocouple type T (CETE IF)	température de la végétation, du substrat et de l'étanchéité	1 min	si substrat de 3 cm : 0, -2, - 5, -7 cm si substrat de 15 cm : 0, -2, -17, -19 cm	15/06/11
NRLite (Kipp & Zonen, Netherlands)	rayonnement net	1 min	1 m au-dessus de SE3Z	06/08/11

## 1.2. Les autres toitures.

Les deux autres toitures se situent à Clamart (92), sur le toit d'une crèche, et à Rosny-sous-Bois (93), sur le toit de la Direction de l'Eau et l'Assainissement (DEA) du Conseil Général 93. Par souci d'homogénéité entre les différents sites, les équipements et les pas de temps d'acquisition sont les mêmes. En revanche, l'instrumentation est moins « lourde » puisqu'il n'y a ni station météo, ni mesure de profil de température.

### 1.2.1. DEA CG93

L'intérêt de cette toiture est d'être complètement différente. C'est une toiture végétalisée intensive de 85 m<sup>2</sup> composée de pelouse sur 20 cm de terre végétale (Figure 4).

Les précipitations sont mesurées par un pluviomètre, géré par le CG 93 et situé sur un toit à côté. L'unique exutoire de cette toiture est équipé d'un auget basculant d'un volume de 850 ml ce qui permet d'avoir une sensibilité de 0,01 mm. Le suivi des teneurs en eau a commencé le 11 mars 2011 puis a été interrompu (problèmes d'acquisition du 9 juin au 7 octobre 2011) et est de nouveau réalisé depuis le 7 octobre 2011. L'auget est en service depuis le 9 juin 2011.



Figure 4 : Toiture végétalisée de la Direction de l'eau et de l'Assainissement du Conseil Général 93. Les carrés rouges indiquent l'emplacement des sondes HS10 (Decagon, USA) placées à -5 et -15 cm de profondeur dans le substrat et les carrés bleus indiquent l'emplacement des sondes ECHO-5 (Decagon, USA) placées à -5, -10 et -15 cm de profondeur dans le substrat

Les précipitations sont mesurées par un pluviomètre, géré par le CG 93 et situé sur un toit à côté. L'unique exutoire de cette toiture est équipé d'un auget basculant d'un volume de 850 ml ce qui permet d'avoir une sensibilité de 0,01 mm. Le suivi des teneurs en eau a

commencé le 11 mars 2011 puis a été interrompu (problèmes d'acquisition du 9 juin au 7 octobre 2011) et est de nouveau réalisé depuis le 7 octobre 2011. L'auge est en service depuis le 9 juin 2011.

### 1.2.2. Clamart

Cette toiture végétalisée (Figure 5) se trouve sur le toit de la crèche Renaudin qui appartient à la ville de Clamart (une convention a été passée avec celle-ci). C'est une toiture extensive, constituée de Sédums, d'un substrat de 3 cm et d'une couche de drainage en polystyrène expansé. Elle a été posée en 2005. Cette toiture est donc très proche de la toiture de référence (SE3Y) du CETE IF mais sa végétation ne s'est jamais vraiment développée (Figure 5 (a)).



(a)



(b)

Figure 5: Toiture végétalisée de Clamart, (a) vue du toit, (b) vue du ciel. En noir, les limites de la partie de la toiture qui est équipée : en vert, les sondes d'humidité ECHO-5 (Decagon, USA), en bleu le pluviomètre et en rouge les exutoires

L'ensemble de la toiture est drainée par plusieurs exutoires aussi nous avons décidé de ne suivre qu'une partie de 84 m<sup>2</sup> reliée à 2 exutoires (Figure 5 (b)). Les flux hydriques sont également suivis. Le matériel mis en place (Figure 5 (b)) est identique à celui du CETE IF. Un pluviomètre est placé sur le toit et quatre sondes capacitives (sondes de 5 cm, ECHO-5, Decagon, USA) réparties sur l'ensemble de la surface, et placées à environ -1,5 cm dans le substrat, mesurent la teneur en eau volumique. Les débits de ruissellement sont également mesurés avec des auges basculants d'une sensibilité de 0,01 mm (volume de 315 et 450 ml).

## 2. Analyse des données obtenues au CETE IF

### 2.1. Climatologie de la période

Le climat de Trappes est de type océanique dégradé. La Figure 6 présente les principales données météorologiques Sur la période du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013 (période où les données sont vérifiées et validées), les maximums relevés sont de 38°C (18 août 2012) pour la température de l'air ( $T_{air}$ ) et de 100 % (plusieurs jours pendant l'hiver) pour l'humidité relative de l'air ( $HR$ ). Les minimums sont de -10°C (13 février 2012) et de 15 % (09 septembre 2012). L'ampleur des variations saisonnières est similaire d'une année à l'autre. A partir du 1 octobre, une baisse marquée de la température et une augmentation de l'humidité de relative sont observées puis du 1 novembre jusqu'à fin janvier, les conditions météo sont assez similaires pour l'hiver 2011-2012 : la température moyenne journalière est d'environ 9°C avec une légère baisse fin décembre et une autre fin janvier et l'humidité relative généralement supérieure à 70 %. Pour l'hiver 2012-2013, les valeurs maximales sont proches

de l'année précédente (autour de 10°C) mais avec des périodes plus froides, plus fréquentes (début décembre 2012, janvier 2013 et fin février 2013). Les valeurs du rayonnement net (*Rnet*) sont très basses pendant cette période hivernale de novembre à janvier, conséquence de l'ensoleillement très faible de la région pendant l'hiver. Cette variation du rayonnement net se retrouve sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle puisque celle-ci passe de 4,6 mm/jour, lors de son maximum en juin 2013 à des valeurs proches de zéro au minimum, l'hiver. L'*ETP* présentée ici est calculé par la formule de Penman-Monteith à partir des données de la station météo. En cas de données météo manquantes, les données de l'*ETP* sont complétées par l'*ETP* estimée par Météo-France.

La comparaison avec la moyenne, sur 30 ans, des précipitations montre une pluviométrie mensuelle assez régulière comprise, suivant les mois, entre 40 et 70 mm et un cumul annuel moyen d'environ 650 mm. Sur la période observée ici, ce n'est pas le cas. La pluviométrie est assez irrégulière, le mois le plus pluvieux est décembre 2011 avec 136,2 mm et le plus sec, février 2012 avec 7,4 mm. En plus du mois de décembre 2011, d'autres mois ont été très pluvieux : août 2011 avec 87 mm de pluie, juin, octobre et décembre 2012 avec respectivement 132, 123 et 113 mm de pluie et juin 2013 avec 80 mm de pluie. Le cumul de pluie sur la période étudiée est de 1554 mm de pluie.

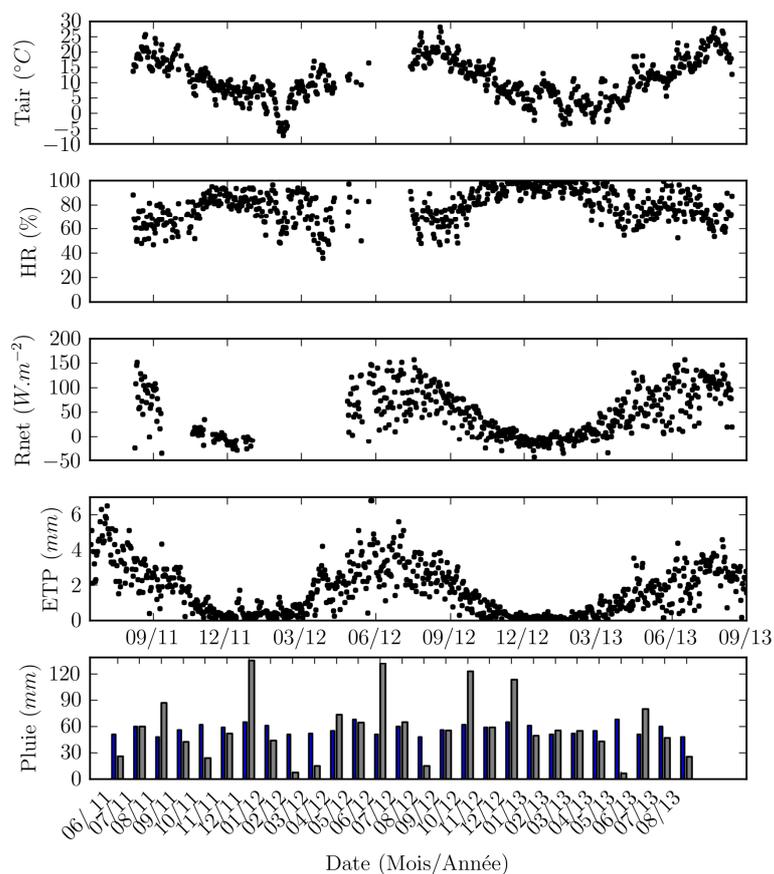


Figure 6: Évolution temporelle de la température de l'air (*Tair*, moyenne journalière), de l'humidité relative (*HR*, moyenne journalière), du rayonnement net (*Rnet*, moyenne journalière) et de l'évapotranspiration potentielle (*ETP*, cumul journalier) du 15 juin 2011 au 01 septembre 2013. Précipitations mensuelles (en bleu ; la moyenne sur 30 ans, en gris les cumuls mensuels du mois de juin 2011 au mois d'août 2013).

## 2.2. Les événements pluvieux

Etudier l'impact des différents compartiments sur la pluie et le besoin de comparer entre eux les différents compartiments nous impose de définir un événement pluvieux de la manière suivante :

*Un événement pluvieux est défini, par le début de la pluie et la fin des ruissellements des toitures. Cette fin est repérée par l'arrêt du dernier ruissellement (tous les compartiments sont étudiés afin d'avoir la même fin et donc le même événement pour tous) pendant une heure.*

Suivant cette définition, l'identification des événements se fait à partir des chroniques de pluie et de débits au pas de temps de 3 min. Les caractéristiques de ces événements pluvieux, utilisés par la suite (cf. Tableau 3) sont bien sûr fortement dépendantes de notre définition de l'événement pluvieux, mais offre l'avantage d'être une base d'analyse commune à nos différents compartiments.

Du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013 (période actuellement validée et analysée), 517 événements ont été enregistrés dont 154 ayant des hauteurs de pluie supérieures à 1 mm (cumul de la pluie entre le début et la fin de l'événement). Pour s'affranchir des incertitudes élevées sur les faibles événements, on s'intéressera uniquement aux événements supérieurs à 1mm, ce qui représente 1434 mm de pluie (soit 92 % de la pluie totale de la période). La Figure 7 présente ces 154 événements au cours de la période. Cette représentation permet également d'apprécier la durée de chaque événement ainsi que les durées entre la fin de l'événement précédent et le début d'un événement. L'observation de cette figure indique ainsi que les événements les plus importants (en hauteur de pluie) et les plus longs ont eu lieu principalement au mois de décembre. C'est aussi à cette période que les événements sont les plus rapprochés. La fréquence élevée des pluies à cette période associé à notre méthode d'identification des événements, peut donner des événements très longs. Ainsi, nous avons enregistré un événement de 15 jours du 11 au 26 décembre 2011.

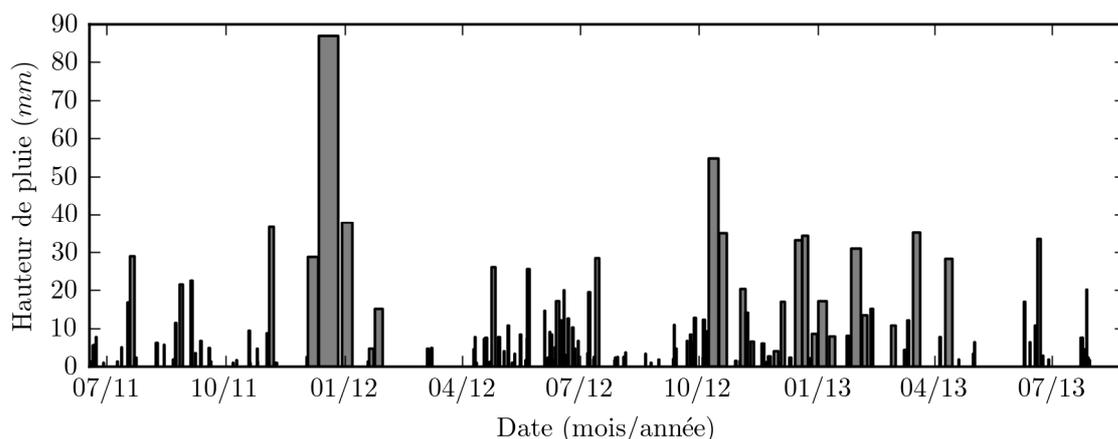


Figure 7 : Occurrence des événements pluvieux, ayant un cumul de pluie supérieur à 1 mm, du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013. L'épaisseur de chaque barre représente la durée de l'événement. La hauteur est la hauteur de pluie cumulée sur cette durée

Les événements pluvieux sont caractérisés par leur hauteur de pluie ( $H_{pluie}$ ), leur durée ( $D$ ) (temps entre le début et la fin de l'événement), leurs intensités moyennes (hauteur/durée,  $Imoy$ ) et maximums ( $Imax$ ) ainsi que par deux caractéristiques liées à l'état hydrique initial :

la durée de temps sec<sup>1</sup> (*DTS*) et la pluie moins l'évapotranspiration potentielle pendant la période de temps sec (*PETP*). Ces caractéristiques sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques des événements pluvieux

	Min	Max	Médiane
<i>H</i> pluie (mm)	1	87	5
<i>D</i> (min)	27	21738 (15 jours)	954 (16 heures)
<i>I</i> max (mm.h <sup>-1</sup> )	2	136	10
<i>I</i> moy (mm.h <sup>-1</sup> )	0,036	5,33	0,36
<i>PETP</i> (mm)	-69	0,44	-1,661
<i>DTS</i> (h)	1,1	765 (31 jours)	33

Les événements pluvieux ont généralement de hauteurs inférieures à 5 mm et des durées longues. Ceci est dû à notre méthode d'identification des événements pluvieux. La période sèche la plus longue se situe entre le 8 mars et le 9 avril 2012.

L'étude des hauteurs de pluies en fonction des autres caractéristiques (Figure 8) montre que les événements ayant les hauteurs les plus importantes ont généralement des durées longues et ont lieu après des durées de temps secs courtes et donc pour lesquelles la pluie – l'évapotranspiration potentielle est faible. Les événements les plus importants apparaissent donc alors que le stock en eau initial est potentiellement élevé.

Un autre paramètre important dans la caractérisation d'un événement pluvieux est sa période de retour. On se base généralement sur ce critère pour le dimensionnement des ouvrages de rétention. Bien que la détermination de nos événements pluvieux diffère des événements pluvieux généralement utilisé pour le calcul des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) permettant de caractériser la période de retour, nous avons toutefois fait la comparaison à titre indicatif. Ainsi, la Figure 9 présente les hauteurs des événements pluvieux en fonction de la durée des événements et les courbes représentant différentes périodes de retour. La période de retour maximum obtenue est comprise entre 5 et 10 ans. Mais celle-ci correspond à l'événement le plus long dont la durée est supérieure à la durée préconisée pour les courbes IDF permettant de déterminer les périodes de retour (cf. légende figure 9). Ce résultat est donc à confirmer. Hormis la quinzaine d'évènements qui sortent du domaine de validité des courbes IDF, la période de retour la plus importante est inférieure à l'année.

Pour compléter la Figure 9, le nombre d'évènements en fonction des périodes de retour est présenté à la Figure 10 et montre bien que la majorité des événements pluvieux enregistrés pendant cette période peuvent être considérés comme courant (i.e. période de retour inférieure au mois).

<sup>1</sup> Cette période de temps sec est comprise entre la fin d'un événement pluvieux ayant une hauteur supérieure ou égale à 1 mm et le début d'un autre événement ayant une hauteur supérieure ou égale à 1 mm. Il peut donc y avoir pendant cette période quelques pluies inférieures à 1 mm.

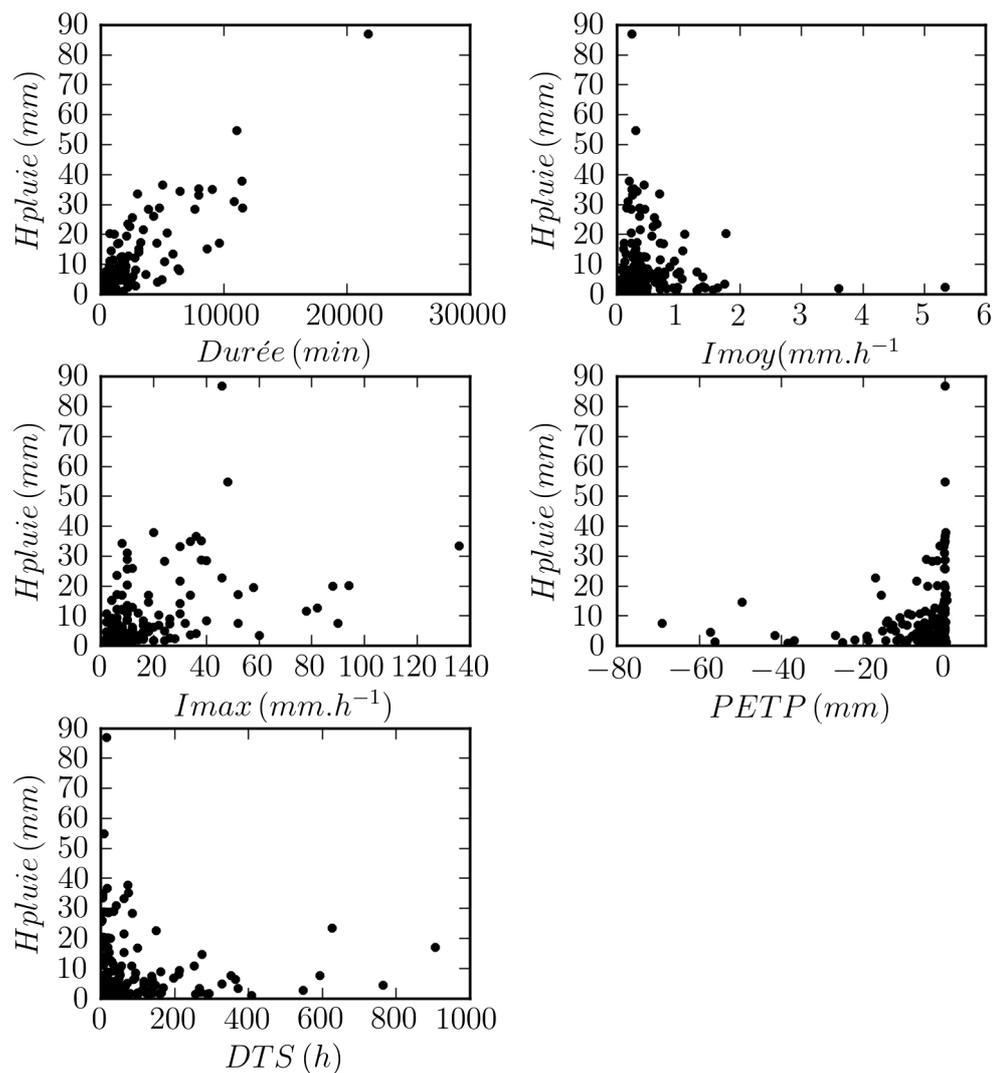


Figure 8 : Nuages de points entre la hauteur de pluie et les autres caractéristiques des événements pluvieux

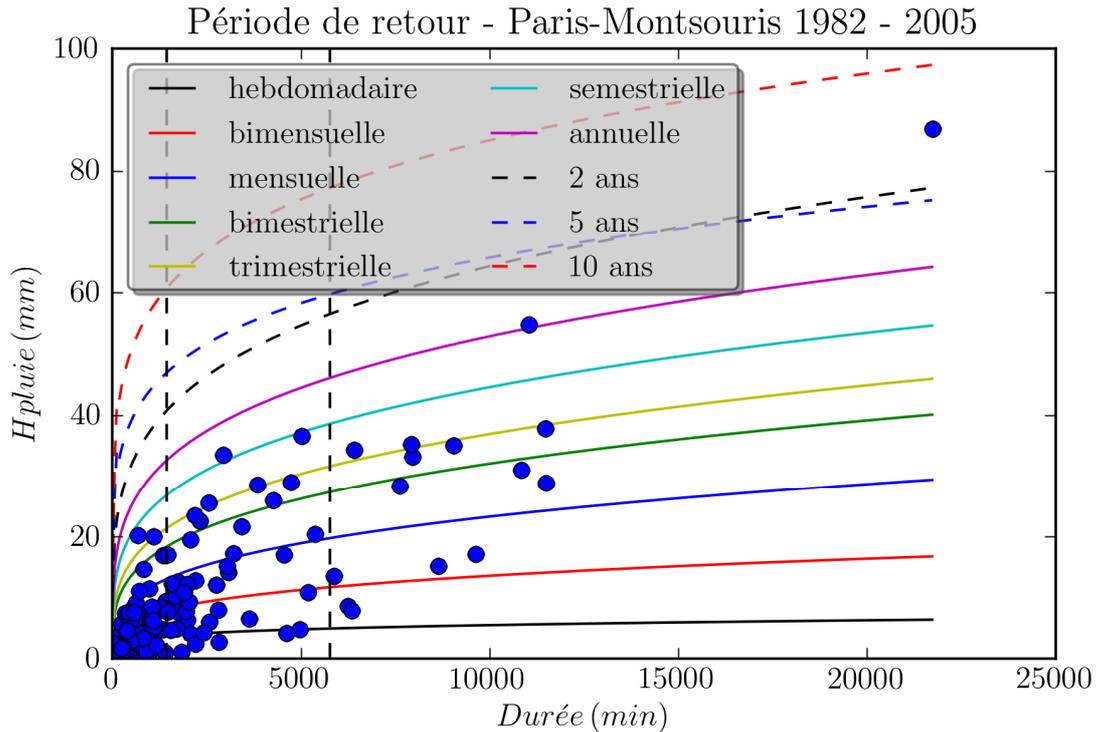


Figure 9 : Hauteurs des événements pluvieux supérieures à 1mm en fonction de la durée (points bleus). Les courbes correspondent à différentes périodes de retour calculées à partir des courbes IDF de Météo-France pour la station de Paris-Montsouris sur la période 1982 – 2005. La durée maximum d'utilisation de ces courbes est de 96 h (5760 min, matérialisée par la droite en pointillée de droite) pour les périodes de retour inférieures à 5 ans et de 24h (1440 min, matérialisée par la droite en pointillée de gauche) pour les périodes de retour 5 et 10 ans. 15 événements dépassent cette durée, les conclusions quant à leur période de retour sont donc hypothétiques

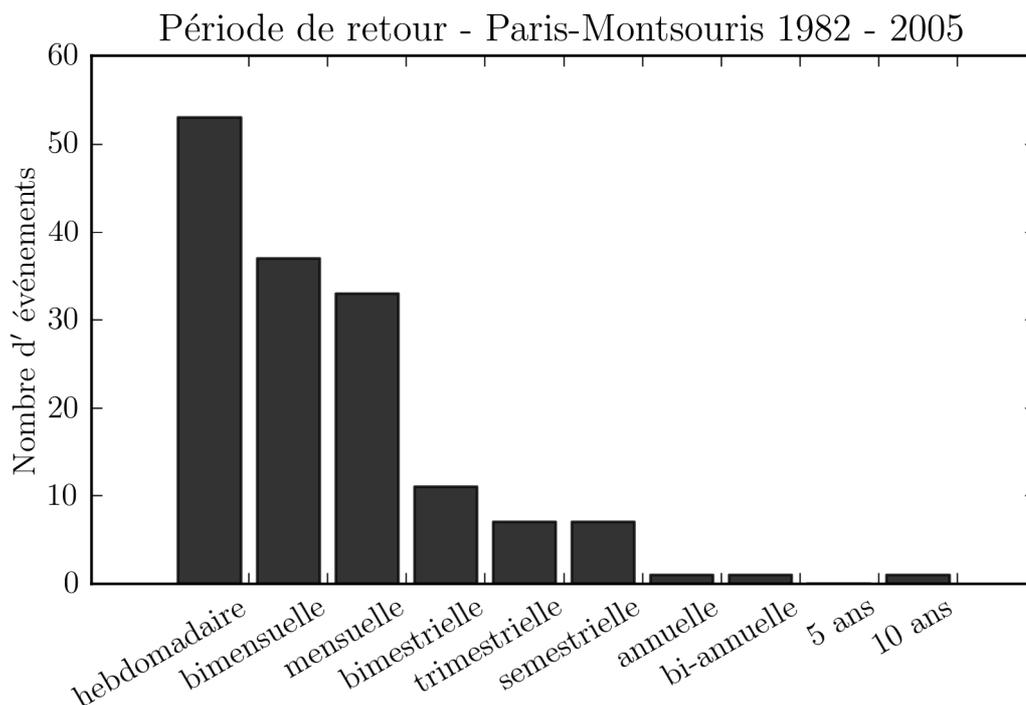


Figure 10 : Nombre d'événements en fonction des périodes de retour

### 2.3. Coefficients de ruissellement

La Figure 11 présente le coefficient de ruissellement pour l'ensemble de la période de mesure. Noté  $CR_{an}$ , il est défini, pour chaque compartiment comme le rapport entre le cumul de la hauteur d'eau ruisselée du compartiment pour tous les événements et le cumul de la pluie de tous les événements.

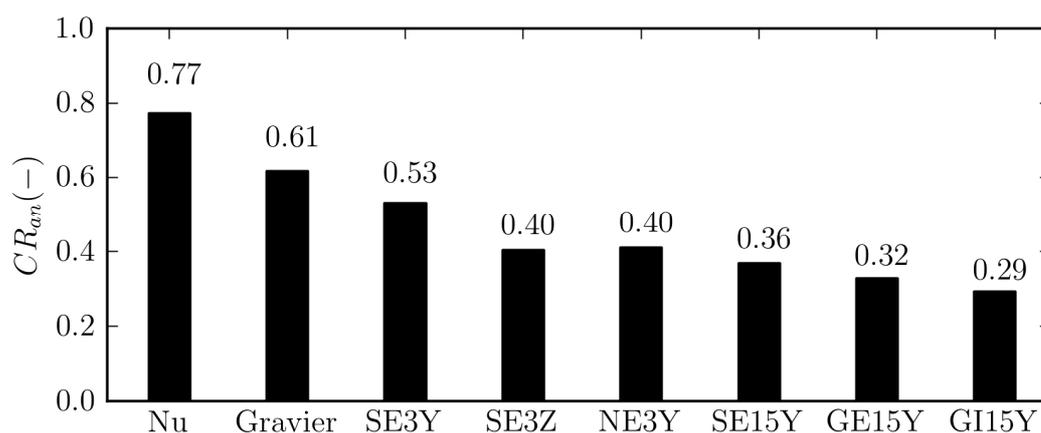


Figure 11 : Coefficients de ruissellement annuels pour chaque compartiment. Le chiffre en haut de chaque barre indique le coefficient de ruissellement annuel ( $CR_{an}$ ).

Les résultats obtenus montrent donc que compartiment **Nu** est celui qui ruisselle le plus (77 %), ensuite c'est le compartiment avec les graviers (**Gravier**, 61 %). Le compartiment végétalisé qui produit le plus de ruissellement est **SE3Y** avec un  $CR_{an}$  de 53 % alors qu'un compartiment similaire mais avec une couche de drainage hydro-rétentricie permet de diminuer de plus de 10 % le ruissellement (**SE3Z**, 40 %). Le résultat obtenu avec la couche de drainage hydro-rétentricie est similaire à celui obtenu si la végétation est supprimée (**NE3Y**, 40 %). Si l'on augmente l'épaisseur jusqu'à 15 cm ; le ruissellement diminue encore (**SE15Y**, 36 %) et la capacité d'abattement est encore augmentée pour les compartiments dont la végétation est composée par le mélange graminées-sédums (**GE15Y**, 32% et **GI15Y**, 29%). La légère différence entre ces deux derniers compartiments pouvant être imputée à la nature différente du substrat.

Ces résultats sont légèrement différents si on les étudie événement par événement et pour chaque compartiment. Le Tableau 4 présente pour chaque compartiment les caractéristiques des coefficients de ruissellement par événement : moyenne ( $CR_{moyen}$ ), médiane ( $CR_{médian}$ ), minimum ( $CR_{min}$ ), maximum ( $CR_{max}$ ) ainsi que le nombre d'événements qui a pu être enregistré pour chaque compartiment et le nombre d'événement qui ont provoqué du ruissellement.

Tableau 4 : Caractéristiques du ruissellement pour chaque compartiment de la toiture du CETE

	$CR_{moyen}$ (-)	$CR_{min}$ (-)	$CR_{max}$ (-)	$CR_{médian}$ (-)	Nombre d'événements (-)	Nombre d'événement avec ruissellement (-)
<b>Nu</b>	0,68	0	1	0,73	108	106 (98 %)
<b>Gravier</b>	0,38	0	0,95	0,43	130	100 (77 %)
<b>SE3Y</b>	0,24	0	1	0,02	113	73 (65 %)
<b>SE3Z</b>	0,19	0	0,92	0	126	64 (51 %)
<b>N3EY</b>	0,20	0	1	0,02	127	72 (57 %)
<b>SE15Y</b>	0,17	0	0,95	0	128	70 (57 %)
<b>GE15Y</b>	0,15	0	0,88	0	131	66 (50 %)
<b>GI15Y</b>	0,14	0	0,92	0	101	68 (67 %)

Pour le compartiment **Nu**, pratiquement tous les événements produisent du ruissellement avec des coefficients de ruissellement élevés. La simple présence de graviers diminue le ruissellement : le coefficient de ruissellement moyen passe à 38 % et 23% des événements enregistrés n'ont pas produit de ruissellement. Pour les compartiments végétalisés, le pourcentage d'événements qui produisent du ruissellement varie entre 50 et 65 %. Les coefficients de ruissellement calculés pour chaque événement sont, pour la moitié des événements, inférieurs à 1% (s'ils ne sont pas égaux à zéro). Les coefficients de ruissellement moyens sont donc faibles mais les maximums sont forts puisque les coefficients de ruissellement maximums sont supérieurs à 0,88 quel que soit le compartiment.

L'écart entre les coefficients de ruissellement moyens à l'événement (moyenne des coefficients de ruissellement de chaque événement,  $CR_{moyen}$ ) et les coefficients de ruissellement obtenus sur l'ensemble des 19 événements communs ( $CR_{an}$ , Figure 11), qui sont plus élevés, s'explique par le fait que la valeur du coefficient de ruissellement est fortement dépendant de la hauteur de pluie et que la majorité des hauteurs de pluie est faible.

La Figure 12 montre les nuages de points entre les coefficients de ruissellement des différents compartiments et la hauteur de pluie. Il apparaît clairement que pour tous les compartiments, le coefficient de ruissellement augmente avec la hauteur de pluie et donc que plus l'événement pluvieux est important (en quantité) et moins la toiture végétalisée est efficace.

Pour les compartiments végétalisés, le ruissellement peut apparaître dès des hauteurs de pluie faibles. Avec une quantité maximum d'eau théorique (CME) de 0,40, la quantité maximum d'eau qui peut-être stockée dans les substrats de 3 cm est de 1,2 cm et de 6 cm pour les substrats de 15 cm. Les hauteurs de pluies minimums sont toutes inférieures à ces valeurs ce qui peut s'expliquer par les conditions d'humidités initiales.

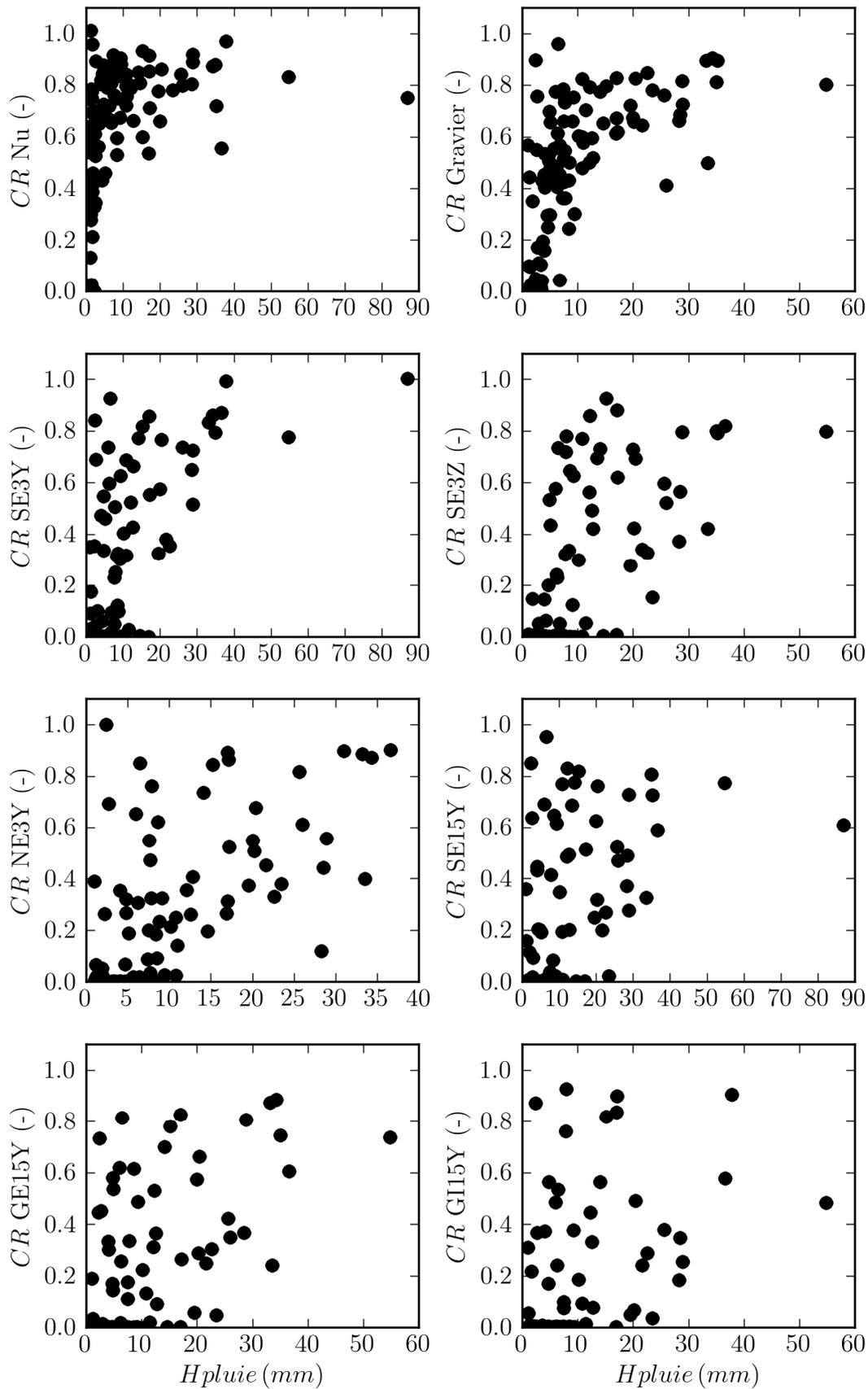


Figure 12: Coefficients de ruissellement en fonction de la hauteur de pluie

### 3. Modélisation

Deux types de modèles sont généralement utilisés en hydrologie, les modèles à base physique qui essaient de représenter explicitement les processus physiques et les modèles conceptuels qui donnent une version simplifiée de la réalité. Pour TVGEP, nous avons décidé d'utiliser ces deux types de modèles.

Le modèle à base physique est Hydrus1D et le modèle conceptuel est un modèle simplifié à réservoirs.

#### 3.1. Hydrus1D

##### 3.1.1. Equations principales

Hydrus1D résout l'équation de Richard en une dimension (écoulement vertical) selon l'équation 1 :

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

où  $\theta$  est la teneur en eau,  $K$  la conductivité hydraulique,  $h$  la succion,  $t$  le temps,  $z$  est la hauteur selon l'axe vertical orienté positivement vers le bas.

Les relations entre  $\theta$  et  $h$  et  $K$  et  $h$  sont obtenues par l'équation de Van Genuchten (1980) avec la condition de Mualem. Ainsi :

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + |\alpha h|^n \right]^m} & \text{si } h < 0 \\ \theta_s & \text{si } h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Et,

$$k(h) = k_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^n \right]^2 \quad (3)$$

Où  $\theta_s$  est la teneur en eau à saturation,  $\theta_r$  la teneur en eau résiduelle,  $S_e$  est le degré de saturation,  $\alpha$ ,  $n$  et  $m$  sont les paramètres de formes de la courbe de Van Genuchten (1980),  $l$  représente la tortuosité de l'écoulement entre les pores.

Le degré de saturation est défini de la manière suivante (équation 4):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

et le paramètre  $m$  par la relation suivante (équation 5) :

$$m = 1 - 1/n \quad (5)$$

### 3.1.2. Discrétisation spatiale et temporelle

Dans Hydrus1D, nous modélisons uniquement le substrat. Le rôle de la végétation est pris en compte dans l'évapotranspiration potentielle et nous supposons que la couche de drainage n'a pas d'influence sur le bilan hydrique (pas de fonction de rétention, pas d'évapotranspiration dus aux transferts très rapides dans cette couche). Ceci n'est pas le cas pour le compartiment avec la couche de drainage hydrorétentrice (**S3EZ**) qui sera étudié autrement. Le substrat est représenté par un maillage composé d'éléments rectangulaires (Figure 13). La taille de ces éléments peut être fixe ou affinée aux interfaces (au fond et en surface).



Figure 13 : Représentation et discrétisation du substrat à modéliser avec Hydrus1D. Les traits horizontaux représentent les limites de chaque élément

Chaque élément est repéré par un nœud. Les équations précédentes sont résolues pour chaque nœud et à chaque pas de temps. L'équation (1) devient donc :

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left[ K_{i+1/2}^{j+1,k} \frac{h_{i+1}^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k+1}}{\Delta z_i} - K_{i+1/2}^{t+1,k} \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_{i-1}^{j+1,k+1}}{\Delta z_{i-1}} \right] \quad (6)$$

avec :

$$\Delta t = t^{j+1} - t^j \quad (7)$$

$$\Delta z = \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2} \quad (8)$$

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$$

$$K_{i+1/2}^{j+1,k} = \frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2} \quad (9)$$

Où les indices  $i$  représentent la position des éléments,  $k$  le niveau d'itération du pas de temps en cours et  $j$  le pas de temps.

### 3.1.3. Paramètres nécessaires

Les paramètres nécessaires pour faire fonctionner Hydrus1D sont résumés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres du modèle Hydrus1D

Nom	Unité	Désignation
<b>Variables d'entrée</b>		
$P$	m.min <sup>-1</sup>	pluie observée
$ETP$	m.min <sup>-1</sup>	évapotranspiration potentielle
$h_{critA}$	m	valeur seuil de la succion de surface
<b>Paramètre du maillage</b>		
$nelt$	(-)	nombre d'éléments
$ep$	(m)	épaisseur
<b>Paramètres physiques</b>		
$Ks$	m.s-1	conductivité hydraulique à saturation
$\theta_r$	(-)	teneur en eau résiduelle
$\theta_s$	(-)	teneur en eau à saturation
$\alpha$	(m <sup>-1</sup> )	paramètre de forme de la courbe de Van Genuchten
$n$	(-)	paramètre de forme de la courbe de Van Genuchten
$l$	(-)	tortuosité

### 3.1.4. Premiers résultats

La modélisation avec Hydrus1D est toujours en cours. Actuellement des tests ont été réalisés sur deux compartiments du CETE, **SE3Y** et **SE15Y** pour lesquels la différence est la plus simple à représenter (ils ne diffèrent que par leur épaisseur). Les premiers résultats indiquent que le modèle peut reproduire assez bien les quantités d'eau ruisselées (Tableau 6). L'erreur obtenue pour **SE3Y** est seulement de 4 %. Cette erreur est 4 fois plus importante pour **SE15Y**.

Tableau 6 : Cumul des hauteurs d'eau ruisselées, simulées avec Hydrus1D et observées

	Cumul des hauteurs d'eau ruisselées (mm)		
	Observé	Simulé	Erreur (%)
<b>SE3Y</b>	227	237	4
<b>SE15Y</b>	173	144	17

En effet, les débits de ruissellement de **SE15Y** sont pour le moment assez mal reproduits. Avant le 8 novembre 2011, aucun débit de ruissellement n'est reproduit par le modèle alors que les observations montrent bien la présence du ruissellement (Figure 14), puis après le 8 novembre 2011, des débits de ruissellement sont bien simulés par le modèle mais sont égaux à ceux simulés pour **SE3Y** alors que les observations montrent des débits différents (Figure 15). Dans le modèle, le ruissellement apparaît lorsque le dernier élément est saturé. Si cette condition fonctionne assez bien pour **SE3Y**, elle n'est apparemment pas suffisante pour représenter les débits de ruissellement de **SE15Y** qui ne diffère pourtant que par son épaisseur.

Des simulations sont toujours en cours pour améliorer la modélisation de la dynamique du ruissellement sur les différents compartiments.

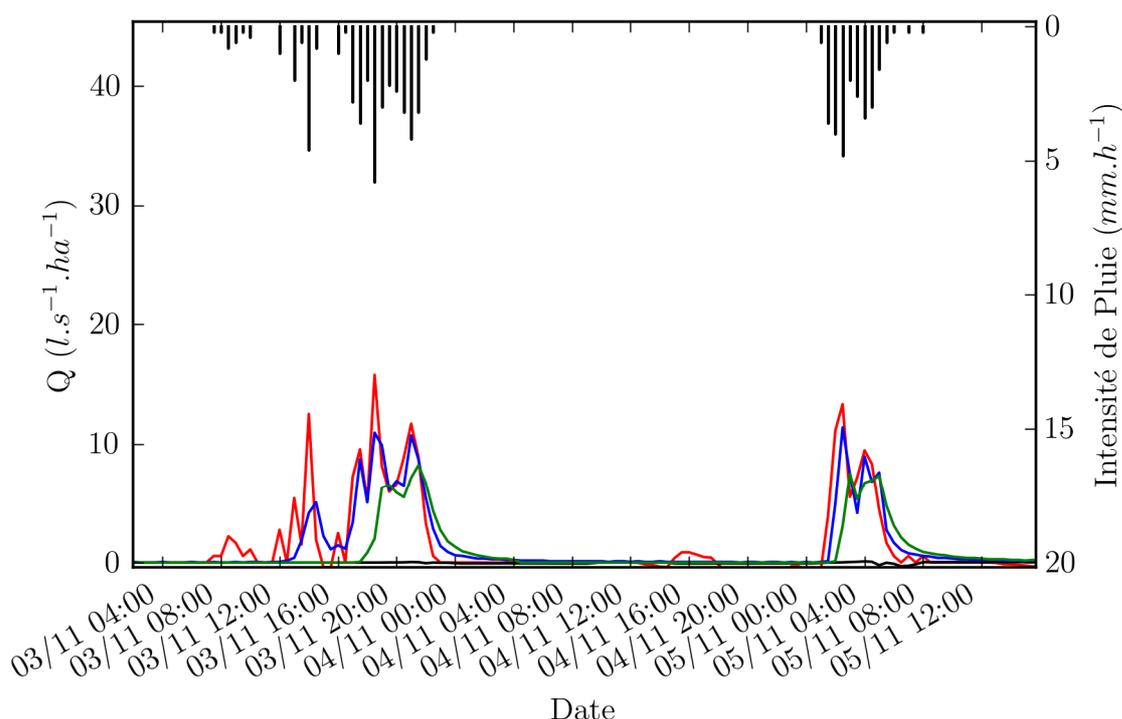


Figure 14 : Comparaison des débits de ruissellement ( $Q$ ), observés et simulés, avec Hydrus1D pour la période du 3 novembre 2011 00h00 au 6 novembre 2011 00h00.

En rouge, SE3Y simulé ; en noir, SE15Y simulé ; en bleu, SE3Y observé ; en vert, SE15Y observé. Les barres, en haut, représentent l'intensité de la pluie. Les simulations sont faites au pas de temps de 3min, et représentées ici à 30 min

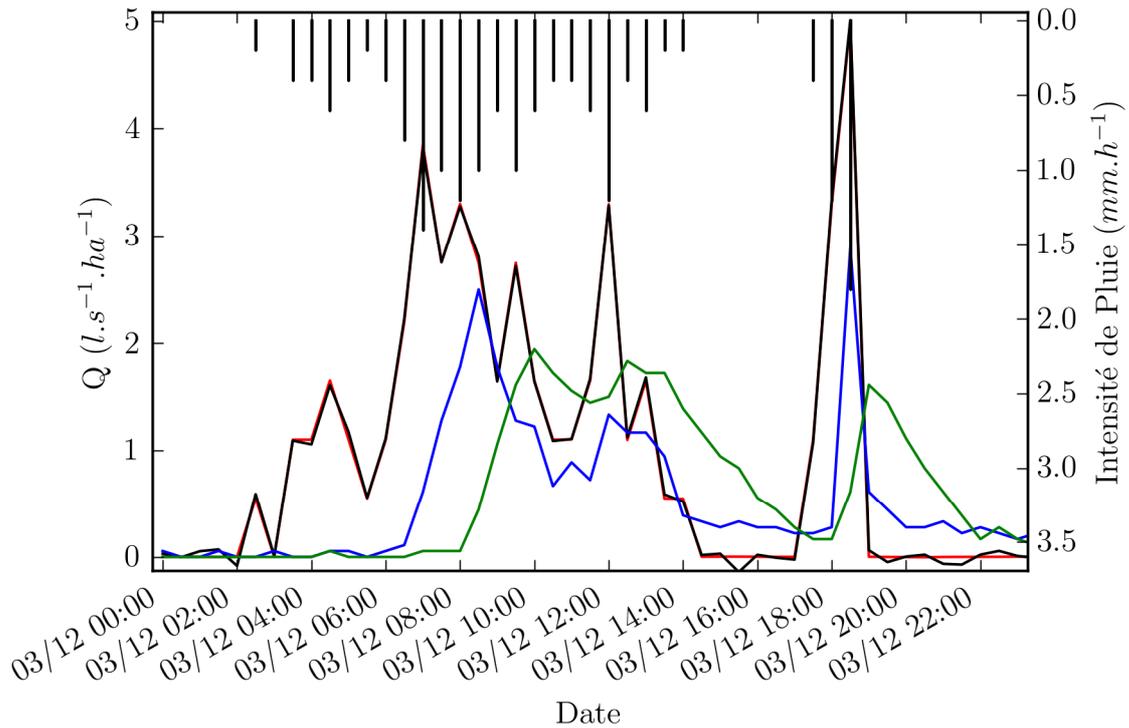


Figure 15 : Comparaison des débits ( $Q$ ) de ruissellement, observés et simulés, avec Hydrus1D pour la période du 3 décembre 2011 00h00 au 4 décembre 2011 00h00. En rouge, SE3Y simulé ; en noir, SE15Y simulé ; en bleu, SE3Y observé ; en vert, SE15Y observé. Les barres, en haut, représentent l'intensité de la pluie. Les simulations sont faites au pas de temps de 3min, et représentées ici à 30 min

### 3.2. Modèle réservoir fonctionnel – FAVEUR-Modèle

Ce modèle a été développé à partir des travaux de Berthier *et al.*, (2011). Les motivations initiales de ce choix sont :

- de réduire le nombre de paramètres, au vu du jeu laissé par le grand nombre de paramètres du modèle précédent, sans pour autant permettre de trouver des valeurs avec un sens physique. La corrélation entre les paramètres et les grandeurs physiques pourra être étudiée dans un second temps. On se rapproche donc de la philosophie initiale des modèles réservoirs ;

- de coupler la modélisation des transferts horizontaux et verticaux, alors qu'on a vu que la modélisation de chacun de ces flux posait des difficultés supplémentaires ;

- que les premiers résultats obtenus avec l'ébauche de ce modèle étaient les plus prometteurs sans calage.

Le complexe de végétalisation se comporte donc :

- d'abord comme une capacité d'interception, qui sera vidée par évapotranspiration fonction d'abattement). Cette capacité d'interception représente donc la capacité d'interception de la végétation et du substrat. Il s'agit donc ici des pertes initiales. Dans l'idéal, on attend qu'on puisse ajouter à ces pertes la présence d'une réserve, par exemple sous forme d'alvéoles, dans la couche de drainage ;

- puis comme un réservoir de transfert, qui s'applique au ruissellement excédentaire. Dans ce réservoir, les transferts horizontaux dépendent fortement du suintement à la base de la couche de drainage. Ainsi, nous considérons que les phénomènes hydrauliques sont mal représentés par les modèles classiques et qu'il est risqué de vouloir en proposer une formulation explicite, et préférons donc les modéliser sous la forme d'une fonction de transfert unique.

### 3.2.1. Présentation de FAVEUR-Modèle

Ce modèle décrit donc les différentes fonctions réalisées par le complexe de végétalisation (Figure 16), nous l'appellerons donc fonctionnel.

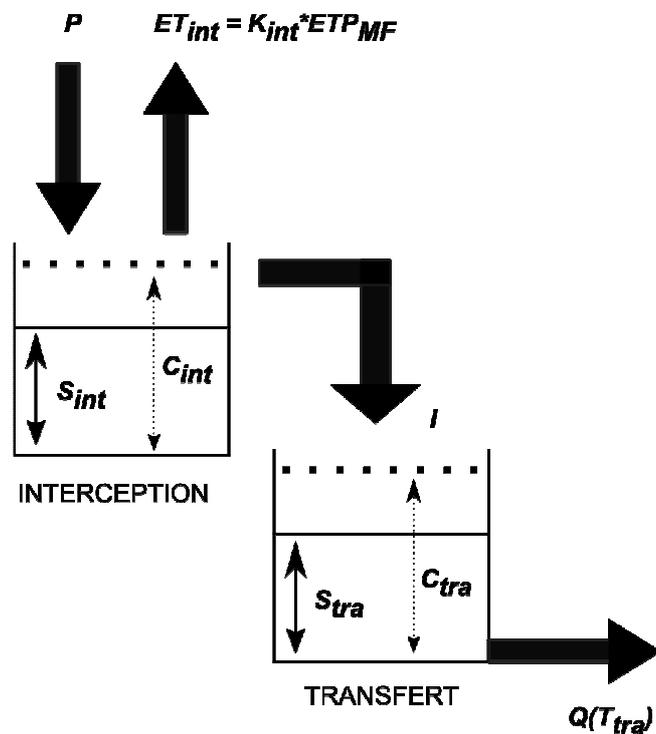


Figure 16 : Schéma de principe du modèle FAVEUR (la signification des paramètres est donnée dans le tableau 6)

Tableau 6 : Paramètres du modèle réservoir

Nom	Unité	Désignation
<b>Variables d'entrée</b>		
$P$	mm	pluie observée
$ETP_{MF}$	mm	évapotranspiration potentielle
<b>Paramètres interception</b>		
$S_{int}$	mm	stockage dans le réservoir d'interception
$C_{int}$	mm	stockage maximum dans le réservoir d'interception
$K_{int}$	-	coefficient de modulation de l'évapotranspiration
$ET_{int}$	mm	évapotranspiration du réservoir d'interception
$I$	mm	quantité d'eau échangée entre les réservoirs d'interception et de transferts
<b>Paramètres transfert</b>		
$S_{tra}$	mm	stockage dans le réservoir de transfert
$C_{tra}$	mm	stockage maximum dans le réservoir de transfert
$T_{tra}$	mm	constante de transfert
$Q$	mm	ruissellement à la base de la TTV

Le forçage du modèle est réalisé à partir de la pluie ( $P$ ) et de l'évapotranspiration potentielle fournie par Météo-France ( $ETP_{MF}$ ). Le calcul des différents stocks et flux d'eau est réalisé à chaque pas de temps de calcul  $t$  et est décrit ci-dessous.

Le réservoir d'interception est caractérisé par une capacité de stockage ( $C_{int}$ ). La hauteur d'eau dans ce réservoir ( $S_{int}$ ) évolue donc en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration et de la quantité  $I$ . L'évapotranspiration de ce réservoir ( $ET_{int}$ ) est estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle ( $ETP_{MF}$ ). Les valeurs de  $ETP_{MF}$  n'étant pas adaptées aux toitures végétalisées (Choisnel, 1988), un coefficient de modulation ( $K_{int}$ ) permet d'ajuster ces valeurs. Enfin, l'évapotranspiration n'est possible que si le stock d'eau est suffisant (c-à-d  $S_{int} > ET_{int}$ ). D'où :

$$ET_{int}(t) = \min(S_{int}(t-1), K_{int} * ETP_{MF}(t)) \quad (10)$$

Ensuite le transfert d'eau  $I$  du réservoir d'interception vers le réservoir de transfert est calculé. Il correspond au surplus d'eau par rapport à la capacité  $C_{int}$ , ainsi :

$$I(t) = \max(S_{int}(t-1) + P(t) - ET_{int}(t) - C_{int}, 0) \quad (11)$$

Puis, le stockage d'eau dans le réservoir de transfert est actualisé :

$$S_{tra}(t) = S_{tra}(t-1) + P(t) - ET_{tra}(t) - I(t) \quad (12)$$

Il est ensuite possible de calculer le stock d'eau dans le réservoir de transfert. Ce stock d'eau est calculé en deux temps, dans un premier temps (noté  $t/2$ ) il est actualisé à partir du flux  $I$  et du stock au temps précédent  $S_{tra}(t-1)$  :

$$S_{tra}(t/2) = S_{tra}(t-1) + I(t) \quad (13)$$

Puis, le ruissellement est calculé à partir de ce nouveau stock :

$$Q(t) = \min \left( S_{tra}, \frac{dt}{T_{tra}} * \left( \frac{S_{tra}(t/2)}{C_{tra}} \right) * S_{tra}(t/2) \right) \quad (14)$$

Où  $dt$  représente la valeur du pas de temps de calcul. Enfin le stock dans le réservoir de transfert est mis à jour :

$$S_{tra}(t) = S_{tra}(t/2) + Q(t) \quad (15)$$

Pour résumer FAVEUR-Modèle calcul à partir de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle, les hauteurs d'eau dans les réservoirs d'interception et de transfert ( $S_{int}$  et  $S_{tra}$ ), le flux d'eau entre les réservoirs d'interception et de transfert ( $I$ ) et la quantité d'eau ruissellée ( $Q$ ). Pour ce faire, FAVEUR a besoin de quatre paramètres pour fonctionner  $C_{int}$ ,  $K_{int}$ ,  $C_{tra}$ ,  $T_{tra}$ . Ces paramètres ont été déterminés lors du calage.

### 3.2.2. Sensibilité et calage de FAVEUR-Modèle

FAVEUR-Modèle a été utilisé pour simuler le comportement hydrologique des 6 compartiments végétalisés (**SE3Y**, **SE3Z**, **NE3Y**, **SE15Y**, **GE15Y**, **GI15Y**) pour la période du 15 juin 2011 au 14 juillet 2012. Le pas de temps de calcul ( $dt$ ) est de 3 min. Le calage du modèle est basé sur une méthode multicritères et multiobjectives (Gupta *et al.*, 1999) qui consiste à faire varier simultanément les 4 paramètres à caler. La plage de variation de ces paramètres est définie à partir de valeurs réalistes comprises entre un maximum et un minimum. Une série de 1000 simulations a ainsi été réalisée pour chacun des 6 compartiments. La qualité des simulations est déterminée en fonction de deux critères, le critère de Nash et Sutcliffe ( $C_{nash}$ , Nash and Sutcliffe, 1970) et un critère de bilan ( $C_{bilan}$ ), définis ci-dessous :

$$C_{nash} = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad \text{et} \quad C_{bilan} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{mod,i} - \sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \times 100 \quad (16)$$

où  $\overline{Q_{obs}}$  est le ruissellement observé,  $Q_{mod}$  est le ruissellement simulé par FAVEUR-Modèle,  $\overline{Q_{obs}}$  est la moyenne du ruissellement observé.

Les résultats de l'ensemble de ces simulations sont ensuite classés selon un rangement de Pareto (Yapo *et al.*, 1998) afin de faire ressortir les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible et les valeurs des paramètres qui donnent les meilleurs résultats.

Les résultats montrent que le modèle est plus sensible aux paramètres du réservoir d'interception que du réservoir de transfert et il fut également nécessaire de faire varier le  $K_{int}$  suivant la saison. Les valeurs des 4 paramètres qui donnent les meilleures simulations sont données dans le Tableau 7

**Tableau 7:** Valeurs des paramètres de chaque réservoir de FAVEUR-Modèle

Paramètres	SE3Y	SE3Z	NE3Y	SE15Y	GE15Y	GI15Y
$K_{int}$ (mm) [été/hiver]	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1,2/0,5	1,2/0,5
$C_{int}$ (mm)	12	12	12	21	21	21
$C_{tra}$ (mm)	10	20	10	30	30	32
$T_{tra}$ (min)	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Les résultats des simulations obtenus à partir de ces paramètres sont représentés par la Figure 17.

**Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.**

Figure 17 : Comparaison entre les débits de ruissellements observés et : NE3Y pas de temps de 30 min pour la période du 15 juin 2011 au 14 juillet 2012.

Les résultats obtenus sont donc globalement satisfaisants pour la période de simulation. Les critères de Nash (dont le maximum est de 1) varient de 0,78 pour **SE15Y**, 0,79 pour **GE15Y** et **GI15Y** à 0,86 pour **SE3Z** et 0,89 pour **SE3Y** et **NE3Y**. Les critères de bilan sont légèrement moins bons, alors qu'ils devraient être proches de 0 %, ils sont de -1 % et -4 % pour **SE3Y** et **GE15Y**, de 10 et 12 % pour **SE3Z** et **NE3Y** et de -11 et -13 % pour **SE15Y** et **GI15Y**. Il est également à noter que les débits extrêmes, les plus faibles et les forts, sont les moins bien représentés.

Le rôle de la végétation se retrouve principalement dans le paramètre  $K_{int}$ . Celui-ci est donc logiquement identique pour les compartiments composés de sédums et pour les deux compartiments, sur lesquels, le mélange graminées-sédums est présent. En revanche, il est plus surprenant d'obtenir des coefficients égaux ou supérieurs à 1. Cela traduit un effet de compensation possible entre  $K_{int}$  et  $C_{int}$  pour le critère de Nash et entre l'été et l'hiver pour le critère de bilan.

#### 4. Conclusion

Depuis juin 2011, le dispositif expérimental prévu pour le projet TVGEP est fonctionnel. Ce dispositif expérimental a pour objectif de comparer différents complexes de végétalisation afin de pouvoir évaluer l'influence des différents composants de ce complexe sur la rétention d'eau. Il est en effet apparu d'après la bibliographie (cf Livrable 2.1) que certains paramètres pouvaient avoir une influence sur la rétention d'eau. La végétation principalement par son rôle dans la transpiration est susceptible d'augmenter la capacité de rétention. Des couches de drainages hydroréentrices existent et sont aussi un moyen d'augmenter l'abattement du ruissellement. Un substrat plus minéral peut favoriser le développement de la végétation et ainsi favoriser la transpiration mais aussi modifier l'évaporation. Enfin l'épaisseur du substrat a un rôle direct sur la capacité de rétention de l'eau et sur l'atténuation des débits de ruissellement. Le choix de ces complexes s'est donc fait avec le souci d'évaluer des solutions existantes et réalistes. Ainsi un complexe classiquement utilisé pour la végétalisation des toitures a été choisi comme base pour la comparaison. Il s'agit d'un mélange de sédum disposé sur 3 cm de substrat avec une couche de drainage constituée de dalle de polystyrène.

A partir de cette composition de référence, 5 autres complexes de végétalisation ont été créés en ne faisant varier qu'un des composants à la fois (type de végétation, couche de drainage, nature et épaisseur du substrat). En revanche, bien qu'envisagé, étudier l'effet de la pente était techniquement difficile à réaliser avec les sites à notre disposition.

Les premiers résultats obtenus sont cohérents avec les observations réalisées lors d'autres études (Mentens *et al.*, 2006). Les différences de coefficients de ruissellement observées sur les toitures végétalisées du CETE correspondent aux différents paramètres de chaque compartiment. L'augmentation de l'épaisseur du substrat augmentent la capacité de stockage de l'eau et la couche de drainage hydrorétentrice semble aussi avoir un effet positif sur la capacité de stockage. Cependant la capacité d'abattement de la pluie diminue avec la hauteur de l'événement pluvieux. Plus celui-ci est important et long et plus le pourcentage de pluie retenue diminue. L'interprétation de ces résultats est cependant limitée à la période observée dont les événements les plus longs et les plus importants se situent aussi pendant la période la plus humide. Une analyse plus approfondie de l'influence des conditions hydriques initiales, sur l'estimation de hauteurs seuils pourra être menée avec une base de données plus complète. Il est également à noter que les résultats présentés ici sont le reflet de dispositifs expérimentaux particuliers et qu'ils sont difficilement généralisables à d'autres toitures. En effet, les effets de site ayant une influence sur les performances des toitures végétalisées sont nombreux : climatologie, couvert végétal.... Concernant ce dernier point, la décision de ne pas faire d'entretien est difficilement quantifiable sur les performances. Cependant, ce choix n'a eu une influence que pour les compartiments constitués de Sédums et la comparaison des résultats avec le compartiment non-végétalisé, **NE3Y**, permet de relativiser l'effet de ce type de végétation sur l'abattement du ruissellement.

Cette base de données est toutefois un support indispensable à la modélisation en cours avec le modèle Hydrus1D et le développement de FAVEUR-Modèle. Ce modèle est composé de deux réservoirs, les données d'entrée sont la pluie et l'évapotranspiration potentielle qui peut être fournie par Météo-France et n'a besoin que de quatre paramètres. Une phase de calage a permis de confirmer la cohérence entre les valeurs de ces paramètres et les caractéristiques des toitures végétalisées. Une simulation sur un an de données a montré la capacité du modèle à reproduire correctement les débits de ruissellement et dans une moindre mesure le cumul de ruissellement sur l'ensemble de la période. Il est maintenant nécessaire de confirmer ces résultats lors d'une étape de validation et par la simulation d'autres toitures végétalisées. Une étape importante sera alors de relier les quatre paramètres à des caractéristiques aisément mesurables pour les toitures végétalisées. Cependant sur la base de la version de FAVEUR-Modèle existante, un outil d'aide aux choix de toitures végétalisées, FAVEUR-Outil, a commencé à être mis en œuvre.

## Listes des figures et des tableaux

### Liste des figures

Figure 1 : Toiture végétalisée du CETE IF à Trappes. A droite du toit se trouve la station météo, à gauche de cette station, le pluviomètre. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets pour la mesure des débits de ruissellement.....	2
Figure 2 : Schéma des 6 compartiments et composition des différentes structures végétalisées de la toiture du CETE Ile-de-France .....	3
Figure 3 : Emplacement des sondes capacitives et des thermocouples de la toiture végétalisée du CETE. (en rouge les sondes HS10, et en bleu les ECHO-5, cf. tableau 2) .....	5
Figure 4 : Toiture végétalisée de la Direction de l'eau et de l'Assainissement du Conseil Général 93. Les carrés rouges indiquent l'emplacement des sondes HS10 (Decagon, USA) placées à -5 et -15 cm de profondeur dans le substrat et les carrés bleus indiquent l'emplacement des sondes ECHO-5 (Decagon, USA) placées à -5, -10 et -15 cm de profondeur dans le substrat .....	6
Figure 5: Toiture végétalisée de Clamart, (a) vue du toit, (b) vue du ciel. En noir, les limites de la partie de la toiture qui est équipée : en vert, les sondes d'humidité ECHO-5 (Decagon, USA), en bleu le pluviomètre et en rouge les exutoires.....	7
Figure 7 : Occurrence des événements pluvieux, ayant un cumul de pluie supérieur à 1 mm, du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013. L'épaisseur de chaque barre représente la durée de l'événement. La hauteur est la hauteur de pluie cumulée sur cette durée .....	9
Figure 8 : Nuages de points entre la hauteur de pluie et les autres caractéristiques des événements pluvieux .....	11
Figure 9 : Hauteurs des événements pluvieux supérieures à 1mm en fonction de la durée (points bleus). Les courbes correspondent à différentes périodes de retour calculées à partir des courbes IDF de Météo-France pour la station de Paris-Montsouris sur la période 1982 – 2005. La durée maximum d'utilisation de ces courbes est de 96 h (5760 min, matérialisée par la droite en pointillée de droite) pour les périodes de retour inférieures à 5 ans et de 24h (1440 min, matérialisée par la droite en pointillée de gauche) pour les périodes de retour 5 et 10 ans. 4 événements dépassent cette durée, les conclusions quant à leur période de retour sont donc hypothétiques .....	12
Figure 10 : Nombre d'événements en fonction des périodes de retour .....	13
Figure 11 : Coefficients de ruissellement annuels pour chaque compartiment. Le chiffre en haut de chaque barre indique le coefficient de ruissellement annuel ( $CR_{an}$ ). .....	13
Figure 12: Coefficients de ruissellement en fonction de la hauteur de pluie .....	16
Figure 13 : Représentation et discrétisation du substrat à modéliser avec Hydrus1D. Les traits horizontaux représentent les limites de chaque élément .....	18
Figure 14 : Comparaison des débits de ruissellement ( $Q$ ), observés et simulés, avec Hydrus1D pour la période du 3 novembre 2011 00h00 au 6 novembre 2011 00h00. En rouge, SE3Y simulé ; en noir, SE15Y simulé ; en bleu, SE3Y observé ; en vert, SE15Y observé. Les barres, en haut, représentent l'intensité de la pluie. Les simulations sont faites au pas de temps de 3min, et représentées ici à 30 min .....	20
Figure 15 : Comparaison des débits ( $Q$ ) de ruissellement, observés et simulés, avec Hydrus1D pour la période du 3 décembre 2011 00h00 au 4 décembre 2011 00h00. En rouge, SE3Y simulé ; en noir, SE15Y simulé ; en bleu, SE3Y observé ; en vert, SE15Y observé. Les barres, en haut, représentent l'intensité de la pluie. Les simulations sont faites au pas de temps de 3min, et représentées ici à 30 min .....	21

Figure 16 : Schéma de principe du modèle FAVEUR (la signification des paramètres est donnée dans le tableau 6.....	22
Figure 17 : Comparaison entre les débits de ruissellements observés et simulés au pas de temps de 30 min pour la période du 15 juin 2011 au 14 juillet 2012.....	25

### *Liste des tableaux*

Tableau 1 : Nom et composition des différents compartiments.....	3
Tableau 2 : Liste des capteurs de la toiture végétalisée du CETE IF.....	5
Tableau 3 : Caractéristiques des événements pluvieux.....	10
Tableau 4 : Caractéristiques du ruissellement pour chaque compartiment de la toiture du CETE.....	14
Tableau 5 : Paramètres du modèle Hydrus1D.....	19
Tableau 6 : Cumul des hauteurs d'eau ruisselés, simulées avec Hydrus1D et observées .....	20
Tableau 7 : Valeurs des paramètres de chaque réservoir de FAVEUR-Modèle.....	25

## Bibliographie

- Berthier, E., Ramier, D. et de Gouvello, B. 2011. *Simulation of Green Roof Hydrological Behavior with a Reservoir Model*. In ICUD, 11 au 16 septembre 2011, Porto Alegre, Brésil.
- Choisnel E. 1988. *Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques*. La Météorologie 7ème série.
- Gupta H.V., Bastidas L.A., Sorooshian S., Shuttleworth W.J. et Yang Z.L. 1999. *Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods*. J. Geophys. Res. 104, 19491–19503.
- Mentens, J., Raes, D., et Hermy, M. 2006. *Green Roofs as a Tool for Solving the Rainwater Runoff Problem in the Urbanized 21st Century?*. Landscape and Urban Planning 77 (3): 217–226.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. *River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles*. J. Hydrol. 10, 282–290.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Sci Soc Am J 44 (5): 892–898.
- Yapo P.O., Gupta H.V. et Sorooshian, S. 1998. *Multi-objective global optimization for hydrologic models*. J. Hydrol. 204, 83–97.



PROJET



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)  
Appel à projets 2009**

**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°3  
LIVRABLE N°3.1  
Potentiel polluant des matériaux mis en œuvre  
dans les TTV**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :  
Organismes impliqués :  
Coordination Partie n°3 :

M. Seidl, Y. Nohra, K. Lamprea, M.-C. Gromaire  
LEESU - ENPC  
Marie-Christine Gromaire, LEESU

Coordination TVGEP :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU  
[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

## Sommaire

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>3</b>
<b>PARTIE 1. - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE: MATERIAUX MIS EN ŒUVRE SUR UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE ET ÉMISSIONS POSSIBLES DE CONTAMINANTS DANS LE RUISSELLEMENT.....</b>	<b>4</b>
<b>1. IDENTIFICATION DES MATERIAUX MIS EN ŒUVRE SUR LES TOITURES TERRASSES CLASSIQUES ET LES TOITURES VÉGÉTALISÉES .....</b>	<b>4</b>
1.1. LE REVÈTEMENT D'ÉTANCHEITÉ DES TOITURES TERRASSES.....	4
<i>Nature du revêtement</i> .....	4
<i>Composition des matériaux d'étanchéité :</i> .....	5
Composition des étanchéités asphaltées .....	5
Composition des membranes bitumineuses.....	5
Composition des membranes synthétiques.....	6
1.2. MATERIAUX CONSTITUTIFS DES STRUCTURES DE VÉGÉTALISATION EXTENSIVES .....	8
<i>La couche anti-racine</i> .....	8
<i>La couche de drainage et la couche filtrante :</i> .....	8
<i>Le substrat et les végétaux</i> .....	9
1.3. MATERIAUX CONSTITUTIFS DES OUVRAGES SINGULIERS .....	10
<i>La zone stérile</i> .....	11
<i>Relevés d'étanchéité</i> .....	11
<i>Evacuation des eaux pluviales</i> .....	11
<b>2. ADJUVANTS ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES POLYMERES .....</b>	<b>11</b>
2.1. LES PLASTIFIANTS.....	12
<i>Phtalates :</i> .....	12
<i>Autres Plastifiants</i> .....	13
2.2. LES STABILISANTS.....	14
<i>Les Stabilisants Thermiques</i> .....	14
<i>Les Stabilisants Photochimiques :</i> .....	16
<i>Stabilisation du PVC :</i> .....	16
<i>Les Biocides :</i> .....	18
2.3. LES RETARDATEURS DE FLAMMES.....	18
2.4. SYNTHÈSE DES ADJUVANTS POUVANT ÊTRE PRÉSENTS DANS LES POLYMERES UTILISÉS POUR LES STRUCTURES DE VÉGÉTALISATION ET COMPOSÉS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE ÉMIS .....	20
<b>3. IMPACT POTENTIEL DES MATERIAUX CONSTITUTIFS D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE SUR LA QUALITÉ DU RUISSELLEMENT - SYNTHÈSE DES DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>21</b>
3.1. LES ÉMISSIONS PAR LES MEMBRANES BITUMINEUSES .....	21
<i>Emissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs)</i> .....	21
<i>Lessivage des biocides</i> .....	23
3.2. LES ÉMISSIONS PAR LES MEMBRANES SYNTHÉTIQUES .....	25
3.3. LES ÉMISSIONS PAR LE COMPLEXE DE VÉGÉTALISATION .....	26
<b>PARTIE 2. - ÉMISSIONS PAR LES SUBSTRATS - ÉVALUATION DU COMPORTEMENT AU LESSIVAGE ACCÉLÉRÉ DE TROIS SUBSTRATS DE VÉGÉTALISATION .....</b>	<b>29</b>
<b>1. MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE .....</b>	<b>29</b>
1.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL .....	29
1.2. NATURE DES SUBSTRATS.....	31
1.3. PLUIE ARTIFICIELLE .....	31
<i>Eau utilisée</i> .....	32
<i>Simulateur de pluie</i> .....	32
1.4. SUIVIS DE LA QUALITÉ DU PERCOLAT.....	34
<b>2. RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>35</b>
2.1. EFFET DU TYPE DE SUBSTRAT .....	35
<i>Paramètres globaux: Couleur, pH, Conductivité, Turbidité et MES</i> .....	35
<i>Carbone et nutriments</i> .....	39
<i>Métaux</i> .....	42
2.2. EFFET DE LA HAUTEUR DU SUBSTRAT .....	44
2.3. EFFET DE LA NATURE DU MATÉRIAU DE DRAINAGE.....	46

<b>PARTIE 3. - EVALUATION DU POTENTIEL D'EMISSION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES PAR LESSIVAGE DES MATERIAUX CONSTITUTIFS D'UNE TTV - CAS DES ALKYLPHENOLS ET DU BISPHENOL-A .....</b>	<b>47</b>
<b>3. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>47</b>
3.1. SELECTION DE PRODUITS ET DESCRIPTION .....	47
<b>4. METHODOLOGIE.....</b>	<b>49</b>
<b>5. RESULTATS .....</b>	<b>53</b>
5.1. ANALYSE DES SUBSTRATS .....	53
5.2. LIXIVIATION AU METHANOL .....	54
5.3. LIXIVIATION A L'EAU .....	56
5.4. SIMULATION DE PLUIE .....	56
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>58</b>
<b>LISTES DES FIGURES ET DE TABLEUX.....</b>	<b>60</b>
LISTE DES FIGURES.....	60
LISTE DES TABLEUX .....	62
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>63</b>

## AVANT-PROPOS

La partie 3 du projet TVGEP vise à analyser l'incidence de la végétalisation des toitures terrasses, par des structures de végétalisation extensives ou semi-intensives, sur la qualité (concentration et flux) des eaux de ruissellement.

En parallèle avec les suivis in-situ réalisés sur le banc de toitures pilotes du CETE Ile de France, des travaux ont été entrepris afin d'identifier le potentiel d'émission de contaminants par les différents matériaux constitutifs d'une structure végétalisée. Ce travail a porté d'une part sur le risque d'émission de certains micropolluants organiques par les différents éléments de la structure (étanchéité, drainage, filtre, substrats, évacuations des eaux) et d'autre part sur le potentiel de lessivage des particules, matières organiques et nutriments issus des substrats.

Ce rapport est divisé en trois parties :

- synthèse bibliographique sur les matériaux constitutifs d'une toiture terrasse végétalisée et les émissions possibles de contaminants
- essais de lessivage accéléré de trois substrats de végétalisation
- essais d'identification du potentiel d'émission de micropolluants organiques par les différents matériaux, application au cas du bisphénolA et des alkylphénols.

## **Partie 1. - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE: MATERIAUX MIS EN OEUVRE SUR UNE TOITURE VEGETALISEE ET EMISSIONS POSSIBLES DE CONTAMINANTS DANS LE RUISSELLEMENT**

### **1. Identification des matériaux mis en œuvre sur les toitures terrasses classiques et les toitures végétalisées**

#### **1.1. Le revêtement d'étanchéité des toitures terrasses**

##### **Nature du revêtement**

Trois grandes familles d'étanchéités sont utilisées pour la réalisation des toitures terrasses : les étanchéités coulées en asphalte, les membranes d'étanchéités bitumineuses, les membranes d'étanchéités synthétiques (Tableau 1).

Avant les années 1970, les étanchéités coulées en asphalte et les membranes bitumineuses oxydées étaient les plus répandues. Au début des années 1970, sont apparues les membranes bitumineuses modifiées, qui ont augmenté la fiabilité des étanchéités de toiture. Le mélange entre le bitume et les polymères élastomères SBS (Styrène-Butadiène-Styrène), ou les plastomères APP (polymère polypropylène atactique) produit des membranes très légères et plus flexibles, extrêmement résistantes aux effets des variations de température et aux différents facteurs de vieillissement (Lassalle 2008).

**Tableau 1 : Répartition des ventes de produits d'étanchéité toiture en construction neuve en France, par type de matériau, 2001-2005 (MSI 2006)**

Type de Matériau	2001	2002	2003	2004	2005
Membranes Bitumineuses	76%	76%	75%	75%	75%
Membranes Synthétiques	15%	16%	18%	18%	19%
Asphalte	8%	7%	6%	6%	5%
SEL	1%	1%	1%	1%	1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Les membranes synthétiques et les étanchéités liquides (SEL) sont d'apparition plus récente et leur application est plus restreinte. Selon l'étude de marché réalisée par MSI en 2006, les membranes bitumineuses représentaient, en 2005, 75 % du marché de l'étanchéité – ces membranes d'étanchéité sont constituées pour 80% de membranes bitumineuses SBS et pour 20% de membranes bitumineuses APP. Les membranes synthétiques qui concurrencent actuellement les membranes bitumineuses représentent 16 % du marché, dont, selon MSI, les membranes bitumineuses PVC P représentaient 84% du marché des membranes synthétiques en 2005, et les membranes synthétiques FPO et EPDM comptaient respectivement pour 11% et 3% du total au cours de la même année. L'application de ces membranes augmente avec les années, pour remplacer l'asphalte (MSI 2006).

L'utilisation de l'étanchéité asphalte diminue lentement, mais à long terme ce type de revêtement d'étanchéité ne va plus être appliqué. Pour les revêtements d'étanchéités liquides, ils sont récemment introduits sur le marché, mais leur application est encore restreinte et représente seulement 2 % (MSI 2006).

## Composition des matériaux d'étanchéité :

### Composition des étanchéités asphalte

L'asphalte naturel entre dans la composition des produits d'étanchéité à base d'asphalte, sous forme de poudre. L'asphalte naturel est une roche sédimentaire, généralement calcaire, imprégnée de bitume naturel natif (Cognard 2005b). L'asphalte pur étanchéité est formé de 86% de poudre d'asphalte et 14 % de bitume et de fines ou fillers qui sont plutôt du calcaire  $\text{CaCO}_3$ . Ce type de mélange, poudre asphalte, bitume et fillers constituent le « mastic » d'une étanchéité asphalte. A ceci s'ajoute le squelette minéral constitué par des sables fins de 0.08 à 0.2 mm, des sables gros de 0.2 à 2 mm et des gravillons de 2 à 10 mm de roches dures comme les porphyres et les diorites. Le squelette minéral a un rôle d'autoprotection.

L'asphalte sablé étanchéité est un mélange d'asphalte pur et de squelette minéral (sables), dont les proportions sont pour la poudre d'asphalte >50%, le bitume > 11%, et le sable 35 % environ.

Pour l'asphalte gravillonné étanchéité, nous avons la même constitution que celle de l'asphalte sablé étanchéité, sauf qu'à la place des sables, on a les gravillons (Cognard 2005b).

### Composition des membranes bitumineuses

Les bitumes sont des mélanges d'hydrocarbures aromatiques, aliphatiques ou naphthénique, de masses molaires élevées, ayant comme provenance la distillation du pétrole. L'utilisation, comme solvant sélectif, d'un hydrocarbure léger en grand excès, permet de fractionner un bitume en deux parties (Figure 1), la partie dissoute formée par les malthènes, la partie précipitée formée par les asphaltènes.

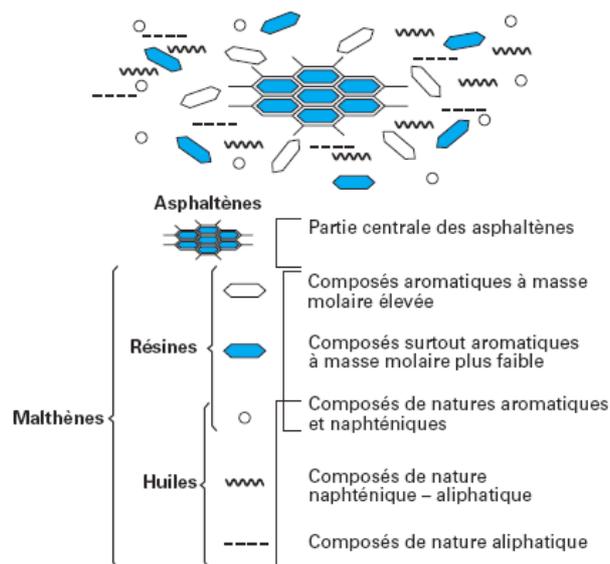
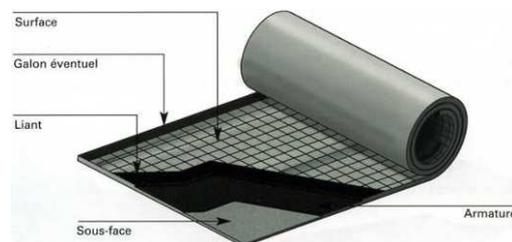


Figure 1: Constitution physico-chimique des bitumes (Cognard 2005b)

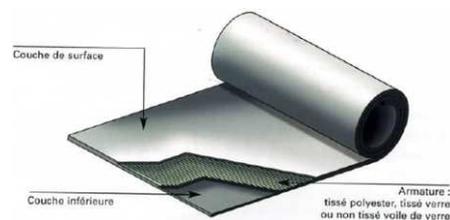
**Les feuilles bitumineuses oxydées** sont constituées d'une armature, d'une masse bitumineuse d'enrobage, et de traitements de surfaces (Figure 2). Pour les feutres bitumés, l'armature la plus utilisée est celle des feutres avec voile de verre haute résistance, alors que pour les chapes de bitumes armés, l'armature est soit souple soit double, et formée, la plupart des cas par du voile ou tissu de verre. La masse bitumineuse d'enrobage est plus importante pour les chapes (4 à 5 mm) que les feutres qui sont surfacés par le bitume d'enrobage. Les sous faces sont traitées afin d'avoir un caractère anti-adhérent, dans le cas d'une mise en œuvre en indépendance. Parfois le caractère anti-adhérent est présent à la surface pour éviter le collage entre les spires de rouleau. Pour assurer ce caractère, nous avons les feuilles d'aluminium, les papiers kraft crêpés. A la surface, il y a aussi des produits intégrés pour assurer l'autoprotection, dont des granulés minéraux et des feuilles métalliques (Lafont 1993; Cognard 2005b).



**Figure 2: Composition d'une feuille bitumineuse(Remolu and Lauby 2007)**

**Les feuilles bitumineuses modifiées** sont constituées de quatre éléments : le liant, l'armature et les finitions de surface et sous face (Figure 2). Le liant est le bitume qui peut être soit élastomère SBS, soit plastomère APP, soit élastomérique SBS (intégration d'une autoprotection métallique). Les armatures les plus appliquées sont, celles à voile ou tissu ou grille de verre, tissu ou grille de polyester. Pour les finitions de sous face, nous avons un film thermofusible pour l'anti-adhérence, et pour la mise en œuvre par soudure à chaud, mais nous ne nous concentrerons pas sur cette couche qui n'entre *a priori* pas en contact avec la pluie. Pour les finitions de la surface supérieure (en contact avec la pluie), nous avons : des adjuvants qui sont employés dans toute la membrane comme par exemple des retardateurs de flammes, des autoprotections minérales (anti-UV) et des autoprotections métalliques (Cognard 2005b; Remolu and Lauby 2007).

### Composition des membranes synthétiques



**Figure 3: Composition d'une membrane PVC-P (Remolu and Lauby 2007)**

Les membranes synthétiques sont soit thermoplastiques, soit vulcanisées. Les membranes thermoplastiques comprennent les membranes PVC-P et les FPO. Les membranes PVC-P (Figure 3) sont composées d'un liant et d'une armature qui est soit en tissé polyester soit en voile de verre. Le liant est un mélange de chlorure de polyvinyle, de plastifiant de phtalate, de stabilisants thermiques, de charges minérales et d'adjuvants. Le liant utilisé pour les membranes FPO, est un mélange de

polyoléfines avec filler, d'adjuvants et de colorants. L'armature est de même type que celle des membranes PVC-P.

Les membranes synthétiques vulcanisées (EPDM) sont également constituées d'un liant et d'une armature. Le liant est composé de caoutchouc-éthylène-propylène-diène avec filler, d'agent de vulcanisation, d'huile, de noir de carbone et d'adjuvants (Cognard 2005b; Remolu and Lauby 2007).

Le Tableau 2 synthétise les différents types de revêtements d'étanchéité, leurs compositions et leurs protections.

**Tableau 2: Les différents revêtements d'étanchéité appliqués sur les toitures**

Revêtement	Type de couche	Composition des couches	Protection	
Asphalte	Bicouche Epaisseur : 20 - 25 mm	- asphalte pure étanchéité (5mm) - asphalte sablé (15mm)	Autoprotection minérale (sable)	
		- asphalte pure étanchéité - asphalte gravillonné (20mm)	Autoprotection par gravillons	
	Monocouche Epaisseur : 20 mm	asphalte gravillonné <sup>(1)</sup>	Autoprotection par gravillons	
Feuille à base de bitume oxydé <sup>(2)</sup>	Multicouche	Feutres bitumés	Autoprotection minérale	
		Chapes de bitume armé	Autoprotection par des feuilles métalliques Protection rapportée	
Feuille à base de bitume modifié <sup>(3)</sup>	Bicouche Epaisseur : 5 mm	2 feuilles bitumineuses élastomère SBS	Autoprotection minérale	
		2 feuilles bitumineuses plastomère APP	Protection rapportée	
		1 feuille bitumineuse élastomère SBS + 1 feuille bitumineuse élastomérique SBS	Autoprotection métallique (Al, Cu, inox) Protection rapportée	
	Monocouche Epaisseur : 4 mm	1 feuille bitumineuse élastomère SBS 1 feuille bitumineuse plastomère APP	Autoprotection minérale Protection rapportée	
Membrane synthétique	Thermoplastique	Monocouche Epaisseur : 1,2 – 1,5 mm	PVC-P FPO	Protection rapportée
	Vulcanisée	Monocouche Epaisseur : 1,2 – 1,5 mm	EPDM	

(1): l'asphalte gravillonné utilisé en monocouche n'est applicable que dans le cas d'une isolation inversée.

(2): les membranes bitumineuses oxydées sont actuellement remplacées par les membranes à base de bitume modifié.

(3): ce type de revêtement est le plus utilisé, et le plus répandu dans le marché.

## 1.2. Matériaux constitutifs des structures de végétalisation extensives

Une toiture végétalisée est constituée de différents éléments (Figure 4). Les éléments qui sont en contact avec l'eau ruisselant sur les toitures sont: le revêtement d'étanchéité, la couche anti-racine, la couche de drainage, la couche filtrante, le substrat et la plantation (Adivet, CSFE et al. 2003; Lassalle 2008).

### La couche anti-racine

Les revêtements d'étanchéité mis en place sur les toitures terrasses végétalisées, sont de même type que ceux utilisés sur des toitures terrasses classiques, mais doivent être complétées par une couche anti-racine pour empêcher la perforation ou bien le contact des racines avec la couche d'étanchéité.

Dans le cas des membranes bitumineuses, la fonction anti-racine est intégrée dans les revêtements d'étanchéité. Les fournisseurs des revêtements d'étanchéité bitumineux emploient dans leurs membranes le Preventol B2 (polyglycolester du mécoprop), le Preventol B5 (octylester du mécoprop) ou l'Herbitect (éthylhexylester du mécoprop), dont la fonction anti-racine est assurée par mécoprop (Bucheli, Muller et al. 1998; Burkhardt, Zuleeg et al. 2010).

### La couche de drainage et la couche filtrante :

**La couche de drainage** assure l'écoulement des eaux vers les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales, évitant ainsi l'asphyxie des racines. La couche de drainage se trouve entre le revêtement d'étanchéité et le substrat, séparée de ce dernier par un filtre. L'épaisseur minimale de cette couche dépend de la hauteur maximale des flash d'eau observés sur la toiture. Sa perméabilité doit être supérieure ou égale à 0,3 cm/s.

Les matériaux pouvant constituer cette couche sont soit des plaques de polystyrène moulées ou alvéolées, soit des agrégats minéraux poreux (pouzzolane, argile expansée, roche volcanique...), soit des éléments synthétiques pouvant former ou non une sorte de réserve d'eau, comme des bacs en polyéthylène recyclé parfois aussi en haute densité. Les matériaux les plus utilisés dans les végétalisations extensives sont les polystyrènes et les polyéthylènes recyclés. Les différents types de couche de drainage sont figurés dans la figure 8.

**La couche filtrante** retient les particules fines du substrat et s'interpose entre le substrat et la couche drainante pour éviter son colmatage. Elle retient des particules de diamètre supérieur à 0.063 mm. Le filtre est soit un géotextile en propylène non-tissé, soit un géotextile en polystyrène non-tissé (Adivet, CSFE et al. 2003; Lassalle 2008).

Il existe des cas, généralement pour des pentes supérieures à 5 %, où la couche de drainage et la couche filtrante sont absentes, et la fonction de drainage serait assurée alors par le substrat lui-même, grâce au matériel minéral qui le contient. Dans ce cas on parle de système de végétalisation monocouche. En présence d'une couche de drainage avec filtre on parle d'un système de végétalisation bicouches ou multicouches.

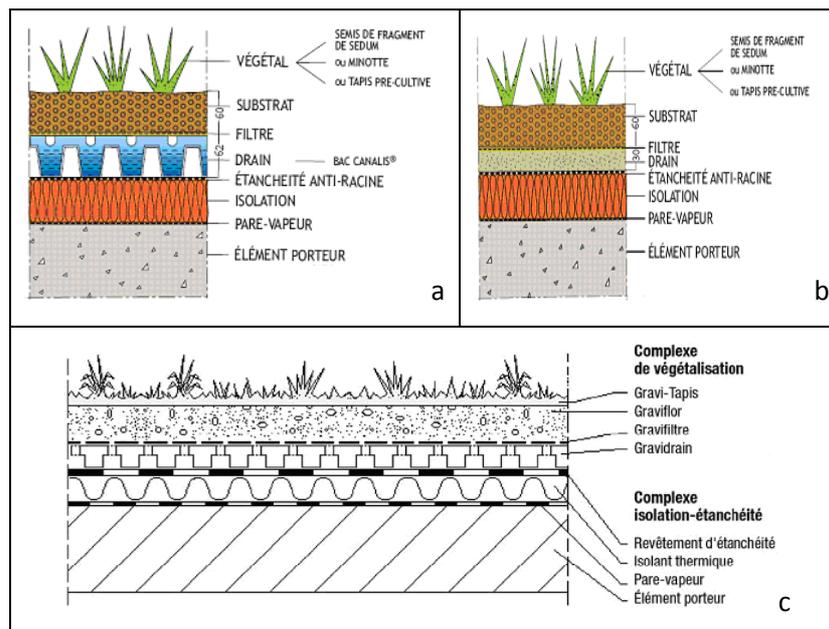


Figure 4: a. La couche de drainage représentée dans cette figure, représente aussi une propriété de rétention de l'eau, avec la fonction du drainage, c'est le cas du Bac Canalis (SMAC 2007); b. la couche de drainage est en granulats minéraux (pouzzolane) assurant la fonction du drainage et la rétention de l'eau, mais moins efficace que la première en tant que rétention (SMAC 2007); c. la couche de drainage assure seulement la fonction du drainage (SIPLAST 2007a)

## Le substrat et les végétaux

Le **substrat** permet l'ancrage des racines, la rétention en eau et la nutrition des plantes sélectionnées, pour assurer leur pérennité. Dans ce travail nous nous intéresseront à la végétalisation extensive, pour la quelle l'épaisseur de substrat varie de 4 à 15 cm.

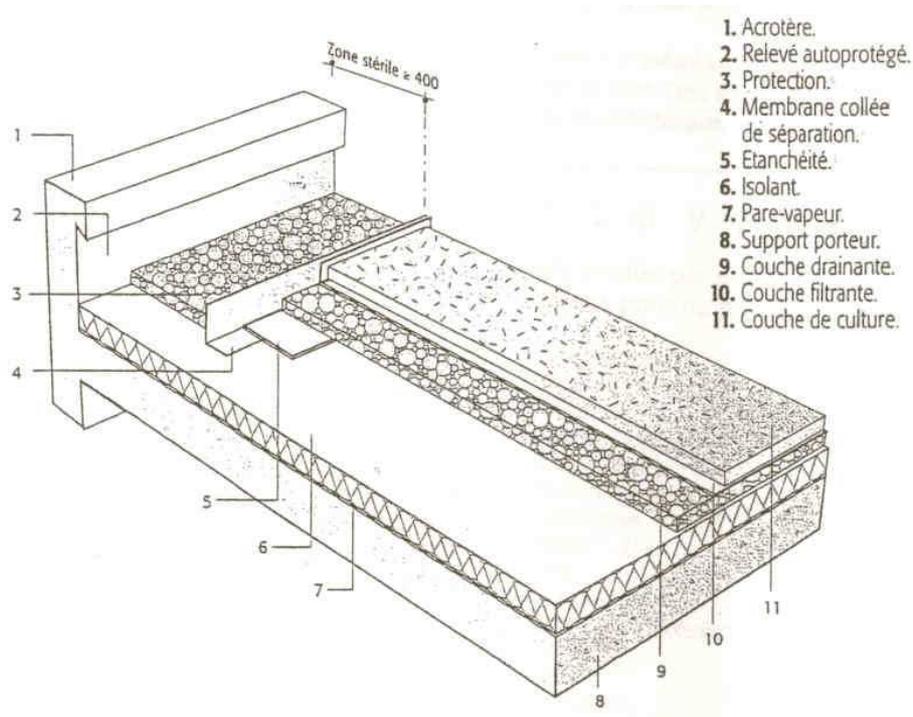
Le substrat est constitué d'un mélange d'environ 80% de matières minérales (pierre ponce, pouzzolane, argile expansée, schiste expansé, roches volcaniques...) et de l'ordre de 20% de matières organiques (tourbes, compost, écorces...), afin d'assurer une bonne nutrition à la végétation avec une croissance limitée pour garder le même profil végétal que celui de départ. Le substrat monocouche contient en plus des pouzzolanes, qui permettent de compenser l'absence de la couche de drainage en s'affranchissant de la fonction filtre (Adivet, CSFE et al. 2003). Le système multicouche est plus appliqué que celui monocouche. Nous remarquons (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) qu'il y a des différences, concernant les caractéristiques physiques, entre les deux substrats, la vitesse de perméabilité est plus grande dans le substrat monocouche que dans le multicouche, grâce aux constituants de chaque substrat qui influent aussi la capacité maximale de rétention d'eau, plus importante dans le cas de multicouche. Alors que pour la porosité à l'air, le pH, la granulométrie et la teneur en matière organique, nous remarquons une légère différence entre les deux types de substrat. Lors de l'entretien, on ajoute, dans les deux substrats, des fertilisants pour soutenir les développement des végétaux (Adivet, CSFE et al. 2003).

La **végétation** appliquée dans les systèmes extensifs, se concentre sur l'association des sedums, graminées et des vivaces. Ils sont mis en place soit par des semis (graines mises dans le substrat) pour les graminées et les vivaces, soit sous forme de fragments de sedums ou de minimottes de vivaces, soit sous forme de dalles (ou tapis) précultivées de sedums, ce dernier type étant le plus fréquemment appliqué en France (ECOVEGETAL 2008).

**Tableau 3: Caractéristiques des substrats extensifs multicouche et monocouche (Adivet, CSFE et al. 2003)**

Caractéristiques	Unité	Substrats extensifs multicouches	Substrats extensifs monocouches
Perméabilité	cm/s	≥ 0,001	≥ 0,1
pH (CaCl <sub>2</sub> )	–	6,5 à 8	6,5 à 9,5
Rétention maximale en eau (CME)	% vol	≥ 35	≥ 20
Porosité pour l'air à CME	% vol	≥ 10	≥ 10
Fines (< 0,063mm)	% massique	≤ 15 %	≤ 7 %
Matière organique	% de masse sèche si D à sec ≤ 0,8 t/m <sup>3</sup>	≤ 8 %	≤ 6 %
	% de masse sèche si D à sec > 0,8 t/m <sup>3</sup>	≤ 6 %	≤ 6 %
Granulométrie (voir annexe II C)	mm	0 à 20 (0 à 2: sables ; 2 à 20: gravier)	0 à 20 (0 à 2: sables ; 2 à 20: gravier)

### 1.3. Matériaux constitutifs des ouvrages singuliers



**Figure 5 : Éléments et couches constitutifs d'une toiture végétalisée**

## **La zone stérile**

La zone stérile est un espace aménagé sur la toiture, dont le but est de faciliter l'accès aux relevés d'étanchéité et aux évacuations d'eaux pluviales, pour l'entretien. Cette zone n'est pas considérée comme zone accessible pour la circulation. Elle a une largeur de 0,40 m en présence du complexe de végétalisation, et dans certains cas cette zone est absente.

Le revêtement d'étanchéité est le même revêtement que celui de la zone végétalisée : le revêtement d'étanchéité possède donc aussi une fonction anti-racine dans la zone stérile. Cette zone possède une protection rapportée, la plus appliquée étant la protection par une couche de gravillons ayant une granulométrie supérieure à 15 mm, éventuellement recouverts de dalles de béton préfabriquées.

La zone stérile est séparée de la zone végétalisée par un dispositif de séparation (Adivet, CSFE et al. 2003) qui a pour rôle de maintenir la couche de culture de la zone de végétalisation. Le dispositif de séparation utilisé dépend du dispositif de drainage de l'eau. Si la couche de drainage est filante alors le dispositif est formé par des bordures ou murets en béton ou en brique. Si la fonction de drainage est assurée par le substrat ou si la couche drainante est interrompue, le matériel utilisé est alors constitué de bandes ajourées avec association d'un filtre qui est identique à celui utilisé dans le complexe de végétalisation. Ces bandes sont plutôt métalliques, en alliage d'aluminium, en acier inoxydable ou en zinc (Adivet, CSFE et al. 2003).

## **Relevés d'étanchéité**

Le relevé d'étanchéité est de même type que l'étanchéité utilisée pour le revêtement de la toiture. Il a une hauteur minimale de 15 cm, il est généralement autoprotégé, ou bien protégé par des bandes métalliques qui peuvent être en aluminium, ou acier inoxydable.

## **Evacuation des eaux pluviales**

Les évacuations des eaux pluviales se situent dans la zone stérile. Elles comprennent les entrées d'eaux pluviales, constituée d'une platine et d'un moignon, et des trop-pleins, qui se raccordent sur les descentes d'eau pluviale. Les entrées d'eaux pluviales et les trop-pleins peuvent être : en plomb, en acier inoxydable, en cuivre, en aluminium ou en autre matériau adapté pour le cas des membranes synthétiques, en PVC à titre d'exemple (CANEPARO 1979). Les tuyaux assurant la descente de l'eau, sont formés des mêmes éléments que les gouttières (CANEPARO 1979). Les trop-pleins ou boîtes à eau récupèrent les eaux excédentaires afin d'éviter l'inondation des toitures.

## **2. Adjuvants entrant dans la composition des polymères**

Les adjuvants sont des substances mélangées aux polymères, utilisés en faible concentration. Ils peuvent être organiques, organométalliques et même parfois minéraux comme les carbonates d'aluminium ou de magnésium qui sont des stabilisants thermiques du PVC, ou les noirs du carbone qui sont des antioxydants des polyoléfinés (Carette 1993).

Les adjuvants confèrent aux polymères une certaine flexibilité grâce aux plastifiants, une longévité de vie, une stabilité chimique et physique contre les paramètres climatiques. Des retardateurs de flamme sont incorporés dans les polymères pour retarder leur combustion. On trouve également des biocides qui sont intégrés dans les membranes d'étanchéité destinées aux toitures végétalisées,

utilisés comme anti-racine, pour empêcher la détérioration du revêtement par les racines de la végétation.

## 2.1. Les Plastifiants

Un plastifiant est un adjuvant qui augmente la souplesse d'un polymère. La définition d'un plastifiant suivant la norme *ISO 472* (1988) est :

« **Plastifiant:** substance volatile faible ou négligeable, incorporé à un plastique, destinée à abaisser son intervalle de ramollissement, faciliter sa mise en œuvre et augmenter sa flexibilité ou son extensibilité. »

Les plastifiants sont surtout utilisés dans les PVC (polychlorure de vinyle plastifié) (Verrier 1992). Ils pourraient donc être présents dans les membranes d'étanchéité en PVC.

Les propriétés et les caractéristiques qu'un plastifiant doit avoir afin qu'il soit associé à un polymère sont: une excellente compatibilité plastifiant-polymère, une action plastifiante efficace, une permanence raisonnable de façon à maintenir les propriétés désirées pendant la durée de vie du produit et une stabilité suffisante. D'autres propriétés peuvent être exigées : tenue thermique aux hautes ou basses températures, résistance à l'extraction par les solvants et par l'eau, bonne tenue au feu, faible odeur et absence de toxicité (Verrier 1992). Il n'existe cependant pas de composé chimique réunissant toutes ces propriétés. Des plastifiants réunissant la majorité de ces caractéristiques sont donc appliqués.

Nous pouvons diviser les familles des plastifiants en deux groupes suivant leurs fréquences d'utilisation: les phtalates et les autres plastifiants.

### Phtalates :

75 % des plastifiants appliqués dans les polymères et les plus répandus dans le marché sont les phtalates (Markarian 2007). Les phtalates (esters phtaliques) (Figure 6) sont principalement utilisés comme plastifiant pour le polychlorure de vinyle. Nous pouvons diviser les phtalates en trois catégories suivant leurs poids moléculaires qui dépendent de la nature des radicaux R1 et R2 (Tableau 4): les phtalates de bas poids moléculaires, ne sont pas utilisés dans les membranes PVC d'étanchéité, les phtalates de poids moléculaire intermédiaire où nous trouvons les phtalates de butylbenzyle (BBP) et de di-(2-éthylhexyle) (DEHP) et finalement les phtalates de haut poids moléculaires où les phtalates de di-n-octyle (DnOP), de di-isononyle (DINP) et de di-isodécyle (DIDP) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), et les phtalates de poids moléculaires importants ne sont pas utilisés dans les membranes PVC d'étanchéité (Saillenfait and Laudet-Hesbert 2005b).

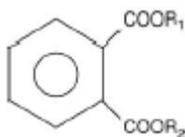


Figure 6: Structure chimique des phtalates(Saillenfait and Laudet-Hesbert 2005a)

**Tableau 4: Les formules chimiques des radicaux des cinq phtalates les plus utilisés dans PVC (Saillenfait and Laudet-Hesbert 2005)**

Phtalate de...	Abréviation	R1	R2
Butylbenzyle	BBP	$(CH_2)_3CH_3$	$CH_2-(C_6H_5)$
di-n-octyle	DnOP	$(CH_2)_7CH_3$	$(CH_2)_7CH_3$
di-isononyle	DINP	$C_xH_{2x+1}$ x variant de 8 à 10	$C_xH_{2x+1}$ x variant de 8 à 10
di-isodécyle	DIDP	$C_xH_{2x+1}$ x variant de 9 à 11	$C_xH_{2x+1}$ x variant de 9 à 11
di-(2-éthylhexyle)	DEHP	$CH_2CH(C_2H_5)(CH_2)_3CH_3$	$CH_2CH(C_2H_5)(CH_2)_3CH_3$

Ces cinq phtalates (BBP, DEHP, DnOP, DINP et DIDP) sont utilisés fréquemment dans le PVC (dont les revêtements d'étanchéité en PVC).

L'application des DEHP dans les polymères diminue. Dans les années 60, le DEHP présentait 80 % des phtalates utilisés, puis en 1999, il représentait 42 %, et sa fréquence diminue encore pour arriver à 30 % en 2002 ([http://rsde.ineris.fr/fiches/fiche\\_Diethyl2hexylphtalateDEHP.pdf](http://rsde.ineris.fr/fiches/fiche_Diethyl2hexylphtalateDEHP.pdf)). Et on remarque que l'application des DIDP et DINP dans le marché augmente, car en 1999 ils représentaient 35 %, et en 2002 49 % ([http://rsde.ineris.fr/fiches/fiche\\_Diethyl2hexylphtalateDEHP.pdf](http://rsde.ineris.fr/fiches/fiche_Diethyl2hexylphtalateDEHP.pdf)). Cette diminution du DEHP fait probablement suite à l'inscription du DEHP dans la liste des polluants prioritaires de la directive européenne cadre sur l'eau (DIRECTIVE 2000/60/CE et DIRECTIVE 2008/105/CE).

Les propriétés physicochimiques représentées dans le Tableau 5, sont les caractères qui nous intéressent par rapport aux risques de contamination de l'eau.

**Tableau 5: Quelques propriétés physicochimiques (Saillenfait and Laudet-Hesbert 2005)**

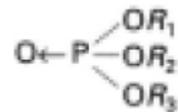
Caractère	BBP	DnOP	DINP	DIDP	DEHP
Aspect	Liquide incolore, visqueux	Liquide légèrement jaune, huileux	Liquide incolore, huileux, visqueux	Liquide huileux, visqueux	Liquide incolore, huileux
Masse molaire	312,36	390,56	418,62	446,68	390,56
Solubilité dans l'eau	Faible (2,7 mg/l)	Pratiquement insoluble (0,5 µg/l)	Insoluble (<1 µg/l)	Insoluble (<1 µg/l)	Pratiquement insoluble (3 µg/l)
Log K <sub>ow</sub>	4,59	8,06	≈ 9	≈ 10	7,50

## Autres Plastifiants

Les autres plastifiants répandus dans le marché constituent 25 % des plastifiants appliqués dans l'industrie, matériaux de construction ... Mais nous allons traiter seulement ceux qui sont en relation avec les polymères entrant dans la constitution des éléments des toitures classiques et végétalisées.

**Les Epoxydes** sont principalement utilisés comme coadjuvants dans les systèmes de stabilisation thermique des mélanges de PVC plastifiés. Les dérivés époxydés qui sont appliqués sont l'huile de soja époxydée, les époxy-stéarates d'octyle (les plus appliqués) et époxy-tallates d'octyle. Ces types de molécules ne sont pas ciblés par la directive cadre sur l'eau (site 4), et ils peuvent remplacer les phtalates mais ils ont un prix onéreux.

**Les phosphates** (Figure 7), généralement appliqués comme retardateurs de flamme, sont aussi parmi les plastifiants, mais ils ont une excellente résistance à la propagation de la flamme et sont de ce fait plutôt classés comme retardateurs de flamme. Les orthophosphates d'alkyle et/ou d'aryle ont été utilisés par le passé dans la formulation du PVC, mais de nos jours les phosphates de diphényl-octyle ou de diphényl-isodécyle sont préférés car ils confèrent de bonnes performances à froid.



**Figure 7: Composition chimique des phosphates (Verrier 1992)**

D'autres types de plastifiants primaires sont aussi appliqués dans le PVC comme le copolymère d'éthylène et de propylène, mais n'est pas très courant car c'est un produit très onéreux (Verrier 1992).

Enfin, nous avons les plastifiants secondaires ou extendeurs qui sont couplés à un plastifiant primaire (cité au-dessus), pour être compatible avec le polymère auquel ils vont être associés, et les limites de compatibilité des plastifiants secondaires dépendent du type de plastifiant primaire associé. La compatibilité diminue avec l'augmentation de la masse moléculaire du plastifiant primaire. Dans ce groupe, nous avons les **Chloroparaffines** qui sont utilisés en particulier dans le PVC, et couplé généralement au DIDP (Verrier 1992).

## 2.2. Les Stabilisants

Les polymères sont exposés à différents types de dégradations, comme la dégradation par oxydation par l'oxygène de l'air, la thermodégradation, la photodégradation causée par certaines substances dans le polymère qui sont photosensibles et l'hydrolyse des polymères causées spécifiquement par les espèces polaires dans les polymères. D'où la nécessité de la mise en place de certains stabilisants.

Les stabilisants agissent en renforçant la stabilité initiale du polymère comme certains stabilisants du PVC afin de le protéger de la dégradation oxydative et de la déshydrochloruration, inhiber tout type de résidus pro-dégradants présents initialement dans le polymère, être des désactivateurs d'une oxydation (déclanchée généralement pendant la mise en œuvre) ou agir comme une barrière à l'agression extérieure. Un stabilisant doit être compatible avec le polymère auquel il va être ajouté, compatible avec d'autres adjuvants qui peuvent être présents ou associés avec eux pendant la fabrication du polymère (Girois 2004a; Girois 2004b).

### Les Stabilisants Thermiques

Les stabilisants thermiques sont employés généralement pour empêcher la dégradation par oxydation des polymères.

Parmi les stabilisants thermiques les plus appliqués dans les polymères, spécialement dans les polyoléfines car ils sont employés dans les membranes synthétiques, nous trouvons des **antioxydants phénoliques** qui sont incorporés aux polymères pour limiter l'oxydation et la formation des défauts de structure. Parmi les antioxydants appliqués dans les polyoléfines (FPO), on peut citer le Metilox, l'hydroxytoluène butylé (BHT) et le 2,6-Di-*tert*.-butylphenol, ainsi que l'Irganox 1010 et 1076 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces antioxydants sont les plus employés en tant que stabilisants thermiques dans les polymères. Les **amines aromatiques** peuvent également être employés comme antioxydants, mais leur utilisation reste limitée à cause de leur tendance à produire des sous-produits fortement colorés (Girois 2004a; Burkhardt, Eugster et al. 2008).

Ces deux types, antioxydants phénoliques et les amines aromatiques, appartiennent au groupe des inhibiteurs radicalaires, car afin d'inhiber l'oxydation et d'assurer la stabilisation des polymères ils agissent, au moment de la fabrication des polymères, sur les radicaux instables pour les rendre stables.

Nous avons aussi les antioxydants qualifiés de secondaire représentés par les **phosphites** et les **thioesters**. Ils sont qualifiés comme secondaires car ils ne sont efficaces qu'en présence des antioxydants phénoliques, mais les thioesters ne sont pas appliqués dans les polymères destinés aux revêtement et aux toitures, car ils ont une sensibilité photochimique ce qui limite leur utilisation dans des applications nécessitant une tenue au vieillissement climatique (Girois 2004a).

**Tableau 6: La solubilité et le coefficient de partition Kow de quelques antioxydants phénoliques (source : site 6,7,8,9,10)**

Antioxydant phénolique	Solubilité dans l'eau (mg/l)	Coefficient de partition octanol/eau ( $K_{ow}$ )
Irganox 1076 : Octadécyl 3,5-Di( <i>tert</i> )-butyl-4-hydroxyhydrocinnamate	$6,1 \cdot 10^{-9}$ mg/l à 25 °C	13,4
Irganox 1010 : Tetrakis-(méthylène-(3,5-di-( <i>tert</i> )-butyl-4-hydrocinnamate))méthane	$<10^{-4}$ g/l à 20 °C	23
Hydroxytoluène butylé (BHT)	0,6 – 1,1 mg/l à 20 – 25 °C	5,1
2,6-Di- <i>tert</i> .-butylphenol	4,11 mg/l	4,5
Metilox : Acide Benzènepropanoïque 3,5-bis(1,1-diméthylethyl)-4-hydroxy-méthyl ester	2,2 mg/l	5,5 – 5,9

## Les Stabilisants Photochimiques :

Les stabilisants photochimiques communément appelés stabilisants UV (ultraviolet) sont employés pour protéger les polymères, durant leur temps de vie, de la dégradation photochimique causée par les rayons UV.

Nous avons dans ce type des stabilisants, les **absorbeurs UV** qui sont les stabilisants les plus employés dans les polymères. Ils sont basés le plus souvent sur des structures aromatiques. Parmi les absorbeurs UV, nous avons les **hydroxybenzophénones** qui sont les plus anciens absorbeurs UV, mais restent toujours utilisés. Le 2-hydroxy-4-(octyloxy)benzophénone est notamment employé dans les PVC et polyoléfines.

Toujours dans les absorbeurs UV, nous avons une deuxième catégorie, les **benzotriazoles**, qui tout comme les hydroxybenzophénones, ont la propriété de pouvoir absorber les photons proche de UV, responsables de la photooxydation. Dans cette catégorie, le produit qui est intégré dans quasiment tous types de polymère, est le 2,4-ditert-butyl-6-(5-chlorobenzotriazol-2-yl)phenol.

Enfin, d'autres types d'absorbeurs peuvent être employés dans les polymères, comme l'absorbant ultraviolet UV-1164 qui appartient à la famille des **triazines**. Et cet absorbant, nous pouvons le trouver dans le polyéthylène qui peut être un constituant de la couche de drainage dans les toitures végétalisées (Girois 2004a).

Nous avons une autre catégorie dont les dérivés peuvent être employés dans les polymères, ce sont les HALS (Hindered Amine Light Stabiliser). Les HALS sont trouvés dans les polyoléfines et les élastomères, donc ils peuvent être inclus dans la composition des revêtements d'étanchéité, et le produit entrant dans la composition de ces deux polymères étant le Bis(2,2,6,6-tetraméthyl-4-piperidyl)sebacate (Girois 2004a).

## Stabilisation du PVC :

Le PVC est un des polymères les plus utilisés aujourd'hui, dans les emballages des produits alimentaires, les jeux... et les revêtements d'étanchéité. De ce fait, le PVC est alors exposé aux différents paramètres climatiques, d'où la nécessité de certains stabilisants afin de le maintenir et de prolonger sa durée de vie, et d'empêcher sa dégradation par oxydation et déshydrochloruration (Girois 2004b).

Nous avons les **stabilisants à base de plomb**, mais d'après le comité de Vinyl 2010, l'utilisation de ces stabilisants par les industries Européennes va être arrêtée en 2015. En 2005, l'utilisation des stabilisants à base de plomb avait déjà diminué de 20% depuis l'an 2000 (Markarian 2007). En 2006, ces stabilisants ont été éliminés des tuyaux d'évacuation d'eau en Europe, mais ce qui nous intéresse c'est si ce produit est inclus dans les membranes synthétiques PVC-P. Les stabilisants à base de plomb sont représentés dans le Tableau 7.

Afin de compenser l'arrêt de l'utilisation des stabilisants à base de plomb, les fournisseurs ont cherché les **métaux mixtes** comme remplaçants. Ces métaux mixtes ont déjà été utilisés par les fournisseurs, en appliquant au début le couple Cadmium/Baryum, et après que le cadmium ait été banni en Europe, par le couple Calcium/Zinc utilisé dans les revêtements d'étanchéité et les bâtiments. L'utilisation de ce couple augmente de plus en plus, car l'application des produits à base

de calcium ne demande pas d'autorisations ou des réglementations au sens propre, pour être employés dans le PVC ou d'autres types d'applications (Girois 2004b; Markarian 2007).

**Tableau 7: Structures chimiques des stabilisants au plomb (Girois 2004)**

Nom	Structures chimiques	Concentration en plomb (%)
Phosphite dibasique	$2\text{PbO} \cdot \text{PbPO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	83,7
Sulfate tribasique	$3\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	83,6
Carbonate dibasique	$2\text{PbO} \cdot \text{PbCO}_3$	80,2
Phtalate dibasique	$2\text{PbO} \cdot \text{Pb}(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4$	76,0
Stéarate dibasique	$2\text{PbO} \cdot \text{Pb}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Pb}$	51
Stéarate neutre	$(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Pb}$	27,0

On a aussi, l'application des **organoétains** qui sont un des types de biocides (Lespes, Banchon-Montigny et al. 2005). Ils sont très dangereux et ils causent des problèmes pour les écosystèmes aquatiques. De ce fait, la Commission Européenne d'Evaluation des Risques des Organoétains cherche à trouver un substituant de ces stabilisants employés dans les produits du PVC (Markarian 2007). Afin, qu'on trouve le substituant, on utilise encore le **mercaptan** qui est un des dérivés des organoétains, pour la stabilisation des PVC.

Les mercaptans ont la formule suivante :

$\text{Sn}-\text{S}-\text{R}_2$ , et le radical R est soit  $\text{C}_{12}\text{H}_{25}$ , soit  $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ , soit l'étain (Sn). Cette structure va faire partir de la structure du base d'un stabilisant étain, représenté en Y dans la structure chimique d'un stabilisant étain (Figure 8). Le radical  $\text{R}_1$  est soit le méthyle ( $\text{CH}_3$ ), soit le butyle ( $\text{C}_4\text{H}_9$ ), soit l'octyle ( $\text{C}_8\text{H}_{17}$ ). Les stabilisants organoétains sont en général des mélanges de monoalkyle et de dialkyle (Girois 2004b).



**Figure 8: Structure de base d'un stabilisant étain (Girois 2004)**

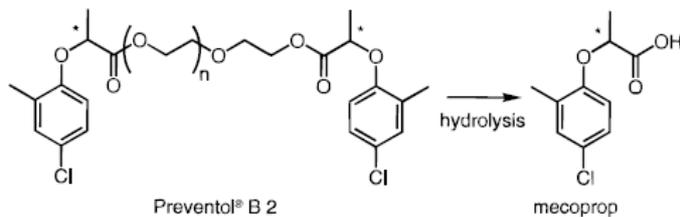
**Tableau 8: Caractéristiques des composés à base du plomb et tributylétain d'après la directive cadre sur l'eau (source : site 4)**

Composé	NQE-MA eaux intérieurs	Commentaires
Plomb et ses composés	7,2 µg/l	Le plomb et ses composés sont des substances polluantes prioritaires dans l'eau, classés par la directive cadre sur l'eau
Composés du tributylétain	10 µg/l	Les composés du tributylétain sont cherchés dans l'eau pour être éliminés car d'après la directive cadre sur l'eau, ils sont des substances polluantes dangereuses prioritaires dans l'eau.

## Les Biocides :

Les biocides sont employés dans les polymères pour empêcher l'attaque des microorganismes ou bien le développement des algues, mousses ...

Les organoétains sont des biocides utilisés dans le PVC (Girois 2004b), mais pour les membranes bitumineuses, on remarque l'application la plus importante du Preventol B2 (polyglycolester du mécoprop) qui contient le mécoprop l'agent anti-racine. En Suisse, le Preventol B2 n'est plus appliqué dans les membranes bitumineuses à cause de sa grande affinité à l'hydrolyse qui produit le mécoprop dans l'eau de ruissellement des toitures (Figure 9). Donc il est remplacé par le Preventol B5 (octylester du mécoprop) et l'Herbitect (éthylhexylester du mécoprop) qui ont une faible affinité face à l'hydrolyse ce qui réduit beaucoup la libération du mécoprop dans l'eau (Bucheli, Muller et al. 1998; Burkhardt, Zuleeg et al. 2010).



**Figure 9: Structure chimique du Preventol B2 et de son produit d'hydrolyse le mécoprop**

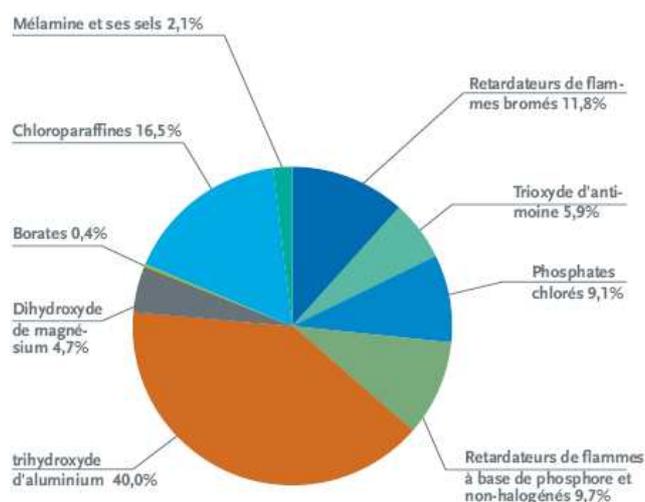
Le mécoprop est une substance qui est soumise à révision par le Conseil de la directive cadre sur l'eau (Voir Annexe III C), afin d'être considéré comme une substance prioritaire dans l'eau et s'il présente un caractère qui le permet d'être comme substance prioritaire dangereuse dans l'eau.

### 2.3. Les Retardateurs de Flammes

Les retardateurs de flammes sont des produits chimiques utilisés pour améliorer le comportement au feu des matériaux combustibles. Ils réduisent le risque de départ de feu en cas de contact avec une petite source de chaleur (EFRA 2004). Les principaux types de retardateurs de flammes sont des composés contenant des halogènes (brome et chlore), du phosphore, de l'azote, des minéraux (composés d'aluminium et de magnésium) et d'autres types comme les borates, l'oxyde d'antimoine  $Sb_2O_3$  (Brossas 1999; EFRA 2004), ou des chloroparaffines (Bayen, Obbard et al. 2006). Les retardateurs de flammes bromés ont la plus large part du marché en valeur et le trihydroxyde d'aluminium la plus large part en volume (EFRA 2004).

Nous remarquons, d'après le diagramme ci-dessous (Figure 10), que les **retardateurs de flammes minéraux** sont les plus employés 44,7 %. Le trihydroxyde d'aluminium représente à lui seul 40 % du marché. C'est le retardateur de flamme le plus répandu dans le marché et il est employé dans les membranes en bitumine modifié.

Les **chloroparaffines** représentent 16,5 % du marché. Ils ont des applications diverses, spécialement dans le PVC, donc nous pourrions le trouver comme retardateur de flamme appliqué dans le revêtement d'étanchéité avec les membranes synthétiques PVC-P (Bayen, Obbard et al. 2006). Les chloroparaffines employés dans le PVC, sont les chloroparaffines à chaînes carbonées moyennes (MCCPs) variant entre C13 et C17 (Bayen, Obbard et al. 2006). Ils sont plus appliqués que les SCPPs car d'après la directive cadre sur l'eau, ils sont considérés des substances polluantes dangereuses primaires dans l'eau (voir Annexe III A et B).



**Figure 10: Etude du marché des retardateurs de flammes en Europe en 2001 (EFRA 2004)**

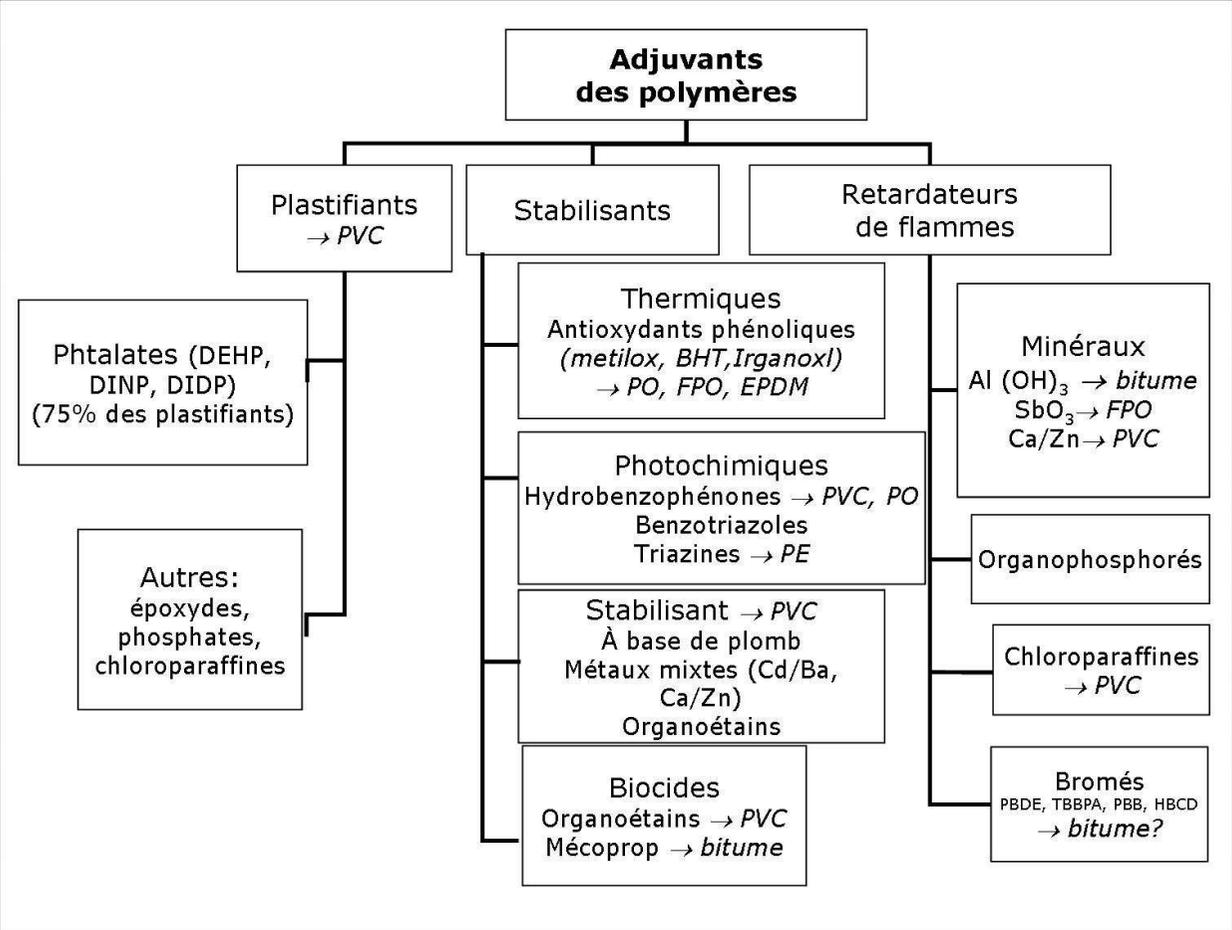
Les **retardateurs de flammes halogénés (bromés)** qui représentent 11,8 % du marché, pourraient également être présents dans les revêtements bitumineux d'étanchéité de toitures. Les principaux retardateurs de flammes bromés sont les polybromodiphényles (PBB), les polybromodiphényléthers (PBDE), les tetrabromobisphénols A (TBBPA) et les hexabromocyclododécane (HBCD) (Brossas 1999; De Wit 2002; Watanabe and Sakai 2003). Parmi ces 4 familles, les PBDE sont ciblés par la directive cadre sur l'eau. Les pentabromodiphényléthers (PEBDE), les octabromodiphényléthers (OCBDE) et les décabromodiphényléthers (DEBDE) sont considérés comme des substances polluantes prioritaires de l'eau, le DEBDE étant considéré comme la substance la plus dangereuse pour l'écosystème aquatique, d'après la directive cadre sur l'eau. Les PBDE ont de ce fait fait l'objet de restrictions d'usage, les octa-BDE ne sont plus utilisés dès l'an 2000, les penta-BDE dès l'an 2004 et les deca-BDE dès l'an 2008 (Watanabe and Sakai 2003; Reemtsma, Quintana et al. 2008). Le Bisphenol A dans les TBBPA est en voie de considération pour être un des polluants prioritaires de l'eau.

Enfin, les **retardateurs de flammes à base de phosphore** représentent 18,8 % dont les plus répandus sont les organophosphores, car ils sont utilisés comme retardateurs de flammes et comme des plastifiants, et ils ont remplacé largement les PBDEs dès la prévention de l'application des ces types de retardateurs de flammes (EFRA 2004; Reemtsma, Quintana et al. 2008).

**Tableau 9: Le coefficient de partition K<sub>ow</sub> et la solubilité des MCCPs et de quelques retardateurs de flammes bromés (De Wit 2002) (source site : 11, 12, 13)**

	Log K <sub>ow</sub>	Solubilité dans l'eau
MCCPs (C14 – C17)	5,5 – 8,2	0,027 mg/l (moyenne)
PEBDE	6,5 – 7	13,3 µg/l
OCBDE	6,29	0,5 µg/l
DeBDE	6,27	< 0,1 µg/l
HBCD	5,8	0,066 mg/l
TBBPA	4,5	4,2 mg/l

**2.4. Synthèse des adjuvants pouvant être présents dans les polymères utilisés pour les structures de végétalisation et composés chimiques susceptibles d'être émis**



**Figure 11 : Synthèse des adjuvants pouvant être présents dans les polymères utilisés pour les structures de végétalisation et composés chimiques susceptibles d'être émis**

### 3. Impact potentiel des matériaux constitutifs d'une toiture végétalisée sur la qualité du ruissellement - synthèse des données bibliographiques

Nous synthétisons ici les résultats des quelques études expérimentales et travaux menés dans l'objectif d'évaluer les risques d'émission de contaminants dans l'eau de ruissellement par des matériaux constituant les revêtements d'étanchéité et le complexe de végétalisation.

#### 3.1. Les émissions par les membranes bitumineuses

##### Emissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs)

Les membranes bitumineuses et l'étanchéité asphalte contiennent dans leur composition des HAPs, provenant des produits pétroliers. Des études de lessivage des HAPs ont été faites afin de voir leur taux de lessivage dans les eaux de ruissellement des toitures, et leur contribution à l'impact environnemental.

Une étude a été menée par (Bowen and de Groot 2000) sur neuf types de revêtements bitumineux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et un revêtement asphalte provenant d'un produit bitumineux du type A, pour observer le taux d'émission des HAPs dans l'eau. Ces produits sont tous utilisés dans des revêtements d'étanchéité et diffèrent entre eux par la concentration des HAPs et par les armatures qui ne sont pas le sujet de notre étude. Les HAPs ont une très faible solubilité dans l'eau, et ont un coefficient de partition  $K_{ow}$  grand (Simon and Sobieraj 2006), ce qui rend leur taux de lessivage théoriquement faible.

**Tableau 10: Les différents produits bitumineux étudiés (Bowen and de Groot 2000)**

Code	Description
A	Conventional Middle East penetration bitumen
B	Conventional Heavy Venezuelan penetration bitumen
C	Conventional Heavy Venezuelan penetration bitumen
D	Straight run vacuum residue of Middle East origin
E	Deeply vacuum flashed conversion residue from a thermal cracker ex D
F	Conventionally blown roofing bitumen ex D
G	Conventionally blown roofing bitumen of Middle East origin
H	Blown roofing bitumen of Middle East origin
I	Multigrade bitumen

Dans le test de lessivage, de l'eau acidifiée pH= 4 a été utilisée, et l'eau étant remplacée après 0.25, 1, 2.25, 4, 9, 16, 36 et 64 jours. Généralement les HAPs formés par quatre noyaux aromatiques ou moins, sont les plus solubles dans l'eau, et leur concentration était > 0.1 ng/l. Le naphthalène a présenté une gamme de concentrations variant de 10 à 100 ng/l, et pour les HAPs possédant deux noyaux, le naphthalène a présenté la plus forte concentration (Bowen and de Groot 2000). Les deux courbes (Figure 12) représentent le taux de lessivage du naphthalène et  $\Sigma$  des HAPs à 2+ noyaux (tous les HAPs dans le tableau 14 sauf que le naphthalène (voir Annexe IV pour caractéristiques physico-chimiques), et nous remarquons qu'il y a augmentation du taux

d'émission dans l'eau pour les premiers 4 jours, puis nous avons un certain équilibre d'émission qui s'établit et la concentration des HAPs émis devient stable avec le temps.

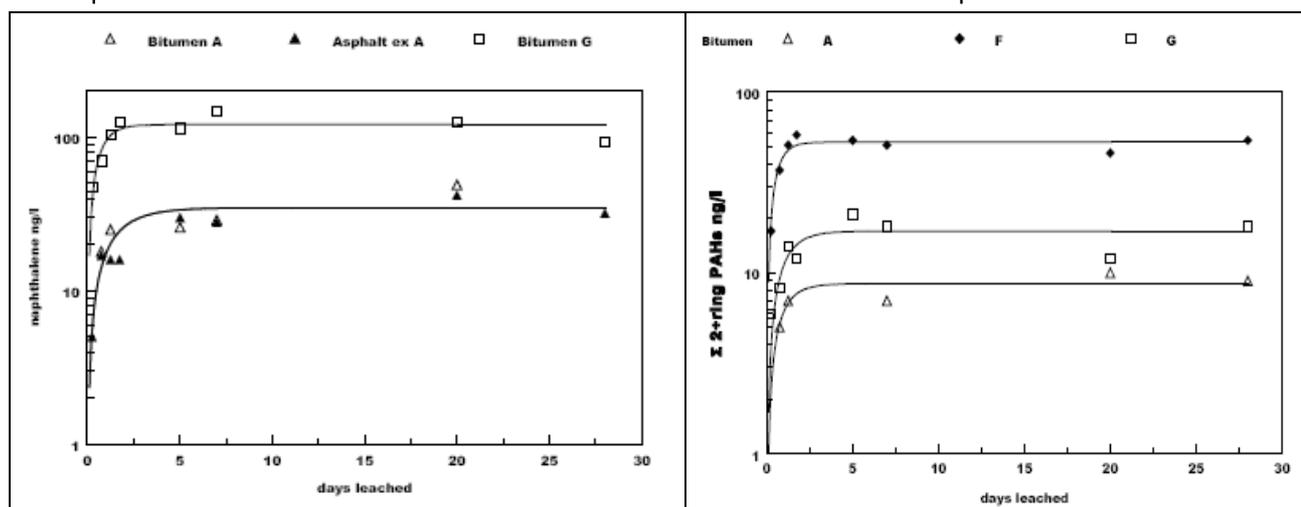


Figure 12: Courbes représentent le taux de lessivage de naphthalène (à gauche) et  $\Sigma$  des HAPs à 2+ noyaux (à droite) (Bowen and de Groot 2000)

Tableau 11: Concentrations moyennes des HAPs obtenues après les tests de lessivage, ng/l (Bowen and de Groot 2000)

Bitumen code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	DL*
1 Naphthalene	35	371	51	175	30	n.v.	120	0.9	168	0.3
2 Acenaphthene	1.3	17	5	2.4	0.6	2.7	0	0.3	11	0.04
3 Fluorene	2.1	42	7	3.6	0.8	19.4	11	3.8	44	0.02
4 Phenanthrene	4.1	180	47	2.9	3.3	15.9	5	1.0	82	0.06
5 Anthracene	0.1	12	5	0.5	0.5	6.1	0.3	0.1	28	0.07
6 Fluoranthene	0.4	1.7	0.8	0.16	0.1	1.7	0.1	0.1	1	0.05
7 Pyrene	0.4	3.9	1.4	0.47	0.5	4.3	0.3	0.1	4	0.04
8 Benz(a)anthracene	0.1	1.4	0.45	0.04	0.1	0.5	0.1	b.d.l.	b.d.l.	0.05
9 Chrysene	0.3	5.3	0.83	0.13	b.d.l.	0.5	0.1	b.d.l.	b.d.l.	0.06
10 Benzo(b)fluoranthene	b.d.l.	0.4	0.14	0.01	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.01
11 Benzo(k)fluoranthene	b.d.l.	0.2	0.14	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.02
12 Benzo(a)pyrene	b.d.l.	0.1	0.3	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.02
13 Dibenz(a,h)anthracene	b.d.l.	0.04								
14 Benzo(g,h,i)perylene	b.d.l.	0.02								
15 Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	b.d.l.	0.1								
16 Coronene	0.03	0.05	0.09	0.04	0.01	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.03
$\Sigma$ 2+ringPAHs	8.8	263	68	10	5.9	51	17	5.4	172	
sum 6 WHO PAHs	0.43	2.33	1.38	0.17	0.08	1.7	0.07	0.07	1.47	

Notes: Calculated from the concentrations in the samples taken after 9,16,36 & 64 days; DL = Detection Limit for 200 ml; b.d.l. = below detection limit; n.v. - not valid.

D'après le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, nous remarquons que le naphthalène est le HAP le plus lessivé dans l'eau et beaucoup d'autres HAPs n'ont pas été détectés, montrant qu'ils ne sont pas ou bien très faiblement lessivés dans l'eau. Les 6 World Health Organisation (WHO) HAPs (fluoranthène, benzo(b)- et benzo(k)-fluoranthène, benzo(a)pyrène, benzo(g,h,i)perylène et indeno(1,2,3-c,d)pyrène) représentent de très faibles taux de lessivage.

**Tableau 12: Lessivage des HAPs du composé bitumineux A et de l'asphalte provenant du produit bitumineux A, ng/l (Bowen and de Groot 2000)**

	bitumen	asphalt
Naphthalene	35	33
Acenaphthene	1.3	0.8
Fluorene	2.1	b.d.l.
Phenanthrene	4.1	1.2
Anthracene	0.09	0.1
Fluoranthene	0.4	0.08
Pyrene	0.4	0.1
Benz(a)anthracene	0.06	b.d.l.
Chrysene	0.3	0.09
Benzo(b)fluoranthene	b.d.l.	b.d.l.
Benzo(b)fluoranthene	b.d.l.	b.d.l.
Benzo(a)pyrene	b.d.l.	b.d.l.
Dibenzo(a,h)anthracene	b.d.l.	b.d.l.
Benzo(g,h,i)perylene	b.d.l.	b.d.l.
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	b.d.l.	b.d.l.

Note: b.d.l. = below detection limit

En comparant, le lessivage des HAPs entre le composé bitumineux A et l'asphalte provenant de ce dernier (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), nous remarquons qu'il n'y a pas de différence significative entre les concentrations des HAPs lessivés pour les deux produits, et en plus l'évolution du taux de lessivage avec le temps représenté dans la figure 17 est le même pour les deux.

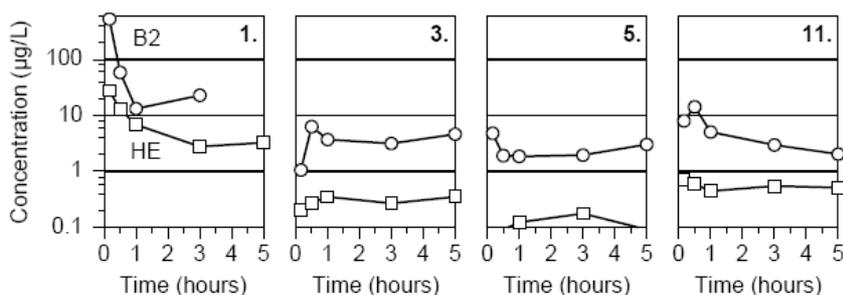
Donc, ces concentrations de lessivage des HAPs sont inférieures aux limites de concentration des eaux de surfaces suivant les normes de la directive cadre sur l'eau (voir Annexe III A), ce qui indique que les HAPs ne posent pas de vrais risques de contamination des eaux de ruissellements des toitures (Gourlay 2004).

Nous avons remarqué que les HAPs ayant de faible nombre de noyaux aromatiques sont les plus lessivés (voir caractéristiques dans Annexe), alors peuvent être solubles dans l'eau. Parfois les HAPs ayant plusieurs noyaux aromatiques peuvent être lessivés sous forme de particules qui s'adsorbent sur d'autres particules trouvées dans l'eau, et peuvent être transportés en suspension ou bien décantés après une certaine distance de transport, et ces types causes des pollutions ponctuelles et des contaminations de sols et accumulation dans les sédiments (Simon and Sobieraj 2006).

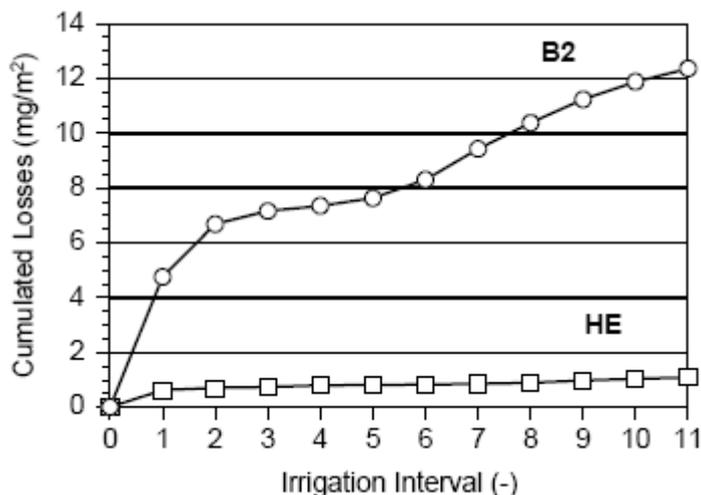
### Lessivage des biocides

Des émissions de mécoprop dans les eaux de ruissellements de membranes d'étanchéité bitumineuses ont été mises en évidence par (Bucheli, Muller et al. 1998) et par (Burkhardt, Zuleeg et al. 2009). Cette libération du mécoprop est due à l'hydrolyse de Preventol B2 (polyglycolester du mécoprop, (Figure 13) qui est un agent anti-racine introduit dans les membranes d'étanchéité destinées aux toitures végétalisées, et qui était auparavant également utilisé dans les membranes employées en toitures terrasses classiques.





**Figure 14: Résultat des 1er, 3ème, 5ème, le 11ème événements de ruissellement, contribuant à la concentration du mécoprop lessivé des membranes B2 et HE (Burkhardt, Zuleeg et al. 2010)**



**Figure 15: Somme cumulée du mécoprop lessivé des membranes pendant les 5 heures d'irrigation pour les 11 événements de ruissellements (Burkhardt, Zuleeg et al. 2010)**

La membrane B2 avait produit  $12,4 \text{ mg/m}^2$  du mécoprop alors que la membrane HE  $1,1 \text{ mg/m}^2$  (Figure 15). Ce qui démontre que l'éthylhexylester de mécoprop utilisé dans Herbitect est beaucoup moins susceptible d'être hydrolysé que le polyglycoester dans le Preventol B2.

En Suisse, l'application du Preventol B2 est arrêtée dans les membranes bitumineuses, et il est remplacé par le Preventol B5 et l'Herbitect. De plus il a été recommandé de ne plus utiliser ces agents anti-racines dans les revêtements des toitures classiques et de les conserver uniquement pour les toitures végétalisées. De ce fait, l'application des revêtements bitumineux anti-racines a diminué de 60% en 2008, et environ de 40 % en 2009. A long terme, ces résultats permettent de réduire le lessivage du mécoprop, pour des pourcentages pouvant être de 96 - 98% (Urbic 2008).

### 3.2. Les émissions par les membranes synthétiques

Peu d'études ont été menées sur les émissions par les membranes synthétiques. Une étude est en cours d'achèvement en Suisse (projet URBIC, EAWAG), seuls les premiers éléments de résultats sont disponibles à ce stade (Burkhardt, Eugster et al. 2008). Dans cette étude, les membranes traitées étaient les membranes PVC, FPO et EPDM. Les premiers résultats montrent que les membranes PVC émettent principalement des phtalates (DEHP, DINP, DIDP). Pour les FPO des antioxydants ont été détectés: le Metilox, l'hydroxytoluène butylé (BHT) et le 2,6-Di-*tert.*-butylphenol. Les 2 premiers antioxydants sont également présents dans les membranes EPDM (Burkhardt, Eugster et al. 2008).

### 3.3. Les émissions par le complexe de végétalisation

Très peu d'études ont été faites pour étudier les émissions par le complexe de végétalisation dans l'eau de ruissellement des toitures végétalisées.

Ces études émissions sont basées sur la comparaison entre la qualité de l'eau de pluie et de l'eau de ruissellement de toitures réelles ou de bancs expérimentaux. Une étude faite en Estonie, permet de comparer la qualité de l'eau ruisselant après une pluie d'intensité moyenne, une pluie d'intensité forte et lors de la fonte de la neige sur les toitures végétalisées (Teemusk and Mander 2007). Dans le Tableau 13, r/s correspond à l'eau de pluie avant ruissellement, gr1 et gr2 correspondent à 2 toitures végétalisées extensives et rr à une toiture classique de référence qui était couverte par un revêtement bitumineux modifié.

**Tableau 13: Concentration de l'eau de pluie (r) et de l'eau ruisselant des toitures étudiées (rr : toiture classique, gr1 et gr2 : toitures végétalisées) (Teemusk and Mander 2007)**

Indicator	Runoff case	Samples			
		r/s	gr1	gr2	rr
pH	Moderate		8.26	8.14	8.43
	Heavy	5.62	7.94	7.85	6.73
	Snowmelt'05	5.24	7.21	7.23	6.08
	Snowmelt'06		7.71	7.60	
BOD <sub>7</sub> (mgO <sub>1</sub> <sup>-1</sup> )	Moderate		5.3	4.1	7.0
	Heavy	2.9	2.6	2.0	2.9
	Snowmelt'05	1.4	8.3	8.9	2.5
	Snowmelt'06		12	7.8	
COD (mgO <sub>1</sub> <sup>-1</sup> )	Moderate		37	26	43
	Heavy	4	22	21	23
	Snowmelt'05	8	39	40	4
	Snowmelt'06		61	38	
Total P (mg l <sup>-1</sup> )	Moderate		0.036	0.026	0.104
	Heavy	0.012	0.090	0.074	0.102
	Snowmelt'05	0.019	0.054	0.056	0.029
	Snowmelt'06		0.044	0.034	
PO <sub>4</sub> -P (mg l <sup>-1</sup> )	Moderate		0.012	0.006	0.032
	Heavy	0.004	0.036	0.066	0.054
	Snowmelt'05	0.003	0.011	0.012	0.005
	Snowmelt'06		0.028	0.014	
Total N (mg l <sup>-1</sup> )	Moderate		2.1	1.9	2.6
	Heavy	1.3	1.2	1.3	1.4
	Snowmelt'05	0.6	1.1	1.0	0.9
	Snowmelt'06		0.25	0.20	
NH <sub>4</sub> -N (mg l <sup>-1</sup> )	Moderate		0.33	0.28	0.43
	Heavy	<0.015	0.12	0.16	0.09
	Snowmelt'05	0.22	0.29	0.35	0.18
	Snowmelt'06		0.20	0.17	
NO <sub>3</sub> -N (mg l <sup>-1</sup> )	Moderate		0.7	0.8	0.4
	Heavy	0.18	0.46	0.42	0.19
	Snowmelt'05	0.09	0.28	0.33	0.26
	Snowmelt'06		<0.03	<0.03	
SO <sub>4</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	Moderate		38	34	3
	Heavy	<1	23	20	2
	Snowmelt'05	1	21	30	1
	Snowmelt'06		16	18	
Ca-Mg salt (mgequiv. l <sup>-1</sup> )	Moderate		2.80	2.83	0.45
	Heavy	0.08	2.15	2.14	0.12
	Snowmelt'05	0.07	1.84	2.16	0.18
	Snowmelt'06		2.23	2.10	

s—melted snow-water; gr1 and gr2—runoff water from two different greenroof outflows; rr—runoff water from bituminous reference roof, and corresponding different runoff cases (moderate, heavy and snowmelt).

D'après ces résultats, nous pouvons conclure que plus le ruissellement de l'eau est lent, plus les concentrations en azote totale,  $\text{NH}_4\text{-N}$  et en matière organique (COD et  $\text{BOD}_7$ ) dans l'eau ruisselant du toit végétalisé est élevée. La concentration du phosphore totale n'a pas beaucoup varié, sauf dans le cas de la pluie intense où le phosphate et les nitrates étaient lessivés ce qui a augmenté leur concentration dans l'eau de ruissellement des toitures. Dans le cas de l'eau provenant de la fonte de la neige, nous remarquons que toutes les concentrations des composants étudiés étant grande, ceci est due à l'accumulation des polluants atmosphériques (Teemusk and Mander 2007). Les concentrations des sulfates et du sel calcium-magnésium ont considérablement augmenté dans l'eau de ruissellement du toit végétalisé, car ces composants sont présents dans le substrat du complexe végétalisé et ils sont lessivés dans l'eau de ruissellement. La valeur de pH a été augmentée en transformant l'eau légèrement acidifié en une eau neutre. Pour le toit de référence, nous avons remarqué que les composants étudiés ont tous des concentrations dans l'eau ruisselant du toit supérieures à celle de l'eau de pluie ou de fusion de la neige (Teemusk and Mander 2007).

Le lessivage du phosphore - pendant une forte pluie seulement - est expliqué par sa présence importante dans la fraction fine du substrat (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Czemiel Berndtsson 2008 a étudié l'effet des saisons sur la qualité de l'eau de ruissellement des toitures végétalisées extensives. Cette étude a montré que les concentrations du potassium, du phosphore, du phosphate, du phosphore total et la matière organique, ont augmenté dans l'eau de ruissellement du toit végétalisé par rapport à celles présentes dans l'eau de pluie, alors que la concentration en nitrate diminue. Cette étude se concentre aussi sur la différence d'émission entre l'automne et le printemps, et montre que les concentrations du potassium, du phosphate et du phosphore total sont plus importantes en automne qu'au printemps, alors que la concentration en matière organique dans l'eau de ruissellement est plus importante en printemps qu'en automne. En plus, on note une diminution de charges de tous ces composants dans l'eau de ruissellement du toit végétalisé avec l'âge de la toiture, ainsi qu'une diminution dans le temps de la capacité de la toiture à absorber les charges d'azote (Czemiel Berndtsson 2008).

**Tableau 14: Teneur en matière organique et en minéraux dans les différentes fractions du substrat (Teemusk and Mander 2007)**

	P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	K ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Ca ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Mg ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Organic material (%)
<2 mm	124.1	223.11	3547.4	230.1	9.8
2-4 mm	23.1	55.4	842.8	101.2	0.8
4-10 mm	20.1	70.0	745.6	153.7	0.5
10-20 mm	17.7	63.3	616.2	129.4	0.3

En comparant ces deux études nous trouvons des résultats contradictoires, spécifiquement concernant le cas des nitrates. Dans la première étude, nous avons une augmentation de la concentration en nitrates dans l'eau de ruissellement du toit végétalisé, alors que dans la seconde, nous avons une absorption de ce composant d'où sa diminution dans l'eau de ruissellement.

Cette contradiction est aussi remarquée dans la synthèse sur la qualité de l'eau de ruissellement des toitures végétalisées réalisée par (Czemiel Berndtsson 2009). Cette synthèse met l'accent sur le fait que chaque chercheur étudie la qualité de l'eau ruisselant des toitures végétalisées de son point de vue, ainsi nous aurions des résultats contradictoires pour la concentration de phosphore et de l'azote dans les eaux de ruissellements. Certains disent que la présence du phosphore et des nitrates est due aux fertilisants ajoutés pour la maintenance de la végétation et d'autres ne sont

pas d'accord avec cette affirmation. Mais toutes les études se mettent d'accord sur le fait que le pH légèrement acide dans l'eau de pluie, acquiert une valeur comprise entre 7 et 8 après le contact avec les toitures végétalisées (Czemieli Berndtsson 2009).

Les données de la littérature ne permettent cependant pas de conclure quant à l'incidence des complexes de végétalisation sur la qualité des eaux de ruissellement et les taux d'émissions de polluants. En effet, ces travaux ont été menés dans des contextes très variés, sur des structures de végétalisation diverses et avec des méthodologies hétérogènes. De plus les durées de ces suivis sont souvent insuffisantes pour pouvoir en tirer des conclusions générales, indépendantes du contexte météorologique.

## **Partie 2. - EMISSIONS PAR LES SUBSTRATS - EVALUATION DU COMPORTEMENT AU LESSIVAGE ACCELERE DE TROIS SUBSTRATS DE VEGETALISATION**

D'après la littérature scientifique, les substrats de végétalisation peuvent être une source importante de turbidité, de matière organique et de nutriments (azote, phosphore) dans les eaux de ruissellement des TTV. Par ailleurs, certains auteurs rapportent la faculté des substrats à piéger les éléments métalliques tandis que d'autres les citent comme source de certains métaux.

Les émissions de particules, de carbone organique et de nutriments par lessivage des substrats sont maximales lorsque le substrat est neuf et tendent à diminuer au cours du temps.

Dans le cadre du projet TVGEP, ces émissions vont être mesurées in-situ, sur plusieurs toits pilotes mis en place au Cete Ile de France en 2011, et comparés aux apports atmosphériques. Néanmoins, ces essais seront réalisés au cours des 24 mois suivant l'installation de la toiture et porteront donc sur des substrats relativement neufs, pour un nombre limité d'événements pluvieux.

Afin d'évaluer l'évolution possible sur le long terme de ces émissions, des lessivages en conditions de pluie accélérée ont été réalisés sur des colonnes reproduisant la structure verticale d'une TTV (substrat, filtre, couche de drainage) mais non végétalisées. La végétation n'a pas été prise en compte dans ces essais du fait de l'impossibilité de reproduire dans des essais accélérés le cycle végétatif. Nos essais sont donc représentatifs des émissions dans les premiers mois avant développement des végétaux (cas d'un semis ou d'une plantation de micro-mottes par exemple) ou d'une toiture avec un faible couvert végétal. Ils sont susceptibles de surestimer les émissions de nutriments (et en particulier de phosphore) par rapport au cas d'un couvert végétal dense.

Ces essais de lessivage accéléré en colonnes avaient pour objectif l'évaluation des comportements des différents substrats des toitures végétalisées (TV) face aux événements pluvieux en remplaçant une évaluation longue et coûteuse *in situ*, par une approche au laboratoire, mieux maîtrisée et plus courte. L'objectif était d'évaluer d'une part les flux de matière organique et de nutriments issus des TV et d'autre part de vérifier la possible rétention des éléments trace métalliques (ETM) sur le long terme.

### **1. Méthodologie d'étude**

#### **1.1. Dispositif expérimental**

Les interactions des toitures végétalisées avec la pluie ont été simulées au laboratoire avec un dispositif de colonnes, exposées à une pluie artificielle. La composition des colonnes était identique aux systèmes utilisés en application réelle. Ainsi on rencontre une couche du substrat assise sur une couche drainante avec une séparation des deux couches par un géotextile. En fonction du type de toiture les caractéristiques des deux couches varient.

Pour évaluer l'impact du type de substrat sur la qualité de l'eau percolée, trois substrats différents ont été utilisés, correspondant aux 2 substrats mis en œuvre sur les bancs d'essais de TTV réalisés au CETE Ile France dans le cadre du projet TVGEP (substrats X et Z) et au substrat mis en œuvre sur les bancs d'essai réalisés dans le cadre d'une étude thermique au CSTB de Champs sur Marne (substrat C).

L'importance de la hauteur du substrat a été évaluée en comparant deux hauteurs différentes de substrat : 7.5 cm et 15 cm.

L'effet de la couche drainante a été évalué en comparant une couche de polystyrène et une couche en pouzzolane.

Le Tableau 15 donne une description détaillée de la composition des colonnes mise en place. Les colonnes ont été construites à la base de seaux mesureurs en polyéthylène de 20 litres et 30 cm de diamètre. Un support en polyéthylène de hauteur variable placé au fond du seau permet de compenser les différences d'épaisseur du substrat et ainsi de positionner la surface du substrat au même niveau dans toutes les colonnes. La figure 1 montre un schéma type de la colonne de 15 cm.

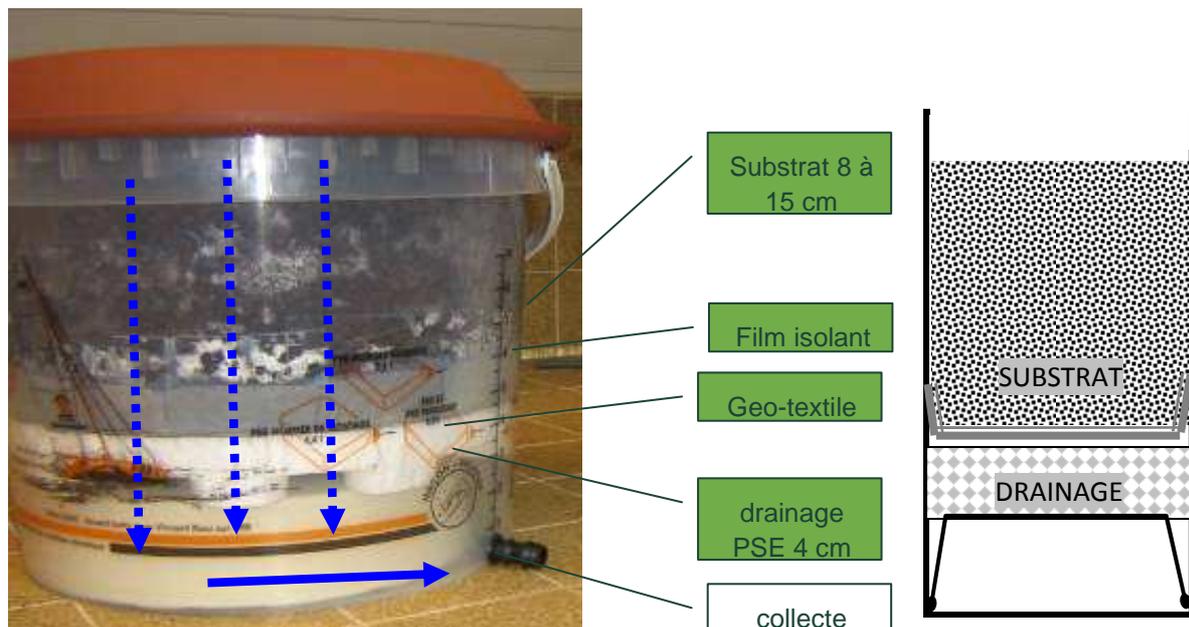


Figure 16: Photo d'une colonne type avec 15 centimètre de substrat (C15, X15 et Z15)

Tableau 15: Composition des colonnes expérimentales. Le diamètre de toutes les colonnes est de  $29 \pm 0.5$  cm et une superficie de  $660 \text{ cm}^2$

code	Type substrat	Hauteur substrat (cm)	Matériau de drainage (4 cm)	poids frais (Kg)
C8	C	7.5	polystyrène	3.93
C15	C	15	polystyrène	7.39
X8	X	7.5	polystyrène	4.66
X8g	X	7.5	pouzzolane	4.35
X15	X	15	polystyrène	9.25
Z15	Z	15	polystyrène	9.52

## 1.2. Nature des substrats

Le Tableau 16 résume les principales caractéristiques des substrats utilisés, d'après les indications du fabricant.

Il s'agit pour X et C de substrats de végétalisation extensive et pour le substrat Z d'un substrat pour végétalisation intensive, ces substrats sont conformes aux règles professionnelles. Les substrats X et Z sont composés, par ordre décroissant en volume, de pouzzolane, pierre ponce, humus d'écorces et compost de déchets verts. Le substrat C est composé, par ordre décroissant en volume, de pouzzolane, de tourbe et d'écorce.

Ces substrats n'ont pas été enrichis en engrais. Lors de leur mise en œuvre sur une toiture neuve les fabricants recommandent un apport d'engrais en surface pour favoriser une installation rapide des plantes. Le substrat C est ainsi livré avec des granulés d'engrais à libération progressive sur 12 mois, conditionnés séparément. Lors de la livraison des substrats X et Z pour la réalisation des bancs d'essais TVGEP, des sacs de substrat de surfacage enrichi en engrais (NPK 18-6-8, 2 kg/m<sup>3</sup>) ont également été fournis, à épandre en cas de difficultés d'installation des végétaux.

Les tests présentés ici portent sur le substrat seul, sans apport d'engrais de surface.

**Tableau 16:** caractéristiques physio-chimiques des substrats utilisés

Paramètres	Unité	Z	X	C
<b>Composition</b>		Pouzzolane, pierre ponce, humus d'écorce, compost de déchets verts		Pouzzolane, tourbe, écorce
Pourcentage de fines (d ≤63 µm)	% en masse	11	9.4	
Pourcentage de graviers (d ≥2 mm)	% en masse	43	47.1	
Masse volumique sèche (105 C°)	g/cm <sup>3</sup>	1.1	1.1	
Masse volumique à la CME	g/cm <sup>3</sup>	1.5	1.5	
Porosité	% volume	56	55.5	
Capacité de rétention en eau (CME)	% volume	45	40.3	160
Permeabilité	mm/min	19.3	28.5	
<b>Caractéristiques chimiques</b>				
Matière organique	% en masse	5.8	3.4	10
pH (CaCl <sub>2</sub> )		7	7.2	7
Azote (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	mg/L of CaCl <sub>2</sub>	7	4	
Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	mg/L CAL	99	71	
Potassium (K <sub>2</sub> O)	mg/L CAL	572	471	

## 1.3. Pluie artificielle

Pour s'approcher le plus de la situation réelle, en termes de niveau de saturation en eau des substrats, et de conditions de transfert au travers des différentes couches de la structure de végétalisation, les tests ont été réalisés sous simulation de pluie.

## Eau utilisée

Une eau de pluie artificielle, dont la composition ionique est proche de l'eau de pluie naturelle, a été reconstituée en diluant une eau minérale faiblement minéralisée avec de l'eau osmosée au rapport 1 :20.

Pour étudier l'absorption des ETM l'eau de pluie reconstituée a été dopée par du cuivre et du zinc à la hauteur de  $30\mu\text{g-Cu.L}^{-1}$  ( $0.472\mu\text{mol/L}$ ) et  $300\mu\text{g-Zn.L}^{-1}$  ( $4.615\mu\text{mol.L}^{-1}$ ). Les ajouts ont été effectués en utilisant des solutions étalon AAS de  $\text{CuSO}_4$  et de  $\text{ZnSO}_4$  (Merck).

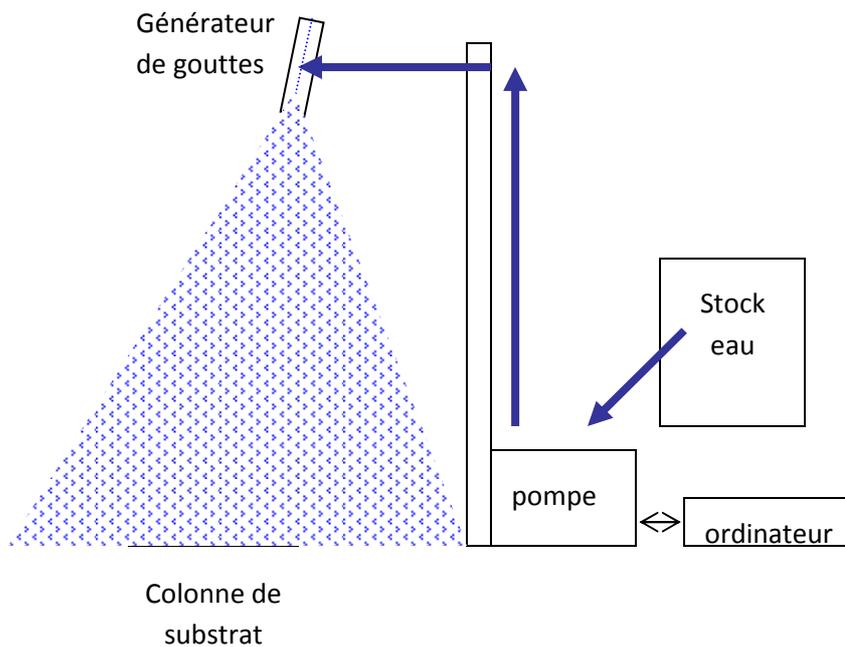
Un stock de 150 litres était préparé quotidiennement dans une cuve en PVC. Le stock a été acclimaté environ 12 heures avant chaque utilisation.

**Tableau 17:** Composition ionique de la pluie artificielle

	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4$	$\text{Zn}_{\text{diss}}$	$\text{Cu}_{\text{diss}}$
Eau osmosée ( $\mu\text{g/L}$ )	0	59	525		741	118	429	199	304		-	-
Volvic ( $\mu\text{g/L}$ )	71000	11500	8000		11600	6200	13500	8100	6300			
Métaux ( $\mu\text{g/L}$ )								488			300	30
Concentration théorique ( $\mu\text{g/L}$ )	3550	634	925		1321	428	1104	1092	619		300	30
Concentration mesurée ( $\mu\text{g/l}$ )	3380	550	380	0	550	300	1050	1060	590		289.6	24.7
Référence ( $\mu\text{g/l}$ )		1380	40	870	190	140	810	1060	2160	110		

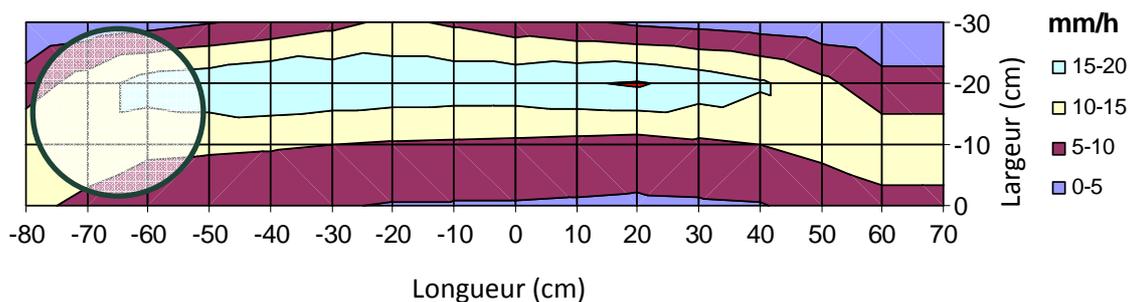
## Simulateur de pluie

La pluie a été appliquée par le biais d'un simulateur de pluie basé sur un générateur de gouttes à disque tournant (marque Sprai). Ce simulateur permet de régler l'intensité de la pluie générée, mais également la taille des gouttes en modifiant la vitesse de rotation du disque et le débit de la pompe. La pluie est distribuée dans une bande étroite (environ 1.5m de longueur sur 30 cm de largeur) dans laquelle les 6 colonnes du test ont été alignées.



**Figure 17:** Schéma du dispositif de simulation de pluie

Afin d'identifier l'étendue de la zone arrosée et la distribution spatiale des intensités de pluie générées, une carte a été établie en collectant les précipitations suivant une grille dense de points de mesure. La Figure 18 montre un exemple pour un réglage de 8.33 mm/h. On observe une hétérogénéité spatiale relativement importante. Afin d'homogénéiser les volumes d'eau reçus par les différentes colonnes, nous avons opté pour une rotation journalière des emplacements des 6 colonnes.



**Figure 18:** Carte d'intensité pour une précipitation moyenne de 8.33mm/h. Le débit de la pompe est 11.3L/h et la rotation de 2500 RPM.

Il a été choisi d'appliquer l'équivalent de 3 années de pluviométrie moyenne de la région Ile-de-France, soit 1950 mm, sur une période d'environ 1 mois ou 20 jours ouvrables. Cependant, compte tenu de la différence entre le coefficient de ruissellement dans le cas de ces tests accélérés (proche de 1, les substrats n'ayant pas le temps de sécher entre deux séquences de pluie) et le coefficient de ruissellement moyen annuel d'une toiture végétalisée in situ (de l'ordre de 0.2 à

0.3), les volumes de ruissellement collectés sont équivalents à une dizaine d'années de ruissellement in situ.

La pluie a été appliquée du 15/6/2011 au 7/7/2011 à raison de 50 mm pour les deux premiers jours, puis de 100 mm par jour, 6 jours par semaine, en faisant se succéder des séquences de 12h (6h pour les deux premiers jours) d'arrosage à une intensité de pluie moyenne de l'ordre de 8.8 mm/h, et des séquences de 12 h d'égouttage.

A l'exception de la première séquence d'arrosage, les substrats étaient à leur niveau d'humidité maximal et l'intégralité du volume de précipitation appliqué a percolé.

Le Tableau 18 résume les caractéristiques des séquences de précipitation en termes de volume percolé sur les différentes colonnes. Si la hauteur totale appliquée est comparable entre les différentes colonnes, de légères fluctuations entre colonnes existent à l'échelle journalière.

**Tableau 18:** Volumes percolés sur les différentes colonnes en fonction des séquences de pluie (mm)

	<b>C8</b>	<b>C15</b>	<b>X8</b>	<b>X8g</b>	<b>X15</b>	<b>Z15</b>
<b>Total (mm)</b>	2058	2065	2066	2092	2081	2044
<b>Séquence 1</b>	51	42	44	21	33	34
<b>Séquence 2</b>	76	64	72	61	30	57
<b>Moyenne séquences 3 à 20</b>	107	109	108	112	112	108
<b>Ecart type séquences 3 à 20</b>	20.9	18.7	21.8	25.1	26.4	20.7

#### 1.4. Suivis de la qualité du percolat

Des échantillons moyens par séquence d'arrosage ont été constitués en collectant la totalité de l'eau percolée au cours de chaque journée. Les échantillons ont été collectés le matin, après la fin de la séquence de précipitation, et traités le jour même. Un échantillon moyen journalier « blanc » de précipitation a été collecté dans un récipient en PEHD témoin en parallèle avec les colonnes végétalisées pour caractériser le niveau de contamination initial de l'eau avant percolation.

Les paramètres suivants ont été étudiés :

- conductivité, turbidité, pH, MES
- matière organique : DCO, COD, COP, SUVA
- Composition ionique (données non encore exploitées)
- Nutriments : Ntot, Ptot, N dissous, PO4-
- Métaux : Cu, Zn, Mn, Ni, Cr, Pb, Sr, V (seules les données Cu, Zn et Mn seront exploitées ici)

Les analyses ont été effectuées selon les normes Afnor en vigueur et /ou selon les *Standard Methods for Water examination* (AWWA APHA, 2007).

## 2. Résultats et discussion

La rétention / relargage des composés chimiques par les TV ont été étudiés en fonction de trois types de facteurs : le type de substrat, l'épaisseur de substrat et le type de la couche drainante.

On observe pour l'ensemble des paramètres étudiés, à l'exception du pH, une décroissance exponentielle des concentrations en fonction de la hauteur cumulée de pluie, avec des concentrations qui tendent au bout de quelques centaines de mm de percolation vers une valeur constante. Aussi, nous avons choisi de décrire la dynamique d'émission par une loi de la forme :

$$C(H) = C_1 + C_2 e^{(-H/k)},$$

avec H : hauteur cumulée percolée (mm), C(H) : concentration du percolat au bout d'une hauteur percolée H,

$C_1$ ,  $C_2$  et k: paramètres du modèle, correspondant pour  $C_1$  à la concentration limite finale vers laquelle tend C(H), pour  $C_0=C_1+C_2$  la concentration initiale émise par le substrat neuf, tandis que k est un paramètre homogène à une hauteur d'eau qui caractérise la vitesse de décroissance de la concentration.

L'ajustement a été réalisé fait à l'aide du Solver de Microsoft Excel, en minimisant la somme de carrés des écarts entre les logarithmes des valeurs observées et simulées. Le coefficient de corrélation est obtenu par corrélation linéaire des valeurs observées et simulées.

Cette décroissance exponentielle décrit convenablement les processus d'élution et de désagrégation, qui se déroulent apparemment en deux phases, une première phase rapide entre 0 et 600 mm et une deuxième beaucoup plus lente ensuite. Ces deux phases peuvent être observées Figure 20 pour la turbidité, ainsi que Figure 22 pour la DCO.

### 2.1. Effet du type de substrat

Dans ce paragraphe seront traitées les différences entre les trois différents substrats : le substrat utilisé sur les toitures pilote de CSTB (substrat C), de fabrication française, et les substrats des toitures pilotes extensives (substrat X) et des toitures intensives (substrat Z) du CETE Ile de France, de fabrication allemande.

#### Paramètres globaux: Couleur, pH, Conductivité, Turbidité et MES

La première différence qu'on puisse observer est la différence de couleur. Les substrats ayant des compositions différentes réagissent différemment sur les apports en eau. Le substrat « C » contenant de la tourbe donne un effluent transparent avec une couleur rougeâtre due aux composés humiques. Les substrats « X » et « Z » donnent une couleur noire, sans transparence, due à la présence des particules fines dans le percolat. (Figure 2). Cette coloration des percolats diminue très nettement au cours du temps mais reste nettement perceptible même après 2000 mm de percolat.



**Figure 19:** Variation de la couleur au cours de l'expérience (2 = 100 mm, 11 = 2000 mm)

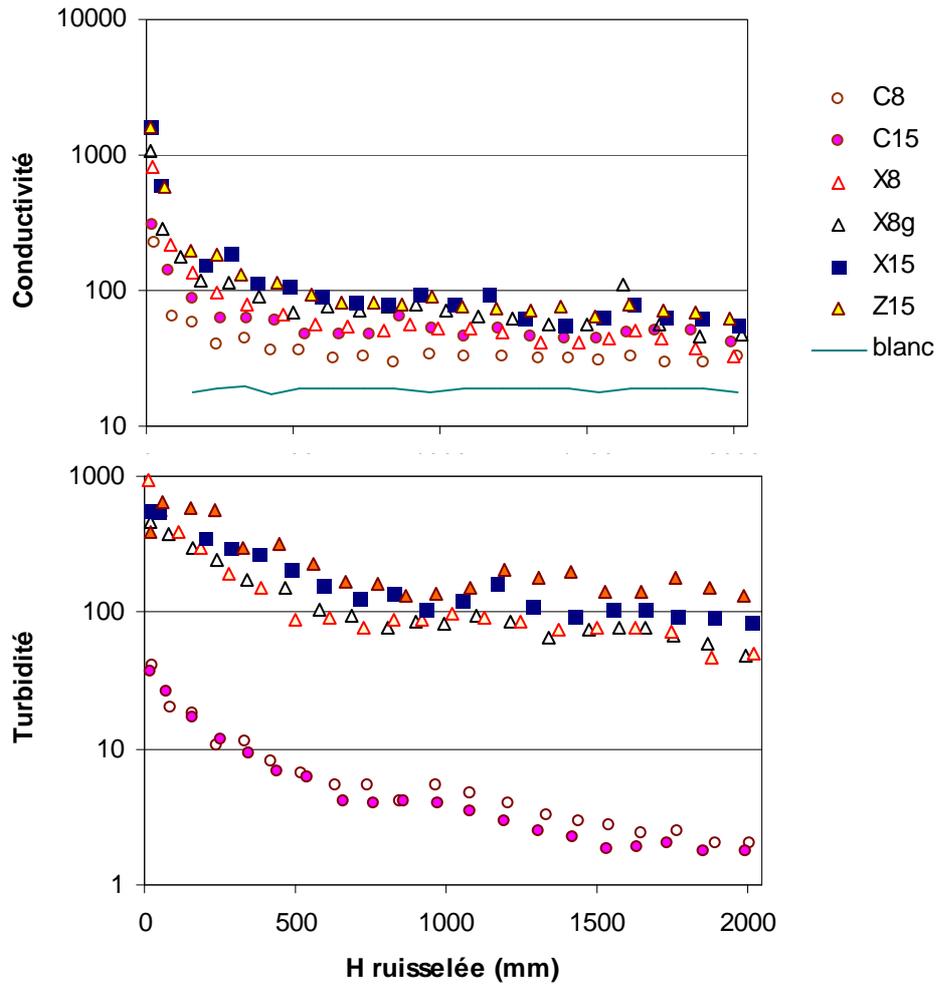
Le pH a été systématiquement mesuré pendant toute la durée de l'expérience. Cependant après le premiers 100 mm, aucune différence significative n'a pas pu être observée. Ainsi tous les échantillons collectés se situent entre pH7.3 et pH7.7.

Pour tous les autres paramètres globaux, on observe une décroissance des concentrations à la sortie avec l'augmentation de la hauteur de pluie appliquée. Si on compare la phase initiale (premiers 600 mm de percolat) avec la phase finale (derniers 600 mm de percolat) on constate qu'au bout 2000 mm de précipitation appliqués, les valeurs chutent de 60 à 80% (Tableau 19).

Les différences de composition entre les substrats sont à l'origine des différences de comportement physico-chimiques. Pour la conductivité cette diminution correspond à la dissolution des minéraux initialement présents, tandis que pour la turbidité cette diminution est liée à l'éluion de particules fines du dispositif. Le substrat X possède un pourcentage de fines <63  $\mu\text{m}$  moins élevé que le substrat Z (9.4% pour X, 11% pour Z) ce qui pourrait expliquer le niveau plus bas des turbidités du X comparé au Z.

**Tableau 19:** concentrations moyennes pour les paramètres physico-chimiques

	Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )				Turbidité (NTU)			
	Moyenne 0 – 2000 mm	Moyenne 0- 600 mm (1)	Moyenne 1400 – 2000 mm (2)	(2)/(1)	Moyenne 0 – 2000 mm	Moyenne 0- 600 mm (1)	Moyenne 1400 – 2000 mm (2)	(2)/(1)
<b>Blanc</b>	18				0.8			
<b>C8</b>	40	72	32	44%	6.5	16	2.6	16%
<b>C15</b>	61	110	47	43%	6.0	16	2.0	12%
<b>X8</b>	77	208	42	20%	122	259	67	26%
<b>X8g</b>	92	278	62	22%	128	373	69	18%
<b>X15</b>	115	466	64	14%	154	375	98	26%
<b>Z15</b>	13	415	71	17%	234	435	160	37%

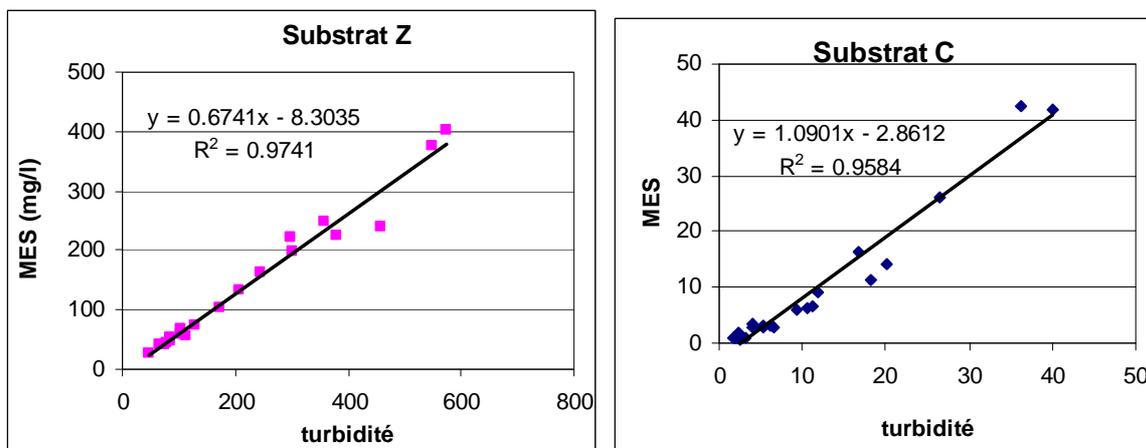
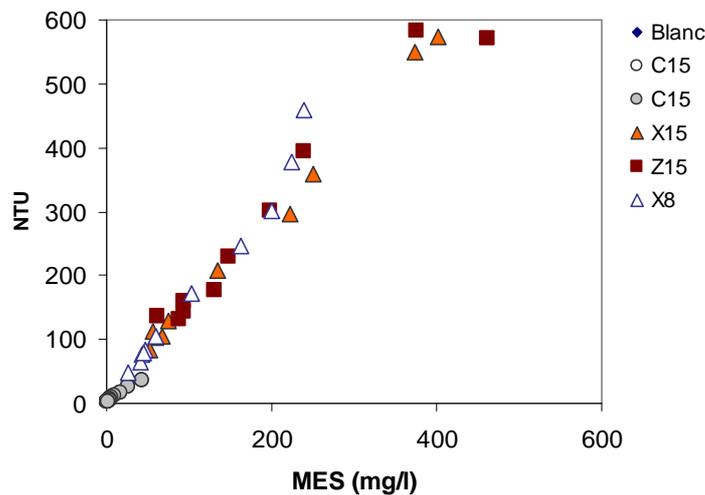


**Figure 20:** Evolution de la conductivité et de la turbidité en fonction de la hauteur cumulée de percolation pour les trois types de substrats

**Tableau 20:** Paramètres de la loi de décroissance de la conductivité, de la turbidité et des MES.

	Turbidité (NTU)				MES (mg/l)			
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>
<b>C15</b>	2	29	287	0.962	1	30	248	0.962
<b>X15</b>	94	531	288	0.996	54	398	277	0.996
<b>Z15</b>	133	514	352	0.733	84	341	334	0.733
	Conductivité (µS/cm)							
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>
<b>C15</b>	48	306	76	0.981				
<b>X15</b>	78	1265	92	0.894				
<b>Z15</b>	82	1446	74	0.955				

Quelle que soit l'épaisseur du substrat et la nature du matériau de drainage, les substrats X et Z présentent tout au long de l'essai des turbidités et des MES très supérieures (de 1 à 2 ordres de grandeur) au substrat C. La concentration initiale en MES est de l'ordre de 400 mg/l pour les substrats X et Z, et chute rapidement pour tendre vers une valeur stable de 30 mg/l en fin d'expérimentation. Pour le substrat C, la dynamique de décroissance est comparable mais la Concentration MES varie entre une valeur initiale de seulement 30 mg/l et tend vers 1 mg/l en fin d'expérimentation. Ces différences de comportement sont à relier à la différence de composition entre les substrats Z et X, qui comportent beaucoup de particules fines dans la fraction compost et humus d'écorce, tandis que pour le substrat C qui comporte peu de fines la coloration est plutôt induite par les matières humiques issues de la tourbe et des écorces. Turbidité et MES présentent pour tous les substrats une très forte corrélation. Cette relation turbidité - MES ne varie pas significativement entre les différents substrats. On note cependant une légère différence de pente de la relation entre les substrats X et Z d'une part et le substrat C d'autre part, ce qui pourrait traduire une différence dans la nature des particules lessivées.



**Figure 21:** Relation entre turbidité et matière en suspension pour les différents substrats

## Carbone et nutriments

La DCO a été utilisée comme une mesure globale de la matière organique totale éluée. Comme on peut le voir sur le Tableau 21 et la Figure 22, les trois substrats présentent un comportement similaire d'émission de DCO, tant en termes de dynamique d'émission que de niveaux de concentration. Les courbes de décroissance sont similaires pour tous les substrats, passant de quelque 300 mg-O<sub>2</sub>/l initiaux à moins de 50 mg-O<sub>2</sub>/l au bout de 600 mm percolés. Au-delà de 600mm percolés la concentration de DCO n'évolue plus que très faiblement et tend vers une valeur constante de l'ordre de 20 mg/l.

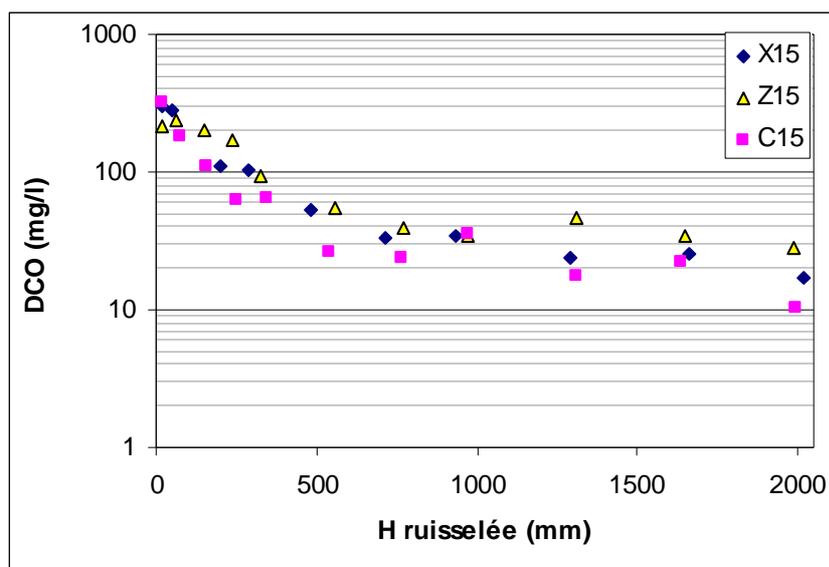


Figure 22: Evolution de la DCO en fonction de la hauteur appliquée, pour les différents substrats.

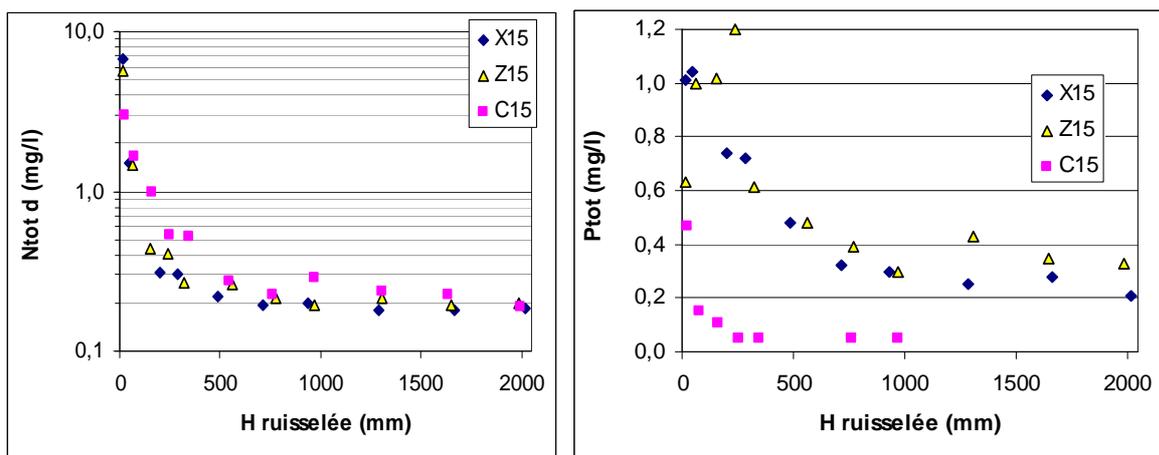
Tableau 21: Constantes et coefficients d'ajustement pour l'azote dissous total, le phosphore, le carbone organique et la DCO

	DCO <sub>t</sub> (mg-O <sub>2</sub> /l)				COT (mgC/l)			
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>
<b>C15</b>	19	279	159	0.964	6	83	134	0.964
<b>X15</b>	23	289	218	0.986	7	89	245	0.986
<b>Z15</b>	33	255	251	0.920	11	72	258	0.920
	Azote dissous, total (mg-N/l)				Ptot (mg/l)			
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>
<b>C15</b>	0.2	2.8	127	0.982	0.05	0.5	45	0.97
<b>X15</b>	0.2	15.1	20	0.999	0.2	0.9	379	0.98
<b>Z15</b>	0.2	6.4	46	0.978	0.3	0.7	392	0.61

En ce qui concerne l'azote dissous, les concentrations observées sont du même ordre de grandeur pour les trois substrats. Les concentrations initiales émises sont cependant plus importantes pour X et Z que pour le substrat C mais décroissent de façon plus rapide sur les premiers 100 mm de pluie. Après 600 mm de ruissellement, les concentrations atteignent pour les trois substrats des niveaux comparables et très faibles, inférieurs à 0.3 mg/l.

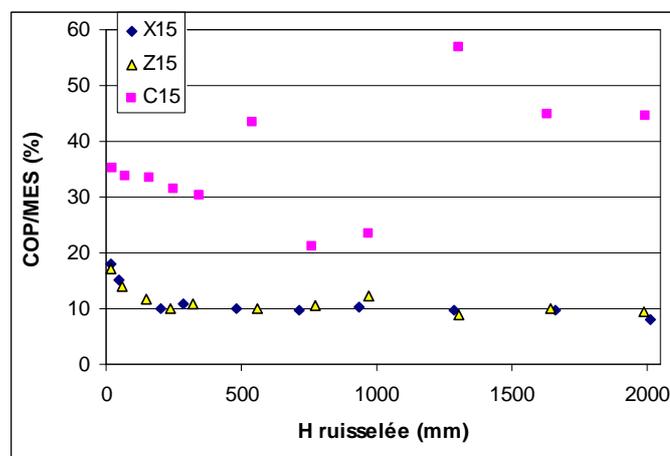
Les concentrations en azote total n'ont pu être quantifiées que pour les trois premiers prélèvements - elles sont par la suite inférieures à la limite de quantification de 1 mg/l. Dans les premiers 50 mm ruisselées, elles sont de l'ordre de 2.5 à 5.5 mg/l. De façon surprenante, les valeurs les plus élevées sont mesurées pour le substrat C.

Les émissions de phosphore sont très faibles pour le substrat C, dont les concentrations chutent très rapidement sous la limite de quantification de 0.05 mg/l. Elles sont durablement plus élevées pour les substrats X et Z, avec des concentrations initiales de l'ordre de 1 mg/l, et une concentration résiduelle après 1000 mm de ruissellement se maintenant autour de 0.2 à 0.3 mg/l.



**Figure 23:** Evolution de la l'azote dissous et du phosphore total en fonction de la hauteur appliquée, pour les différents substrats.

Si on se penche plus sur la composition des particules lessivées, on peut observer une teneur en carbone deux à trois fois plus importante pour le substrat C que pour les substrats X et Z (Figure 24). Les substrats X et Z produisent des particules très comparables avec environ 10% de carbone et ceci d'une façon constante (teneur en carbone de 18% en début de lessivage). Le substrat « C », par contre relargue des particules nettement plus carbonées avec une variation plus importante.



**Figure 24:** Teneur en carbone organique des MES

La proportion de carbone organique émise sous forme particulaire, exprimée comme COP/COT, varie peu pour un substrat donné durant l'expérimentation. Cependant le substrat « C » relargue le carbone principalement sous forme dissoute (COP/COT de l'ordre de 20%), tandis que pour les substrats « X » et « Y » c'est plutôt du particulaire (COP/COT autour de 60%).

Le rapport de DCO sur COT montre que la matière organique du substrat «C » (7.23 mg-O<sub>2</sub>/ mg-C) est probablement plus hydrogénée que la matière organique du « X » et « Y » (2.75 mg-O<sub>2</sub>/ mg-C). L'index SUVA plus faible de «C» semble de confirmer cette hypothèse. En observant le type de carbone produit, on s'aperçoit que ce dernier produit peu de carbones aromatiques. L'aromaticité des substrats X et Z est ainsi 3 fois plus élevée. (Figure 25).

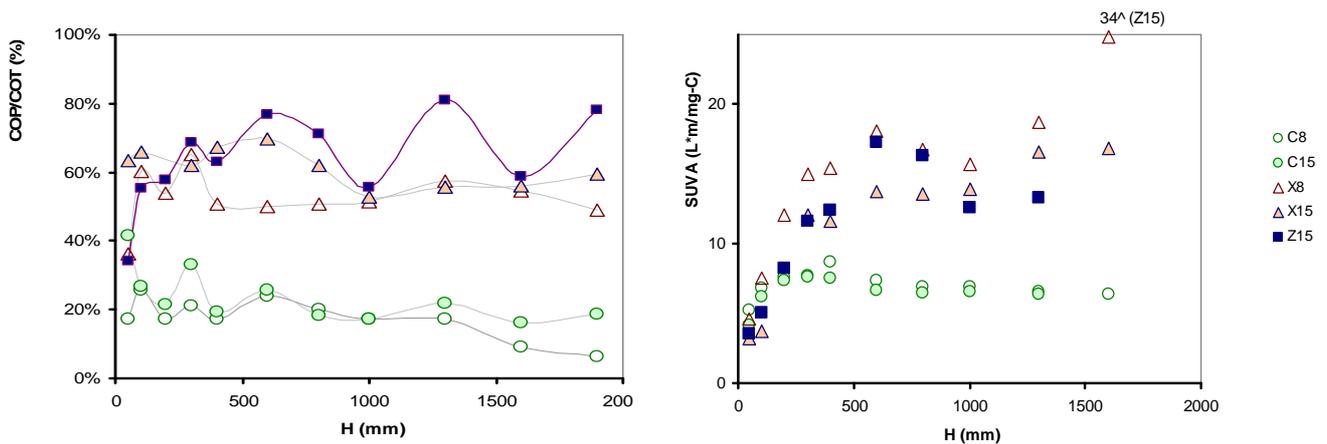


Figure 25: Evolution du carbone dissout et de l'aromaticité

Quant aux nutriments, on s'aperçoit que l'évolution de l'azote total dans la partie dissoute est très similaire avec celle du carbone organique ou de la DCO et qu'au bout de 300 mm appliqué, l'azote est à peine présent dans les effluents. Cependant si on observe le rapport de C sur N le substrat «C» relargue globalement deux fois plus de carbone par unité d'azote. On peut aussi s'apercevoir une plus forte fluctuation de ce coefficient. Cette fluctuation peut être due aux pauses de 24 heures le weekend entre la reprise des pluies.

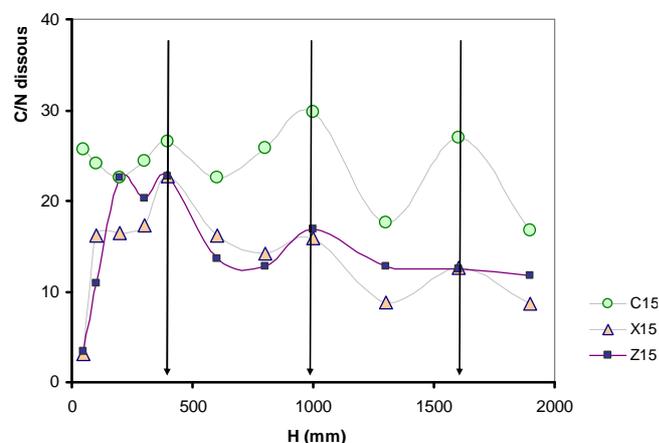


Figure 26: Variation du rapport C/N dans le temps

## Métaux

Dans le paragraphe précédent on a pu observer que l'évolution de la concentration des nutriments carbone et l'azote dans l'éluant suit une décroissance exponentielle avec la hauteur de pluie appliquée. Cette tendance est partiellement vrai pour le manganèse total, ou la concentration à la sortie est 10 fois supérieur à celle de la pluie pour le substrat « c » et 1000 fois pour les substrats « Z, Y » ou le manganèse fait probablement partie des solides élués. Les concentrations en manganèse dissous sont sensiblement les mêmes pour tous les substrats.

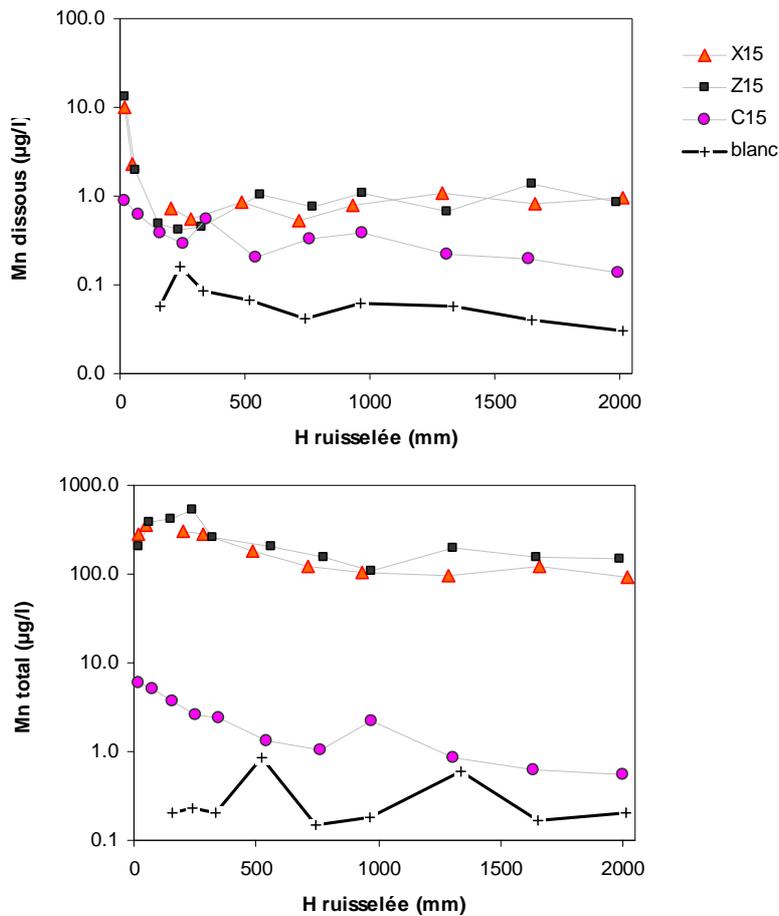
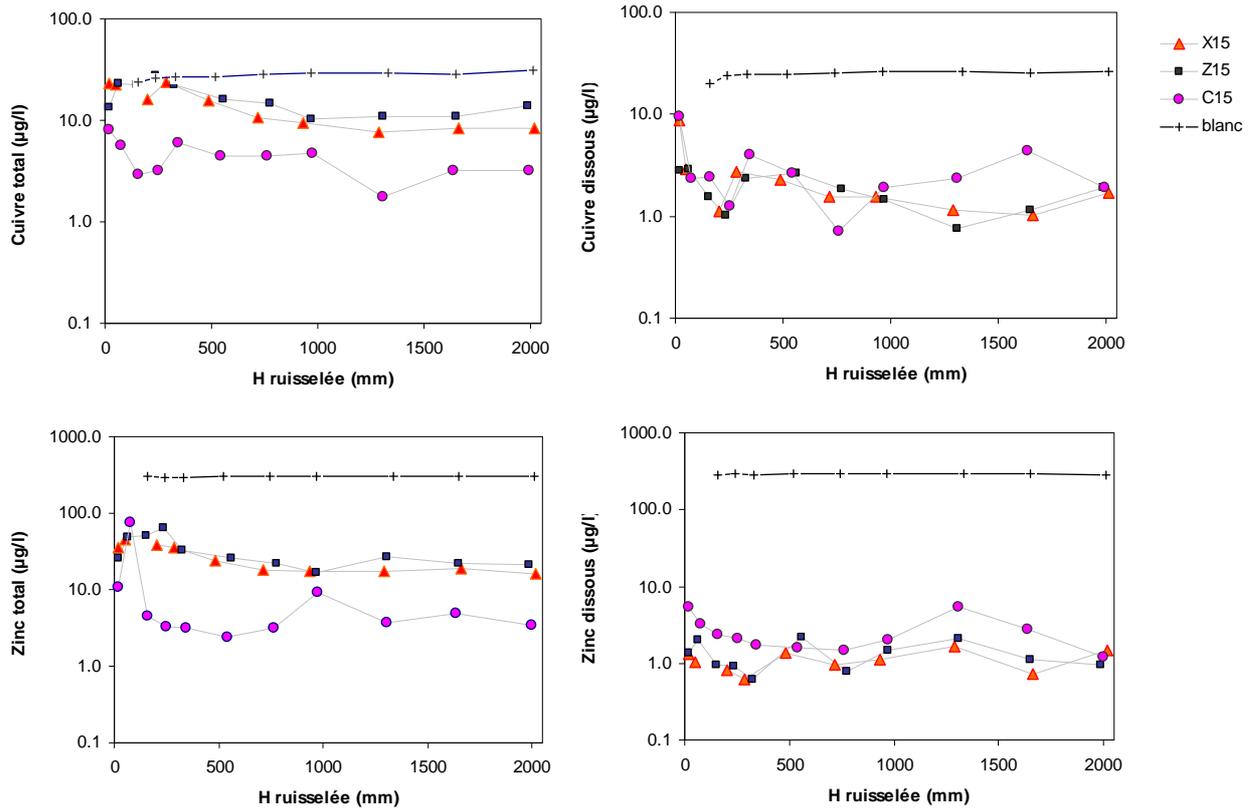


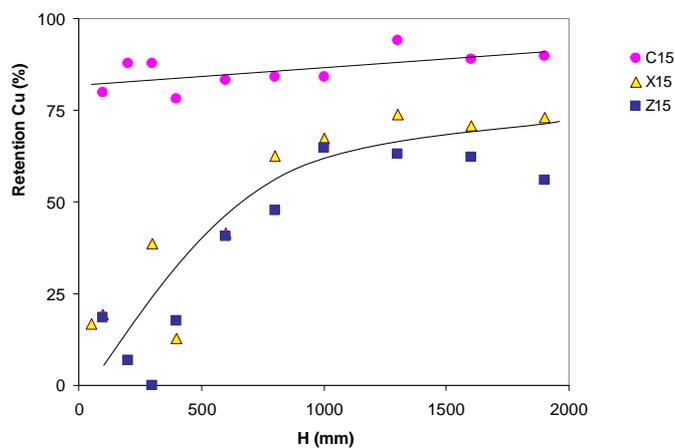
Figure 27: Evolution des métaux majeurs, exemple du manganèse

Les métaux Cuivre et Zinc ont été appliqués pour étudier la possible rétention des éléments traces métalliques par les toitures végétalisées. Leur comportement peut être décrit, contrairement au manganèse, non pas comme relargage, mais comme adsorption. Pour tous les substrats étudiés les concentrations à la sortie sont inférieures à celles appliquées. Cette différence est plus importante pour les dissous que pour les totaux, car une partie des entrants repart adsorbée sur les particules en suspension, accompagnée ou non de relargage du substrat contenant ces métaux.



**Figure 28: Evolution des métaux étudiés**

Dans la Figure 29 on peut observer aussi bien pour le cuivre que pour le zinc, que la rétention des métaux additionnés s'améliore au cours du temps. Si on prend le rapport de cuivre total additionné sur cuivre récupéré à un moment donné, on obtient l'évolution de la rétention comme dans le graphique 8. Le graphique montre bien les comportements différents entre le substrat « C » très organique et les substrats plus minéraux « X » et « Z ». Dans les trois cas on s'approche d'un plateau sans cependant épuiser la capacité d'absorption.



**Figure 29: Evolution de la capacité de rétention de cuivre total**

## 2.2. Effet de la hauteur du substrat

Dans cette partie de rapport on s'intéressera principalement à l'effet de la hauteur du substrat en comparant uniquement les substrats « C » et « X », qui ont été utilisés avec deux épaisseurs différentes de 7.5 cm et 15 cm.

L'effet de la hauteur de substrat est quantifié par régression linéaire entre les valeurs obtenues pour les deux hauteurs de chaque substrat. Le rapport  $h=15/h=8$  donné en Tableau 22 est le coefficient de régression  $dy/dx$  et non le rapport des deux équations issu d'une régression  $dC/dt$ .

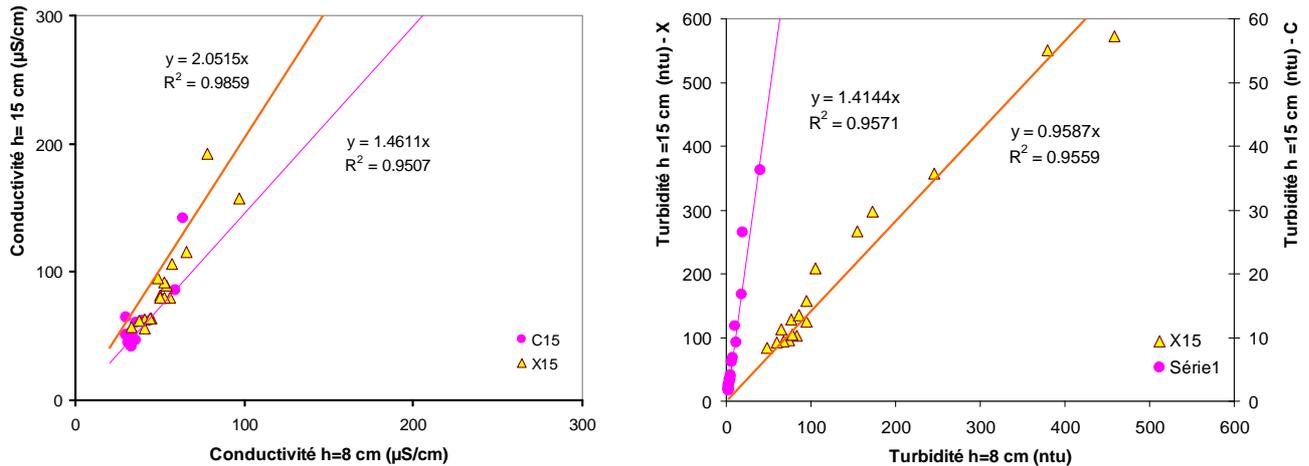


Figure 30: Effet de l'hauteur de substrat, exemple de conductivité et de turbidité

A partir des données de corrélation du Tableau 22 on peut constater que le doublement de hauteur du substrat « C » n'entraîne pas un doublement des concentrations de C et N, mais une augmentation d'environ 40%. En revanche, le doublement de l'épaisseur du substrat « X » entraîne un doublement des concentrations de carbone et d'azote à la sortie. La conductivité confirme ce comportement de mise en solution. Les particules, représentées par les paramètres MES et COP, sont mieux retenues que les dissous.

Les métaux montrent un autre comportement (Figure 31). Dans le cas de manganèse on observe, une corrélation satisfaisante entre les teneurs les deux hauteurs. Cependant la pente est proche de 1, indiquant absence d'effet de la hauteur, pour le substrat C, tandis qu'elle est de 1.39 pour le substrat X. Dans le cas du cuivre, on n'observe pas de corrélation entre les concentrations mesurées pour les 2 épaisseurs de substrat C, tandis que pour le substrat X la concentration en cuivre augmente faiblement lorsque l'épaisseur de substrat est doublée.

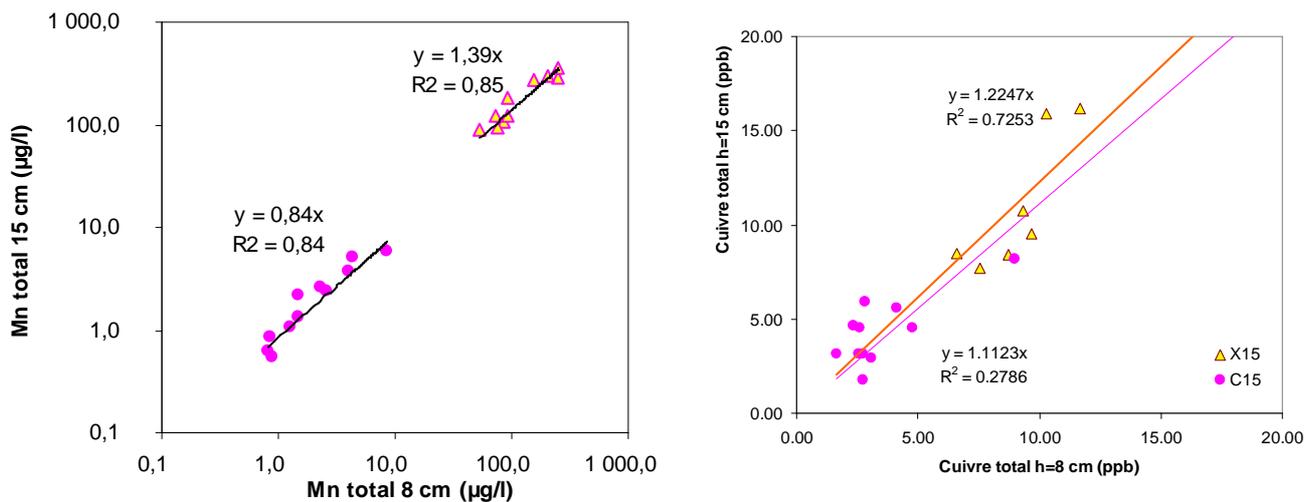


Figure 31: Absence de l'effet de l'hauteur, exemple de teneurs totales en Mn et en Cu

Tableau 22: Résumé des corrélations effectuées pour les différents paramètres pour les deux hauteurs 7.5 cm et 15 cm du substrat « C » et substrat « X ». n=11

	Substrat C		Substrat X	
	a	R <sup>2</sup>	a	R <sup>2</sup>
Conductivité	1.46	0.951	2.05	0.986
Turbidité	1.41	0.957	0.961	0.956
MES	1.21	0.923	1.44	0.896
DCOt	1.35	0.915	1.77	0.948
COD	1.42	0.864	2.01	0.912
COP	1.30	0.967	1.79	0.986
SUVA	0.925	0.879	0.774	0.909
Nt-diss	1.30	0.945	2.02	0.988
Ptot	1.33 (n=3)	0.978	1.63	0.900

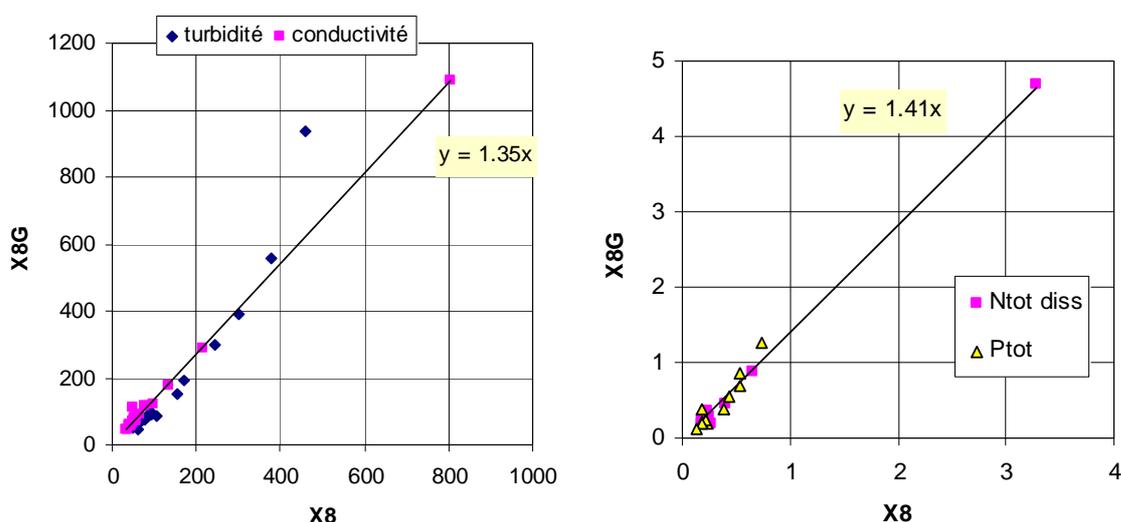
### 2.3. Effet de la nature du matériau de drainage

Pour le substrat X, en épaisseur 7.5 cm, les essais ont été effectués sur deux colonnes équipées d'un matériau de drainage différent : du polystyrène pour X8 et de la pouzzolane pour X8g.

Pour la plupart des paramètres, le drainage en pouzzolane conduit à une légère augmentation des concentrations des eaux percolées. Cette augmentation est de l'ordre de 30 à 40 % tout au long de l'expérimentation pour les paramètres dissous. Pour les contaminants particulaires, le lessivage des fines particules qui entourent la pouzzolane (le matériau n'était pas préalablement lavé et ne l'est pas non plus lors de sa mise en œuvre sur les TTV) conduisent à des émissions beaucoup plus fortes au cours des premiers 100 mm ruisselés. Ainsi la turbidité initiale, les MES et le COP initiaux sont deux fois plus élevés dans le cas du drainage pouzzolane. Cette différence s'estompe après les 300 premiers mm de percolation.

**Tableau 23 : Comparaison des constantes et coefficients de la loi de décroissance au cours du temps des concentrations émises, dans le cas d'un drainage en polystyrène (X8) et d'un drainage en pouzzolane (X8g)**

	Conductivité (µs/cm)				Turbidité (NTU)			
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>	C <sub>f</sub>	C <sub>a</sub>	k	r <sup>2</sup>
X8	48	699	84	0.929	62	432	263	0.996
X8g	70	873	57	0.926	72	808	139	0.974
	Azote dissous, total (mg-N/l)				DCO <sub>t</sub> (mg-O2/l)			
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	k	r <sup>2</sup>	C <sub>f</sub>	C <sub>a</sub>	k	r <sup>2</sup>
X8	0.2	4.8	39	0.99	14	161	271	0.978
X8g	0.2	5.1	31	0.982	18	272	142	0.934



**Figure 32 : Corrélation linéaire entre les concentrations mesurées pour le drainage polystyrène (X8) et pour le drainage pouzzolane (X8g)**

### **Partie 3. - EVALUATION DU POTENTIEL D'EMISSION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES PAR LESSIVAGE DES MATERIAUX CONSTITUTIFS D'UNE TTV - CAS DES ALKYLPHENOLS ET DU BISPHENOL-A**

De nombreuses molécules de synthèse organiques entrent dans la composition des matériaux urbains, dont les matériaux constitutifs des TTV. Le risque d'émission dans les eaux ruissellement de ces molécules, souvent présentes à l'état de trace dans les matériaux, est très mal évalué actuellement. Des travaux menés précédemment en Suisse ont identifié des émissions de certains micropolluants organiques.

Cette tâche vise à caractériser et quantifier le potentiel d'émissions d'alkylphénols (AP), et bisphénol A (BPA) par lessivage des matériaux constitutifs d'une toiture végétalisée entrant en contact avec de l'eau de pluie. Pour atteindre cet objectif, des essais de lixiviation en conditions statiques en essayant de se placer dans des conditions d'extraction élevée seront mis en œuvre sur des matériaux choisis. De plus, des tests complémentaires en simulation de pluie en conditions contrôlées seront effectués. Ce rapport présente les matériaux sélectionnés ainsi que les méthodologies mises en place en laboratoire.

## **3. Dispositifs expérimentaux**

### **3.1. Sélection de produits et description**

Compte tenu de la grande variété des matériaux proposés dans le domaine de la construction des toitures végétalisées nous avons décidé d'étudier d'une part, les matériaux traditionnellement employés dans le domaine et représentatifs du marché français, et d'autre part, les matériaux constitutifs des toitures végétalisées mises en place dans le cadre de ce projet. Les produits considérés pour cette étude sont : les membranes d'étanchéité bitumineuses SBS, les couches de drainages en polystyrène et en polyéthylène recyclé, les couches filtrantes (géotextile en polyester non-tissé), les substrats monocouche et les gouttières en PVC (voir Tableau 24). Pour chacun des produits sélectionnés, entre 1 et 3 échantillons seront testés.

**Tableau 24. Produits de construction de toitures végétalisées sélectionnées**



Membranes d'étanchéité SBS



Drainage en polystyrène expansé



Drainage nid d'abeille en polypropylène recyclé



Natte de drainage en polyamide/ polyéthylène



Géotextile



Substrats



Descentes de gouttières en PVC

### Membrane d'étanchéité SBS

2 échantillons de membranes neuves, correspondant aux membranes mises en œuvre sur le toit expérimental du Cete Ile de France (TVGEP) et sur celui du Cete de l'Est, ont été testés.

Les membranes d'étanchéité sont constituées d'une armature en fibres de polyester non-tissé et de bitume élastomère composé par un mélange de bitume sélectionné et de polymères thermoplastiques SBS. La masse bitumineuse contient des agents anti-racines empêchant la pénétration des racines à travers le complexe étanche. La face supérieure est protégée par une autoprotection minérale « paillettes ardoise » et la face inférieure est recouverte d'un film thermo-fusible.

### Couche de drainage

3 types de matériaux de drainage ont été testés : plaques de polystyrène expansé (matériau mis en œuvre sur le toit expérimental du Cete Ile de France, pour TVGEP), nid d'abeille en polypropylène extrudé et natte de drainage en polyamide/polyéthylène.

- La couche de drainage en polystyrène expansé est une plaque alvéolée et perforée de 36 mm d'épaisseur avec une densité de  $25 \text{ kg/m}^3$  et un poids de  $0,7 \text{ kg/m}^2$ .

- La couche de drainage en polypropylène est une plaque à structure en nid d'abeille de maille 50 mm en polypropylène noir issu à 60 % de polypropylène recyclé. Elle reçoit sur une face un parement spécifique en non-tissé noir résistant et filtrant.

- La natte de drainage est composée d'un tissu géotextile monofilament léger en polyamide doublé et d'une natte filtrante non tissée en polyamide et polyéthylène. Elle a une épaisseur de 20 mm et un poids surfacique total de  $0.5 \text{ kg/m}^2$ .

### Couche filtrante

La couche filtrante testée est celle mise en œuvre sur le toit expérimental du Cete Ile de France dans le cadre de TVGEP. Il s'agit d'un géotextile non-tissé de fibres synthétiques continues en polypropylène. Les fibres sont uniformément réparties et thermosoudées. La masse surfacique de ce matériau est de  $0,1 \text{ kg/m}^2$ .

### Substrat

3 substrats ont été testés. Ils correspondent aux 2 substrats mis en œuvre sur sur le toit expérimental du Cete Ile de France dans le cadre de TVGEP (substrat extensif X et substrat intensif Z) ainsi que du substrat C mis en œuvre sur les bancs expérimentaux du CSTB de Champs sur Marne.

Les substrats sélectionnés sont composés d'un mélange d'environ 10 % de matières organiques (turbe et écorce) et 70 % de matières minérales (roche volcanique pouzzolane) ayant une granulométrie comprise en 4 et 17 mm. Le substrat est de pH neutre et de densité 0,7 à sec et 1,4 à capacité maximale en eau.

#### Descentes de gouttière en PVC

Dans le domaine d'évacuation des eaux pluviales, le polychlorure de vinyle (PVC) utilisé pour la fabrication des tuyaux et raccords est généralement du PVC non plastifié ou PVC-U. Les gouttières et descentes de gouttière en PVC sont des éléments opaques et fréquemment de couleur gris pastel ou beige. Les descentes gouttières utilisées dans cette étude sont circulaires avec un diamètre intérieur de 750 et 950 mm et une épaisseur de 2 mm. Trois descentes de gouttière neuves (dont celle mise en œuvre sur le toit expérimental du Cete Ile de France), et deux gouttières usagées ont été testées.

## **4. Méthodologie**

Dan le but de déterminer les possibles émissions des alkylphénols (AP) et du bisphénol-A (BPA) par les produits choisis, trois approches seront prises en compte.

Les substrats ont fait l'objet d'une analyse directe, après broyage et extraction.

Pour les autres matériaux, nous avons procédé à des essais de lixiviation en condition statique, au méthanol puis à l'eau distillée afin de déterminer la présence ou absence des AP, BPA dans les produits à tester et leur potentiel de migration dans l'eau.

Une approche par simulation de pluie a permis de quantifier l'émission de ces substances dans les eaux de ruissellement, dans des conditions d'essais plus proches des conditions naturelles, pour la membrane d'étanchéité et la descente de gouttière.

#### Précautions de manipulations et solvants

Afin de garantir la qualité des résultats des précautions de manipulation sont prises :

- Le matériel employé est de préférence en verre, préalablement trempé (24h) au détergent TFD 4 (environ 5 %), rincé à l'eau du robinet et ensuite à l'eau osmosée. Après séchage, le matériel est recouvert de papier aluminium puis grillée au four à 500 °C pendant 2h.
- Les molécules étudiées étant à l'état de trace, photosensibles et s'adsorbant facilement sur les parois des contenants, les échantillons sont donc conservés à l'abri de l'air et de la lumière.
- Les solvants employés sont de qualité chromatographique : le dichlorométhane, le méthanol et l'éthylacétate (Suprasolv, Merck).

#### Préconditionnement

Avant le début des essais de lixiviation ou d'extraction, un préconditionnement des échantillons est effectué.

Les substrats de toitures végétalisées ont été broyés à l'aide d'un mortier en acier et ensuite tamisés avec un tamis métallique de taille de maille de 2 mm. Ces échantillons ont été par la suite lyophilisés pendant 48h (Alpha 1-2 LD Plus, Bioblock Scientific).

Les autres échantillons, sont nettoyés à l'eau osmosée et ensuite rincés avec du méthanol afin d'éliminer la contamination superficielle. Ils sont ensuite finement coupés (taille inférieure à 4 mm).

Tous les échantillons sont ensuite stockés dans des bouteilles en verre brun jusqu'à leur utilisation. Les échantillons lyophilisés sont conservés en chambre froide à 4 °C.

### Essais de lixiviation en conditions statiques

#### *Lixiviation au méthanol*

Pour la plupart des matériaux, le ratio liquide solide (L/S) employé est de 10. Ce ratio est préconisé par la norme NF EN 12457-2 sur la caractérisation des déchets -Lixiviation- Essais de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Des études scientifiques conduites sur la lixiviation en conditions statiques des matériaux de construction emploient également un ratio L/S de 10 (Legret et al. 2005, Schioppa 2007, Vahcic et al. 2008). Pour des raisons pratiques, les essais de lixiviation ont été conduits sur dix grammes d'échantillon mis en contact avec 100 mL de méthanol.

Le ratio L/S a du être modifié lors des essais conduits sur les matériaux ayant une masse volumique faible (couche de drainage en polystyrène, natte de drainage et géotextile). Ainsi, pour la couche de drainage en polystyrène un ratio L/S de 80 est utilisé (1 g de polystyrène dans 80 mL du méthanol). Pour la natte de drainage et le géotextile le ratio L/S employé est de 20 (5 g de natte de drainage dans 100 mL de méthanol et 1 g de géotextile dans 20 mL de méthanol).

Les essais de lixiviation au méthanol se sont déroulés pendant 24h et à température ambiante (20 °C) et sous agitation. Les récipients employés sont des flacons en verre brun avec des bouchons en téflon préalablement lavés.

A la fin de la lixiviation, les solutions de méthanol sont dopées par ajout de 50 µL d'étalon interne d'extraction composé de 3 molécules deutérées (BPA-d6, NP1EO-d2 et n-OP-d17). Ces étalons internes permettront d'évaluer le rendement d'analyse pour les composés ciblés. La totalité de l'éluat est ensuite filtrée puis évaporé à sec et repris dans 500 µL d'un mélange eau/méthanol (50/50, v/v). Une purification est effectuée en phase solide (SPE) sur des cartouches Oasis® HLB. Les extraits sont conservés au congélateur jusqu'à analyse au LC-MS/MS.

#### *Lixiviation dans l'eau*

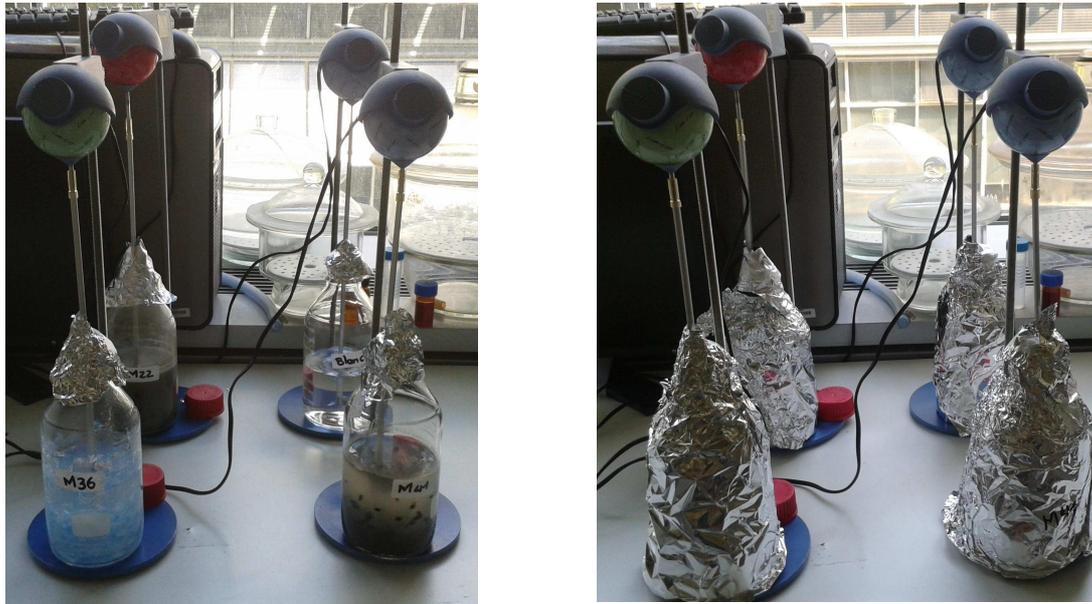
Les essais de lixiviation dans l'eau ultrapure (Elga) ont été réalisés sur les matériaux présentant les plus fortes valeurs de concentration de BPA et/ou des AP lors de la lixiviation au méthanol : membrane d'étanchéité (1 seul échantillon retenu pour ce test car très peu de différence entre les 3 échantillons testés au méthanol) et gouttières PVC (les 5 gouttières ont été lixiviées à l'eau car les profils d'émission au méthanol différaient entre les 5 échantillons).

Pour les essais de lixiviation dans l'eau ultrapure, nous avons décidé de conserver le ratio L/S de 10 employé pendant les essais de lixiviation au méthanol. Cependant, la masse de matériau et le volume d'eau utilisés ont été multipliés par cinq afin d'avoir un volume d'eau suffisant pour l'extraction des AP et BPA et d'effectuer des analyses complémentaires telles que : mesure de pH, conductivité, absorbance à 254 nm et concentration en carbone organique dissous (COD).

Le ratio L/S égal à 10 n'a pas été respecté pour la couche de drainage en polystyrène ni pour le géotextile en raison de leur faible masse volumique. Les ratios L/S employés ont été donc de 59

pour la couche de drainage en polystyrène (9 g de polystyrène en 527 mL d'eau) et de 50 pour le géotextile (20 g de matériaux en 1000 mL d'eau).

Les essais de lixiviation dans l'eau se sont déroulés pendant 48 h, à température ambiante (20°C) et sous agitation. Un blanc (l'eau ultrapure mise dans les mêmes conditions expérimentales) a été réalisé lors de chaque série d'essais. Les récipients employés sont des flacons en verre transparent d'un litre. Les flacons ont été entourés de papier aluminium pour éviter la photo-dégradation de molécules ciblées. La Figure 33 illustre le dispositif expérimental.



**Figure 33 : Dispositif expérimental de lixiviation à l'eau distillée pour les matériaux de construction**

A la fin de la lixiviation, les échantillons sont filtrés sous vide sur une membrane filtrante GF/F en fibre de verre préalablement calcinée à 500 °C. Des mesures de pH, conductivité, absorbance à 254 nm, COD, alkylphénols et bisphénol-A sont réalisées sur le filtrat.

Le filtrat destiné à l'analyse de AP et du BPA est dopé par ajout de 50 µL d'étalon interne d'extraction composé de 3 molécules deutérées (BPA-d6, NP1EO-d2 et n-OP-d17) et laissé une nuit en chambre froide (4°C) pour mise en équilibre. L'extraction est ensuite réalisée en phase solide (SPE) sur des cartouches Oasis® HLB. Les extraits sont conservés au congélateur jusqu'à analyse au LC-MS/MS.

### Essais de simulation de pluie

Les essais de « simulation de pluie » ont été réalisés au laboratoire, en conditions contrôlées, sur un échantillon de membrane d'étanchéité (0.07 m<sup>2</sup>) et un échantillon de gouttière (0.02 m<sup>2</sup>). Ils s'appuient sur la méthodologie de simulation de pluie développée par Van de Voorde 2012.

La pluie a été générée au moyen d'un générateur de gouttes à disque tournant de marque Sprai SAS. Ce dispositif permet de contrôler à la fois la taille des gouttes générées et l'intensité de la pluie.

Dans ce travail, des intensités de pluie constantes, de l'ordre de 7 à 11 mm/h ont été utilisées, et la vitesse de rotation du disque a été choisie pour produire des tailles de gouttes de l'ordre de 0.8 à 1.2 mm. Ces choix correspondent aux caractéristiques des pluies courantes en Ile de France. Une

durée de pluie totale de 2h a été simulée afin de collecter un volume de ruissellement par échantillon suffisant pour l'analyse (de l'ordre de 500 ml).

Une eau de pluie synthétique e été constituée en diluant de l'eau minérale Volvic avec de l'eau osmosée (dilution d'un facteur 21). Cette eau présente un pH proche de la neutralité et une composition ionique comparable à celle de l'eau de pluie en milieu urbain. Une analyse préalable des concentrations en BPA et en APEO a montré l'absence de contamination significative de ces eaux.

**Tableau 25. Concentration des minéraux majeurs dans l'eau de Volvic (brute et diluée) et l'eau de pluie (Van de Voorde, 2012)**

Minéraux	Eau Volvic (mg/L)	Eau Volvic diluée (mg/L)	Pluie en milieu urbain (mg/L) (Garnaud, 1999)
Calcium Ca <sup>2+</sup>	11,5	0,55	0,7
Magnésium Mg <sup>2+</sup>	8	0,38	-
Sodium Na <sup>+</sup>	11,6	0,55	0,6
Potassium K <sup>+</sup>	6,2	0,29	0,5
Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	8,1	0,38	1,2
Carbonates HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71	3,4	3,5
Nitrates NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6,3	0,29	-
Chlorures Cl <sup>-</sup>	13,5	0,64	1,8
Silice	31,7	1,5	-
Fluor	0,22	0,01	-
<b>TOTAL</b>	<b>168</b>	<b>8</b>	<b>8,3</b>

**Tableau 26. Concentration des AP et du BPA (ng/L) dans l'eau Volvic et l'eau osmosée**

	BPA	4-NP	NP1EO	NP2EO	OP	OP1EO	OP2EO	NP1EC
Eau Osmosée 1	< L.D	23	6	< L.D	3	< L.D	< L.D	< L.D
Eau Osmosée 2	8	17	5	< L.D				
Eau Volvic 1	< L.D	15	2	< L.D	2	< L.D	< L.D	< L.D
Eau Volvic 2	< L.D	28	4	< L.D				

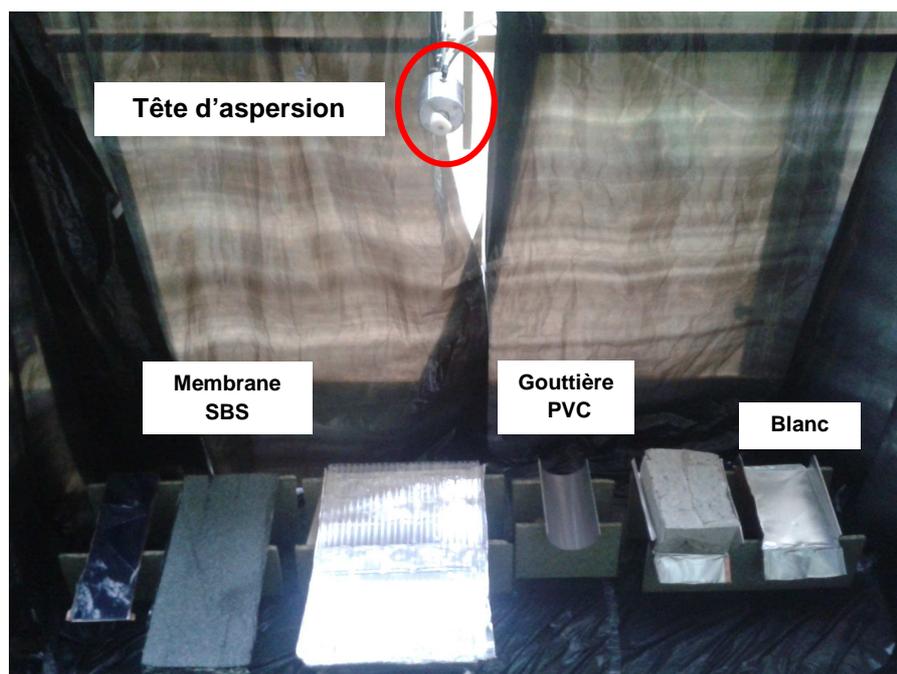


Figure 34. Montage expérimental pour les essais de simulation de pluie

La simulation de pluie a été réalisée en simultanée sur un échantillon de membrane, un échantillon de gouttière, et sur une plaque en aluminium qui servait à collecter le blanc. Elle a été reproduite 2 fois, sur 2 échantillons différents de chaque matériau, à une semaine d'intervalle.

Les eaux de ruissellement ont été collectées dans des flacons en verre et traitées en suivant le même protocole d'analyse que celui employé pour les éluats obtenus par la lixiviation à l'eau distillée.

## 5. Résultats

### 5.1. Analyse des substrats

Les concentrations en OP, OPEO et NP1EC mesurées dans les substrats de toitures végétalisées sont inférieures aux limites de quantification. Pour les NPEO les concentrations restent proches de la concentration mesurée dans le blanc d'analyse. Il en est de même pour la concentration du BPA pour les substrats X et Z et la concentration du NP dans les substrats Z et C. En revanche, la concentration en NP pour le substrat X et la concentration en BPA pour le substrat C sont respectivement 14 et 3,5 fois supérieures aux concentrations mesurées dans le blanc (Tableau 13).

Tableau 13. Concentration en alkylphénols et bisphénol-A (ng/g) dans les substrats de toitures végétalisées (Z et X = substrat mis en œuvre sur le toit expérimental de TVGEP au Cete Ile de France).

Echantillon	BPA	4-NP	NP1EO	NP2EO	OP	OP1EO	OP2EO	NP1EC
L.Q	5	3	2	1	5	3	2	3
Blanc	8	30	8	< L.Q				
Z (semi intensif)	8	50	7	5	< L.Q	< L.Q	< L.Q	< L.Q
X (extensif)	8	103	< L.Q	8	< L.Q	< L.Q	< L.Q	< L.Q

C (extensif)	115	30*	4*	7*	< L.Q*	< L.Q*	< L.Q*	< L.Q*
--------------	-----	-----	----	----	--------	--------	--------	--------

\*Rendement d'extraction inférieur au 40%.

A partir de ces résultats nous pouvons considérer que l'apport des substrats à la contamination en AP et BPA transporté dans les eaux de ruissellement des toitures végétalisés est très faible voire inexistant, à l'exception du BPA pour le substrat C. Cependant, une deuxième analyse des AP et BPA serait souhaitable sur le substrat C.

## **5.2. Lixiviation au méthanol**

La Figure 35 met en évidence la présence des AP et/ou du BPA dans les différents matériaux testés, en ng de composé lixivié dans le méthanol par g de matériau mis en contact, après déduction de la concentration mesurée dans le blancs de lixiviation.

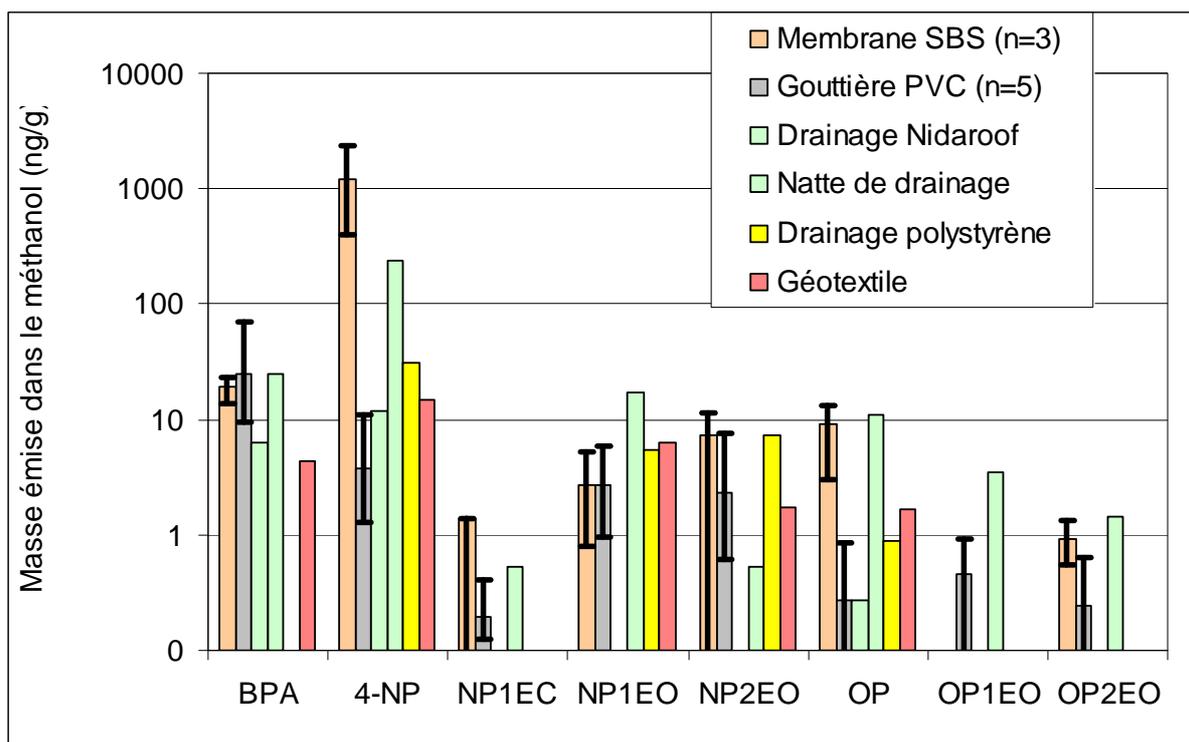
Les valeurs mesurées pour les membranes d'étanchéités sont données à titre indicatif en raison des mauvais rendements d'extraction obtenus lors de l'analyse. Cet effet est provoqué par des interférences avec d'autres composés issus des matrices analysées qui ont altéré la détection des composés recherchés.

Les membranes d'étanchéité présentent des émissions très fortes en 4-NP (entre 400 et 2400 ng/g) ainsi que des émissions sensibles en BPA (14 à 23 ng/g). L'OP est également émis mais à des concentration 10 fois inférieures au 4-NP (3 à 13 ng/g).

Les gouttières en PVC émettent majoritairement du BPA (9 à 70 ng/g), et en quantité moindre des composés nonylphénoliques : 4 NP (1 à 11 ng/g), NP1EO (1 à 6 ng/g) et NP2EO (0.6 à 7.5 ng/g). Les composés octylphénoliques sont également détectés, à des concentrations 10 fois inférieures au nonylphénol (OP : 0.1 à 0.9 ng/g).

Les composés relargués et les concentrations mesurées dans les éluats des matériaux de drainage et géotextile varient d'un échantillon à l'autre. Toutefois, le 4-NP reste de loin le composé relargué aux plus fortes concentrations (240 ng/g pour la natte de drainage, 31 ng/g pour la couche de drainage en polystyrène, 15 ng/g pour le géotextile et 12 ng/g pour la couche de drainage Nidaroo). Les NPEO sont également présents dans le drainage polystyrène, le géotextile et la natte de drainage, mais à ces teneurs inférieures à celles du 4-NP. L'octylphénol (OP) est détecté à des concentrations 10 à 30 inférieures à celles du 4-NP (natte de drainage : 11 ng/g, géotextile : 1.7 ng/g, polystyrène 1 ng/g).

Le BPA est relargué uniquement par 3 des 4 matériaux de drainage analysés. Il s'agit de la couche de drainage Nidaroo (6 ng/g), la natte de drainage (25 ng/g) et le géotextile (4 ng/g).



**Figure 35 : Emissions de bisphénola et d'alkylphénols**

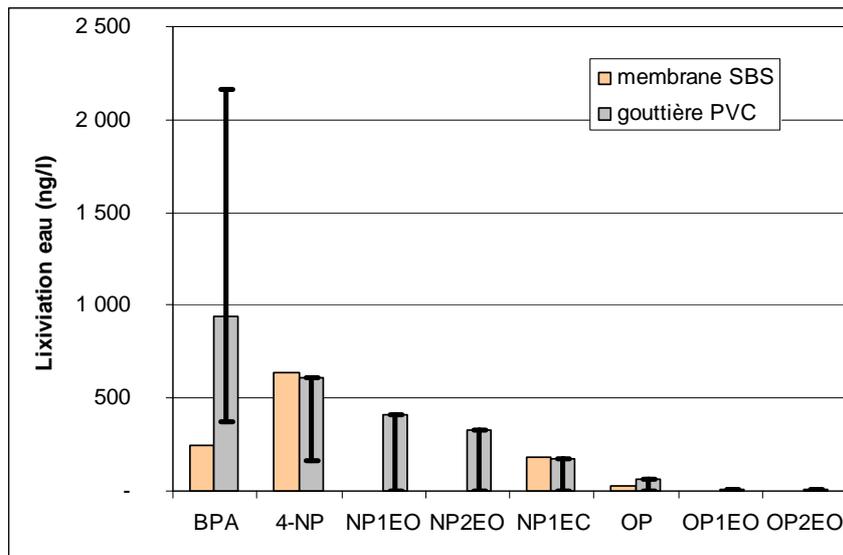
(4-NP = nonylphénol, NP1EO = nonylphénol 1 éthoxylé, NP2EO = nonylphénol 2 éthoxylé, NP1EC = nonylphénol 1 carboxylé, PO = octylphénol, OP1EO = octylphénol 1 éthoxylé, OP2EO = octylphénol 2 éthoxylé) lors de la lixiviation au méthanol (en ng de composé émis par g de matériau, après soustraction de la valeur du blanc)

Ces résultats sont cohérents avec les usages connus du bisphénola et des alkylphénols. Dans le domaine de production des membranes d'étanchéité SBS, le NP est employé pour la synthèse de sulfates d'éther de nonylphénol. Ce dernier intervient comme émulsifiant lors de la fabrication du monomère styrène et styrène butadiène (ECB 2010). Pour le BPA, OP et NPEO, la littérature consultée ne rapporte pas d'information sur leur usage dans la fabrication des membranes en bitume modifié. Le 4-NP est par ailleurs employé en tant que stabilisant de matières plastiques, les NPEO sont employés comme additifs dispersants lors de la fabrication des matières plastiques polymérisées par émulsion et les OPEO en tant qu'agents émulsifiants pour la synthèse de polymères. Le 4-NP est également utilisé dans la production du TNPP (trinonylphénol phosphite) lequel sert comme antioxydant secondaire dans les formulations de polymères (polyéthylène, polystyrène, PVC ...) et comme stabilisateur pour certains polymères (vinyliques, polyoléfine, polystyrène, polycarbonate). La littérature rapporte la production non volontaire d'OP lors de la synthèse du NP commercial à une hauteur de 3 à 5% (OSPAR 2003). Plusieurs rapports scientifiques signalent l'utilisation du BPA en tant que monomère dans la synthèse de certains polymères (polyester carbonate, polyarylates, polysulfones, polyols, entre autres) (ECSC 2008, INERIS 2010, ANSES 2011). ECB, 2003a signale l'emploi du BPA dans le domaine de production du PVC en tant que antioxydant dans le traitement du PVC, constituant d'un pack d'additif pour le traitement du PVC, agent antioxydant dans la

production de plastifiants utilisés dans la transformation du PVC, et agent inhibiteur pendant la phase de polymérisation du PVC (avant 2003).

### 5.3. Lixiviation à l'eau

La lixiviation à l'eau a été menée uniquement sur les deux types de matériaux qui présentaient les émissions les plus fortes dans le méthanol : membrane d'étanchéité SBS et gouttières en PVC. Les résultats sont présentés en Figure 36 (après déduction de la concentration du blanc de lixiviation) pour la membrane et la descente de gouttière mises en œuvre sur la toiture expérimentale de TVGEP au Cete Ile de France. Pour la gouttière, la fourchette de valeurs indiquée correspond aux concentrations minimum et maximum mesurée pour 5 gouttières en PVC d'origines diverses.



**Figure 36 : Concentration mesurées lors de la lixiviation à l'eau distillée de la membrane d'étanchéité et des plusieurs gouttières en PVC (pour les gouttières la barre correspond à la gouttière installée sur le toit du Cete Ile de France, et la fourchette aux valeurs minimum et maximum sur 5 échantillon de gouttières d'origines différentes)**

Dans le cas de la membrane SBS les 4 composés suivants ont pu être quantifiés à des concentrations décroissantes : 4-NP (638 ng/l) > BPA (245 ng/l), NP1EC (182 ng/l) > OP (24 ng/l).

Dans le cas de la gouttière PVC le nombre de composé quantifié est plus important, le composé majoritaire étant le BPA : BPA (944 ng/l) > 4-NP (611 ng/l) > NP1EO (411 ng/l) > NP2EO (327 ng/l) > NP1EC (171 ng/l) > OP (64 ng/l) > OP1EO (12 ng/l) > OP2EO (11 ng/l).

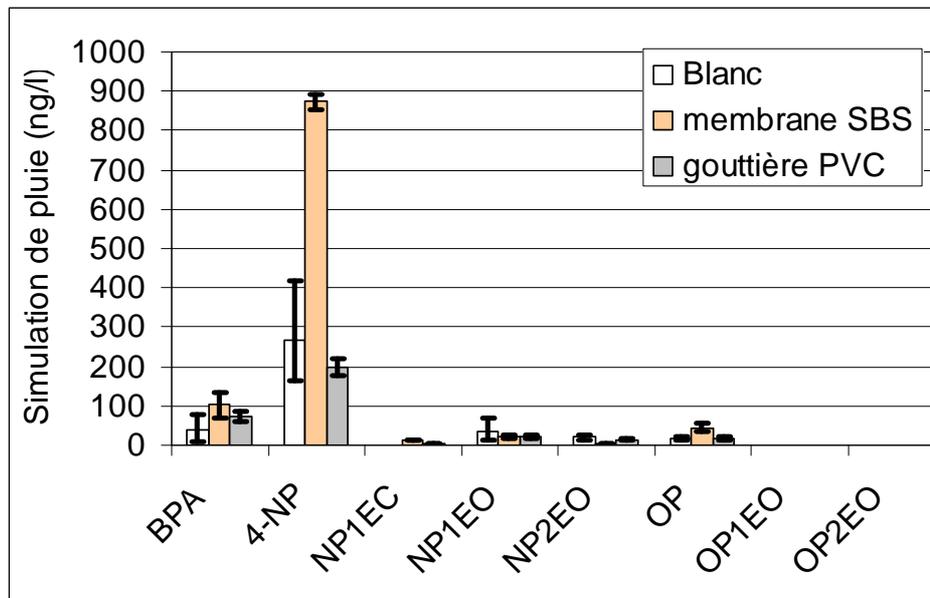
Les deux matériaux présentent les mêmes niveaux d'émission de 4-NP et NP1EC, mais des émissions plus importantes en BPA, NPEO et OP pour les PVC. Il est à noter que parmi les 5 gouttières testées c'est la gouttière mise en œuvre sur le banc de toiture de TVGEP qui présente les émissions les plus fortes.

### 5.4. Simulation de pluie

Les deux matériaux testés en lixiviation à l'eau ont également été testés sous conditions de pluie simulée. Cet essai, conçu pour être plus représentatif de l'exposition réelle in situ, est assez différent de la lixiviation en termes des durées et surface de contact entre le matériau et l'eau.

Dans le cas de la pluie, seule la surface du matériau entre en contact avec l'eau et la durée de contact est brève.

Les blancs effectués lors des simulations de pluie ont fait apparaître une forte contamination en 4NP et dans une moindre mesure en BPA de l'eau de pluie synthétique utilisée. Des essais complémentaires ont montré que cette contamination était imputable à l'osmoseur neuf mis en service juste avant la simulation de pluie (aucune contamination n'avait été mesurée sur l'eau produite par l'ancien osmoseur utilisé lors de la lixiviation).



**Figure 37 : Concentrations en bisphenolA (BPA) et alkylphénols dans les eaux de ruissellement d'une membrane d'étanchéité SBS et d'une gouttière sous pluie simulée (moyenne et valeurs des 2 répétitions)**

Une fois les concentrations du blanc déduite, on observe :

- une émission importante de 4NP ( $\approx 600$  ng/l), et plus faible de BPA (64 ng/l) et d'OP (26 ng/l) par la membrane d'étanchéité ;
- une émission faible de BPA (34 ng/l) par la gouttière en PVC.

Ces profils d'émission sont assez différents de ceux obtenus en lixiviation, avec des émissions plus fortes par la membrane d'étanchéité que par la gouttière PVC pour le BPA et le 4NP.

Les résultats suggèrent un stock de 4NP et de BPA présent en surface de la membrane d'étanchéité et facilement mobilisable, tandis que pour le PVC ces composés seraient plutôt présents dans la masse et peu disponibles en surface du matériau.

D'après ces essais, l'étanchéité ainsi que les descentes de gouttière en PVC pourraient constituer une source de contamination en BPA et en 4NP des eaux de ruissellement des toitures terrasse. Des biais sont cependant possibles du fait de la forte concentration de l'eau d'arrosage.

## 6. Conclusion

Dans le cadre du projet TVGEP, nous avons cherché à caractériser le potentiel de contamination des eaux de ruissellement par les matériaux constituant les structures de végétalisation de toiture.

Le travail réalisé comportait :

- une classification des matériaux utilisés dans les structure de végétalisation, et une identification, sur la base des données de la littérature, des composés susceptibles d'entrer dans la composition de ces matériaux et des contaminant pouvant potentiellement être émis par ces matériaux,
- des essais sous pluie simulée de lessivage accéléré des substrats, destinés à étudier la dynamique d'émission des matières en suspension, du carbone organique, des nutriments et des métaux
- des essais de lixiviation des matériaux synthétiques couramment utilisés pour la construction des TTV, destinés à identifier le potentiel d'émission dans l'eau de certains micropolluants organiques.

En ce qui concerne les matériaux synthétiques entrant dans la structure des TTV (étanchéité, drainage, couche filtrante), la synthèse bibliographique met en évidence la présence d'une variété d'adjuvants, dont certains présentent un potentiel éco-toxicologique. Les données techniques sur la présence effective de ces composés dans les matériaux commercialisés sont quasi inexistantes. Les données scientifiques sur les facteurs de transfert dans les eaux de ruissellement sont extrêmement lacunaires. Les essais réalisés dans le cadre du projet TVGEP, confirment la présence ubiquiste des deux types de micropolluants organiques recherchés (bisphénol-A et alkyl-phénols) et leur transfert dans les eaux de ruissellement à des concentrations parfois significatives. Le transfert vers les eaux de ruissellement d'autres micropolluants organiques est donc également à craindre. Ces essais démontrent également la très grande variabilité des matériaux en termes de composition (teneur du composé recherché dans le matériau) et comportement émissif (facteur d'émission du composé dans els eaux de ruissellement). Le choix des matériaux entrant dans la composition des structures devrait donc prendre en considération ce risque de contamination des eaux de ruissellement. Cependant, les éléments actuellement disponibles ne permettent pas d'orienter ces choix de manière objective. La mise en place de procédures standardisées et systématiques de caractérisation des matériaux vis-à-vis de leur potentiel d'émissions de composés dans les eaux de ruissellement est préconisée. La nature des essais à mettre en place n'a pas été définie dans ce projet et nécessite une réflexion complémentaire.

En ce qui concerne les émissions liées aux couches de substrats et de végétaux, les essais réalisés dans le cadre de TVGEP confirment des résultats cités dans la littérature :

- au cours des premiers mois après la mise en œuvre de la toiture, les eaux de percolation présentent une forte coloration, et des concentrations importantes en carbone organique et nutriments.

- ces concentrations diminuent très rapidement au cours de la 1ere année, pour atteindre des niveaux relativement faibles. Des émissions persistantes peuvent cependant être observées pour le carbone organique et le phosphore.
- Les pratiques de fertilisation des toitures sont susceptibles de générer des concentrations importantes d'azote et surtout de phosphore dans ces eaux.

Il convient d'avoir recours à un usage raisonné de la fertilisation. Celle ne devrait pas être pratiquée de façon systématique et répétitive, mais uniquement lorsque l'inspection de la toiture en démontre le besoin. Les quantités de fertilisant apportées doivent être modulées en fonction du type plantes et de leurs besoins.

Les substrats utilisés en végétalisation de toiture peuvent contenir des matériaux d'origine diverses, y compris dans certains cas des matériaux recyclés. Là encore des procédures standardisées de lixiviation de ces substrats devraient être développées et appliquées de façon systématique à tous les produits commercialisés afin de mieux qualifier le risque de lessivage par les eaux pluviales.

## Listes des figures et de tableaux

### Liste des figures

Figure 1: Constitution physico-chimique des bitumes (Cognard 2005b).....	5
Figure 2: Composition d'une feuille bitumineuse(Remolu and Lauby 2007).....	6
Figure 3: Composition d'une membrane PVC-P (Remolu and Lauby 2007).....	6
Figure 4: a. La couche de drainage représentée dans cette figure, représente aussi une propriété de rétention de l'eau, avec la fonction du drainage, c'est le cas du Bac Canalis (SMAC 2007); b. la couche de drainage est en granulats minéraux (pouzzolane) assurant la fonction du drainage et la rétention de l'eau, mais moins efficace que la première en tant que rétention (SMAC 2007); c. la couche de drainage assure seulement la fonction du drainage (SIPLAST 2007a).....	9
Figure 5 : Eléments et couches constitutifs d'une toiture végétalisée .....	10
<b>Figure 6: Structure chimique des phtalates(Sailienfait and Laudet-Hesbert 2005a) .....</b>	<b>12</b>
Figure 7: Composition chimique des phosphates (Verrier 1992).....	14
Figure 8: Structure de base d'un stabilisant étain (Girois 2004).....	17
Figure 9: Structure chimique du Preventol B2 et de son produit d'hydrolyse le mécoprop .....	18
Figure 10: Etude du marché des retardateurs de flammes en Europe en 2001 (EFRA 2004).....	19
Figure 11 : Synthèse des adjuvants pouvant être présents dans les polymères utilisés pour les structures de végétalisation et composés chimiques susceptibles d'être émis .....	20
Figure 12: Courbes représentent le taux de lessivage de naphtalène (à gauche) et $\Sigma$ des HAPs à 2+ noyaux (à droite) (Bowen and de Groot 2000) .....	22
Figure 13: Comportement du Preventol B2 dans l'environnement (source : Site8).....	24
Figure 14: Résultat des 1er, 3ème, 5ème, le 11ème événements de ruissellement, contribuant à la concentration du mécoprop lessivé des membranes B2 et HE (Burkhardt, Zuleeg et al. 2010) .....	25
Figure 15: Somme cumulée du mécoprop lessivé des membranes pendant les 5 heures d'irrigation pour les 11 événements de ruissellements (Burkhardt, Zuleeg et al. 2010).....	25
Figure 16: Photo d'une colonne type avec 15 centimètre de substrat (C15, X15 et Z15) .....	30
Figure 17: Schéma du dispositif de simulation de pluie.....	33
Figure 18: Carte d'intensité pour une précipitation moyenne de 8.33mm/h. Le débit de la pompe est 11.3L/h et la rotation de 2500 RPM. ....	33
Figure 19: Variation de la couleur au cours de l'expérience (2 = 100 mm, 11 = 2000 mm) .....	36
Figure 20: Evolution de la conductivité et de la turbidité en fonction de la hauteur cumulée de percolation pour les trois types de substrats.....	37
Figure 21: Relation entre turbidité et matière en suspension pour les différents substrats.....	38
Figure 22: Evolution de la DCO en fonction de la hauteur appliquée, pour les différents substrats. ....	39
Figure 23: Evolution de la l'azote dissous et du phosphore total en fonction de la hauteur appliquée, pour les différents substrats. ....	40
Figure 24: Teneur en carbone organique des MES .....	40
Figure 25: Evolution du carbone dissous et de l'aromaticité.....	41
Figure 26: Variation du rapport C/N dans le temps .....	41
Figure 27: Evolution des métaux majeurs, exemple du manganèse.....	42
Figure 28: Evolution des métaux étudié.....	43
Figure 29: Evolution des la capacité de rétention de cuivre total.....	43
Figure 30: Effet de l'hauteur de substrat, exemple de conductivité et de turbidité .....	44
Figure 31: Absence de l'effet de l'hauteur, exemple de teneurs totaux en Mn et en Cu.....	45
Figure 32 : Corrélacion linéaire entre les concentrations mesurées pour le drainage polystyrène (X8) et pour le drainage pouzzolane (X8g).....	46

Figure 33 : Dispositif expérimental de lixiviation à l'eau distillée pour les matériaux de construction .....	51
Figure 34. Montage expérimental pour les essais de simulation de pluie.....	53
Figure 35 : Emissions de bisphénolA et d'alkylphénols.....	55
Figure 36 : Concentration mesurées lors de la lixiviation à l'eau distillée de la membrane d'étanchéité et des plusieurs gouttières en PVC (pour les gouttières la barre correspond à la gouttière installée sur le toit du Cete Ile de France, et la fourchette aux valeurs minimum et maximum sur 5 échantillon de gouttières d'origines différentes).....	56
Figure 37 : Concentrations en bisphenolA (BPA) et alkylphénols dans les eaux de ruissellement d'une membrane d'étanchéité SBS et d'une gouttière sous pluie simulée (moyenne et valeurs des 2 répétitions) .....	57

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition des ventes de produits d'étanchéité toiture en construction neuve en France, par type de matériau, 2001-2005 (MSI 2006) .....	4
Tableau 2: Les différents revêtements d'étanchéité appliqués sur les toitures .....	7
Tableau 3: Caractéristiques des substrats extensifs multicouche et monocouche (Adivet, CSFE et al. 2003).....	10
Tableau 4: Les formules chimiques des radicaux des cinq phtalates les plus utilisés dans PVC (Saillenfait and Laudet-Hesbert 2005) .....	13
Tableau 5: Quelques propriétés physicochimiques (Saillenfait and Laudet-Hesbert 2005) .....	13
Tableau 6: La solubilité et le coefficient de partition Kow de quelques antioxydants phénoliques (source : site 6,7,8,9,10) .....	15
Tableau 7: Structures chimiques des stabilisants au plomb (Girois 2004).....	17
Tableau 8: Caractéristiques des composés à base du plomb et tributylétain d'après la directive cadre sur l'eau (source : site 4) .....	17
Tableau 9: Le coefficient de partition Kow et la solubilité des MCCPs et de quelques retardateurs de flammes bromés (De Wit 2002) (source site : 11, 12, 13).....	19
Tableau 10: Les différents produits bitumineux étudiés (Bowen and de Groot 2000).....	21
Tableau 11: Les concentrations moyennes des HAPs obtenues après les tests de lessivage, ng/l (Bowen and de Groot 2000) .....	22
Tableau 12: Lessivage des HAPs du composé bitumineux A et de l'asphalte provenant du produit bitumineux A, ng/l (Bowen and de Groot 2000) .....	23
Tableau 13: Concentration de l'eau de pluie (r) et de l'eau ruisselant des toitures étudiées (rr : toiture classique, gr1 et gr2 : toitures végétalisées) (Teemusk and Mander 2007) .....	26
Tableau 14: Teneur en matière organique et en minéraux dans les différentes fractions du substrat (Teemusk and Mander 2007) .....	27
Tableau 15: Composition des colonnes expérimentales. Le diamètre de toutes les colonnes est de $29\pm 0.5$ cm et une superficie de $660$ cm <sup>2</sup> .....	30
Tableau 16: caractéristiques physio-chimiques des substrats utilisés.....	31
Tableau 17: Composition ionique de la pluie artificielle .....	32
Tableau 18: Volumes percolés sur les différentes colonnes en fonction des séquences de pluie (mm) .....	34
Tableau 19: concentrations moyennes pour les paramètres physico-chimiques.....	36
Tableau 20: Paramètres de la loi de décroissance de la conductivité, de la turbidité et des MES.....	37
Tableau 21: Constantes et coefficients d'ajustement pour l'azote dissous total, le phosphore, le carbone organique et la DCO .....	39
Tableau 22: Résumé des corrélations effectuées pour les différentes paramètres pour les deux hauteurs 7.5 cm et 15 cm du substrat « C » et substrat « X ». n=11 .....	45
Tableau 23 : Comparaison des constantes et coefficients de la loi de décroissance au cours du temps des concentrations émises, dans le cas d'un drainage en polystyrène (X8) et d'un drainage en pouzzolane (X8g) .....	46
Tableau 24. Produits de construction de toitures végétalisées sélectionnées .....	47
Tableau 25. Concentration des minéraux majeurs dans l'eau de Volvic (brute et diluée) et l'eau de pluie (Van de Voorde, 2012) .....	52
Tableau 26. Concentration des AP et du BPA (ng/L) dans l'eau Volvic et l'eau osmosée.....	52

## Bibliographie

- Adivet, CSFE, SNPPA and UNEP (2003). Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées.
- ANSES (2011) Connaissances relatives aux usages du bisphénol A. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- Bayen, S., J.P. Obbard and G.O. Thomas (2006). "Chlorinated paraffins: A review of analysis and environmental occurrence." ELSEVIER.
- Bowen, C. and P. de Groot (2000). Health safety and the environment-aqueous leaching of pac's from bitumen. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000. Barcelona-Spain.
- Brossas, J. (1999). "Retardateurs de flammes." Technique de l'ingénieur AM3237.
- Bucheli, T.D., S. R. Muller, A. Voegelin and R.P. Schwarzenbach (1998). "Bituminous Roof Sealing Membranes as Major Sources of the Herbicide (R,S)-Mecoprop in Roof Runoff Waters: Potential Contamination of Groundwater and Surface Waters." Environmental Science & Technology 32.
- Burkhardt, M., J. Eugster, S. Zuleeg and M. Boller (2008). Biozide und Additive in Gebäudehüllen: Auswaschung und Eintrag in die Gewässer (URBIC). Teilprojekt Kunststoffdachbahnen (PROOF). Eawag and Empa: 19.
- Burkhardt, M., T. Kupper, S. Hean, P. Schmid, R. Haag, L. Rossi and M. Boller (2007). "Release of biocides from urban areas into aquatic systems." NOVATECH.
- Burkhardt, M., S. Zuleeg, J. Eugster, M. Boller, S. Hean, R. Haag, P. Schmid and M. Kohler (2009). Mecoprop in Bitumenbahnen: Auswaschung von Mecoprop aus Bitumenbahnen und Vorkommen im Regenkanal Teilprojekt Kunststoffdachbahnen (PROOF). Eawag and Empa.
- Burkhardt, M., S. Zuleeg, R. Vonbank, P. Schmid, S. Hean, X. Lamani, K. Bester and M. Boller (2010). Leaching of additives from construction materials to urban storm water runoff. Eawag.
- CANEPARO, R. (1979). "Evacuation des eaux pluviales." Technique de l'ingénieur C1075.
- Carette, L. (1993). "Généralités sur les adjuvants." Technique de l'ingénieur A3230.
- CERTU, (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) (2003). Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques - Les toitures. Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement and du Tourisme et de la Mer
- Cognard, P. (2005a). "Applications des revêtements d'étanchéité préfabriqués." Technique de l'ingénieur C3556.
- Cognard, P. (2005b). "Etanchéité par revêtements de surface préfabriqués." Technique de l'ingénieur C3555.
- Czemieli Berndtsson, J. (2008). Seasonal changes of runoff water quality from an extensive vegetated roof. 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, Scotland, UK.
- Czemieli Berndtsson, J. (2009). "Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review." ELSEVIER: 10.
- De Wit, C.A. (2002). "An overview of brominated flame retardants in the environment." PERGAMON: 42.
- ECB (2010) European Union Risk Assessment Report. 4,4'-Isopropylidenediphenol (Bisphenol-A). European Chemicals Bureau.
- ECSC (2008) Évaluation préalable finale pour le Défi concernant le Phénol, 4,4' -(1-méthyléthylidène)bis (Bisphénol-A) Environnement Canada. Santé Canada.
- ECOVEGETAL (2008). CPP pour pente ≤20%, Procédés de végétalisation extensive et semi-intensive pour les terrasses et les toitures végétalisées. Rapport d'Enquête SOCOTEC.
- EFRA (2004). Retardateurs de flammes, Les questions les plus courantes.
- Gendreau, N., P. Rochefeuille, Y. Kovacs, C. Senechal and F. Lassale (2007). Les toitures végétalisées, une technique de gestion de l'eau devenue incontournable lors des nouvelles constructions respectant les critères de la Haute Qualité Environnementale. NOVATECH.

- Gilbert-Pawlik, S. (2011). Devenir des polybromodiphényléthers et des alkylphénols dans les filières de traitement des eaux usées : cas des fonctionnements optimisés par temps sec et dégradés par temps de pluie. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Girois, S. (2004a). "Stabilisation des plastiques." Technique de l'ingénieur **AM3232**.
- Girois, S. (2004b). "Stabilisation du PVC." Technique de l'ingénieur **AM3233**.
- Gourlay, C. (2004). BIODISPONIBILITE DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DANS LES ECOSYSTEMES AQUATIQUES : INFLUENCE DE LA MATIERE ORGANIQUE NATURELLE ET ANTHROPIQUE. Géosciences et Ressources Naturelles. Paris, ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS. **Docteur de l'ENGREF**.
- INERIS (2010) Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Bisphenol A. Institut national de l'environnement industriel et des risques.
- Kleijer, A. and N. Chèvre (2008). Lessivage des matériaux de construction et risques pour les eaux de surfaces. 3<sup>ème</sup> Symposium sur les énergies renouvelables et l'environnement dans le bâtiment. Yverdon-les-Bains, Suisse.
- Lafont, L. (1993). Revêtement d'étanchéité de toiture CATED.
- Lassalle, F. (2008). Végétalisation extensive des terrasses et toitures.
- Lespes, G., CH. Banchon-Montigny, S. Aguerre and M. Potin-Gautier (2005). "Spéciation des organoétains dans les eaux et sédiments du bassin Adour-Garonne." Revue Des Sciences de l'Eau: 17.
- Luckett, K. (2009). Green Roof Construction and Maintenance United States.
- Markarian, J. (2007). "PVC additives - What lies ahead?" Plastics Additives & Compounding.
- MSI, Etude (2006). Le Marché des Matériaux de Couverture de Toits en France. MSI Marketing Research for Industry Ltd. Lyon: 223.
- OSPAR. (2003) Octylphenol. ISBN 1-905859-00-7. OSPAR Convention for the protection of the marine environment of the north-East Atlantic.
- Reemtsma, T., J.B. Quintana, R. Rodil, M. Garcia-Lopez and I. Rodrigez (2008). "Organophosphorus flame retardants and plasticizers in water and air I. Occurrence and fate." Trends in Analytical Chemistry **27**: 11.
- Remolu, D. and J. M. Lauby (2007). L'étanchéité des toitures-terrasses, Conception et réalisation - En application des DTU 43.1, 43.3, 43.4, 43.5.
- Saillenfait, A.-M. and A. Laudet-Hesbert (2005a). "Phtalate." EL SEVIER: 13.
- Saillenfait, A.-M. and A. Laudet-Hesbert (2005b). "Phtalate (II)." EL SEVIER.
- Simon, J. A. and J. A. Sobieraj (2006). Contributions of Common Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Soil Contamination, WILEY InterScience.
- SIPLAST (2007a). Gravidand S, Système d'étanchéité et de végétalisation pour terrasses et toitures, Etanchéités des toitures inaccessibles végétalisées. Enquête de Technique Nouvelle SOCOTEC.
- Teemusk, A. and U. Mander (2006). "The use of greenroofs for the mitigation of environmental problems in urban areas." WIT Transactions on Ecology and the Environment **93**: 17.
- Teemusk, A. and U. Mander (2007). "Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events." EL SEVIER: 7.
- Urbic (2008). Reduced leaching of herbicides from bitumen sheets. Annual Report 2008. eawag aquatic research.
- Van de Voorde, A. (2012). Incidence des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité des eaux de ruissellement. Cas des traitements par produits biocides. Thèse de doctorat, Université Paris Est.
- Verrier, P. (1992). "Plastifiants." Techniques de l'ingénieur **A3231**.
- Watanabe, I. and S. Sakai (2003). "Environmental release and behavior of brominated flame retardants." EL SEVIER: 18.



PROJET



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)**

**Appel à projets 2009**

**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

## **PARTIE N°3**

### **LIVRABLE N°3.2**

**Qualité des eaux de ruissellement issues des  
toitures végétalisées – synthèse  
bibliographique et suivi expérimental**

(version finale corrigée)

#### **Organisation du travail**

Rédaction du rapport :

Organismes impliqués :

Coordination Partie n°3

Coordination TVGEP :

MC Gromaire, M. Seidl, S. Negro

LEESU - ENPC

Marie-Christine Gromaire, LEESU

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

## Sommaire

Introduction.....	3
1. Synthèse bibliographique .....	4
1.1 Structure, Types et Compositions des Toitures Végétalisées .....	4
1.2 Rétention des eaux pluviales par les toitures végétalisées .....	6
1.2.1 Capacité de rétention .....	7
1.2.2 Evolution saisonnière .....	8
1.2.3 Effet de l'âge du toit végétalisé .....	8
1.2.4 Effet de la couche de végétalisation.....	9
1.2.5 Effet de la nature et de l'épaisseur du substrat .....	9
1.2.6 Epaisseur et évolution saisonnière.....	11
1.2.7 Couche de drainage et couche de filtration .....	12
1.2.8 Rôle de la pente.....	12
1.2.9 Hauteur de la pluie: .....	13
1.3 Qualité de l'eau de ruissellement .....	13
1.3.1 Nutriments.....	14
1.3.2 Carbone organique dissous (COD).....	16
1.3.3 Acides humiques.....	17
1.3.4 Les matières en suspension.....	17
1.3.5 Composition ionique.....	17
1.3.6 Eléments traces métalliques (ETM).....	18
1.4 Les facteurs influençant la qualité de l'eau .....	19
1.4.1 Utilisation des engrais .....	19
1.4.2 Nature et épaisseur de la couche de substrat.....	20
1.4.3 Type de végétation .....	20
1.4.4 Âge du toit .....	21
1.4.5 Qualité de l'eau suivant les saisons .....	21
1.4.6 Utilisation de Biochar : .....	22
1.4.7 La hauteur de la pluie .....	22
2. Matériel et méthode .....	24
2.1 Dispositif expérimental .....	24
2.1.1 Description du banc de toitures .....	24
2.1.2 Equipements.....	25
2.1.3 Protocoles d'échantillonnage et d'analyse.....	27
2.2 Caractéristiques des événements pluvieux étudiés .....	29
2.2.1 Événement pluvieux étudiés simultanément sur les RA et les toits BI et SE3Y.....	29
2.2.2 Événement pluvieux étudiés simultanément sur les 8 compartiments de toitures .....	30
2.3 Caractéristiques des substrats étudiés .....	31
3. Résultats .....	33
3.1 Comparaison des concentrations et flux de polluants entre la toiture végétalisée SE3Y, la toiture nue BI et les retombées atmosphériques.....	33
3.1.1 Concentrations en paramètres globaux .....	33
3.1.2 Concentrations en métaux .....	34
3.1.3 Concentrations en micropolluants organiques .....	35
3.1.4 Comparaison des flux polluants émis.....	37
3.2 Comparaison des 6 compartiments de toitures végétalisées.....	38
3.2.1 Comparaison des concentrations en paramètres globaux.....	38
3.2.2 Comparaison des concentrations en matière organique et nutriments .....	39
3.2.3 Comparaison des concentrations en métaux.....	40

3.2.4	Comparaison des concentrations en micropolluants organiques.....	41
3.3	Discussion et comparaison avec les données de la littérature.....	43
4.	Conclusion .....	45
	Listes des figures et des tableaux.....	46
	Liste des figures.....	46
	Liste des tableaux.....	47
	Bibliographie.....	49

## Introduction

Face à l'imperméabilisation croissante des villes, qui peut causer des problèmes d'inondation en aval ou bien d'éventuelles saturations de STEP dans le cas de réseau unitaire, le développement de techniques alternatives pour la gestion des eaux de pluie se généralise. L'objectif est de gérer ces volumes au niveau de la parcelle par des ouvrages de stockage ou de rétention temporaire puis de les rendre au réseau avec un débit limité. Ces techniques, souvent incluses dans l'écologie urbaine ou associée à des approches de types HQE (haute qualité environnementale) ont souvent aussi comme objectif de limiter la pollution de l'eau et d'améliorer l'environnement urbain et la santé. Les eaux pluviales peuvent aussi faire l'objet de récupération et réutilisation, directement à partir des toitures ou plus en aval, pour une ou plusieurs valorisations successives.

De plus, ces dernières décennies ont eu lieu des modifications importantes dans la manière dont les gens perçoivent l'environnement et les questions relatives à la qualité de la vie urbaine. La construction d'espaces verts, reconnus pour leur influence sur le bien-être humain est de plus en plus encouragée. Les toits végétalisés (TTV) s'insèrent très bien dans le concept de la ville verte moderne puisqu'ils offrent la possibilité de réintroduire la nature dans la ville en créant de nouveaux espaces de verdure, qui n'occuperont pas plus d'espace et qui ne demanderont pas beaucoup d'entretien dans le cas de culture extensive. Outre cet atout architectural, elles protègent aussi la couche d'étanchéité du toit des agressions UV et des chocs thermiques, et optimise le climat intérieur en maintenant le bâtiment au frais en été, et en améliorant les propriétés acoustiques de la toiture. La végétalisation contribue à prolonger la durée de vie des matériaux et réduire la consommation énergétique du bâtiment. De nombreuses expériences conduites en Europe ont montré que pour des objectifs esthétiques ou de durabilité, comme dans la perspective de restauration ou protection de la biodiversité et de l'environnement en milieu urbain, l'aménagement d'un éco-toit se révélait intéressant.

Les toits végétalisés ont gagné une reconnaissance accrue dans de nombreux pays tels qu'Allemagne, Suède, Etats-Unis, Royaume-Uni, Japon et Singapour (Mentens et al, 2006 ; Berndtsson et al, 2008). Ils sont souvent sollicités pour leur capacité de régulation du ruissellement, cependant, peu d'attention est prêtée à la qualité de l'écoulement qui en émane. Cette eau de ruissellement est généralement considérée comme propre mais peut tout de même être acide, et contenir des quantités considérables de nitrates, des traces de métaux lourds, de pesticides et des polluants issus de sources locales (Berndtsson 2010).

Un système de toiture végétalisée est un ensemble de matériaux et de végétaux mis en place sur une toiture ou toiture-terrasse. Cette technique de végétalisation demande une conception très soignée, relevant d'entreprises qualifiées pour garantir une parfaite étanchéité et un substrat adapté au type de végétation.

# 1. Synthèse bibliographique

## 1.1 Structure, Types et Compositions des Toitures Végétalisées

Visuellement, les toits verts semblent n'être rien de plus que les plantes qui poussent sur une seule couche de terre, mais en réalité, ils sont beaucoup plus complexes.

Un toit végétalisé est constitué de plusieurs couches (figure 1). Entre la surface du toit et le substrat, se trouve une membrane d'étanchéité pour protéger contre l'humidité, une couche de drainage emporte l'excès d'eau et un filtre en tissu empêche les particules de sol d'être lessivées avec la pluie. Fondamentalement, les différentes couches permettent au toit structurel de rester sec tout en laissant de l'humidité aux plantes pour qu'elles puissent survivre.

Il existe trois types de toitures végétalisées: extensive, semi-intensive et intensive. Cette classification permet de différencier entre les systèmes de végétalisation lourds, modérés et légers ce qui dicte une variété de structures et de caractéristiques fonctionnelles: les toits extensifs étant légers, ceux intensifs étant des systèmes lourds et les toits semi-intensifs ont des caractéristiques intermédiaires entre un système extensif et un système intensif.

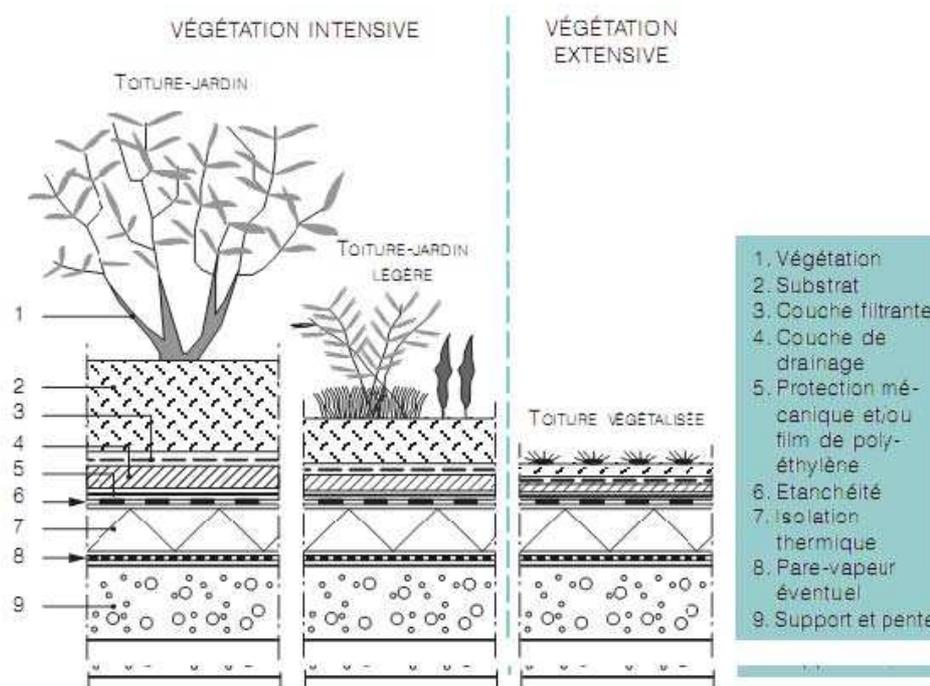


Figure 1 : Représentation schématique de la composition typique de toiture verte (CSTC, 2006)

- **Végétalisation intensive**

Ce type de végétalisation se caractérise par une épaisseur moyenne de substrat de 50 cm, pouvant atteindre 1 m d'épaisseur. Le substrat utilisé est de la terre naturelle et présente une diversification de plantation. L'entretien de ce type de toiture est très important, dû à la diversité de la végétation et au type du substrat (terre) utilisés (Lassalle 2008).

- **Végétalisation semi-intensive**

Dans ce type de végétalisation, le complexe de culture présente une épaisseur moyenne de 25 cm, atteignant 40 cm au maximum. La nature du complexe est proche de la terre naturelle, mais c'est un substrat artificiel et non pas une terre naturelle. Le type de plantation est moins diversifié par

rapport à celui de l'intensif. L'entretien est modéré, pas aussi important que celui de la végétalisation intensive (Adivet, CSFE et al. 2003; Lassalle 2008).

- **Végétalisation extensive**

La végétalisation extensive est caractérisée par un substrat léger à dominante minérale, ayant une épaisseur qui varie entre 4 à 15 cm. Le type de végétation pouvant être utilisé est restreint (sedums, succulent), dans ce type de toiture végétalisée. L'entretien est très faible voire absent, du fait du type de plantation utilisée et de l'épaisseur du substrat (Adivet, CSFE et al. 2003; Lassalle 2008). Ces toitures, qui se différencient par leurs propriétés physiques, présentent également des avantages différents. Le Tableau 1 illustre les avantages de ces 3 types de toitures végétalisées.

<b>Extensive</b>	<b>Semi-Intensive</b>	<b>Intensive</b>
Légère	Combine les meilleures caractéristiques de l'extensive et de l'intensive	Une grande diversité de plantes
Convenable pour les grandes surfaces	Utilisée pour les zones avec une grande capacité de chargement	Meilleures propriétés d'isolation et de gestion des eaux pluviales
Faibles coûts de maintenance et l'irrigation n'est pas nécessaire	Une plus grande couverture à un coût inférieur à celui de l'intensive	Un plus grand éventail de la conception
Convenable pour les projets de rénovation	Entretien moyen	Souvent accessible
Coûts d'investissement plus faibles	Une diversité des plantes plus grande que celle de l'extensive	Grande variété d'utilisations par l'homme
Plus facile à remplacer	Opportunités pour la conception esthétique plus grandes que celles de l'extensive	Un potentiel plus grand à la biodiversité

**Tableau 1 :** Avantages généraux des différents types toitures végétalisées (GRHC, 2005)

- **Couche de drainage et couche de filtration**

Les matériaux pouvant constituer cette couche sont soit des plaques de polystyrène moulées ou alvéolées, soit des agrégats minéraux poreux (pouzzolane, argile expansée, roche volcanique...), soit des éléments synthétiques pouvant former ou non une sorte de réserve d'eau, comme des bacs en polyéthylène recyclé. Les matériaux les plus utilisés dans les végétalisations extensives sont les polystyrènes et les polyéthylènes recyclés.

La couche filtrante retient les particules fines du substrat et s'interpose entre le substrat et la couche drainante pour éviter son colmatage. Elle retient des particules de diamètre supérieur à 0.063 mm. Le filtre est soit un géotextile en propylène non-tissé, soit un géotextile en polystyrène non-tissé (Adivet, CSFE et al. 2003; Lassalle 2008).

Il existe des cas, généralement pour des pentes supérieures à 5 %, où la couche de drainage et la couche filtrante sont absentes, et la fonction de drainage serait assurée alors par le substrat lui-même, grâce au matériel minéral qui le contient. Dans ce cas on parle de système de végétalisation monocouche. En présence d'une couche de drainage avec filtre on parle d'un

système de végétalisation bicouches ou multicouches. Les différents types de couche de drainage avec leur capacité de rétention de l'eau pluviale sont figurés dans le tableau 7, (Nohra et al. 2010).

## 1.2 Rétention des eaux pluviales par les toitures végétalisées

Les toitures végétalisées ont été reconnues comme une option possible de contrôle des eaux pluviales pour les centres urbains (Carter et Rasmussen, 2006), son avantage principal est la réduction du volume des eaux pluviales (TRCA, 2006).

Dans un système de toit vert, une grande partie de la précipitation est capturée et stockée dans les substrats ou par la végétation et, par la suite, s'évapore de la surface du sol ou est relâchée dans l'atmosphère par évapotranspiration (Getter, Rowe et Andresen. 2007). Une haute évapotranspiration à partir d'un toit vert peut réduire le ruissellement annuel à moins de la moitié des précipitations (Liesecke, 1998; Knoll, 2000; Bengtsson et al, 2005).

Les figures suivantes illustrent le phénomène de rétention.

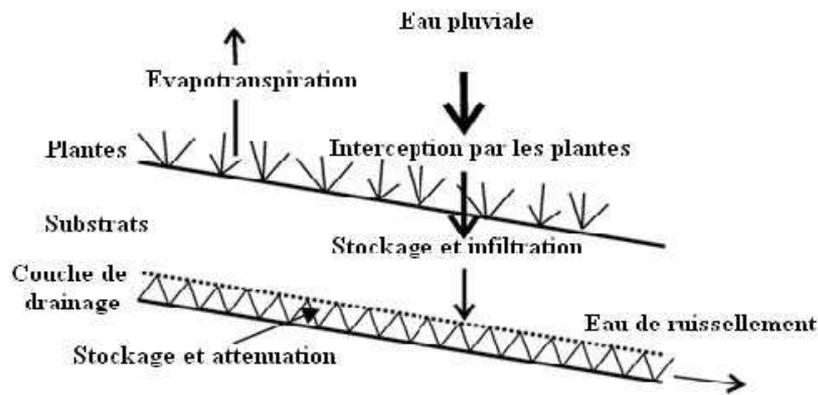
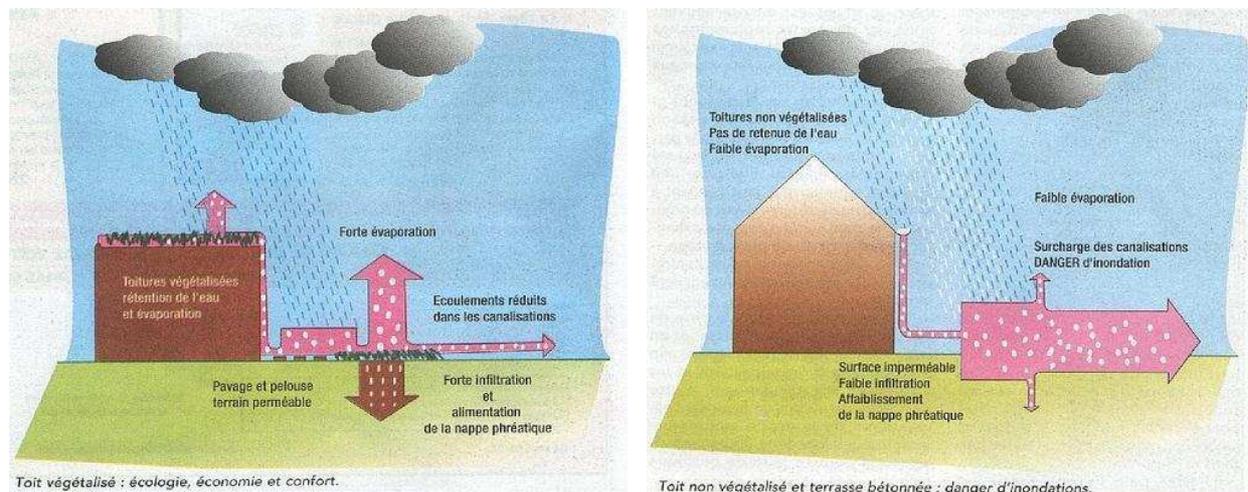


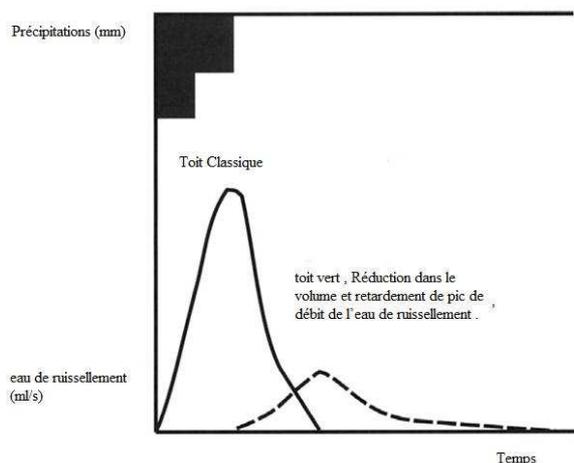
Figure 2 : Processus hydrologique de toits verts (Stovin, Vesuviano and Kasmin 2012)

Figure 3 : Différence en quantité d'eau de ruissellement en présence (gauche) et en absence (droit) de végétalisation des surfaces urbaines



La Figure 4 illustre la différence de rétention entre un toit vert et un toit classique. Le ruissellement du toit vert commence après celui du toit classique. Il est observé, que pour le toit vert, il y a une forte rétention d'eau, ce qui fait diminuer le niveau du débit de pointe : le pic est atténué et retardé. De plus le ruissellement du toit vert, dure plus longtemps que celui du toit classique.

**Figure 4** : Hydrogramme fictif représentant la différence entre les ruissellements d'eau pluviale passant par toit vert et par un toit classique, (Stovin et al. 2012)



### 1.2.1 Capacité de rétention

Toutes les études montrent que les TTV ont un effet positif sur la réduction du ruissellement des eaux pluviales (tableau 2). L'importance de cet effet dépend de l'épaisseur du substrat, son humidité, l'intensité de la pluie, la distribution de la précipitation pendant les périodes d'étude. Elle peut aussi dépendre de l'âge du toit, du couvert végétal, et de la pente. Les valeurs exactes de la réduction des eaux de ruissellement (présenté comme un % de la précipitations) peuvent difficilement être comparées entre les différentes études en raison des conditions différentes dans lesquelles les études ont été réalisées (par exemple nombre des évènements pluvieux et la durée de la période d'étude) qui ont été prises en considération pour calculer les valeurs de rétentions présentées (Berndtsson 2010).

Référence	Capacité de rétention moyenne (%)	Durée d'étude
Monterusso et al, 2004	49	4 pluies
Bengtsson et al, 2005	46	17 mois
VanWoert et al, 2005	60,6	15 mois
DeNardo et al, 2005	45	2 mois
Moran et al, 2005	63 (toit 1); 55(toit 2)	18 ; 15 mois
Carter et Rasmussen, 2006	78	13 mois
Kristin L. et al, 2007	80.2	32 pluies
Teemusk et Mander, 2007	85,7	10 mois
FII, 2008	40-70	12 mois
Voyde et al. 2010	66	12 mois
Gregoire and Clausen 2011	51.4	12 mois
Stovin et al, 2012	50,2	12 mois

**Tableau 2** : Capacités de rétention pour plusieurs études, (Berndtsson 2010 : articles de 2004 jusqu'à 2006)

### 1.2.2 Evolution saisonnière

La rétention de toit vert dépend de la saison. En été il y a une augmentation de l'évapotranspiration et la capacité de rétention du toit se régénère plus rapidement. Il est difficile de comparer les résultats de différentes études car les auteurs définissent les saisons de manières différentes.

Bengtsson et al. (2005) signalent que la réduction du ruissellement mesurée pendant la période d'étude pour des vastes toitures végétalisées sur une base mensuelle varie, avec le plus bas obtenu pour Février (19%) et le plus élevé pour Juin (88%). Stovin et al. (2012) ont montré dans leur étude, la variation de la rétention pendant les saisons. Ils ont utilisé un toit vert extensif commercial standard (ALUMASC / Zinco), comprenant une végétation en sedum, un substrat de 80 mm, et une pente de 1,5°. Pour les 21 pluies sélectionnées, 12 sont survenues en Juin, Juillet ou Août et trois en printemps, automne et l'hiver. En outre, les trois pluies avec des périodes de retour les plus grandes sont toutes survenues dans l'été. Par conséquent, cette répartition très inégale des événements entraîne des difficultés significatives dans l'analyse de la performance saisonnière de la toiture. En outre, en raison des grandes variations climatiques qui se produisent naturellement dans les saisons, le résultat d'une telle analyse est discutable. Les résultats sont représentés dans le Tableau 3.

Saison	No. De pluie	Précipitation moyenne (mm)	Rétention moyenne (mm)	Rétention moyenne (%)
Hiver (01 Déc. -28/29 Fév.)	3	28.0	1.7	6.06
Printemps (01 Mars – 31 Mai)	3	18.5	14.1	76.18
Eté (01 Juin - 31 Août)	12	26.8	14.0	52.12
Automne (01 Sep. - 30 Nov.)	3	28.7	10.1	35.26

**Tableau 3 :** Capacité de rétention en fonction des saisons (en mm et en %) dans l'étude de Stovin et al. (2012)

D'autre part Villarreal et Bengtsson. (2005) ont montré que les conditions météorologiques (sec ou humide) ont affecté la capacité de rétention de toit vert étudié (une couche de végétalisation de 4cm et une couche géotextile sous-jacente), dans des conditions sèches 6-12 mm de précipitations ont été requises pour initier le ruissellement des eaux, pour des conditions humides, la réponse a été presque simultanée.(Berndtsson, Bengtsson et Jinno 2009).

### 1.2.3 Effet de l'âge du toit végétalisé

Le substrat végétalisé de toits verts subit divers changements physiques et chimiques avec le temps: les particules de sol peuvent être perdues, les substances solubles sont lessivées par l'eau, les racines se développent, la teneur en matière organique peut augmenter, la porosité du sol, le diamètre des pores et l'espace d'air libre changent avec le temps. On peut donc s'attendre à ce que l'âge des toits verts puisse influencer la dynamique des eaux de ruissellement. Très peu d'études prennent en considération le changement de performances hydrauliques des toits verts en fonction de son âge.

Mentens et al. (2006) ont fait des études en Allemagne et ont trouvé que l'âge d'un toit vert n'est pas significativement corrélé avec la quantité annuelle du ruissellement, mais peut influencer le temps usuel de rétention (Berndtsson 2010).

D'autre part, Getter et al. (2007) ont montré dans une étude, faite pendant 5 ans dans les Great Lakes Laboratories, inc, Ft. Wayne, Indiana., que la capacité de la rétention augmente avec l'âge de toit vert : L'augmentation de la matière organique et les micropores peut augmenter la capacité de rétention d'eau, ce qui augmente la rétention totale, Les résultats sont représentés dans le Tableau 4.

Echantillon	Matière organique(%)	Porosité (%)	Espace d'air libre(%)	Capacité de rétention(%)
Initial	2.33	41.41	14.40	17.07
Mâture	4.25	81.84	21.43	67.44

**Tableau 4 :** Variation de la capacité de rétention (%) en fonction de la variation de différents paramètres de substrat après 5 ans de son utilisation, (Getter et al. 2007)

#### **1.2.4 Effet de la couche de végétalisation**

De nombreuses études indiquent que la profondeur et le type de substrat ont une influence majeure sur la capacité de rétention du toit, et non pas le type de végétation ni sa couverture (Dunnnett et al, 2008b; Monterusso et al, 2004; VanWoert et al, 2005).

Cependant, il est constaté que la végétation joue un rôle dans la rétention d'eau, en particulier au cours des périodes avec une faible disponibilité en eau et des températures plus élevées. Cet effet est négligeable en hiver (quand la disponibilité en eau est élevée). Par exemple, en août le toit extensif et celui semi-intensif avec végétation retiennent l'eau respectivement 30 et 2 fois, plus que le toit extensif et le toit semi-intensif sans végétation, au cours d'octobre-décembre, la végétation n'a pas montré une influence sur la rétention d'eau. (Dunnnett et al, 2008b; Steusloff, 1998).

Dans l'étude de Mentens et al. (2006) il était clair que la capacité de rétention sur une base annuelle peut varier de 75% pour les toits verts semi-intensifs (profondeur du substrat: 150mm) à 45% pour le toit extensif (profondeur du substrat: 100mm). Par contre Dunnett et al. (2011) ont trouvé qu'il y avait une différence significative dans la quantité de ruissellement de l'eau entre différents types de végétation, les graminées étant les plus efficaces pour réduire le ruissellement des eaux, suivie d'herbacées et de sedum. Alors ils ont conclu que les végétations graminées et herbacées, qui ont une grande hauteur, un grand diamètre, des grandes pousses et biomasses racinaires sont recommandées si la réduction du ruissellement de l'eau est le principal objectif de l'installation d'un toit vert.

Les études allemandes de 1987 à 2003, résumées par Mentens et al. (2006) signalent que les toits verts intensifs ont montré une réduction annuelle entre 85-65% des précipitations annuelles et pour les toits extensifs les valeurs correspondantes étaient entre 27 et 81% (Berndtsson 2010).

#### **1.2.5 Effet de la nature et de l'épaisseur du substrat**

Le substrat remplit les fonctions suivantes :

- Fixation des plantes

- stockage d'eau, d'air, d'éléments minéraux et organiques, d'oligo-éléments, tous nécessaires au développement de la végétation,
- transfert de ces éléments aux plantes

La composition du substrat a un impact très important sur les végétaux présents sur le toit et sur la biodiversité. Le substrat idéal doit avoir une bonne capacité de rétention en eau et une capacité de drainage. Les substrats existants aujourd'hui sont composés en majeure partie de matériaux minéraux de gros calibre, en raison de leur rôle drainant malgré leur forte densité : 70 % à 90 % de graviers, pouzzolane, briques concassées, sable, auxquels on rajoute 10 à 30% de matière organique qui contient les nutriments indispensables à la végétation. La quantité de matière organique doit être suffisante pour permettre un choix large dans la palette végétale. Il faudrait également qu'une proportion de la fraction minérale soit de taille plus fine pour améliorer la capacité de rétention en eau.

Une étude, effectuée par K. Vijayaraghavan. (2012), met en évidence l'influence du substrat et de la végétation sur la rétention d'eau. L'étude est résumée dans les tableaux 5 et 6.

Code de toit	Couche de Béton	Couche de Drainage	Végétation	Substrat
A1	+	-	-	-
A2	+	D1	-	S1
A3	+	D1	+	S1
A4	+	D2	-	S2

**Tableau 5 : Constituants des toits utilisés dans l'expérience de (K. Vijayaraghavan, 2012)**

D1 : Couche de drainage (3 cm) sous forme de galets (5-15 mm),

D2 : Couche de drainage commerciale, fabriquée à partir de polystyrène expansé et moulé par pression, utilisée spécialement pour collecter l'eau dans des petits compartiments.

S1 : Substrat de jardinage local (15 cm),

S2 : Substrat commercial réalisé sous la dénomination commerciale DAKU, basé sur un matériel volcanique naturel inorganique, du compost, des engrais organiques et inorganiques (15 cm).

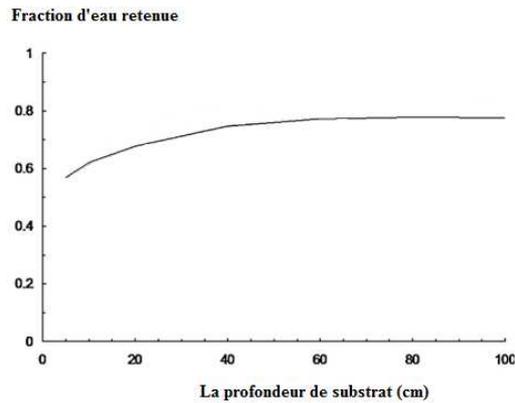
Toutes les toitures ont été exposées aux pluies pendant 12 h.

Code du toit	Début de ruissellement
A1	immédiatement
A2	après 15 mm de précipitation.
A3	après 20 mm de précipitation.
A4	après 40 mm de précipitations

**Tableau 6 : Début de ruissellement de chaque toit (K. Vijayaraghavan, 2012).**

L'écoulement retardé dans A2 et A3 est dû à la capacité de rétention de S1 et à la présence des plantes dans A3. Dans le cas d'A4, ce retardement est dû à l'effet combiné de S2 et de l'élément de drainage D2. Il convient de noter que S2 dispose d'une capacité de rétention d'eau, très nettement inférieure à celle de S1.

Parmi les facteurs importants pour l'hydrologie et l'énergie, mais aussi pour les espèces qui peuvent croître sur le toit, sont les propriétés physiques et l'épaisseur du sol du substrat qui déterminent la charge de la construction et donnent le lien entre la végétation, l'hydrologie et le substrat (Klaas Metselaar 2012).



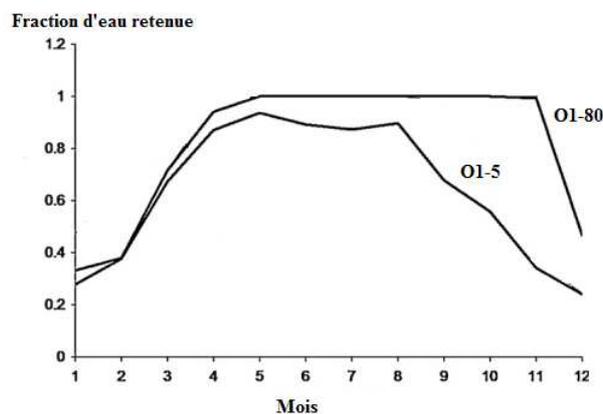
**Figure 5 :** Variation de la quantité d'eau retenue en fonction de l'épaisseur de substrat, (Klaas Metselaar 2012).

En ce qui concerne l'épaisseur, on peut dire qu'au plus épais est le substrat, au plus importante est la rétention (Steusloff ,1998). L'étude de Klaas Metselaar (2012), confirme l'hypothèse de Steusloff (1998) et montre la variation de la capacité de rétention en fonction de l'épaisseur de substrat. Les données météorologiques journalières utilisées sont celles de l'université de Wageningen pour la période 1954-1999. On remarque que la rétention augmente asymptotiquement avec l'épaisseur du substrat, mais au-delà de 40 cm, la fraction d'eau retenue ne dépasse pas 80% (Figure 5).

Steusloff (1998) indique que la combinaison d'un substrat moins épais avec une couche drainante de composition adéquate permet d'optimiser la capacité de rétention.

### 1.2.6 Epaisseur et évolution saisonnière

Tout comme l'évapotranspiration, la rétention d'eau de toit est une fonction des saisons, et de la profondeur de substrat en même temps (Figure 6). Des études allemandes, résumées par Mentens et al. (2006) ont montré qu'aucune relation n'a été trouvée entre le ruissellement de l'eau et la profondeur de substrat pour la saison froide (16 Novembre -15 Mars) et la saison moyenne (16 Mars-30 Avril et 1 Octobre – 15 Novembre). Pour la saison chaude (1 May-30 Septembre) chaque 1 cm de profondeur du substrat entraîne une réduction du ruissellement de 2.5mm.



**Figure 6 :** Variation de la quantité d'eau retenue en fonction de mois et de la profondeur de substrat. (Klaas Metselaar 2012).

(O1-80 est un substrat de 80 cm de profondeur, O1-5 est un substrat de 5 cm de profondeur)

### 1.2.7 Couche de drainage et couche de filtration

La vie des plantes et l'efficacité d'un toit vert dépend en grande partie de la couche de drainage. Le système de drainage d'un toit vert est constitué de deux parties: une couche de drainage dans le toit lui-même et les canaux qui portent l'eau en excès dans le système d'égout.

Les précipitations qui tombent sur un toit vert peuvent être évaporées dans l'atmosphère, transpirées par les plantes (absorbées par les racines et libérées par les feuilles) ou absorbées par le substrat. La quantité restante d'eau doit avoir un chemin pour quitter le toit. C'est le rôle de la couche de drainage. Lorsque le substrat est saturé, l'excès d'eau entre dans la couche de drainage et est finalement évacué à l'extérieur du toit par les gouttières (Dunnett 2004). La couche de drainage assure alors l'écoulement des eaux vers les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales, évitant ainsi l'asphyxie des racines. Elle se trouve entre le revêtement d'étanchéité et le substrat, séparée de ce dernier par un filtre, et l'épaisseur minimale de cette couche dépend de la hauteur maximale des flashes d'eau observés sur la toiture, pouvant atteindre une épaisseur maximale de 9 cm. Sa perméabilité doit être supérieure ou égale à 0,3 cm/s.

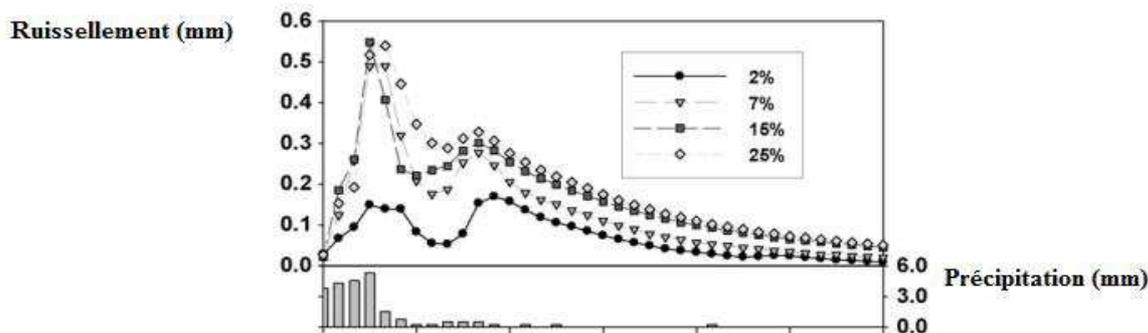
Pour les types qui ne contribuent pas dans la rétention de l'eau, ils assurent seulement la fonction de drainage.

Type	Nom du produit (fournisseur)	Epaisseur	Granulométrie (si existe)	Rétention de l'eau (si présente)
Polyéthylène recyclé	Floradrain FD25 (ECOVEGETAL)	2,5 cm	—	4 l/m <sup>2</sup>
Alvéolés polyéthylène haute densité (PEHD)	Bac Canalis (SMAC)	5 cm	—	15,5 l/m <sup>2</sup>
Polyéthylène recyclé	EcoDrain (PRIEURE)	2,5 cm	—	—
Granulats minéraux: pouzzolane	ID Lite PZ (PRIEURE)	4 cm	5 – 15 mm	5,1 l/m <sup>2</sup>
Polystyrène moulé	Mepdrain (MEPLE) Gravidrain (SIPLAST)	4 cm	—	—

Tableau 7 : Les différentes couches de drainage avec leur capacité de rétention, (Nohra et al. 2010).

### 1.2.8 Rôle de la pente

La pente du toit vert a un effet sur la quantité de rétention des eaux de ruissellement. Les pourcentages de rétention diminuent au fur et à mesure que la pente augmente, et ont été importantes pour les pentes comprises entre 2% et 25% (respectivement 68%, 64%, 57% et 58% pour les pentes 2%, 7%, 15%, et 25%), (Kristin L. et al. 2007). La Figure 7, représente la variation de la quantité d'eau retenue en fonction de la quantité de précipitation pour des toits de différentes pentes et pour une pluie intense de 23,37 mm, (Getter et al. 2007).



**Figure 7 :** Variation des quantités des eaux de ruissellement (mm) en fonction de différentes pentes (2%, 7%, 15%, 25%) . (Getter et al. 2007).

### 1.2.9 Hauteur de la pluie:

On classe les pluies en pluie faible (hauteur inférieure à 50mm), pluie modérée (hauteur comprise entre 50 et 100mm) et pluie forte (hauteur supérieure à 100mm). L'étude de VanWoert et al, (2005a) décrit l'impact de la hauteur sur la rétention d'eau de toiture végétalisée, ils ont signalé que la rétention de la toiture végétalisée a diminué, en passant de 97,1% pour les pluies faibles, jusqu'à 65,1% pour les pluies modérées.

## 1.3 Qualité de l'eau de ruissellement

Les toits végétalisés (TTV) sont souvent promus en raison de leur potentiel de fournir des avantages environnementaux, mais peu d'attention est généralement accordée à la qualité des eaux de ruissellement. Il est souvent considéré que les toitures végétalisées peuvent améliorer la qualité de l'eau (Peck et al, 1999). Cependant, des grandes différences dans la qualité du ruissellement des TTV, dues à des différences importantes dans leur construction et dans leur entretien, peuvent être trouvées en comparant les résultats rapportés par les quelques études existantes.

Pour les TTV, les principales sources de polluants sont les dépôts atmosphériques secs et humides ainsi que les matériaux constitutifs de la structure de végétalisation. Une étude à Charlotte, Caroline du Nord, a trouvé que, de 10% à 30% du phosphore total et des nitrates, de 30% à 50% des ortho-phosphates et de 70% à 90% du l'azote Kjeldahl total (TKN) et de l'azote ammoniacal qui sont détectés dans les eaux de ruissellement, proviennent des dépôts atmosphériques (Wu et al. 1998).

Les contaminants les plus couramment étudiés dans les eaux de ruissellement sont les métaux lourds, les hydrocarbures, les pesticides, les matières en suspension, les éléments nutritifs et les microorganismes pathogènes (Berndtsson et al. 2009).

Les TTV contribuent-elles à une augmentation ou à une diminution de la charge polluante des eaux de ruissellement?

C'est la question la plus importante posée sur la qualité des eaux de ruissellement provenant des toits vert. Les réponses sont représentées de manières différentes selon les auteurs. Certains auteurs comparent la concentration des polluants dans l'eau de pluie à celle dans l'eau de ruissellement, dans ce cas, la diminution dans la concentration des polluants à la sortie signifie que le toit est considéré comme un piège des polluants, dans le cas inverse, il en est considéré comme une source. D'autres études évaluent les flux de polluants émis dans les eaux de ruissellement par m<sup>2</sup> de toiture et par unité de temps. Dans un tel cas, une réduction de la

charge polluante peut être calculée en tenant compte de la charge polluante correspondant à l'eau de pluie tombant sur le toit vert (1 m<sup>2</sup>) et la moyenne de la réduction du volume de ruissellement à l'intérieur du toit vert. En conséquence, dans un tel cas, un toit vert est une source de contaminants si les charges de contaminants dans l'eau de ruissellement sont plus élevées que la charge dans l'eau de pluie qui tombe sur la même surface pendant la même période de temps. Dans certains cas, les concentrations et flux émis par les TTV sont comparés à ceux issus d'une terrasse classique (non végétalisée) considérée comme référence.

Les polluants étudiés dans les eaux de ruissellement des TTV sont le plus souvent les formes de phosphore et de l'azote, et les métaux lourds (Berndtsson et al. 2009).

### 1.3.1 Nutriments

#### Azote

L'azote est le constituant majoritaire de l'atmosphère terrestre. Pendant le cycle hydrologique, l'eau de pluie passe à travers l'atmosphère et peut s'équilibrer avec les gaz présents comme le diazote (N<sub>2</sub>). L'oxydation par des bactéries peut transformer l'ammoniac en nitrites (NO<sub>2</sub>-), puis à la suite en nitrate (NO<sub>3</sub>-). Certaines bactéries peuvent aussi réduire les nitrates en azote gazeux, en nitrites ou en ammoniac, l'ammoniac lui-même peut réagir avec des ions hydrogène pour former l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). L'utilisation d'engrais est une autre source d'ammoniac et de nitrates (Snoeyink. 1980).

Les concentrations d'azote dans les eaux de ruissellement des TTV peuvent être reliées au type de sol, à l'âge de toit vert et à l'entretien (utilisation d'engrais). Certaines études indiquent que les concentrations d'azote sont plus faibles dans les eaux de ruissellement des toits verts que dans l'eau de pluie, dans ce cas, le toit est un piège à l'azote. Tandis que d'autres ont trouvé une libération importante de l'azote à partir des toits verts, ce qui indique que le toit est une source d'azote (tableau 8), (Berndtsson et al. 2009).

Référence	Comportement de la TTV		Commentaires
Moran et al, 2005	Source		
Monterusso et al, 2005	Source		-Sauf pour les plantes indigènes
Moran et al, 2005	Source		- pour le Tot-N
Berndtsson et al, 2006	Source	Piège	-Rétention de nitrate -Source d'ammoniac -La concentration de Tot-N est la même
TRCA, 2006	Source		-Pour le Tot-N
Teemusk et Mander, 2007			-La concentration de Tot-N est la même
Berndtsson et al, 2008		Piège	-Nitrates et ammoniac (toit intensif + extensif) -Tot-N (toit intensif) -La concentration de Tot-N est la même (toit extensif)
Gregoire and Clausen, 2011	Source	Piège	-Rétention de nitrate et de nitrite - Pour l'ammoniac, Tot-N et TKN

**Tableau 8 :** Influence d'une TTV sur la concentration d'azote dans ses différentes formes

Il est possible que l'azote inorganique, absorbé par les plantes, se transforme en azote organique et reste dans la végétation. Cela pourrait expliquer la rétention de l'azote total (Tot-N) observée sur certains toits intensifs. Clark et al. (2009) ont signalé que la modification du substrat de

culture, par l'augmentation de la quantité de la matière organique, l'augmentation de sa densité ou l'augmentation de son épaisseur, augmente la rétention d'azote. Berndtsson et al. (2005) ont montré dans leur étude que les toitures végétalisées se comportent comme des sources de contaminants, sauf pour l'azote.

### Phosphore

Le phosphore peut entrer dans l'eau à partir d'un certain nombre de sources, y compris l'atmosphère, les eaux de ruissellement, les débris végétaux et la pollution, l'engrais étant une source commune. Il y a normalement un équilibre entre la quantité du phosphore dans l'eau et celle dans les sédiments mais avec une concentration plus élevée dans le sol, (Chin. 2006). Quand il y a un afflux de phosphore, le phytoplancton se développe rapidement, ce qui augmente la turbidité et change la couleur de l'eau, (Boyd. 2000). L'eau des précipitations contient généralement de faibles concentrations en phosphore alors que les niveaux de concentration de phosphore provenant des eaux de toiture végétalisée sont généralement plus élevés que ceux provenant de la pluie ou des sites de contrôle. L'engrais, les excréments des oiseaux et les dépôts atmosphériques peuvent contribuer à l'entrée du phosphore dans la toiture (Moran et al. 2005 ; TRCA, 2006; Emilsson et al. 2007).

Le Tableau 9 synthétise les résultats de différentes études concernant la performance des TTV vis-à-vis des concentrations en phosphore.

Référence	Comportement de la TTV		Commentaires
Mason et al, 1999	Piège		-Rétention de phosphate
Dietz et Clausen, 2005	Source		-Concentration élevée du Tot-P au début de l'étude
Moran et al, 2005	Source		-Pour le Tot-P
TRCA, 2006	Source		-Pour le Tot-P et pour les ortho-phosphates
Teemusk and Mander 2007	Piège		-Rétention de phosphate
Berndtsson et al, 2008	Source	Piège	-Toit extensif (phosphate) -Toit intensif (phosphate)
Gregoire and Clausen 2011	Source		-Pour le phosphate et le Tot-P

**Tableau 9 :** Influence d'un toit vert sur la concentration de phosphore dans ses différentes formes

Certaines études révèlent que la quasi-totalité du phosphore libéré par les TTV est sous la forme de phosphate et qu'il existe des exemples de toits verts qui ne présentent aucune libération de phosphore (Vijayaraghavan et al. 2012). Cependant, d'autres études trouvent que les concentrations de phosphore total (Tot-P) dans les eaux de ruissellement sont nettement plus élevées que les concentrations en phosphate (Teemusk et Mander, 2007). Köhler et al, (2002) ont conclu que les émissions de phosphore diminuent avec le temps. Ceci est attribué à l'évolution de la végétation, mais peut aussi être liée à l'âge du toit et à la perte annuelle de phosphore du sol. Il est observé que le lessivage du phosphore se réduit d'une manière significative après un an, ce qui suggère que la substance nutritive est rapidement lessivée du sol et l'on peut s'attendre à ce que les niveaux de concentration baissent.

Dans le cas de deux toits végétalisés neufs au nord-est de la Caroline (USA), dont le substrat a été initialement fertilisé avec de l'engrais contenant 15% de compost de fumier de vaches, connu pour être une grande source de N et P, Hathaway et al (2008) ont indiqué que les toitures végétalisées agissent en tant que source de N et P (Tableau 11). Ce phénomène est

particulièrement net pendant les deux premières années de la toiture. Ainsi les émissions de phosphore par les TTV sont dépendantes de l'âge du toit et de sa fertilisation.

Le Tableau 10 synthétise les niveaux de concentration rapportés dans la littérature pour les différentes formes d'azote et de phosphore.

Référence		Tot-N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	Tot-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P
Teemusk et Mander 2007	pluie	0.6-1.3	0.18-0.09	<0.015-0.22	0.012	0.003-0.004
	TTV	1.2-2.1	0.42-0.8	0.12-0.33	0.026-0.09	0.006-0.066
Teemusk et Mander 2011	pluie	0.4	0.1	0.1	0.02	0.004
	TTV	0.4-6.4	0.005 – 2.0	0.01-2.4	0.16-0.64	0.12-0.63
Gregoire et Clausen 2011	pluie	0.51	0.26	0.10	0.007	0.004
	TTV	0.49	0.37	0.023	0.043	0.025
Moran et al, 2005		0.8-6.8			0.60-1.50	
Monterusso et al, 2004					0.00-0.004	
Moran et al, 2005		0.8-6.8			0.60-1.50	
Monterusso et al, 2004					0.00-0.004	
Berndtsson et al, 2009	pluie	2.65	1.03	1.08	0.04	0.02
	TTV extensif	2.31	0.07	0.08	0.31	0.27
	TTV intensif	0.59	0.11	0.15	0.01	0
Bliss et al, 2009		0.0			2-3	
Hathaway et 2008	pluie	0.06 à 2.41			0.05	
	TT référence	0.7 à 7.2			0.05 à 0.35	
	TTV	0.7 à 6.9			0.6 à 1.4	

**Tableau 10** : Concentration de substances nutritives dans les eaux de ruissellement

#### Flux de nutriments émis par les TTV

Grégoire et al (2010) ont comparé les flux (kg/m<sup>2</sup>/an) issus d'un toit végétalisé extensif de 248 m<sup>2</sup> et d'un toit de contrôle, pour les analyses de NTK, NO<sub>3</sub>+ NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P. Les flux d'azote et de phosphore observés sur la TTV sont nettement inférieurs à ceux mesurés pour la TT classique, du fait principalement de la réduction des volumes de ruissellement. Dans le cas des composés azotés, ces flux sont inférieurs à ceux apportés par les précipitations.

Nutriments (kg/ha/an)	Azote total	NTK	(NO <sub>2</sub> -) + (NO <sub>3</sub> -)	NH <sub>4</sub>	Phosphore total	Ortho phosphates
pluie	6.29	2.56	3.73	1.47	0.11	0.05
TT référence	10.82	2.27	8.55	0.34	2.00	1.71
TTV	4.27	1.39	2.88	0.18	0.32	0.21

**Tableau 11** : Flux (kg/ha/an) d'éléments nutritifs dans l'écoulement des toitures végétalisées de plaza et de la ligne de partage de contrôle, Storrs, depuis le 2 septembre 2009, au 1er février 2010, (Grégoire et al, 2011).

#### **1.3.2 Carbone organique dissous (COD)**

Dans l'étude de (Berndtsson et al. 2009), une libération importante de COD a été observée à partir des toits verts extensifs. La concentration moyenne dans les eaux de ruissellement était 20 fois supérieure à celle des précipitations. Dans le cas du toit intensif, les concentrations moyennes de l'écoulement sont deux à quatre fois supérieures à celle du toit extensif. La source de COD est le matériau organique provenant du sol et la décomposition de la végétation. Les différences entre les

toits extensifs et intensifs peuvent être expliqués par la composition du sol : le premier est essentiellement minéral, le deuxième contient de la matière organique (5%). Les résultats d'une étude réalisée par Mason et al. 1999 sur l'infiltration des eaux de ruissellement dans le sol ont montré que la majeure partie du COD est conservée lors de l'infiltration et que l'adsorption de COD sur le sol semble peu probable. Dans le cas où il y a un excès de carbone disponible dans le sol, une libération d'un certain degré de COD est probable. Dans une autre étude, Mendez et al (2011) examinent le comportement de matériaux de toiture conventionnels et alternatifs pendant les pluies d'automne dans l'éventualité d'un usage domestique. Ils ont mesuré le COD, et trouvé que les toits végétalisés ont rejeté de l'eau avec des concentrations en COD très fortes (25-27 mg/L), qui pourraient mener à de fortes concentrations en sous-produits de désinfection après chloration.

### 1.3.3 Acides humiques

Il est observé que les eaux de ruissellement des toitures végétalisées ont une couleur jaune ou thé, par rapport à la source d'eau initiale. Cette couleur jaune est probablement due à la présence d'acides humiques dans ces eaux.

### 1.3.4 Les matières en suspension

La notion de matières en suspension (ou MES) désigne l'ensemble des matières solides insolubles présentes dans un liquide. Plus une eau en contient, plus elle est dite turbide. Les seules valeurs documentées proviennent du TRCA (2006), et montrent une réduction des concentrations de MES dans une toiture végétalisée, par rapport à la toiture de contrôle et les précipitations.

### 1.3.5 Composition ionique

Certaines études (Uba et Aghogho, 2000 ; Rossillon et al. 2007 ; Sazakli et al. 2007) s'intéressent aux cations et aux anions communément présents dans les eaux collectées en aval des toitures : calcium, magnésium, sodium, potassium, ammonium, phosphate, chlorure, sulfate, nitrate et nitrite. Vijayaraghavan et al. 2012 ont démontré que les toits verts sont une source d'ions dont ils augmentent la concentration dans l'eau de ruissellement. De même, en Pennsylvanie, les eaux de ruissellement des TTV ont contenu une concentration élevée en ions et en nutriments par rapport à un toit conventionnel (US EPA, 2009).

Les résultats de l'étude effectuée en 2011 par le LEESU au niveau des bancs de toitures végétalisés du centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), sur la qualité de l'eau en aval des toitures végétalisées montrent la variation de la concentration des anions et des cations en fonction du type de végétation de toit (tableau 15), on remarque que les 3 toits, conventionnel, extensif et intensif, ont agi comme une source des ions. Les concentrations moyennes des ions sont plus élevées que celles de l'eau pluviale sauf pour l'ammonium pour les 2 toits intensif et conventionnel, (Ghiglia et al. 2011). Il faut noter que le nombre de pluie sur chaque toit est différent : pour l'intensif il y a eu seulement 4 pluies échantillonnées, contre 8 sur le toit extensif il est donc difficile de faire une comparaison directe des moyennes

Concentration moyenne (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Eau pluviale	1.0	4.1	0.1	0.05	1.1	3.5	0.2	2.5
Toit conventionnel	0.7	7.8	0.1	0.17	1.3	2.9	0.7	4.1
TTV extensif	0.1	12.9	4.0	0.14	5.5	0.5	18.7	17.5
TTV intensif	0.6	8.3	1.4	0.12	2.6	2.3	6.5	8.0

Tableau 12 : Concentration moyenne (mg/l) des ions pour les différents types de toiture (Ghiglia et al. 2011)

### 1.3.6 Éléments traces métalliques (ETM)

Très peu d'études se sont intéressées aux métaux dans les eaux des toitures végétalisées. Dans la plupart des cas les concentrations des métaux étaient insignifiantes ou bien en dessous des limites admissibles (Berndtsson et al. 2006, 2009). Berndtsson et al. (2006) ont constaté que certains métaux apparaissent dans les eaux de ruissellement des TTV dans des concentrations correspondant à l'eau naturelle modérément polluée.

Berndtsson et al, (2009) et Steusloff (1998) ont étudié la rétention des métaux lourds (plomb (Pb), zinc (Zn), cuivre (Cu), et le cadmium (Cd)) dans les TTV et montré que le flux dépend essentiellement de la capacité de réduction de l'eau de ruissellement par les toits verts.

Alsop et al (2010) ont constaté que les pluies acides peuvent intensifier la lixiviation des métaux comme le Cd, le Pb, et le Zn dont la solubilité augmente quand le pH diminue. Ils ont testé différents substrats pour établir les toitures végétalisées. Aucun des cas observés ne peut être considéré comme source notable de Cr, Cu, Fe, Ni, ou Zn car la concentration détectée dans le lixiviat a rarement dépassé la norme de l'EPA (Environmental Protection Agency), sauf le Lassenite qui était une source du Manganèse (50µg/L).

Berndtsson et al. 2008 (Tableau 13), ont trouvé que les concentrations moyennes du Fe, du Pb, et du Zn sont diminuées dans l'écoulement du toit végétalisé intensif par rapport à l'eau de pluie, démontrant son potentiel à piéger ces métaux. Les concentrations du Cadmium du Chrome et du Plomb étaient inférieures aux limites de détection. La concentration moyenne dans l'écoulement du toit végétalisé extensif est au contraire accrue pour le Zn et inchangée pour le Fe. Le Pb n'a pas été détecté dans l'écoulement du toit extensif. Une faible libération de Cu et de Mn a été observée. Les résultats montrent que les toits végétalisés étudiés, s'ils ne retiennent pas efficacement les métaux, ne sont au moins pas une source importante de contaminants métalliques.

	Zn	Fe	Cu	Mn	Cd	Cr	Pb
<b>Extensif</b>	Augmentation de concentration	Pas de changement	Faible libération		Concentration inférieure aux limites de détection		
<b>Intensif</b>	Diminution de concentration			---	---	---	Diminution de concentration

**Tableau 13** : Comparaison des concentrations en métaux dans les eaux de toitures végétalisées par rapport à la concentration dans l'eau de pluie, Berndtsson et al. (2005).

Mendez et al (2011), observent que la concentration de l'arsenic (6-7µg/l) et du plomb (2.5-5µg/l) étaient sensiblement plus élevées en sortie de TTV que dans l'échantillonneur ambiant. Ils suggèrent de ce fait que la qualité des substrats commerciaux soit soigneusement examinée si l'eau est récupérée pour l'usage domestique.

Métaux (kg/ha/an)	Total				Dissous			
	Cu	Pb	Zn	Hg	Cu	Pb	Zn	Hg
<b>pluie</b>	0.02	0.11	0.38	4.30E-5	0.03	0.12	0.41	5.61E-5
<b>TT référence</b>	0.03	0.00	0.65	1.42E-5	0.02	0.00	0.56	1.74E-5
<b>TTV</b>	0.03	0.00	0.13	1.68E-5	0.02	0.00	0.12	2.51E-5

**Tableau 14** : Entrée et sortie de flux (kg/ha/an) de métaux dans l'écoulement des toitures végétalisées et de contrôle de la plaza, du 2 septembre 2009 au 1er février 2010, (Ghiglia 2011 d'après Grégoire et al, 2011).

Grégoire et al (2010) ont mesuré les flux de quatre métaux (Cu, Pb, Zn, Hg) issus d'un toit de 248 m<sup>2</sup> végétalisé extensif et l'on comparé au flux issu d'un toit de contrôle, et a ceux apportés par les précipitations. La toiture végétalisée a été un piège pour Zn, Pb, et Cu dissous mais pas pour Cu total (Tableau 13). Ce comportement de « piège » est largement conditionné par la réduction des volumes ruisselés sur la toiture végétalisée comparativement au toit de référence.

#### 1.4 Les facteurs influençant la qualité de l'eau

Il est certain que de nombreux facteurs participent à la qualité de l'eau, tels que la composition du substrat et son épaisseur, la sélection du type de plantes, l'âge des toitures, les pratiques de fertilisation et d'entretien, la quantité de précipitations, les sources locales de pollution, et les propriétés physiques et chimiques de ces polluants.

##### 1.4.1 Utilisation des engrais

Emilsson et al (2007) ont mesuré la concentration en nutriments dans l'écoulement, leur stockage et le taux de prélèvement par le végétal en croissance après fertilisation (par les engrais à libération contrôlée ou bien un mélange avec des engrais conventionnels) sur des tapis de sedum, de végétation préétablie et de substrat non végétalisé (Tableau 15).

		Système végétal		
	Fertilisation	Végétation préétablie	Tapis de sedum	Substrat non végétalisé
<b>NH4-N</b>	Faible	0.7	2.1	2.92
	Moyenne	1.06	3.52	4.35
	Forte	183.4	459.6	301.1
<b>NO3-N</b>	Faible	11.98	404.9	616.1
	Moyenne	21.59	532.9	699.9
	Forte	448.1	2130	2176
<b>Total N</b>	Faible	41.42	502.7	806.1
	Moyenne	47.35	534.1	849.2
	Forte	751.2	2977	2899
<b>PO4-P</b>	Faible	1.57	0.79	1.19
	Moyenne	1.67	1.11	0.91
	Forte	53.62	109.2	48.16
<b>Total P</b>	Faible	3.93	8.81	12.74
	Moyenne	3.27	7.18	28.11
	Forte	72.49	150.9	86.47
<b>K</b>	Faible	93.85	87.11	93.14
	Moyenne	112.7	90.65	96.9
	Forte	1504	2611	2152

**Tableau 15 :** Flux (mg/m<sup>2</sup>) des nutriments dans l'écoulement issu des différents toits et selon le type de fertilisation (faible, moyenne, forte) (Emilsson et al, 2007).

Les concentrations des nutriments augmentent quand les engrais conventionnels sont employés et bien que les concentrations diminuent au fil du temps, elles sont toujours plus élevées que celles des toits fertilisés avec de l'engrais à libération contrôlée (tableau 17). On remarque ici que la lixiviation est moins importante avec les toits à la végétation préétablie qu'avec ceux qui ont été récemment plantés. Ce résultat est principalement dû à la lixiviation rapide de l'engrais conventionnel qui se dissout vite et dont l'excès (dépassement de la capacité d'échange du substrat et du taux de prélèvement par les plantes) est évacué lors de l'écoulement.

De plus la fertilisation des toitures végétalisées pourrait non seulement être affectée par le type d'engrais utilisé mais également par la technique et la période d'administration. En outre, l'utilisation des engrais conventionnels solubles devrait être évitée à cause de leur impact défavorable sur la qualité de l'écoulement lors de grosses précipitations. Si la charge en nutriment reste le problème de toitures végétalisées, on pourrait les coupler avec d'autres techniques alternatives pour la gestion des eaux de pluie. (Rowe, 2010).

#### 1.4.2 Nature et épaisseur de la couche de substrat

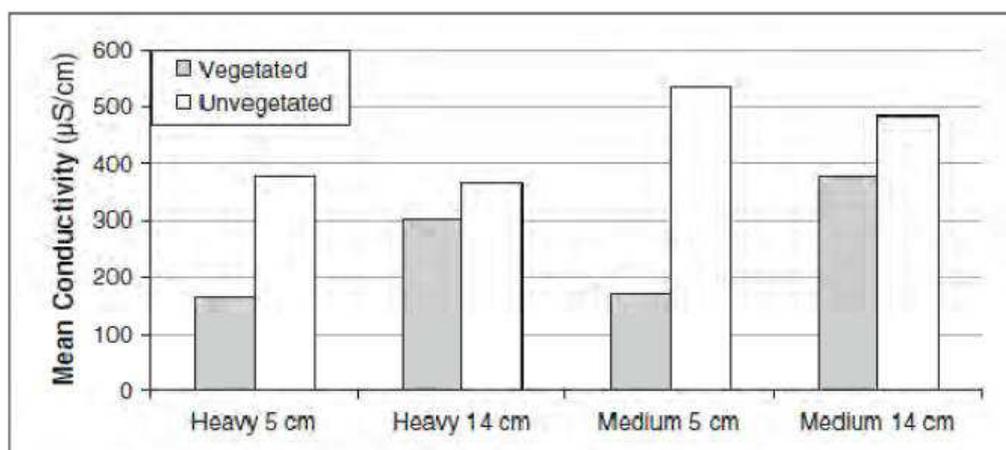
Le substrat et l'engrais à émission contrôlée sont des sources probables de phosphore, d'azote et de Cuivre dans l'écoulement issu de la toiture végétalisée. Une étude de laboratoire entreprise à l'université de Caroline du Nord (NCNU) a prouvé que les concentrations de N et P dans l'écoulement peuvent être réduites avec une proportion moindre de compost dans le substrat (Maron, 2004).

Teemusk et al (2007) comparent également l'écoulement des toitures végétalisées au toit bitumeux d'Estonie pour le pH. Les valeurs de pH à l'effluent des toitures végétalisées varient de 5,2-5,6 à 7.2-8.3, probablement en raison de la teneur en carbonate du substrat.

L'épaisseur du substrat est un paramètre qui affectera la performance globale des toitures végétalisées selon Buccola et al (2011). Une épaisseur plus importante apportera une plus grande rétention, mais également une conductivité plus élevée (matière solide dissoute plus importante) qui peut porter préjudice à la qualité de l'eau, Cet effet peut être dû à un temps de séjour plus long ou à une surface de contact entre l'eau et le sol plus grande.

#### 1.4.3 Type de végétation

Monterusso et al (2004) ont comparé l'effet de plusieurs types de végétation sur l'effluent des toits végétalisés et ont constaté que les concentrations en nitrate dans l'écoulement étaient plus élevées dans les toits de sedum que dans les toits équipés d'herbacés pluriannuels. Czemieli Berndtsson et al (2008), ont comparé la qualité de l'eau d'écoulement de deux toits végétalisés : un intensif au Japon et un extensif en Suède. Les résultats montrent que les toits végétalisés extensifs et intensifs sont tous les deux un piège pour l'azote sous forme de nitrate et de l'azote sous forme ammoniacale avec des performances similaires. Le toit végétalisé intensif constitue également un piège de l'azote total contrairement au toit extensif. La lixiviation du phosphore s'observe aussi sur le toit végétalisé extensif mais pas du toit végétalisé intensif. La libération de COD et K est observée sur les deux toits. La source de COD est la matière organique du substrat et celle provenant de la décomposition de la végétation. Le potassium et le calcium sont également libérés des deux toits, ce qui est certainement dû à la dissolution du matériau du sol.



**Figure 8 :** Conductivité de l'eau écoulée en fonction de la végétation, de la profondeur du substrat et de l'intensité des précipitations (Heavy pour forte et Medium pour modérée) (Buccola et al, 2011).

#### 1.4.4 Âge du toit

Dans une des études pionnières de Kohler et al (2002) sur les toits végétalisés à Berlin (Allemagne), la rétention en masse du PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> a augmenté de 26% pendant un an après l'installation du toit et jusqu'à 80% à la quatrième année. Bien que le substrat d'origine influence beaucoup les résultats, l'entretien de la végétation, l'application d'engrais artificiel pour améliorer la floraison et obtenir la densité de couverture végétale souhaitée, pourraient aussi porter préjudice à la qualité de l'eau. Une autre étude en Allemagne a signalé des concentrations faibles de plomb, de cadmium, de nitrate et de phosphate à partir des toits vieux, âgés de 15 ans, sur une période de 4 ans (Köhler et Schmidt, 2003).

Selon les études citées précédemment, les jeunes toits végétalisés tendent à être une source de pollution, à la différence des plus âgés ou la végétation a été préétablie et qui sont de vrais pièges pour les contaminants (Berndtsson et al. 2006). Les éléments nutritifs additionnels administrés pendant leur développement ainsi que la décomposition de matière organique sont des sources possibles de contamination. Ainsi la végétation, une fois établie, empêchera la lixiviation des éléments nutritifs supplémentaires.

#### 1.4.5 Qualité de l'eau suivant les saisons

Dans une première approche, il semble que les toits végétalisés constituent une source de contaminants. Berndtsson et al (2006), ont analysé les métaux et éléments nutritifs (Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb, Zn, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, Tot-N, PO<sub>4</sub>-P, et Tot -p) présents dans l'écoulement issu de toits extensifs de sedum-mousse et des toits non végétalisés et ont prouvé qu'à l'exception de l'azote, l'eau de pluie s'est avérée moins chargée en contaminants que l'écoulement de toitures végétalisées. La plupart des toits étudiés libèrent du PO<sub>4</sub>-P, à l'exception du toit le plus ancien (plus de rétention de P par la végétation). Ces toits montrent également une légère diminution des flux de quelques métaux (Cr, Mn, et Zn Tableau 18) C'est en grande partie dû au fait que la durée du séjour dans le toit végétalisé extensif en automne est relativement rapide (humidité enlevée, précipitations fréquentes, sol saturé), ce qui limite l'influence des toits sur la qualité de l'eau.

Annual load	Tot-N	Tot-P	K	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Précipitation (mg/m <sup>2</sup> /an)	909	15	73	0.18	1.44	12.08	1.44	2.16	7.77
Eau issue du toit (mg/m <sup>2</sup> /an)	378	104	2504	0.07	5.72	15.4	1.1	0.15	7.11
Source(S)/Piège(P)	P	S	S	P	S	S	P	P	P

**Tableau 16 :** Estimations du dépôt humide annuel et lixiviation annuelle de l'azote, du phosphore et des métaux étudiés sur le toit végétalisé extensif à Augustenborg, Malmö, (Berndtsson et al, 2006).

Une étude allemande (Steusloff, 1998) s'intéresse à la rétention des métaux lourds par un toit végétalisé extensif, a noté les pourcentages de rétention en masse suivants : 97%, 96%, 92%, et 99%, respectivement pour le Cu, le Zn, le Cd, et le Pb, pendant la période estivale (juillet-septembre). Vers la fin de la période automnale (octobre-décembre), ces taux deviennent 34%,

72%, 62% et 91%. Il semble donc que la période de l'année est également l'un des facteurs importants. Les résultats de l'étude peuvent être résumés dans le tableau suivant :

<b>Eté</b>	Zn(%)	Cu(%)	Cd(%)	Pb(%)
Semi-intensif	99	99	98	99
Extensif	96	97	92	99
<b>Hiver</b>	Zn(%)	Cu(%)	Cd(%)	Pb(%)
Semi-intensif	92	68	94	88
Extensif	72	44	62	91

**Tableau 17** : La variation des taux de rétention en masse des métaux en fonction de la saison et le type de toit, (Steusloff, 1998).

#### 1.4.6 Utilisation de Biochar :

Dans l'objectif d'améliorer la qualité d'écoulement, le Biochar (charbon de bois produit à partir de la biomasse) a été intensivement étudié pour le rôle positif qu'il peut exercer sur la qualité et la quantité d'eau écoulée des toitures végétalisées. Avec l'augmentation globale de l'installation de toitures végétalisées, il est devenu essentiel de s'assurer que les toits végétalisés n'exercent aucun effet néfaste sur l'écoulement. Lehmann et al (2003) ont conclu qu'en utilisant le biochar, on réduisait la lixiviation de l'azote, mais également on augmentait la fertilité du sol et la résistance microbienne, servant alors de pièger à long terme les contaminants. Beck et al (2011) ont trouvé qu'une addition de biochar de 7%, en poids sur le sol de contrôle a entraîné une amélioration de la qualité de l'eau du ruissellement de pluie, et une augmentation du rétention de ces eaux, Ces améliorations comprennent: une diminution de nitrate, azote total, phosphore, phosphore total et les concentrations de carbone organique, également une diminution des concentrations des matières en suspension, l'augmentation de la rétention d'eau, et la réduction de la turbidité des eaux de pluie. Contrairement au carbone organique total, la concentration du carbone inorganique rejeté dans les eaux de ruissellement n'a pas été affectée par la présence de biochar dans le sol (tableau 20). Le biochar a montré une réduction de 67 % à 72% de carbone organique total dans les eaux de ruissellement de pluie.

Type de substrat	NO3 (mg/L)	PO4-P (mg/L)	Tot-P (mg/L)	Carbone organique total (mg/L)	Carbone inorganique total (mg/L)
Sol de référence	178	19.8	22.1	139.8	17.4
Sol avec Biochar	36.5	11.2	12.8	38.7	15.2
% Réduction	79	43	42	72	12

**Tableau 18** : Concentrations moyennes et pourcentage de réduction des paramètres examinés pour la qualité de l'eau issue des toitures végétalisées, (Beck et al, 2011).

Ces données remarquables exigent tout de même qu'une étude soit menée tout au long de la durée de vie de la toiture, afin de s'assurer que le biochar est une solution possible à l'optimisation de la qualité d'écoulement de toitures végétalisées.

#### 1.4.7 La hauteur de la pluie

Carpenter et al (2010) ont étudié la corrélation entre l'intensité de l'évènement de pluie et les solides en suspension dans l'effluent. Ils ont constaté que lors d'une pluie faible, les nutriments et les sédiments du toit conventionnel sont généralement totalement retenus par le toit

végétalisé car il n'y a en fait aucun écoulement. Mais dans des circonstances de forte pluie, les toitures végétalisées en produiront des concentrations plus élevées. Teemusk et al (2007) ont noté dans leur étude, pendant 3 événements pluvieux, que quand l'écoulement était lent (pluie faible), la concentration en azote total, en NH<sub>4</sub>-N et en matière organique dans l'eau d'écoulement était plus élevée. Dans l'étude estonienne, et pendant des pluies modérées, les valeurs de DCO et DBO ainsi que les concentrations en N et P totaux sont plus élevées dans l'écoulement issu du toit bitumeux que dans la toiture végétalisée. Cependant, lors de pluies fortes, les nitrates et les phosphates sont lessivés du substrat. Lors de la fonte de neige, les concentrations de tous les composants sont plus élevées pour les toitures végétalisées que pour le toit bitumeux à cause de l'accumulation des polluants atmosphériques dans la neige. Les résultats précédents sont notés ci-dessous dans le tableau 21.

	<b>pH</b>	<b>DBO7 (mgO//L)</b>	<b>COD (mgO/L)</b>	<b>Total P (mg/L)</b>	<b>PO4-P (mg/L)</b>
<b>TV1</b>	M: 8.26 F: 7.94 FN:7.21	M: 5.3 F: 2.6 FN: 8.3	M: 37 F: 22 FN: 39	M: 0.036 F: 0.09 FN: 0.054	<i>M: 0.012</i> <i>F: 0.036</i> <i>FN: 0.011</i>
<b>TV2</b>	M: 8.14 F: 7.85 FN:7.23	M: 4.1 F: 2 FN: 8.9	M: 26 F: 21 FN: 40	M: 0.026 F: 0.074 FN: 0.056	<i>M: 0.006</i> <i>F: 0.066</i> <i>FN: 0.012</i>
<b>REF</b>	<i>M: 8.43</i> <i>F: 6.73</i> <i>FN:6.08</i>	<i>M: 7</i> <i>F: 2.9</i> <i>FN: 2.5</i>	<i>M: 43</i> <i>F: 23</i> <i>FN: 4</i>	<i>M: 0.104</i> <i>F: 0.102</i> <i>FN: 0.029</i>	<i>M: 0.032</i> <i>F: 0.054</i> <i>FN: 0.005</i>

**Tableau 19 :** Qualité de l'eau d'écoulement provenant de différents toits étudiés. TV1 et TV2 : deux toits végétalisés ; REF : toit bitumeux de référence, et différentes forces d'écoulement (Teemusk et al, 2007).

(M : écoulement modéré, F : écoulement fort et FN : fonte de Neige),

## 2. Matériel et méthode

Afin d'évaluer les concentrations et les flux de contaminants dans les eaux issues des toitures végétalisées, des campagnes d'échantillonnage et analyses ont été effectuées au cours de l'année 2012 sur le banc de toitures mis en place dans le cadre du projet TVGEP.

### 2.1 Dispositif expérimental

#### 2.1.1 Description du banc de toitures

Le dispositif expérimental est constitué d'un banc d'essai implanté sur la toiture terrasse d'un bâtiment 300m<sup>2</sup>, situé le site du CETE Ile-de-France à Trappes, à l'ouest de l'agglomération parisienne (Figure 9).

Le banc d'essai a été mis en place en Juin 2011 dans le cadre du projet TVGEP. Il comporte 8 compartiments végétalisés d'une surface de 35 m<sup>2</sup> (7x5m) chacun et 2 compartiments de référence correspondant à des toitures terrasse classiques de 21 m<sup>2</sup> (7x3 m) chacun.

Les bancs ont été mis en œuvre après réfection de l'étanchéité de la toiture avec une membrane d'étanchéité en bitume modifié SBS autoprotégée anti-racine.



**Figure 9** : Toiture végétalisée du CETE IF à Trappes. A droite du toit se trouve la station météo, à gauche de cette station, le pluviomètre. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets pour la mesure des débits de ruissellement.

L'objectif du banc d'essai est de comparer sur un même site (i.e. mêmes conditions climatiques) différentes structures de végétalisation, en faisant varier un seul paramètre entre chaque structure. 2 types de végétations (mélange de sédums, mélange de sédums / graminées / vivaces), 2 types de substrats (substrat pour toiture extensive et substrat pour toiture semi-extensive), 2 hauteurs de substrats (3 et 15 cm) et 2 types de drainages (polystyrène expansé ou pouzzolane) différents ont été testés. Ainsi, 6 compartiments végétalisés furent réalisés (Tableau 20 et figure 11) :

- Un premier compartiment qui est notre référence, noté **SE3Y**, composé d'un substrat typique d'une toiture végétalisée extensive, d'épaisseur 3 cm, de sédums et d'une couche de drainage en polystyrène expansé ;
- Pour la variante **SE3Z**, la couche de drainage est composée de 3 cm de billes de pouzzolane qui ont la propriété d'être hydrorétentrice ;
- La variante **NE3Y** n'a pas de végétation ;

- La variante **SE15Y**, est identique à la référence mais avec une hauteur de substrat de 15 cm;
- La variante **GE15Y** diffère de la référence par une hauteur de substrat différente, 15 cm et une végétation composée d'un mélange graminées - sédums ;
- La variante **GI15Y** est obtenue en modifiant le type de substrat pour un substrat caractéristique des toitures semi-intensives de 15 cm et en changeant la végétation pour un mélange graminées-sédums.

Pour comparer l'effet des structures végétalisées par rapport aux toitures traditionnelles, un compartiment a été laissé avec seulement l'étanchéité en bitume modifié (**Bi**, figure 11) et un autre recouvert de graviers (**Gr**).

**Tableau 20 : Composition des 6 bancs de toitures végétalisées**

Code	SE3Y	SE3Z	NE3Y	SE15Y	GE15Y	GI15Y
Végétation	Sedum (S)		Aucune (N)	Sedum (S)	Graminées + sedum (G)	
Nature du substrat	Extensif (E)					Intensif (I)
Épaisseur de substrat	3 cm			15 cm		
Matériau de drainage	Polystyrène expansé (Y)	Pouzzolane (Z)	Polystyrène expansé (Y)			

La notation utilisée pour référencer les différentes structures (par exemple S3E) est la suivante : la première lettre correspond au type de végétation (S pour sédums, G pour le mélange graminées – sédums) ; la lettre suivante désigne le type de substrat (E pour extensif, I pour semi-intensif) ; le chiffre correspond à l'épaisseur du substrat (3 ou 15 cm), la dernière lettre désigne le type de drainage (Y pour le polystyrène expansé et Z pour la pouzzolane).

La végétation extensive de sédums est un mélange des espèces suivantes : *S. album* (majoritaire), *S. sexangulare*, *S. reflexum*, *S. kamchatikum*, *S. spurium*, *S. acre* (faible quantité). Les graminées et vivaces sont constituées de *Festuca ovina*, *Festuca rubra*, *Dianthus carthusianorum*, *Poa pratensis*, *Koeleria glauca*.

Le substrat extensif mis en œuvre est conforme aux règles professionnelles (ADIVET et al. 2007) et composé de : roches volcaniques, compost d'écorces, compost vert et tourbe. Sa capacité maximale en eau est de 40% vol. environ, avec une perméabilité comprise entre 0,01 et 0,1 cm/s.

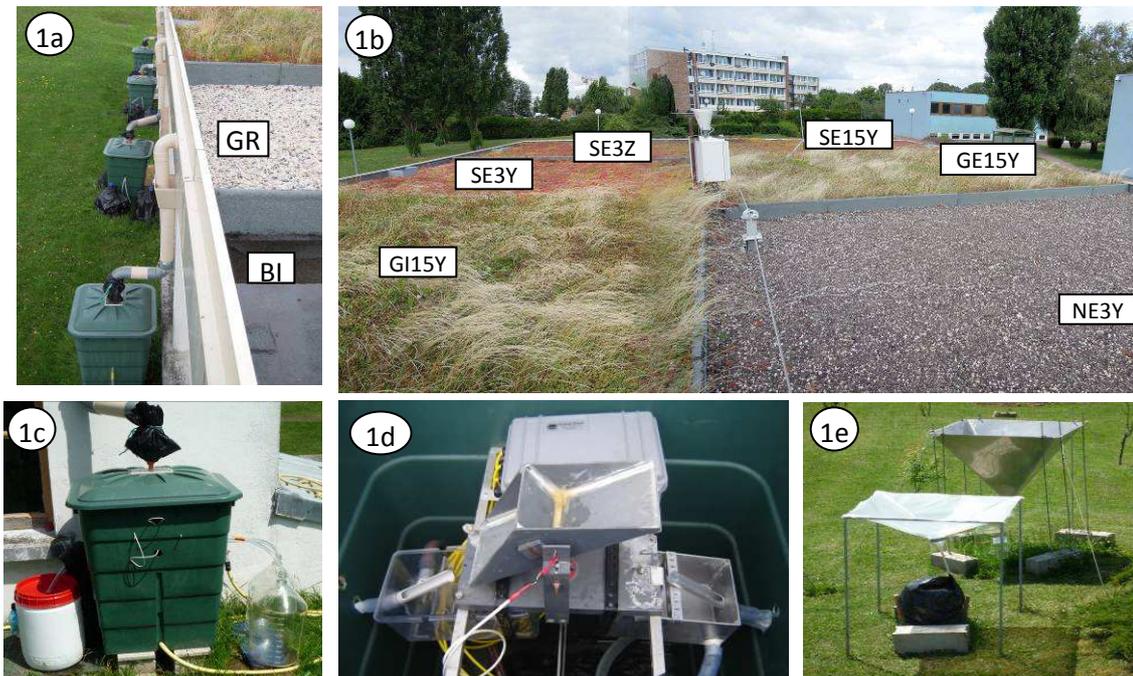
### 2.1.2 Equipements

Les eaux d'écoulement (ruissellement et percolation au travers du substrat) issues de chaque toiture expérimentale sont collectées dans une descente de gouttière en PVC. La mesure du débit est réalisée en pied de gouttière par augets basculants (résolution 0,01 mm).

L'auget, de part de sa construction, sépare les écoulements en deux parties égales, chacune récupérée séparément pour des mesures de qualité spécifiques. Deux échantillons moyens, proportionnels au volume des eaux écoulées, sont ainsi prélevés en aval du débitmètre, l'un pour l'analyse des paramètres globaux et des métaux, l'autre pour l'analyse des micropolluants organiques.

Un système de fractionnement permet de collecter environ 10% du volume des basculements d'auget et de le diriger vers un flacon de collecte. L'ensemble servant pour la mesure des paramètres globaux et des micropolluants métallique est conçu en matières plastiques : bac de collecte en PVC, tuyaux en polyéthylène gainé PTFE et flacon de collecte de 30 L en PEHD. L'ensemble servant pour la

mesure des micropolluants organique est conçu en métal (boite de division) avec tuyaux en polyéthylène gainé PTFE et des flacons de collecte en verre de 20 L (photo 1d).



**Figure 10 : (1a and 1b) Vue d'ensemble des 8 compartiments de toiture et des dispositifs de mesure et de collecte du ruissellement ; (1c) Echantillonnage des eaux de percolation. Le conteneur vert abrite le débitmètre et de dispositif de prélèvement détaillés en (1d) ; (1e) Collecteurs de retombées atmosphériques totales.**

Le dispositif permet ainsi de récupérer des échantillons proportionnels jusqu'à une hauteur de ruissellement de l'ordre de 10 à 12 mm. Un volume d'échantillon d'au moins 2 litres est nécessaire pour l'analyse des paramètres globaux et métaux, et d'au moins 6 litres pour l'analyse des micropolluants organiques. Afin d'avoir un volume d'échantillon suffisant pour l'analyse des micropolluants organiques dans les cas de faible ruissellement (pluies faibles ou substrat sec en début de pluie), la partie 90% est collectée dans un deuxième flacon de 20 L.

L'objectif est de comparer la qualité de l'eau écoulee des toitures végétalisées avec celle du toit de référence, mais également aux retombées atmosphériques totales. Pour ce faire, nous avons installé deux dispositifs de collecte des retombées atmosphériques totale (figure14). Il s'agit :

- pour l'analyse des paramètres globaux et des métaux, d'une bache en polyéthylène de forme pyramidale, d'une surface de 1 m<sup>2</sup>, fixée sur un cadre métallique peint et collectant les eaux vers un flacon de 30 l en PEHD.
- pour l'analyse de micropolluants organiques, d'un entonnoir pyramidal en inox d'une surface de réception de 1 m<sup>2</sup>, collectant les eaux dans un flacon en verre de 20 l. Il s'agit d'une bache en polyéthylène d'une surface de 1 m<sup>2</sup>, fixée sur un cadre métallique peint. La bache possède un passage en son centre pour permettre à l'eau de s'écouler en travers d'un entonnoir dans le bidon placé en dessous.

La mesure de la pluviométrie est réalisée au moyen d'un pluviomètre à augets basculants (résolution 0.1 mm) placé sur le toit expérimental.

### **2.1.3 Protocoles d'échantillonnage et d'analyse**

Les flacons d'échantillonnage sont mis en place sur la base des prévisions de pluie, immédiatement avant des événements pluvieux susceptibles de générer des volumes ruisselés suffisants. Ils sont revêtus extérieurement de sacs poubelle noirs afin de les protéger de la lumière et de la pluie.

Les flacons sont collectés dans les 24h qui suivent la fin de la pluie. La quantité d'eau collectée dans chaque flacon est déterminée par pesée. Les flacons plastiques sont ensuite échantillonnés et un volume de 2 litre est récupéré pour les analyses des paramètres globaux et des métaux. Le volume des flacons est réduit, si nécessaire, à 8 litre et ramené au laboratoire pour analyse. Les flacons en plastique sont lavés à l'eau de robinet et rincés à l'eau distillée. Les flacons en verre sont trempés 24 heures dans l'Extran et rincés abondamment avec de l'eau de robinet et eau distillée.

À partir des échantillons des bidons en plastique sont analysés :

- conductivité, turbidité, pH.
- MES et matière organique : DCO, COD (1), COP, SUVA
- Composition ionique (données non encore exploitées)
- Nutriments : Ntot, Ptot, N dissous, PO4-
- Métaux : Cu, Zn, Mn, Ni, Cr, Pb, Sr, V

À partir des échantillons des flacons en verre :

- MES, conductivité, pH, COD (2)
- Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- Les Alkyl-Phénols (NP, NP1EC, NP1EO, NP2EO, OP, OP1EO, OP2EO)
- Le Bisphénol-A (BPA),
- Le mécoprop (pour une partie des pluies uniquement)

Les analyses des paramètres globaux ont été effectuées selon les normes Afnor en vigueur et /ou selon les Standard Methods for Water examination (AWWA APHA, 2007).

Les méthodes d'analyse sont basées sur la distinction des fractions dissoutes et particulaires (limite fixée à 0,45µm) afin d'obtenir des informations sur la spéciation des molécules.

#### Protocole d'analyse des métaux

Les métaux traces sont analysés sur la phase totale et sur la phase dissoute. Pour éviter les contaminations et les pertes, certaines précautions de manipulation sont prises. Les analyses sont réalisées en salle blanche. La vaisselle, uniquement en plastique, est lavée successivement au détergent, à l'acide nitrique à 5 % et à l'eau milli-Q.

Les échantillons pour l'analyse du dissous sont filtrés sur des membranes en acétate de cellulose (0,45 µm) puis acidifiés à pH=1 avec de l'acide nitrique concentré (Suprapur 65 %).

Pour les métaux totaux, deux échantillons de 50 mL sont prélevés dans des flacons en PEHD pour l'analyse des métaux totaux, auxquels on ajoute 390µL d'acide nitrique concentré ultrapur (Merck) pour avoir une acidification à 5%. Les échantillons étant alors acidifiés à pH <1, ils peuvent être conservés plusieurs mois en chambre froide à 4°C avant d'être minéralisés (Méthode Digiprep HNO3 + H2O2 + HCl) et analysés.

Les échantillons pour l'analyse du total sont minéralisés (système Digiprep MS, SCP Science) à 95 °C pendant 2h30 après ajout d'acide nitrique (Suprapur 65 %) et chlorhydrique (Suprapur 30 %) (respectivement 620 µl et 1,15 ml pour 50 ml d'échantillon).

La quantification est faite par spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif (ICP-AES Vista MPX Varian) par étalonnage externe à partir d'une solution de calibration multi-élémentaire (PlasmaNorm Multi-Éléments pour ICP, VWR).

#### Protocole d'analyse des micropolluants organiques

La méthode d'analyse des micropolluants organiques est basée sur l'analyse séparée des fractions dissoutes et particulaires. Les échantillons d'eau sont filtrés sous vide, le jour même de l'échantillonnage, sur des filtres en fibre de verre (GFD de porosité 2,7 µm puis GFF de porosité 0,7 µm, Whatman) pré grillés et pré pesés.

*Extraction de la fraction dissoute* : La fraction dissoute est dopée par ajout d'étalons interne d'extraction et laissée une nuit en chambre froide (4°C) pour mise à l'équilibre avant extraction. L'extraction de la phase dissoute est réalisée dans 48 heures suivant la fin de l'événement pluvieux.

- HAP : La fraction dissoute est extraite sur phase solide sur des cartouches C18 (2g, Macherey Nagel). Les cartouches sont conditionnées par 10 ml de méthanol, puis 10 ml d'eau Milli Q sous pression atmosphérique. L'échantillon est ensuite percolé sous  $3 \cdot 10^4$  à  $4 \cdot 10^4$  Pa. La cartouche est alors rincée avec 0,5 ml de méthanol sous pression atmosphérique, séchée sous vide et éluée par 12 ml d'un mélange dichlorométhane / acétate d'éthyle (80/20 v/v). Après évaporation à sec sous flux d'azote, l'échantillon est repris dans 300 µl d'heptane avant purification.

- AP : La fraction dissoute est extraite sur phase solide sur des cartouches OASIS HLB (200mg, Waters). Les cartouches sont conditionnées par 10 ml de méthanol, puis 10 ml d'eau Milli Q sous pression atmosphérique. L'échantillon est ensuite percolé sous  $3 \cdot 10^4$  à  $4 \cdot 10^4$  Pa. La cartouche est alors rincée avec 2 ml d'eau Milli Q sous pression atmosphérique, séchée sous vide et éluée par 12 ml d'un mélange Méthanol/dichlorométhane/acétate d'éthyle (40/40/20 v/v). Après évaporation à sec sous flux d'azote, la fraction AP dissoute est reprise dans 1 ml de phase mobile (Methanol/Eau mQ)

*Extraction simultanée des HAP et AP de la fraction particulaire* : La fraction particulaire est congelée puis lyophilisée pendant 24h (Alpha 1-2 LD Plus, Bioblock Scientific) et extraite par micro-ondes à bombes fermées Multiwave3000 (Anton Paar). Entre 10 et 80 mg (suivant la quantité des MES) sont introduits dans les matras avec les étalons internes et 30 ml d'un mélange dichlorométhane/méthanol (40/60 v/v), et extraits pendant 15 minutes avec un gradient de puissance allant jusqu'à 800W. L'extrait est ensuite filtré sur filtres plissés et concentré par évaporation rotative sous vide jusqu'à environ 2 ml. Après évaporation à sec sous flux d'azote, l'échantillon est repris dans 5 ml d'heptane puis séparé en deux parties : 1ml pour l'analyse des AP et 4 ml pour les HAP.

*Purification* : L'étape de purification permet de séparer les composés d'intérêt des autres substances présentes dans la matrice et qui sont susceptibles de perturber l'analyse (matière organique, graisses...).

- HAP : Une colonne est préparée dans une pipette en verre de 5 ml grillée : 2,1 g de silice activée (à 100°C pendant 24 h) sont placés entre deux morceaux de laine de quartz. La colonne est conditionnée par 5 ml d'heptane, l'échantillon est déposé, puis élué avec 10 ml d'un mélange heptane/dichlorométhane 80/20 (v/v). La fraction HAP récupérée est ensuite évaporée à sec sous flux d'azote puis reprise dans 50 µl pour le dissous et 40 µl pour le particulaire en vue de l'analyse GC-MS

- AP : la fraction AP est purifiée sur une cartouche OASIS HLB (200mg, Waters) conditionnée par 3 ml de Methanol et 3 mL d'un mélange Méthanol/eau mQ (50/50 v/v). L'échantillon est ensuite déposé

dans la cartouche puis elle est rincée avec 3 ml d'eau mQ et séchée pendant 30 mn sous  $3.10^4$  à  $4.10^4$  Pa. La fraction purifiée AP est récupérée après élution de la cartouche avec un mélange Méthanol/Dichlorométhane/Acétate d'éthyl (40/40/20 v/v). La fraction est évaporée à sec sous flux d'azote puis reprise dans 100  $\mu$ L de phase mobile.

*Séparation et quantification des composés* : Chaque famille de substances est analysée séparément avec une méthode analytique adaptée. La séparation et la quantification des HAP sont faites par chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée à un spectromètre de masse (MS) (Focus DSQ, Thermo Fisher Scientific). La séparation et la quantification des AP et du BPA sont faites par chromatographie en phase liquide (LC) couplée à un spectromètre de masse en tandem (MS-MS).

La quantification est faite par étalonnage interne, ce qui permet de corriger les pertes lors des différentes étapes du protocole et de s'affranchir de l'effet de la matrice sur la réponse du spectromètre de masse. Les étalons internes utilisés sont les molécules deutérées suivantes :

- pour le BPA : BPA-d6 ;
- pour les AP : NP1EO-d2, n-OP-d17 ;
- pour les HAP : naphthalène d8, acénaphthène d10, phénanthrène d10, chrysène d12, pyrène d12, pérylène d12.

## 2.2 Caractéristiques des événements pluvieux étudiés

### 2.2.1 Événement pluvieux étudiés simultanément sur les RA et les toits BI et SE3Y

La qualité des eaux issues de la toiture végétalisée SE3Y a été analysée pour 13 événements pluvieux entre janvier 2012 et décembre 2012, et comparée à la qualité des eaux collectées pour les mêmes pluies sur le collecteur de retombées atmosphériques et de la toiture de référence en membrane d'étanchéité bitumineuse autoprotégée BI.

Les caractéristiques de ces événements pluvieux sont synthétisées dans le Tableau 21. Ces événements présentent une assez grande diversité en termes de hauteur de pluie, de temps sec antécédent et d'intensité maximale.

Date échantillonnage	Hauteur (mm)	DTS (j)	I <sub>max</sub> 3mn (mm/h)	Coef. de ruissellement	
				BI	SE3Y
06/01/2012	2.9	1.5	4	0.90	0.71
25/01/2012	16.4	15.1	4	0.88	0.65
05/03/2012	5.8	14.6	18	0.79	0.10
08/03/2012	9.0	1.1	10	0.75	0.16
19/04/2012	7.6	0.8	32	0.76	0.23
24/04/2012	21.1	1.8	6	0.63	0.77
26/04/2012	7.1	0.7	12	0.74	0.77
22/05/2012	20.5	0.3	6	0.85	0.88
12/06/2012	9.2	1.7	12	0.41	0.27
14/06/2012	12.9	0.9	52	0.74	0.64
25/06/2012	10.2	2.9	22	0.80	0.40
09/10/2012	18.2	1.3	46	0.84	0.75
05/12/2012	11.1		8	0.90	0.86
<b>Total</b>	<b>152</b>			<b>0.77</b>	<b>0.62</b>

**Tableau 21 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés en parallèle sur les retombées atmosphériques totales et sur les toitures BI et SE3Y**

### 2.2.2 Événement pluvieux étudiés simultanément sur les 8 compartiments de toitures

Pour 6 événements pluvieux, la collecte a eu lieu simultanément sur les 8 compartiments du banc de toitures expérimentales. Ces événements ont eu lieu entre le 20/05/2012 et le 05/12/2012. Elles ont toutes été collectées durant des périodes de pluviosité importante. Elles sont caractérisées par une humidité initiale élevée des substrats des toitures, et des durées de temps sec antécédentes faibles (Tableau 22). Ces conditions d'humidité étaient nécessaires pour pouvoir collecter des volumes d'échantillons suffisants pour les analyses sur l'ensemble des toitures. Si ces 6 événements sont assez semblables en termes d'humidité initiale des substrats, il diffèrent cependant de par les cumuls de pluie et les intensités maximales.

Ils présentent dans l'ensemble des coefficients de ruissellement élevés.

**Tableau 22 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés en parallèle sur les 8 compartiments de toiture**

Date de collecte	H pluie (mm)	I <sub>max</sub> 3min (mm/h)	DTS (jours)	Teneur en eau initiale
21.05.2012	20.5	6	0.3	0.18 – 0.3
12.06.2012	6.8	12	1.7	0.15 – 0.28
14.06.2012	17.2	52	0.9	0.19 – 0.29
24.06.2012	10.2	22	2.9	0.15 – 0.29
09.10.2012	18.2	46	1.3	0.19 – 0.32
05.12.2012	11.1	8		

**Tableau 23 : Coefficients de ruissellement des 8 toitures pour les 6 événements pluvieux échantillonnés**

	BI	GR	SE3Y	NE3Y	SE3Z	SE15Y	GE15Y	GI15Y
21.05.2012	85%	79%	88%	88%	75%	65%	53%	47%
12.06.2012	41%	40%	27%	11%	25%	11%	0%	0%
14.06.2012	74%	72%	64%	64%	73%	64%	36%	36%
24.06.2012	80%	60%	40%	21%	30%	35%	22%	19%
09.10.2012	84%	84%	75%	46%	81%	74%	71%	71%
05.12.2012	90%	79%	86%	87%	86%	86%	85%	87%

## 2.3 Caractéristiques des substrats étudiés

Le Tableau 24 résume les principales caractéristiques des substrats utilisés selon les données du fournisseur :

- substrat extensif E (précédemment noté X dans le livrable 3.1) utilisé sur les compartiments SE3Y, NE3Y, SE3Z, SE15Y, GE15Y

- substrat semi-intensif I (précédemment noté Z dans le livrable 3.1) utilisé sur le compartiment GI15Y.

**Tableau 24 : Caractéristiques physico-chimiques des substrats utilisés d'après le producteur (<http://www.substrate-ev.org>)**

Paramètres	Unit	Extensif E (*)	Intensif I (*)
argile - silt ( $d \leq 63 \mu\text{m}$ )	% by Mass	9.4	11
gravier ( $d \geq 2 \text{ mm}$ )	% by Mass	47.1	43
Densité à sec (105 C°)	g/cm <sup>3</sup>	1.1	1.1
Densité apparente à CME	g/cm <sup>3</sup>	1.5	1.5
Porosité	% Volume	55.5	56
CME	% Volume	40.3	45
Volume d'air à CME	% Volume	16.8	13
Perméabilité	mm/min	28.5	19.3
Matière organique	g/L	38	69
	% Masse	3.4	5.8
pH KCl	-	7.2	7
Nitrogène (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	mg/L CaCl <sub>2</sub>	4	7
Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	mg/L CAL	71	99
Potassium (K <sub>2</sub> O)	mg/L CAL	471	572

En complément des informations fournies par le producteur un échantillon représentatif de 300 grammes obtenu par quartage de 5 kg de chaque substrat a été analysé entre terme de granulométrie, et de teneur en matière organique (perte au feu à 550°C) et en métaux par classe granulométrique (Tableau 25 et Tableau 26).

**Tableau 25: Composition granulométrique obtenu par tamisage et composition organique obtenu par combustion à 550°C**

	E (Extensif)		I (Semi Intensif)	
	composition solides	Perte au feu (g/g)	composition solides	Perte au feu (g/g)
d > 2.5mm (1)	42.6%	13.6%	42.1%	3.4%
0.25<d<2.5 mm (2)	42.5%	6.3%	43.2%	6.7%
d < 0.25mm (3)	13.8%	9.2%	12.7%	11.6%
<b>Total</b>		<b>9.74%</b>		<b>5.80%</b>

On observe que les deux substrats ont une granulométrie similaire, avec des teneurs en matière organique légèrement différentes, mais une composition en métaux trace identique. Les deux substrats peuvent être classés comme minéraux. On note par ailleurs l'homogénéité des concentrations en métaux entre les 3 classes granulométriques.

La distribution granulométrique mesurée ainsi que la teneur en matière organique du substrat I sont cohérentes avec les données fournisseur. En revanche, pour le substrat E la teneur en matière organiques mesurée est supérieure à la valeur fournisseur, et supérieur à celle mesurée sur le substrat I, ce qui est contraire au résultat attendu. Les teneurs en métaux mesurées sur nos

échantillons sont globalement cohérentes avec les données du fournisseur, à l'exception du cadmium mesuré à des concentrations plus élevées et du plomb mesuré à des concentrations plus faible. Les différences observées peuvent dues à des différences de protocoles d'extraction ou une légère fluctuation de la composition du substrat.

Les deux substrats E et I ont des compositions très proches. Leur similarité se reflétera dans les teneurs des polluants émis à la sortie.

**Tableau 26: Teneur en métaux traces**

	<b>Cd</b> (mg/kg)	<b>Cr</b> (mg/kg)	<b>Cu</b> (mg/kg)	<b>Ni</b> (mg/kg)	<b>Pb</b> (mg/kg)	<b>Zn</b> (mg/kg)
E fraction 1	0.710	16.99	32.78	30.31	4.84	71.30
E fraction 2	0.630	16.73	31.03	30.50	4.49	76.96
E fraction 3	0.770	18.30	33.45	33.94	5.01	82.37
<b>moyenne*</b>	<b>0.684</b>	<b>17.1</b>	<b>32.1</b>	<b>30.9</b>	<b>4.71</b>	<b>75.3</b>
<b>Données fournisseur</b>	<b>0.08</b>	<b>23</b>	<b>41</b>	<b>47</b>	<b>10.9</b>	<b>74</b>
I fraction 1	0.710	20.20	34.01	34.89	4.39	70.14
I fraction 2	0.700	18.45	34.40	35.42	4.35	69.24
I fraction 3	0.730	19.45	35.60	34.50	3.99	76.97
<b>moyenne*</b>	<b>0.708</b>	<b>19.3</b>	<b>34.4</b>	<b>35.1</b>	<b>4.32</b>	<b>70.6</b>
<b>Données fournisseur</b>	<b>0.2</b>	<b>18</b>	<b>25</b>	<b>32</b>	<b>11</b>	<b>78</b>

La densité sèche et humide des deux substrats ainsi que leur CME ont également été évaluées expérimentalement, sur des colonnes de substrat de volume connu, saturées par plusieurs jours de simulation de pluie puis égouttées durant une nuit avant pesée. La densité sèche apparente (à 105°C) estimée est de 0.83 kg/l et ne varie pas entre les 2 substrats. La densité humide apparente (à la CME) a été évaluée à 1.05 kg/l pour le substrat E et 1.10 kg/l pour le substrat I. La teneur en eau à la CME est de 30% pour les deux substrats. Ces valeurs sont sensiblement différentes de celles affichées par le fournisseur, avec notamment une CME plus faible.

### 3. Résultats

#### 3.1 Comparaison des concentrations et flux de polluants entre la toiture végétalisée SE3Y, la toiture nue BI et les retombées atmosphériques

##### 3.1.1 Concentrations en paramètres globaux

La Figure 11 montre des concentrations significativement plus élevées pour la toiture végétalisée comparé avec les retombées atmosphériques ou avec la surface bituminée pour tous les paramètres globaux (turbidité, MES, conductivité, DCO, COD, phosphore total) à l'exception de l'azote total dissous et du COP. La différence entre les retombées et la surface bituminée est à l'exception de la DCO non significative.

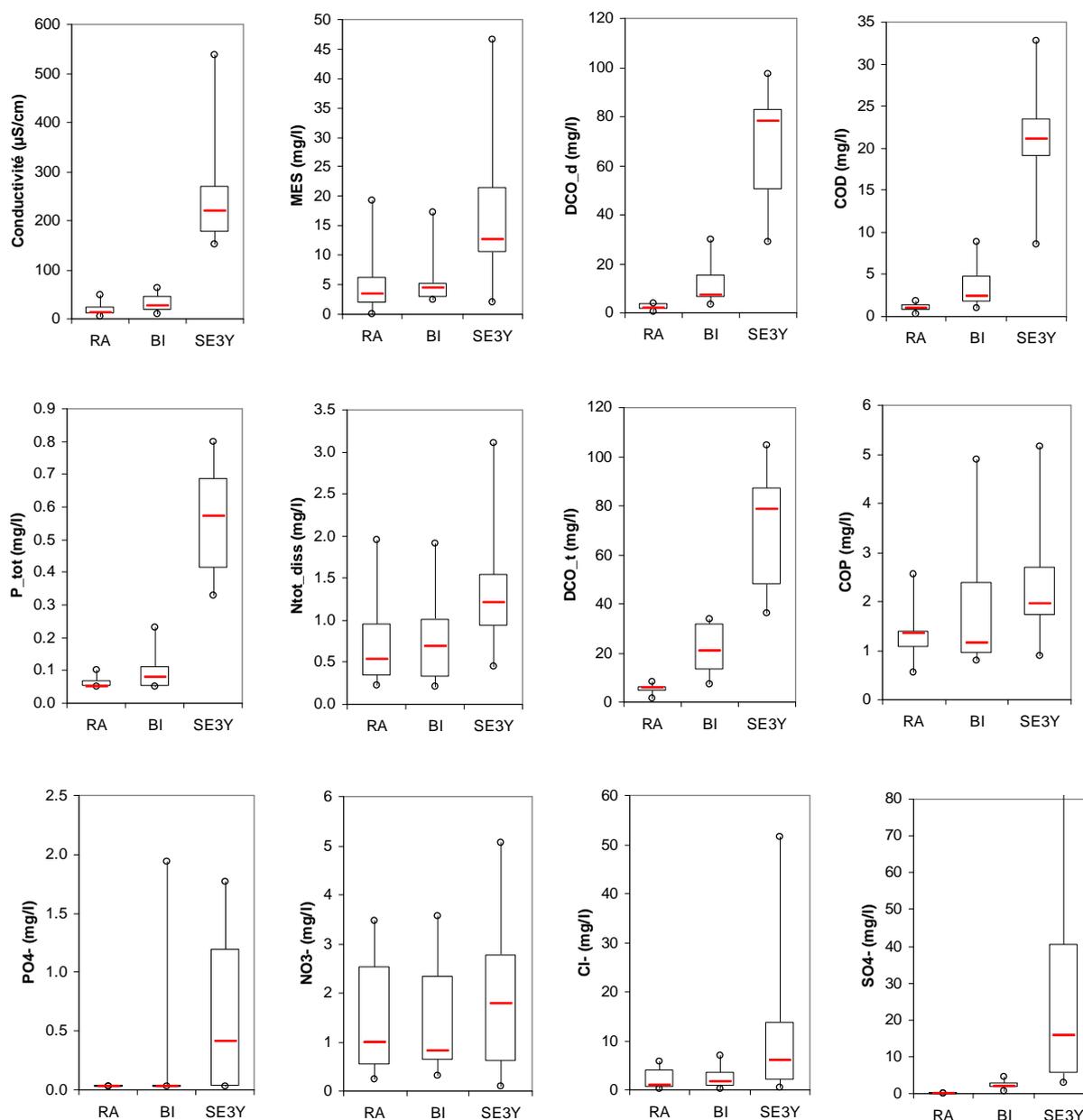


Figure 11 : Distributions statistiques des concentrations des paramètres globaux pour les retombées atmosphériques (RA), la toiture bituminée (BI) et la toiture végétalisée de référence (SE3Y) (Valeurs minimales et maximale, boîte contenant 50% des valeurs mesurée et médiane)

Ces résultats indiquent que les toitures végétalisées suivies sont probablement une source de particules, de carbone, de phosphore et partiellement aussi de l'azote. Environ la moitié de l'azote est présente sous la forme de nitrates, aussi bien dans les retombées que dans les eaux à la sortie des TTV. Bien que les TTV relarguent des solides, leur concentration n'est pas importante en comparaison à d'autres surfaces urbaines et la pollution émise est présente majoritairement dans la phase dissoute.

Il est à noter que la toiture végétalisée étudiée ici n'a pas fait l'objet d'une fertilisation lors de sa mise en œuvre, contrairement à ce qui est recommandé par la plupart des professionnels du domaine. Les concentrations susceptibles d'être observées dans la réalité, sur des toitures relativement neuves, pour l'azote et le phosphore, sont donc potentiellement supérieures à celles reportées ici.

### **3.1.2 Concentrations en métaux**

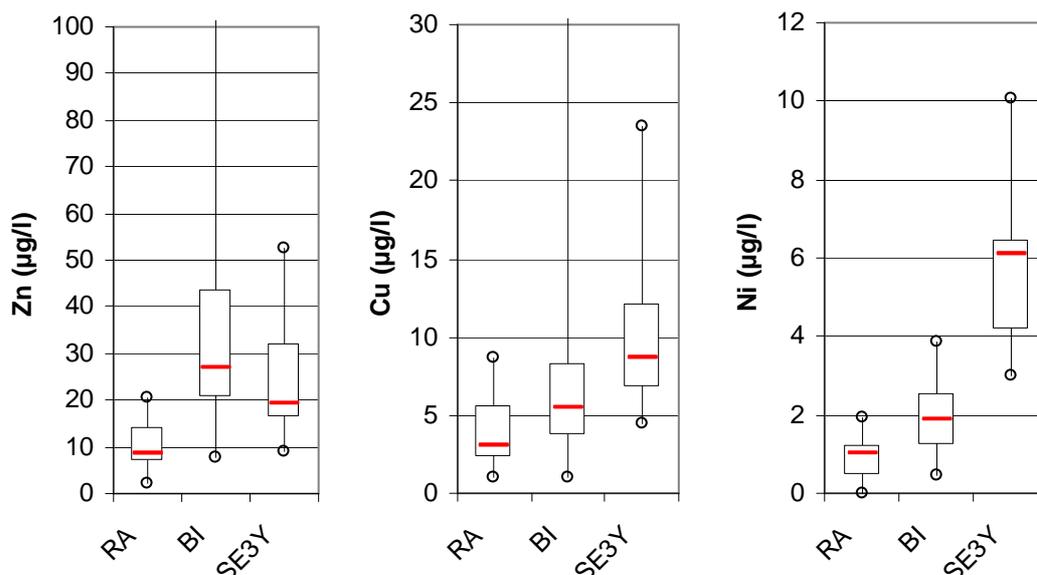
L'effet de la structure de végétalisation sur les concentrations en métaux est illustrée en pour le cas du zinc, du cuivre et du nickel.

Pour les trois métaux étudiés, les concentrations en sortie de toiture végétalisées sont nettement supérieures aux concentrations des retombées atmosphériques totales. Dans le cas du zinc, les concentrations issues de la toiture végétalisée sont du même ordre de grandeur ou légèrement inférieures à celles du toit de référence. Dans le cas du cuivre et surtout du nickel, l'écoulement du toit végétalisé présente une surconcentration par rapport au toit de référence. Pour ces deux métaux il semble donc y avoir une émission par les matériaux de la structure de végétalisation, probablement par lessivage du substrat.

Le cuivre et le nickel sont présents dans leur quasi-totalité sous forme dissoute dans les eaux de ruissellement de la toiture végétalisée. Leur présence en forme dissoute est certainement favorisée par la forte concentration en carbone organique dissous du ruissellement et les faibles concentrations en matières en suspension. Dans le cas du zinc, la forme dissoute représente plus de 60% du zinc total, à l'exception de 2 pluies pour lesquelles 70% du zinc sont associés aux particules. Il s'agit de deux événements pluvieux présentant des turbidités assez élevées.

Si l'on considère que les matières en suspension présentes dans les eaux de ruissellement de la toiture végétalisée sont issues de l'érosion du substrat, et connaissant la teneur en métaux du substrat (Tableau 26) on peut évaluer la masse de métaux particulaires susceptibles d'être engendrés de cette érosion. Le calcul montre que cette masse est très faible, et représente moins de 10% de la concentration métallique des eaux de ruissellement. Ces données sont cohérentes avec les très faibles fractions de Cu et Ni particulaires, mais ne suffisent pas à expliquer les concentrations en Zn particulaire.

Les émissions de Cu et Ni sont de ce fait attribuées à une élution des couches de végétalisation. Dans le cas du zinc, un apport par la membrane d'étanchéité est probable.



**Figure 12 : Distributions statistiques des concentrations en zinc, cuivre et nickel pour les retombées atmosphériques (RA), la toiture bituminée (BI) et la toiture végétalisée de référence (SE3Y)**  
(valeurs minimales et maximale, boîte contenant 50% des valeurs mesurée et médiane)

Afin de situer le niveau d'écotoxicité de ces métaux et de relativiser l'importance des concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement, nous pouvons les comparer aux normes de qualité environnemental (NQE) établies pour les eaux douces suite à la Directive cadre européenne sur l'eau. Il s'agit de valeurs seuils à ne pas dépasser dans les milieux aquatiques superficiels. Les concentrations mesurées en zinc et en cuivre sont systématiques supérieures aux NQE (NQE = 3.1 µg/l pour Zn et 1.4 µg/l pour Cu), y compris dans les retombées atmosphériques. Une dilution des eaux d'un facteur 3 à 10 est nécessaire pour respecter les valeurs seuils dans les milieux aquatiques récepteurs. Les concentrations en nickel sont inférieures à la NQE réglementaire actuelle (NQE = 20 µg/l). Cependant une modification de cette NQE, l'abaissant à 4 µg/l a été proposée en 2011 par la commission européenne – cette nouvelle valeur seuil est supérieure aux concentrations mesurées dans les retombées atmosphériques et le ruissellement de la toiture de référence mais est généralement dépassée dans le ruissellement de la toiture végétalisée.

### 3.1.3 Concentrations en micropolluants organiques

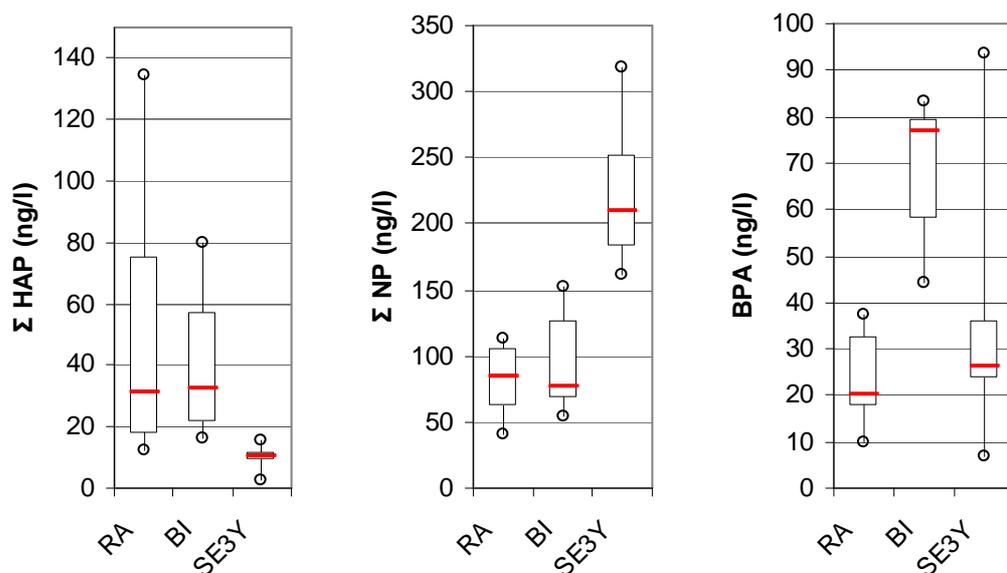
Le comportement de la structure de végétalisation vis-à-vis des micropolluants organiques est illustré en Figure 13 pour trois familles de micropolluants organiques : les HAP, les alkyl phénols et le bisphénolA.

Alors que les HAP sont supposés avoir une origine purement atmosphérique dans le cas présent, le nonylphénol ainsi que le bisphénolA ont été identifiés comme présents dans les matériaux en PVC (gouttières notamment) et dans les membranes bitumineuses et peuvent de ce fait être émis dans les eaux de ruissellement par lessivage des matériaux de couverture de la toiture et de collecte des eaux.

Dans le cas des HAP on observe un effet de filtration très net de la structure de végétalisation. Alors que les concentrations des eaux de ruissellement de la toiture BI sont équivalentes aux retombées atmosphériques totales, celles de la toiture végétalisée SE3Y sont inférieures d'un facteur 3 en médiane. Les concentrations mesurées pour les HAP en sortie de toiture végétalisée sont largement

inférieures aux normes de qualité environnementales existante pour le fluoranthène, le benzo(a)pyrène, le benzo(b)fluoranthène et le benzo(k)fluoranthène.

Dans le cas des nonylphénols cet effet de filtration n'est pas visible et ma structure de végétalisation se comporte au contraire comme une source de contamination. La concentration médiane mesurée en aval de SE3Y est plus du double de celle des retombées atmosphériques et des eaux de ruissellement de BI. Les analyses faites sur le substrat et sur le matériau de drainage (polystyrène) montrent qu'ils ne sont pas susceptibles d'être des sources importantes de nonylphénols, contrairement à l'étanchéité et aux descentes de gouttière. La plus forte émission par le compartiment SE3Y peut donc paraître surprenante, la même membrane d'étanchéité et les mêmes descentes PVC étant mises en œuvre sur BI et SE3Y. Il est cependant possible que la plus faible fréquence des ruissellements sur SE3Y par rapport à BI, et le maintien d'une condition d'humidité de la membrane sur de plus longues durées dans le cas du toit végétalisé, conduisent à des conditions favorisant le transfert par diffusion des molécules de nonylphénol depuis la membrane vers la phase aqueuse. La plus forte concentration en composés nonylphénoliques dans les eaux du toit SE3Y pourrait également être due à la dégradation au sein du substrat de composés éthoxylés à longue chaîne (non dosés ici) issus des apports atmosphériques en composés de courte chaîne. Malgré cette augmentation des concentrations, les concentrations en nonylphénol mesurées en aval de la toiture végétalisée restent inférieures ou également à la norme de qualité environnementale (NQE = 300 ng/l pour le 4-nonylphénol) fixée par la directive cadre sur l'eau pour les milieux aquatiques.



**Figure 13 : Distributions statistiques des concentrations en HAP (somme des 13 HAP), nonylphenols (somme des 4 composés dosés) et bisphénolA pour les retombées atmosphériques (RA) toiture bituminé (BI) et la toiture végétalisée de référence (SE3Y)**

(valeurs minimales et maximale, boîte contenant 50% des valeurs mesurées et médiane)

Le bisphénolA (BPA) présente un comportement encore différent des deux précédentes familles. Pour ce contaminant une très nette émission par la toiture de référence BI est observée, avec une concentration médiane de BPA environ 4 fois supérieure à celle des apports atmosphériques. Les concentrations en sortie de la toiture végétalisée SE3Y varient quand à elles dans une large gamme. La valeur médiane reste proche de celle des apports atmosphériques et dénote d'émissions globalement plus faibles que pour le toit de référence. La présence de la structure de végétalisation pourrait également protéger la membrane d'étanchéité des effets de photodégradation et thermodégradation et de ce fait limiter l'émission de certains composés organiques. Il n'existe pas de norme de qualité environnementale pour le bisphénolA à ce jour. On notera cependant que les

concentrations observées ici restent très inférieures à la concentration sans effet (predicted no effect concentration PNEC = 1.4 µg/l) pour les eaux douces.

### 3.1.4 Comparaison des flux polluants émis

La mesure des concentrations à elle seule ne permet pas d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur la qualité des eaux pluviales. Il convient d'évaluer des flux émis par ces toitures, compte tenu de leur comportement hydrologique spécifique et des volumes effectivement ruisselés.

La Figure 14 permet de comparer les flux émis par la toiture végétalisée SE3Y avec ceux émis par la toiture de référence BI, pour chacune des pluies étudiées (points noirs) ainsi que pour la somme des 13 pluies (point rouge). Une valeur du ratio supérieure à 1 correspond à une surproduction en masse de contaminants par la structure végétalisée, tandis qu'une valeur inférieure à 1 indique une réduction des flux polluants par la TTV. Nous avons également estimé la valeur moyenne annuelle de ce ratio, en nous appuyant sur la concentration moyenne volumique sur l'ensemble des 13 événements de ruissellement étudiés (masse totale / volume ruisselé total) et sur le taux de ruissellement annuel mesuré pour les toitures BI (Cr= 0.76) et SE3Y (Cr=0.49). Cette dernière valeur est indiquée par une barre verte sur le graphique.

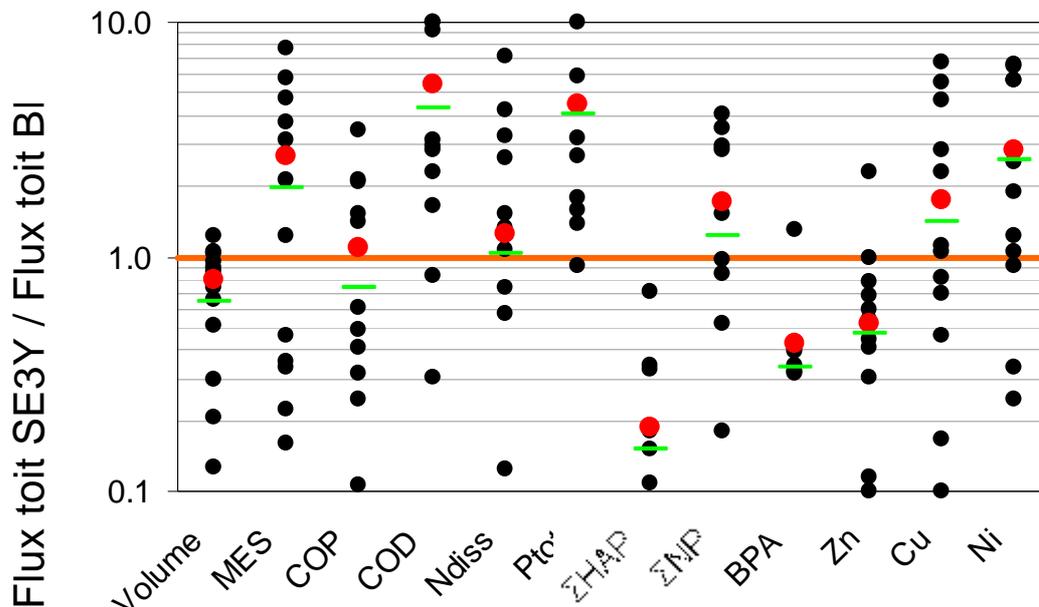


Figure 14 : Rapport entre les flux émis par la toiture SE3Y et les flux émis par la toiture BI pour chacun des 13 événements pluvieux étudiés (points noirs), et en cumul pour les 13 événements (point rouge)

On observe une forte variabilité du ratio SE3Y / BI d'une pluie à une autre. Ce ratio est en effet très dépendant du ratio entre les volumes de ruissellement produits par les 2 toits. Or le rapport volume SE3Y / volume BI varie entre 0.13 et 1, suivant l'état de saturation initiale du substrat et l'importance de l'événement pluvieux. En somme des 13 événements ce ration est de 0.81, à l'échelle de toute une année il est de 0.64.

Dans le cas du carbone et du phosphore, la comparaison des flux confirme la conclusion basée sur les concentrations, c'est-à-dire le comportement de relargage de ces éléments par la TTV. L'émission de COD et de Ptot est, à l'échelle annuelle, 4 à 5 fois supérieure pour le toit végétalisé.

Ce comportement d'émission est également observé pour les MES, le nickel et dans une moindre mesure pour le cuivre et les composés nonylphénoliques.

En revanche, la toiture végétalisée conduit à une réduction très importante des flux de HAP (flux 5 fois + faibles que sur BI), et dans une moindre mesure des flux de BPA et de zinc (flux réduits de 50%).

La toiture végétalisée peut donc se comporter comme un piège permettant la rétention des contaminants d'origine atmosphérique. Du fait de la composition des matériaux la composant, elle est également susceptible d'être source de contamination pour certains composés. Une attention particulière est donc à porter à la composition des matériaux entrant en contact avec l'eau de pluie, à la composition du substrat et à leur comportement à la lixiviation.

### 3.2 Comparaison des 6 compartiments de toitures végétalisées

Afin d'identifier d'éventuels effets de la hauteur ou la nature du substrat, de la nature de la couche de drainage, du type de couvert végétal, nous comparons ici les concentrations mesurées, pour les mêmes événements pluvieux en aval des 6 compartiments végétalisés et des deux toits de référence. A l'exception de la figure 15, les résultats sont présentés sous forme de ratios entre les concentrations issues d'un toit donné et celles du toit de référence BI pour la même pluie.

#### 3.2.1 Comparaison des concentrations en paramètres globaux

La Figure 15 compare les paramètres globaux pH, conductivité et turbidité pour les 6 compartiments végétalisés.

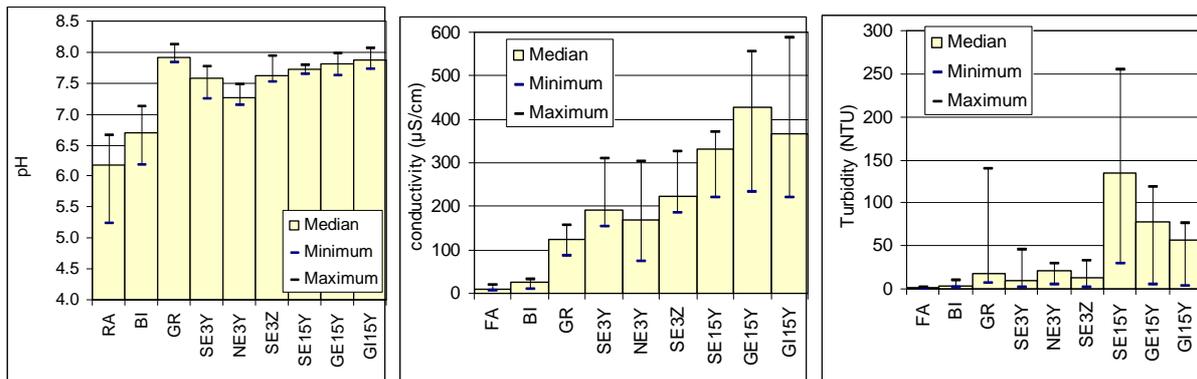


Figure 15 : Gamme de la turbidité et de la conductivité mesurée pour les retombées atmosphérique totale (FA), les échantillons de ruissellement des toits plats classiques (BI: toit bitumineux, GR: toit de gravier) et les 6 toitures végétalisées différentes (SE3Y à GI15Y)

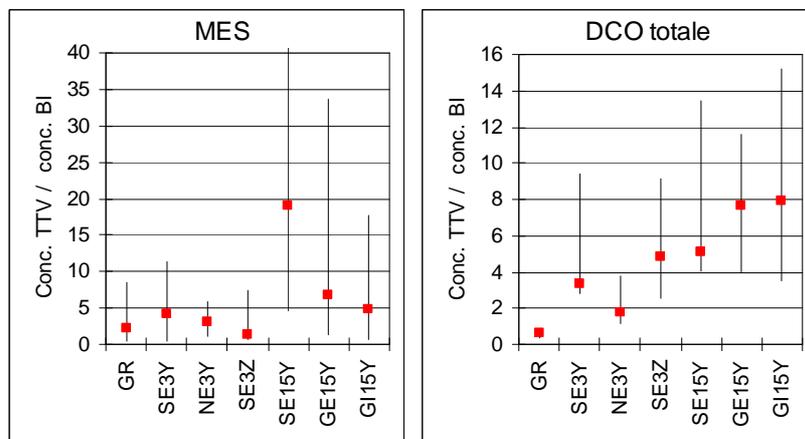


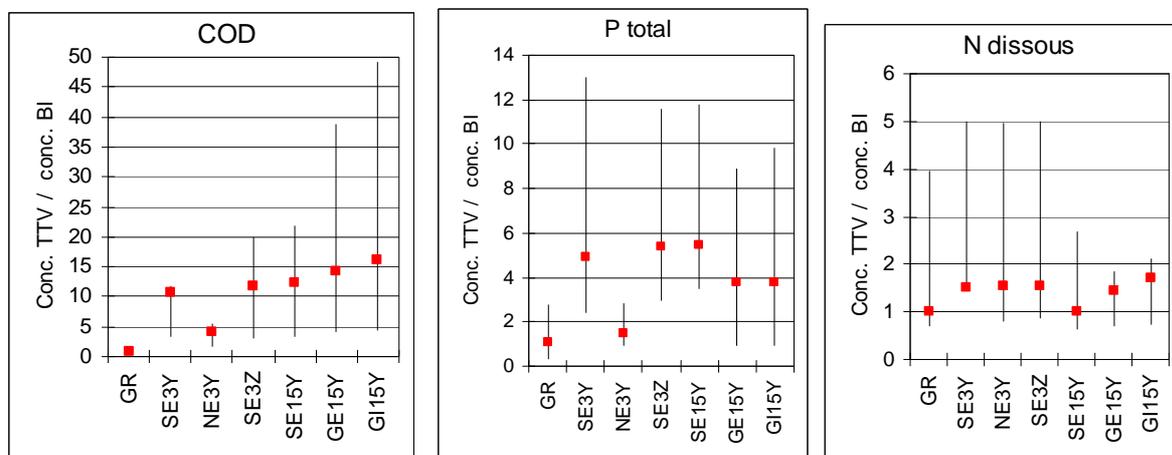
Figure 16 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas des MES et de la DCO

Pour les TTV d'épaisseur de substrat 3 cm (SE3Y, SE3Z, NE3Y), la turbidité et la concentration en MES restent modérées, du même ordre de grandeur que pour le toit en gravier GR (médianes: 12 à 21 NTU, 11 à 17 mg/l SS). Les MES et la turbidité augmentent quasiment proportionnellement à l'épaisseur de substrat pour les TTV d'épaisseur 15 cm (médianes: 60 à 138 NTU, 42 à 106 mg/l MES). Une plus faible turbidité est notée pour les TTV à couverture sedum et graminées (GE15Y and GI15Y), comparée à celles sans graminées (SE15Y). Une couverture végétale plus dense et un réseau racinaire plus développé offre potentiellement une meilleure protection contre l'érosion du substrat.

La forte conductivité observées pour l'ensemble des toits végétalisés (médianes: 198 à 446  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) indique clairement une élution de composés dissous depuis le substrat et/ou la couche végétale. La conductivité des eaux de ruissellement des TTV d'épaisseur 15 cm est 1.5 à 2 fois supérieure à celle des TTV de 3 cm. Elle ne semble en revanche pas être influencée par la présence ou non de végétaux, le type de végétaux ni le type de drainage.

### 3.2.2 Comparaison des concentrations en matière organique et nutriments

Les concentrations en carbone organique dissous et en phosphore sont 5 à 10 fois supérieures dans les eaux des TTV par rapport au toit BI. Elles sont cependant nettement plus faibles dans le cas de la TTV sans végétaux (NE3Y) que pour les autres toits végétalisés, ce qui souligne le rôle de la couche de végétalisation dans l'émission du carbone et du phosphore. Ce résultat est en contradiction avec les travaux cités par (Rowe 2011) pour les quels de plus fortes concentrations en azote et phosphore ont été observées dans le cas de substrats non plantés. Il est à noter cependant que dans le cas de nos toitures expérimentales la végétation a été installée sous forme de tapis pré-cultivés constitués d'une trame en fibres de coco et en polyéthylène supportant une fine couche de substrat et les végétaux. Ces tapis ont du faire l'objet d'une fertilisation durant la phase de mise en culture préalable à l'installation.



**Figure 17 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas du COP du phosphore total et de l'azote dissous**

Les concentrations en matière organique dissoute et en phosphore ne présentent pas de variation significative en fonction de la nature du matériau de drainage (polystyrène ou pouzzolane), de la nature du substrat (extensif ou semi-intensif), ni de l'épaisseur du substrat (3 ou 15 cm), ce qui est cohérent pour le phosphore total avec les résultats de Monterusso 2004, cité par (Rowe 2011). Les concentrations en phosphore tendent à être plus faibles dans le cas des toits plantés de graminées par rapport aux plantations de sédums seuls.

Pour les deux dernières pluies, en octobre et décembre, on observe en revanche des concentrations en COD significativement plus élevée sur les TTV plantées de graminées que sur celles en sédum. Ce résultat pourrait être lié à la décomposition des graminées fanées, après le développement estival.

(Teemusk et Mander 2011) ont observé des concentrations plus élevées en P<sub>tot</sub> et en matière organique (BOD<sub>7</sub>) pour les événements pluvieux importants. Ce résultat n'a pas été vérifié dans notre cas.

Bien que supérieures à celles de la toiture de référence BI, les concentrations en azote dissous restent faibles pour l'ensemble des TTV étudiées (0.7 à 1.8 mgN/l). Les toitures expérimentales n'ayant fait l'objet d'aucune fertilisation lors de leur mise en place ni ultérieurement, les seules sources d'azote sont les apports atmosphériques, le compost contenu dans le substrat et une éventuelle fertilisation antérieures des tapis de végétaux précultivés. Dans le cas de l'azote on n'observe pas de différence en le toit NE3Y sans végétaux et les autres TTV, le tapis précultivé ne semble donc pas être une source d'azote.

Des concentrations en azote plus élevées (jusqu'à 5mg/l) avaient été mesurées en 2011 lors d'un suivi expérimental effectué sur les bancs de TTV du CSTB – Champs sur Marne. Ces bancs avaient fait l'objet d'un apport d'engrais à libération lente lors de leur mise en œuvre, 20 mois auparavant ((Seidl et al., 2013 – article joint en annexe). Des concentration en azote total atteignant 6.8 mgN/l ont par ailleurs été mesurées dans d'autres études par (Teemusk et Mander 2011) et (Berndtsson 2010).

### **3.2.3 Comparaison des concentrations en métaux**

Le comportement des différentes TTV étudiées est illustré en Figure 18 pour les 4 métaux fer, nickel, cuivre et zinc.

Les profils d'émission différents entre les 4 métaux.

Pour le fer, le nickel et le cuivre, les 6 TTV étudiées génèrent une augmentation de la concentration par rapport à la toiture de référence BI. La concentration de ces métaux augmente avec l'épaisseur de substrat, traduisant un phénomène de lessivage du substrat. Les concentrations en nickel sont ainsi en médiane 8 à 12 fois plus élevées en aval des TTV de 15 cm qu'en aval de la toiture de référence BI.

Dans le cas du zinc, une réduction de la concentration est observée pour les TTV 3 cm par rapport à BI, et une faible augmentation pour les TTV 15 cm. Les concentrations en zinc dissous sont systématiquement inférieures dans le cas des TTV par rapport au toit BI. Ce métal ne semble donc pas émis par les couches constituant le TTV et notamment par le substrat et pourrait au contraire être piégé dans le substrat.

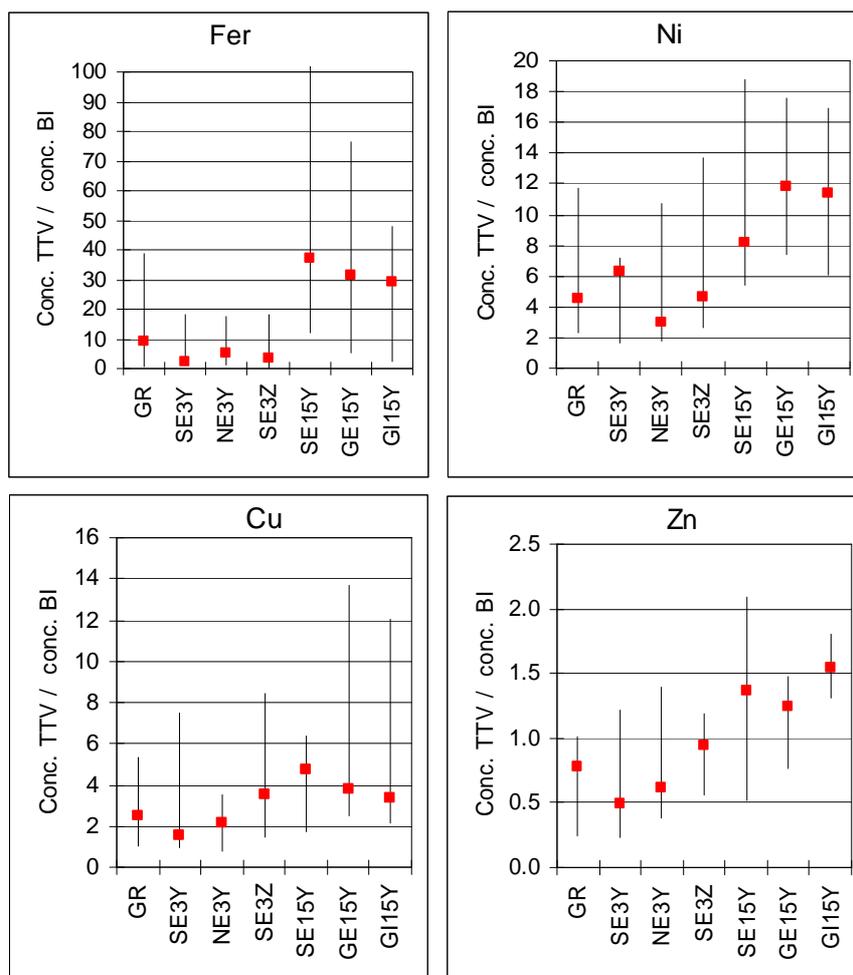


Figure 18 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas des métaux

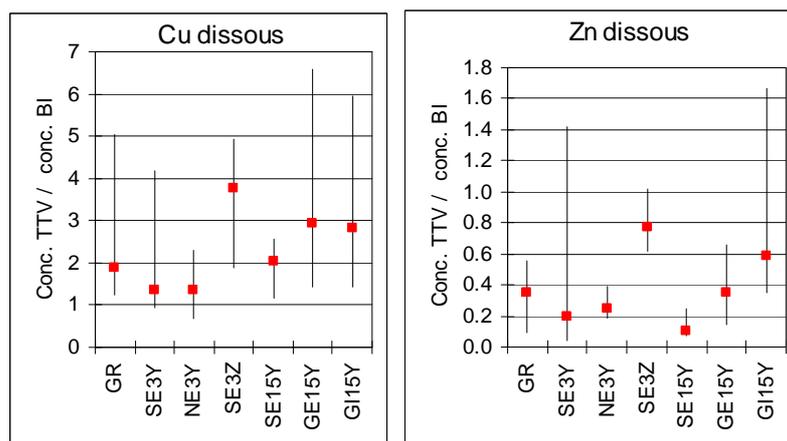


Figure 19 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas des métaux dissous

### 3.2.4 Comparaison des concentrations en micropolluants organiques

Les concentrations mesurées en aval des 8 compartiments de toiture pour les 3 familles de micropolluants organiques étudiés sont présentées en Figure 20.

Dans les cas des HAP, les concentrations les plus fortes sont observées sur le toit de référence BI. Toutes les toitures végétalisées, et dans une moindre mesure le toit couvert de graviers, présentent un effet de filtration des HAP. Cet effet de filtration n'est cependant pas amélioré pour une plus grande épaisseur de substrat. Les concentrations en HAP les plus faibles ont été observées à l'aval des TTV de 3 cm, ce qui est à relier aux plus faibles concentrations en MES dans les eaux de ces toitures comparativement aux TTV de 15 cm.

Dans le cas du bisphénol A, on n'observe pas de différence significative de concentrations entre les TTV de 3 cm, le toit en gravier et le toit de référence nu BI. En revanche les 3 TTV d'épaisseur 5 cm font apparaître des concentrations plus élevées. Le temps de séjour plus long des eaux de pluie dans ces TTV, et leur concentration élevée en COD, pourraient être favorables à la migration du bisphénol A contenu dans les matériaux synthétiques (membrane d'étanchéité, gouttières PVC) vers la phase aqueuse.

Dans le cas des alkylphénols (nonylphénols et octylphénols) les résultats sont plus difficiles à interpréter. On retrouve comme pour le bisphénol A une plus forte concentration en sortie des TTV de 15 cm.

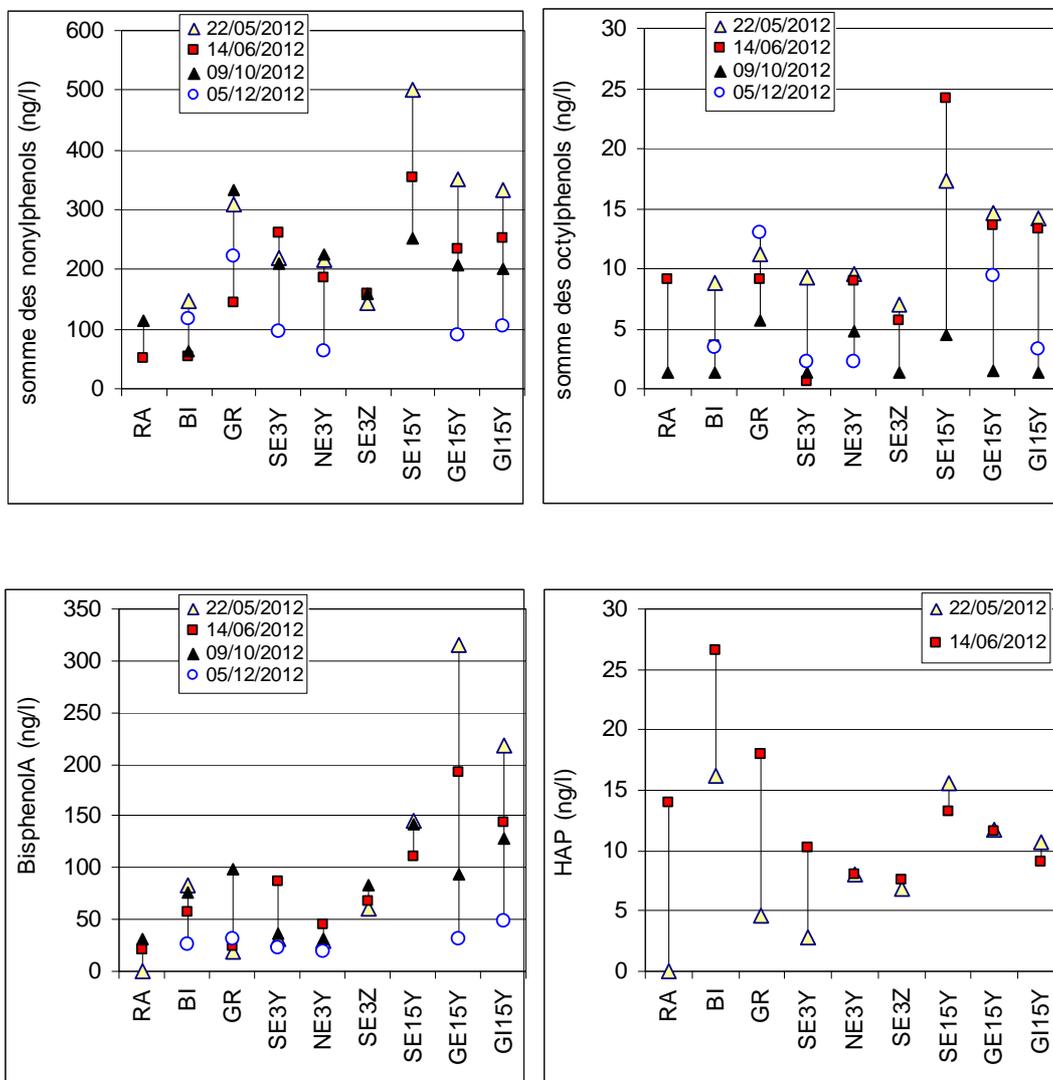


Figure 20 : Concentrations en nonylphénols, octylphénols, bisphénol A et HAP mesurées au cours de 4 événements pluvieux sur les 8 compartiments de toitures

En complément des trois familles de micropolluants organiques précédemment citées, des analyses de mécoprop ont également été réalisées pour un nombre limité d'échantillons. En effet, des travaux réalisés en Suisse (Bucheli et al 1998 ; Burkhardt et al. 2009) avaient mis en évidence l'émission dans l'eau de mécoprop par hydrolyse de l'agent anti-racine mis en œuvre dans les membranes d'étanchéité bitumineuses utilisées pour les toitures végétalisées. Ces études ont conduit la Suisse à recommander le remplacer l'agent anti-racine Preventol B2 (polyglycolester de mécoprop), par un des deux substituants suivants ; Preventol B5 (octylester de mécoprop) ou Herbitect (éthylexylester de mécoprop). La concentration sans effet du mécoprop dans les eaux douces a été évaluée à PNEC = 100 ng/l. Les analyses réalisées en Suisse sur des eaux de ruissellement de membranes bitumineuses mettaient en avant des concentrations atteignant 10 µg/l pour le Preventol B2. Des concentrations 10 à 20 fois inférieures ont été mesurées pour l'herbitect.

Les concentrations en mécoprop ont été analysées pour 3 événements pluvieux sur les toitures expérimentales du projet TVGEP. Les résultats sont synthétisés dans la Figure 21. Des émissions de mécoprop ont en effet été observées sur tous les compartiments de toitures. Les concentrations émises varient fortement entre les 3 pluies étudiées mais également entre les différents compartiments de toiture. La concentration maximale mesurée a été observée en mai 2012 sur le toit végétalisé SE3Y et atteint 24 µg/l. Le toit de référence BI présente des concentrations en mécoprop entre 500 et 1400 ng/l, supérieures à la PNEC. Les concentrations sont dans l'ensemble plus faibles pour les autres toitures végétalisées.

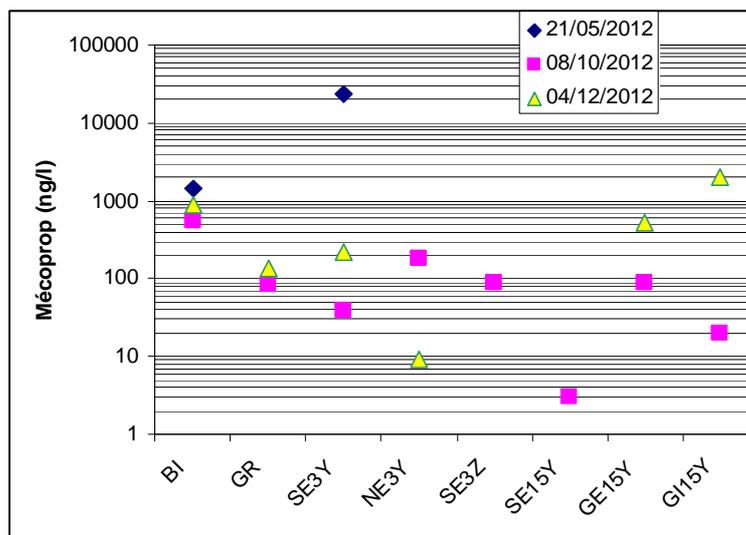


Figure 21 : Concentrations en mécoprop mesurées dans les eaux de ruissellement des différents compartiments de toitures

### 3.3 Discussion et comparaison avec les données de la littérature

Les concentrations en matière organique et en nutriments mesurées au cours de cette recherche sont cohérentes avec celles citées dans la littérature pour d'autres toitures végétalisées (Tableau 27). Comparativement aux eaux de ruissellement d'autres types de toitures, les eaux issues des toitures végétalisées présentent une coloration importante et sont riches en carbone organique et en phosphore. Elles sont de ce fait utilisables pour les besoins d'arrosage mais peu indiquées pour les autres pratiques de collecte/utilisation des eaux de ruissellement. Au-delà de la gêne due à la coloration, on peut également craindre la prolifération algale dans les cuves de stockage si celles-ci ne sont pas parfaitement opaques, la formation de sous-produits de désinfection en cas de chloration (Mendez et al. 2011) et une faible efficacité du traitement UV. Ces importantes concentrations en phosphore et en carbone conduisent également à déconseiller le rejet de ces eaux à une échelle très locale, dans les milieux aquatiques fermés et sensibles à l'hyper-eutrophisation que sont les petits plans d'eau et bassins décoratifs.

**Tableau 27 : Comparaison des concentrations en carbone organique, phosphore et azote dans les eaux issues des TTV et d'autres surfaces urbaines.**

		COT	COD	Ptot	Ntot
TTV (EMC range)	Cette étude * without vegetation layer	23–51 * 9–22	20–51 * 6–19	0.39–0.78 * 0.13–0.24	0.8 – 1.8
	(Hathaway et al. 2008; Berndtsson et al. 2009; Teemusk et Mander 2011)			0.16–1.50	0.4 – 6.9
Autres toits (EMC range)	Cette étude	3–12	1–7	<0.05–0.22	0.3 – 1.2
	(Duncan 1999; Boller 2004; Gobel et al. 2007; Hathaway et al. 2008)	5–15	2–14	0.03–0.50	0.7–7.2
Chaussées (EMC range)	(Driscoll et al. 1990; Duncan 1999; Boller 2004; Gobel et al. 2007)	8–26	5–10	0.10–0.80	0.9–9.0
Réseaux séparatifs (site medians)	(Williamson 1991; Duncan 1999; Smullen et Cave 1999; Pitt et al. 2004; Bressy et al. 2011)	8–40		0.20–0.34	2.0–3.2

**Tableau 28 : Comparaison des concentrations en cuivre et zinc dans les eaux issues des TTV et d'autres surfaces urbaines.**

		Cu	Zn
TTV (EMC range)	Cette étude	3 - 25	5 – 74
	Van Seters, et al., 2009; Gregoire and Clausen, 2011	6 - 45	7 - 11
Autres toits (EMC range)	Cette étude	3 – 12	1 – 7
	Xanthopoulos and Hahn, 1992; Quek and Forster, 1993; Boller, 1997; Förster, 1998; Gromaire-Mertz, et al., 1999; Changet al., 2004; Scholz, 2004; Gneccoet al., 2005; Göbelet al., 2007; Huanget al., 2007; Rosillonet al., 2007; Bressy, 2010; Tsakovskiet al., 2010; Vialleet al., 2012	4 - 166	10 - 3700
Chaussées (EMC range)	Xanthopoulos and Hahn, 1992; Quek and Forster, 1993; Boller, 1997; Förster, 1998; Gromaire-Mertz, et al., 1999; Changet al., 2004; Scholz, 2004; Gneccoet al., 2005; Göbelet al., 2007; Huanget al., 2007; Rosillonet al., 2007; Bressy, 2010; Tsakovskiet al., 2010; Vialleet al., 2012	47 - 143	129 - 1956

Lorsque l'on compare la concentration des eaux de ruissellement de TTV à celle d'autres types d'eaux de ruissellement urbaines (eaux de ruissellement de voirie ou eaux pluviales mixtes) on note que les concentrations en azote restent dans la gamme des valeurs classiques tandis que les concentrations en phosphore et en carbones sont dans la fourchette haute des valeurs.

Les concentrations en métaux, illustrées dans le tableau par le cuivre et le zinc sont légèrement supérieures à celles usuellement observées pour des toitures non métalliques mais restent modérées par rapport aux concentrations générées par des surfaces de chaussées ou par des toitures comportant des éléments métalliques.

## 4. Conclusion

Dans le cadre du projet TVGEP, un banc de toitures expérimental de grandeur réelle a été mis en œuvre sur le site du CETE Ile de France à Trappes. Les eaux issues de ces 8 toitures ont été prélevées et analysées au cours de 13 événements pluvieux, afin de caractériser la qualité des eaux issues des toitures végétalisées, de quantifier les flux émis vers les milieux aquatiques et de comparer ces données aux émissions dues aux retombées atmosphériques et aux eaux de ruissellement de toitures terrasses classiques.

Les résultats en termes de qualité des eaux sont contrastés en fonction du contaminant étudié. Les concentrations issues des toits végétalisées sont globalement supérieures à celles issues d'un toit nu, notamment dans le cas de la matière organique et du phosphore, mais aussi de certains métaux (cuivre, nickel) et micropolluants organiques (alkylphénols, mecoprop). A l'exception du carbone organique dissous et du phosphore, les concentrations observées restent dans des gammes comparables ou inférieures à celles usuellement observées dans les eaux de ruissellement urbaines. La forte concentration en nutriments et en matière organique pourrait cependant être préjudiciable en cas de gestion de ces eaux à une échelle très locale dans des milieux aquatiques clos tels que petits bassins et plans d'eau, ou cuves de collecte/utilisation des eaux pluviales.

Les flux émis en moyenne annuelle restent modérés, du fait notamment de la réduction des volumes de ruissellement en aval des toitures végétalisées (coefficient de ruissellement moyen annuel de l'ordre de  $C_r = 0.5$ ). En moyenne annuelle, la toiture végétalisée se comporte comme un piège pour des contaminants atmosphériques tels que les HAP. Certains contaminants peuvent cependant être émis directement par les matériaux mis en œuvre (étanchéité, drainage, substrat) et il convient d'être vigilant quand à la composition des matériaux composant la structure et aux pratiques d'entretien et de fertilisation. La mise en place de procédures systématiques d'évaluation environnementale des matériaux mis en œuvre dans les structures de végétalisation, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux synthétiques ou recyclés, paraît souhaitable.

Au l'échelle de l'évènement, les flux émis restent très variables, en fonction de l'état d'humidité initial de la toiture et de l'importance des précipitations. Ils peuvent devenir importants dans les périodes où le substrat est saturé (période hivernale notamment).

## Listes des figures et des tableaux

### Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique de la composition typique de toiture verte (CSTC, 2006).....	4
Figure 2 : Processus hydrologique de toits verts (Stovin, Vesuviano and Kasmin 2012).....	6
Figure 3 : Différence en quantité d'eau de ruissellement en présence (gauche) et en absence (droit) de végétalisation des surfaces urbaines .....	6
Figure 4 : Hydrogramme fictif représentant la différence entre les ruissellements d'eau pluviale passant par toit vert et par un toit classique, (Stovin et al. 2012) .....	7
Figure 5 : Variation de la quantité d'eau retenue en fonction de l'épaisseur de substrat, (Klaas Metselaar 2012). .....	11
Figure 6 : Variation de la quantité d'eau retenue en fonction de mois et de la profondeur de substrat. (Klaas Metselaar 2012). .....	11
Figure 7 : Variation des quantités des eaux de ruissellement (mm) en fonction de différentes pentes (2%, 7%, 15%, 25%) . (Getter et al. 2007).....	13
Figure 8 : Conductivité de l'eau écoulée en fonction de la végétation, de la profondeur du substrat et de l'intensité des précipitations (Heavy pour forte et Medium pour modérée) (Buccola et al, 2011). 21	
Figure 9 : Toiture végétalisée du CETE IF à Trappes. A droite du toit se trouve la station météo, à gauche de cette station, le pluviomètre. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets pour la mesure des débits de ruissellement. ....	24
Figure 10 : (1a and 1b) Vue d'ensemble des 8 compartiments de toiture et des dispositifs de mesure et de collecte du ruissellement ; (1c) Echantillonnage des eaux de percolation. Le conteneur vert abrite le débitmètre et de dispositif de prélèvement détaillés en (1d) ; (1e) Collecteurs de retombées atmosphériques totales.....	26
Figure 11 : Distributions statistiques des concentrations des paramètres globaux pour les retombées atmosphériques (RA), la toiture bituminée (BI) et la toiture végétalisée de référence (SE3Y) .....	33
Figure 12 : Distributions statistiques des concentrations en zinc, cuivre et nickel pour les retombées atmosphériques (RA), la toiture bituminée (BI) et la toiture végétalisée de référence (SE3Y) .....	35
Figure 13 : Distributions statistiques des concentrations en HAP (somme des 13 HAP), nonylphenols (somme des 4 composés dosés) et bisphénolA pour les retombées atmosphériques (RA) toiture bituminé (BI) et la toiture végétalisée de référence (SE3Y) .....	36
Figure 14 : Rapport entre les flux émis par la toiture SE3Y et les flux émis par la toiture BI pour chacun des 13 événements pluvieux étudiés (points noirs), et en cumul pour les 13 événements (point rouge) .....	37
Figure 15 : Gamme de la turbidité et de la conductivité mesurée pour les retombées atmosphérique totale (FA), les échantillons de ruissellement des toits plats classiques (BI: toit bitumineux, GR: toit de gravier) et les 6 toitures végétalisées différentes (SE3Y à GI15Y).....	38
Figure 16 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas des MES et de la DCO .....	38
Figure 17 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas du COP du phosphore total et de l'azote dissous .....	39
Figure 18 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas des métaux .....	41
Figure 19 : Rapports entre les concentrations mesurées pour les différentes toitures et les concentrations mesurées pour la toiture de référence BI – cas des métaux dissous.....	41
Figure 20 : Concentrations en nonylphénols, octylphénols, bisphénolA et HAP mesurées au cours de 4 événements pluvieux sur les 8 compartiments de toitures .....	42
Figure 21 : Concentrations en mecoprop mesurées dans les eaux de ruissellement des différents compartiments de toitures.....	43

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages généraux des différents types toitures végétalisées (GRHC, 2005).....	5
Tableau 2 : Capacités de rétention pour plusieurs études, (Berndtsson 2010 : articles de 2004 jusqu'à 2006).....	7
Tableau 3 : Capacité de rétention en fonction des saisons (en mm et en %) dans l'étude de Stovin et al. (2012).....	8
Tableau 4 : Variation de la capacité de rétention (%) en fonction de la variation de différents paramètres de substrat après 5 ans de son utilisation, (Getter et al. 2007) .....	9
Tableau 5 : Constituants des toits utilisés dans l'expérience de (K. Vijayaraghavan, 2012).....	10
Tableau 6 : Début de ruissellement de chaque toit (K. Vijayaraghavan, 2012). .....	10
Tableau 7 : Les différentes couches de drainage avec leur capacité de rétention, (Nohra et al. 2010). .....	12
Tableau 8 : Influence d'une TTV sur la concentration d'azote dans ses différentes formes .....	14
Tableau 9 : Influence d'un toit vert sur la concentration de phosphore dans ses différentes formes. .....	15
Tableau 10 : Concentration de substances nutritives dans les eaux de ruissellement.....	16
Tableau 11 : Flux (kg/ha/an) d'éléments nutritifs dans l'écoulement des toitures végétalisées de plaza et de la ligne de partage de contrôle, Storrs, depuis le 2 septembre 2009, au 1er février 2010, (Grégoire et al, 2011). .....	16
Tableau 12 : Concentration moyenne (mg/l) des ions pour les différents types de toiture (Ghiglia et al. 2011).....	17
Tableau 13 : Comparaison des concentrations en métaux dans les eaux de toitures végétalisées par rapport à la concentration dans l'eau de pluie, Berndtsson et al. (2005).....	18
Tableau 14 : Entrée et sortie de flux (kg/ha/an) de métaux dans l'écoulement des toitures végétalisées et de contrôle de la plaza, du 2 septembre 2009 au 1er février 2010, (Ghiglia 2011 d'après Grégoire et al, 2011).....	18
Tableau 15 : Flux (mg/m2) des nutriments dans l'écoulement issu des différents toits et selon le type de fertilisation (faible, moyenne, forte) (Emilsson et al, 2007). .....	19
Tableau 16 : Estimations du dépôt humide annuel et lixiviation annuelle de l'azote, du phosphore et des métaux étudiés sur le toit végétalisé extensif à Augustenborg, Malmö, (Berndtsson et al, 2006). .....	21
Tableau 17 : La variation des taux de rétention en masse des métaux en fonction de la saison et le type de toit, (Steusloff, 1998).....	22
Tableau 18 : Concentrations moyennes et pourcentage de réduction des paramètres examinés pour la qualité de l'eau issue des toitures végétalisées, (Beck et al, 2011). .....	22
Tableau 19 : Qualité de l'eau d'écoulement provenant de différents toits étudiés. TV1 et TV2 : deux toits végétalisés ; REF : toit bitumeux de référence, et différentes forces d'écoulement (Teemusk et al, 2007).....	23
Tableau 20 : Composition des 6 bancs de toitures végétalisée .....	25
Tableau 21 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés en parallèle sur les retombées atmosphériques totales et sur les toitures BI et SE3Y .....	29
Tableau 22 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés en parallèle sur les 8 compartiments de toiture .....	30
Tableau 23 : Coefficients de ruissellement des 8 toitures pour les 6 événements pluvieux échantillonnés .....	30
Tableau 24 : Caractéristiques physico-chimiques des substrats utilisés d'après le producteur ( <a href="http://www.substrate-ev.org">http://www.substrate-ev.org</a> ) .....	31
Tableau 25: Composition granulométrique obtenu par tamisage et composition organique obtenu par combustion à 550°C .....	31
Tableau 26: Teneur en métaux traces.....	32

Tableau 27 : Comparaison des concentrations en carbone organique, phosphore et azote dans les eaux issues des TTV et d'autres surfaces urbaines. ....	44
Tableau 28 : Comparaison des concentrations en cuivre et zinc dans les eaux issues des TTV et d'autres surfaces urbaines. ....	44

## Bibliographie

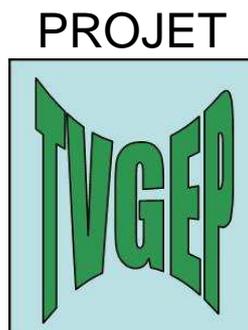
- Adivet, CSFE, SNPPA And UNEP. Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées. 2ème édition, 2007, p 37.
- Ahmed, W., Huygens, F., Goonetilleke, A., Gardner, T., 2008. Real-time PCR detection of pathogenic microorganisms in roof-harvested rainwater in southeast Queensland, Australia. *Applied and Environmental Microbiology* 74 (17), p 5490-5496.
- Alsup; Ebbs; Retzalff. The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates. *Urban ecosystems*, 2010, vol. 13, n° 1, p. 91-111
- Beck; Johnson; Spoleck . Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*, 2011, p. 1-8
- Bengtsson, L., L. Grahn & Olsson, J. (2005). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology*, 36 (3), pp. 259-268.
- Berndtsson, J. C. (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36, p 351-360.
- Berndtsson, J. C., L. Bengtsson & K. Jinno (2009) Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 35, 369-380.
- Boyd, C. E. (2000). *Water Quality: An Introduction*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Bucheli, T.D., Müller, S.R., Voegelin, A., Schwarzenbach, R.P., 1998. Bituminous roof sealing membranes as major sources of the herbicide (R, S)-mecoprop in roof runoff waters: potential contamination of groundwater and surface waters. *Environmental Science and Technology* 32 (22), p. 3465 - 3471.
- Burkhardt, M., S. Zuleeg, J. Eugster, M. Boller, S. Hean, R. Haag, P. Schmid and M. Kohler (2009). Mecoprop in Bitumenbahnen: Auswaschung von Mecoprop aus Bitumenbahnen und Vorkommen im Regenkanal Teilprojekt Kunststoffdachbahnen (PROOF). Eawag and Empa.
- Carpenter; Kaluvakolanu. Effect of Roof Surface Type on Stormwater Run-off for Full-Scale Roofs in a Temperate Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 2011, vol. 137, n° 3, p. 161-169
- Carter, T.L., Rasmussen, T.C., 2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *J. American Water Resources Association (JAWRA)* 42 (5), p. 1261-1274 .
- Chin, D. A. (2006). *Water-Quality Engineering in Natural Systems*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ.
- Czemiel Berndtsson, J., Bengtsson, L., Jinno, K., Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs ecological engineering, (2008).
- DeNardo, J.C., Jarrett, A.R., Manbeck, H.B., Beattie, D.J., Berghage, R.D., 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of ASAE* 48 (4), 1491e1496.
- Dunnett, N., Nagase, A., Hallam, A., 2008a. The dynamics of planted and colonizing species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: influence of substrate depth. *Urban Ecosyst.* 11, 373–384.
- Emilsson, T., Czemiel Berndtsson, J., Mattssona, J.E., Rolfa, K., Effect of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Ecological engineering* 29 (2007), P. 260–271.
- FLL. Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen–Dachbegrünungsrichtlinie. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V; 2008.

- Getter, K. L., D. B. Rowe & J. A. Andresen (2007) Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31, 225-231.
- Grégoire Clausen. Effect of a modular extensive green roof on storm water runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 2011, Vol. 37, n° 6, p. 963-969
- Green Roofs for Healthy Cities (GRHC) and the Cardinal Group Inc. (2005). Green Roof Design 101. Introduction : Participant's Manual. Toronto.
- Hathaway; Hunt; Jennings. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, Vol. 51, P. 37-44.
- James Bliss , D. (2007) Stormwater runoff mitigation and water quality improvements through the use of a green roof in Pittsburgh , PA . School of engineering, P. 92.
- Jennings, G., B. Hunt & Moran, A. (2003). A North Carolina Field Study to Evaluate Green Roof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth, ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA, 27-30 July 2003.
- Roof in Berlin, Part III: Retention of Contaminants. Retrieved March 5, 2006, from [www.roofmeadow.com/water\\_quality.htm](http://www.roofmeadow.com/water_quality.htm)
- Knoll, S., 2000. Das Abflußverhalten von extensiven Dachbegrünungen e Ph.D. Dissertation, TU-Berlin.
- Kristin L. Gettera D. Bradley Rowea, Jeffrey A. Andresen, Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention , 2007 , conclusion .
- Lassalle. Végétalisation extensive des terrasses et toitures, *Le moniteur*, 2008.
- Lehmann; DA Silva; Steiner ; Nehls ; Zech; Glaser. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments, *Plant and soil*, 2003, vol. 249, n° 2, pp. 343-357
- Les Dossiers du CSTC – 3/2006 – Cahier n° 2 – page 1 71
- Liesecke, H.-J., 1998. Das Retentionsvermögen von Dachbegrünungen; water retention capacity of vegetated roofs). *Stadt und Grün* 47 (1), 46–53.
- Macivor, J. S. & J. Lundholm (2011) Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37, 407-417.
- Mendez; Klenzendorf; Afshar; Simmons; Barrett; Kinney; Kirists. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water research*, 2011, vol. 45, n° 5, 2049-2059 .
- Mentens, J., D. Raes & M. Hermy (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77, 217-226.
- Moran, A., Hunt, B., Jennings, G., 2003. A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth. In: *Proceedings of the ASAE Annual International Meeting*, Paper No. 032303, Las Vegas, Nevada, USA, July 27–30, 2003, 1–15.
- Monterusso; Rowe; Rugh; Russell. Runoff water quantity and quality from roof systems. *Acta Horticulturae*, 2004, vol. 639, 369-376. (Cited in ROWE, 2010)
- N. Dunnett, A. Nagase, A. Hallam, The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: nfluence of substrate depth ,*Urban Ecosyst.*, 11 (2008), 373–384 .
- Nohra et al. Toitures terrasses et toitures terrasses végétalisées : risques de contaminations eaux de ruissellement par les matériaux de construction, 2010.

- Peck, S.W. & Goucher, D. (2005). Overview of North American Policy Development and the Policy Development Process, Greening Rooftops for sustainable communities, Washington, D.C., May 4, 5 & 6, 2005. Green Roofs for Healthy Cities, CD ROM.
- Rowe. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 2010, 1-11
- S. Steusloff Input and output of airborne aggressive substances on green roofs in Karlsruhe. J. Breuste, H. Feldmann, O. Uhlmann (Eds.), *Urban Ecology*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany (1998)
- Martin SEIDL, Marie Christine GROMAIRE and Bernard DE GOUVELLO (2012) The effect of roof and rain-event type on pollutant balance of green roofs. *Urban Environmental Pollution*, 17– 20 June 2012 Amsterdam The Netherlands.
- Snoeyink, V. L. and Jenkins, D. (1980). *Water Chemistry*, John Wiley & Sons, New York.
- Stovin, V., G. Vesuviano & H. Kasmin (2012) The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414, 148-161. 72



**Concevoir et Construire  
pour le Développement  
Durable (C2D2)  
Appel à projets 2009**



**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°4  
LIVRABLE N°4.1/4.2  
Déclinaison opérationnelle des résultats du  
projet : outil d'évaluation des performances  
hydrologiques d'une TTV**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :	Emmanuel Berthier, CETE IF Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU
Organismes impliqués :	CETE IF, CSTB/LEESU
Coordination Partie n°4 :	Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU
Coordination TVGEP :	Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU <a href="mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr">bernard.degouvello@leesu.enpc.fr</a>

## Sommaire

1	Introduction .....	2
2	Reformulation des attentes opérationnelles à l'échelle de la TTV.....	3
2.1	Réorientation des objectifs initialement prévus .....	3
2.2	Les indicateurs hydrologiques de performance retenus .....	4
3	Méthodologie d'élaboration de l'outil FAVEUR.....	5
3.1	Principes méthodologiques .....	5
3.2	Illustration des résultats d'un calcul .....	6
3.3	Relations entre C <sub>int</sub> et les critères hydrologiques CR et Ab.....	10
4	Présentation de l'outil FAVEUR d'aide à l'évaluation des performances hydrologiques	11
4.1	Illustration des résultats de l'outil avec une structure « légère » .....	12
4.2	Illustration des résultats de l'outil avec une structure « épaisse » .....	13
5	Conclusion et perspectives .....	14
	<b>Liste des figures .....</b>	<b>16</b>

# 1 Introduction

L'objectif de la partie 4 du projet TVGEP est de décliner à l'attention des acteurs opérationnels des toitures terrasses végétalisées (TTV) les avancées scientifiques produites dans les parties précédentes du projet.

Cette déclinaison emprunte deux directions distinctes, complémentaires, mais renvoyant à deux échelles opérationnelles.

D'un côté, l'échelle urbaine où se trouvent les préoccupations opérationnelles des gestionnaires des grands réseaux de drainage urbains. Ceux-ci s'interrogent sur l'intérêt des TTV en tant qu'outil de gestion des eaux pluviales à l'échelle des gestionnaires de réseaux d'assainissement. Autrement dit, la mise en place de TTV peut-elle contribuer à limiter les apports aux réseaux d'assainissement pluvial (unitaire ou séparatif) de sorte à en faciliter la gestion, que ce soit dans une logique de gestion de la pollution (limitation des déversements) ou dans une logique de prévention contre les risques d'inondation par débordement de réseau. Cette question, qui passe par le couplage du modèle développé dans la partie 2 du projet avec un modèle hydrologique à l'échelle du bassin versant est étudiée dans le cadre du livrable 4.3 en se basant sur des territoires d'étude situés dans les Hauts de Seine, dont la Direction de l'eau est partenaire du projet TVGEP.

D'un autre côté, se trouve l'échelle du bâtiment voire du produit TTV lui-même. Les parties 2 et 3 du projet TVGEP ont permis de caractériser les performances de certaines solutions de TTV tant en termes d'hydrologie quantitative qu'en termes d'émissions – ou de piégeage – de contaminants. Ces résultats ont pu être établis grâce à la mise en place d'un dispositif expérimental conséquent et d'une procédure de suivi sur une période de plus d'une année. Dans le cadre de ce suivi expérimental différentes variantes de TTV ont été testées, mais cette variété est loin d'épuiser l'ensemble des solutions existantes (et à venir) en matière de TTV. Or, il n'est pas envisageable de reproduire des dispositifs expérimentaux d'une telle envergure pour caractériser les performances en termes d'effet sur le ruissellement des TTV. Il convient donc, à partir des résultats du projet, de proposer des éléments permettant une évaluation plus générique. Tel est le propos du présent rapport qui recouvre les ambitions initialement affichées dans les tâches 4.1 et 4.2 du projet.

Ce rapport est organisé en trois parties. La première s'attache à reformuler les besoins de caractérisations des performances des TTV en matière de gestion d'eau pluviale à l'échelle d'une TTV. La seconde présente la méthodologie utilisée pour élaborer l'outil permettant de quantifier la performance hydrologique d'une TTV. La dernière présente l'outil lui-même et son application à deux exemples.

## 2 Reformulation des attentes opérationnelles à l'échelle de la TTV

### 2.1 Réorientation des objectifs initialement prévus

A l'échelle de la TTV, le projet TVGEP contenait initialement deux tâches dans la partie 4:

- esquisser une réflexion permettant à terme la mise au point d'une méthode d'essai pour évaluer la performance « eau » des produits disponibles tant du point de vue hydrique qu'en termes de qualité d'eau : cette méthode pouvant, le cas échéant, intégrer les procédures d'évaluation des produits des industriels (tâche 4.1. devant donner lieu au livrable 4.1) ;
- formuler des recommandations pour la conception, le dimensionnement et l'entretien des TTV adaptées aux besoins des maîtres d'ouvrage des réseaux urbains d'assainissement (tâche 4.2, devant donner lieu au livrable 4.2).

Les résultats obtenus dans les parties 2 et 3 du projet (et accessoirement, dans la partie 1) ont conduit à proposer une réorientation de ces tâches en raison des points suivants :

- Il est apparu possible de prévoir les performances hydrologiques d'une TTV en fonction de ses paramètres physiques (nature et épaisseur des couches intégrant le complexe). Cette prévision repose sur un traitement statistique indispensable car le rôle des conditions initiales dans le comportement de la TTV est essentiel. Cette conclusion rend *de facto* et dans un premier temps évitable et illusoire la possibilité de développer un protocole d'essai : évitable, car une simulation numérique validée peut remplacer avantageusement un essai réel ; illusoire car tout essai réel ne saurait traiter la question épineuse de la variabilité des conditions initiales qui ne peut être correctement traitée qu'au moyen de l'utilisation de longues séries de pluie réelles. En l'état actuel des connaissances, développer un test rapide permettant la caractérisation directe des performances hydrologiques paraît donc une aporie. Toutefois, à l'avenir, la définition de protocoles spécifiques visant à renseigner de manière standardisée une variable physique jouant un rôle important dans la performance hydrologique du produit pourrait s'avérer nécessaire (ex. la capacité maximale en eau, CME).
- La différenciation des tâches 4.1 et 4.2 reposait sur une hypothèse implicite que les attentes en termes de performances « eau » des TTV différaient selon le type d'acteurs concerné. En d'autres termes, les gestionnaires de réseaux n'auraient pas les mêmes attentes que les acteurs intervenant au niveau du bâtiment. Dans les faits, on constate bien une convergence en termes d'objectifs : les objectifs assignés aux techniques alternatives (auxquelles les TTV revendiquent d'appartenir) sont définis en fonction de contraintes reposant à l'échelle urbaine et reformulés à l'échelle des parcelles (cf. section 2.2).
- En ce qui concerne l'émission de contaminants, les résultats obtenus en partie 3 du projet ne permettent de dégager en fin de projets d'éléments tangibles en termes de recommandations opérationnelles de conception ou d'entretien.
- De façon plus générale, la question de l'entretien, pour être traitée correctement, suppose une observation du comportement des structures sur une durée plus longue que celle de l'expérimentation. Sur ce point, il apparaît donc peu évident d'apporter des éléments. Notons toutefois que l'entretien a suscité de nombreuses questions au sein des partenaires du projet et qu'il est envisagé de poursuivre (selon des modalités encore à définir tant du point de vue protocole que du cadre) le suivi des installations au cours des années à venir. L'objectif serait de pouvoir disposer d'éléments

d'observation pouvant alimenter des recherches sur les questions de maintien des performances dans le temps en lien avec la thématique de l'entretien.

En conséquence, l'option prise a été de se focaliser sur l'élaboration d'un outil prédictif des performances en « eau » des TTV se limitant au volet strictement hydrologique.

## **2.2 Les indicateurs hydrologiques de performance retenus**

Les besoins de caractérisation de performance « eau » des TTV peuvent être définis en termes de ruissellement, d'abattement et de débit instantané.

- Le coefficient de ruissellement (CR, sans unité). Le coefficient de ruissellement indique le pourcentage d'eau sortant d'une toiture au regard de la quantité d'eau reçue.
  - o Ce coefficient peut être relatif à un comportement moyen sur une période donnée : on prend alors généralement la base de l'année, i.e. le coefficient de ruissellement annuel, noté **CR annuel**. Mais il est également possible de prendre une saison voire un mois donné. Ce coefficient permet d'avoir une idée générale des apports évités au réseau situé en aval. En revanche, cela ne renseigne pas sur la variabilité des apports.
  - o Le coefficient peut être exprimé par événement pluviométrique : il est alors noté **CR ev**. Ce coefficient a une valeur différente en fonction de l'évènement considéré et il est alors possible d'apprécier cette variabilité à partir d'une série assez longue.
- Le niveau d'abattement (Ab, exprimé en mm). Ce niveau indique la part de la pluie qui ne ruisselle pas, i.e. qui ne sort pas de la TTV. A nouveau, ce paramètre peut être évalué de manière moyenne, par exemple sur une année donnée (**Ab annuel**), ou par événement pluviométrique (**Ab ev**)
- Le débit spécifique maximum (**qs** en l/s/ha de TTV). Ce débit est exprimé par événement pluvieux uniquement ; il correspond donc au débit maximum à l'exutoire de la TTV pendant l'évènement (l/s), divisé par la superficie de la TTV (l/s/ha de TTV). Ce critère est ressorti comme important dans les discussions avec les maîtres d'ouvrages des réseaux. Il est plus difficile à comprendre et reproduire car au contraire des 2 critères précédents, il dépend non seulement du volume de ruissellement produit par la TTV mais aussi de sa dynamique et son transfert, et donc en particulier de la géométrie plane de la TTV. Dans les travaux de TVGEP, des débits spécifiques ont été observés sous différents événements et configurations de TTV, mais leur reproduction en fonction de caractéristiques de la toiture n'est pas assez aboutie et donc trop incertaine. Dans ces conditions et en l'état actuel des connaissances, il n'est pas souhaitable d'introduire ce critère dans les déclinaisons opérationnelles, et en particulier dans l'outil permettant d'estimer les performances hydrologiques d'une TTV.

## 3 Méthodologie d'élaboration de l'outil FAVEUR

### 3.1 Principes méthodologiques

L'élaboration de l'outil suit la méthodologie représentée en Figure 1. Les grands principes sont les suivants :

- nous disposons du modèle FAVEUR qui simule le comportement hydrologique d'une TTV (cf. Livrable 2.2 du projet) et de données d'entrée de pluie et d'évapotranspiration potentielle sur de longues durées. Pour ce rapport, c'est 18 ans de données de la région parisienne (1993-2011) qui sont utilisées au pas de temps de 5min;
- des simulations sont alors lancées (au nombre de ncalc) avec un tirage aléatoire des paramètres C<sub>int</sub>, C<sub>tra</sub> et T<sub>tra</sub> de FAVEUR-modèle dans une gamme de valeurs qui permettent de représenter une certaine diversité de TTV. Pour cette note, ncalc = 500 ;
- à partir de la chronique de ruissellement simulée à chaque calcul, des critères de comportement hydrologique sont calculés. Il est calculé les 3 types de critères présentés précédemment : le coefficient de ruissellement (CR), l'abattement (Ab en mm) et le débit spécifique maximum (q<sub>s</sub> en l/s/ha de TTV). Les deux premières familles sont calculées aux échelles annuelle, saisonnière et événement pluvieux, la dernière uniquement lors d'événements pluvieux. Avec la chronique de pluie utilisée, 1438 événements pluvieux de pluie > 1mm sont identifiés, et 694 > 5 mm. Des statistiques sont calculées pour chacun des critères : moyenne, médiane, minimum, maximum, quantiles, ... ;
- une fois ces critères calculés pour une diversité de TTV, on recherche à corréler ces critères avec i) des paramètres du modèle puis ii) des caractéristiques de la toiture. Pour cette note, les résultats présentent les relations entre le paramètre C<sub>int</sub> de FAVEUR-Modèle et les critères CR et Ab. C<sub>int</sub> est ensuite relié à des caractéristiques de la toiture comme l'épaisseur du substrat, la CME du substrat et le type de végétation ;
- enfin, ces corrélations sont rentrées dans un tableur (ici Excel©) qui permet à partir de la saisie des caractéristiques de la toiture, de calculer ses performances hydrologiques en termes de CR et Ab.

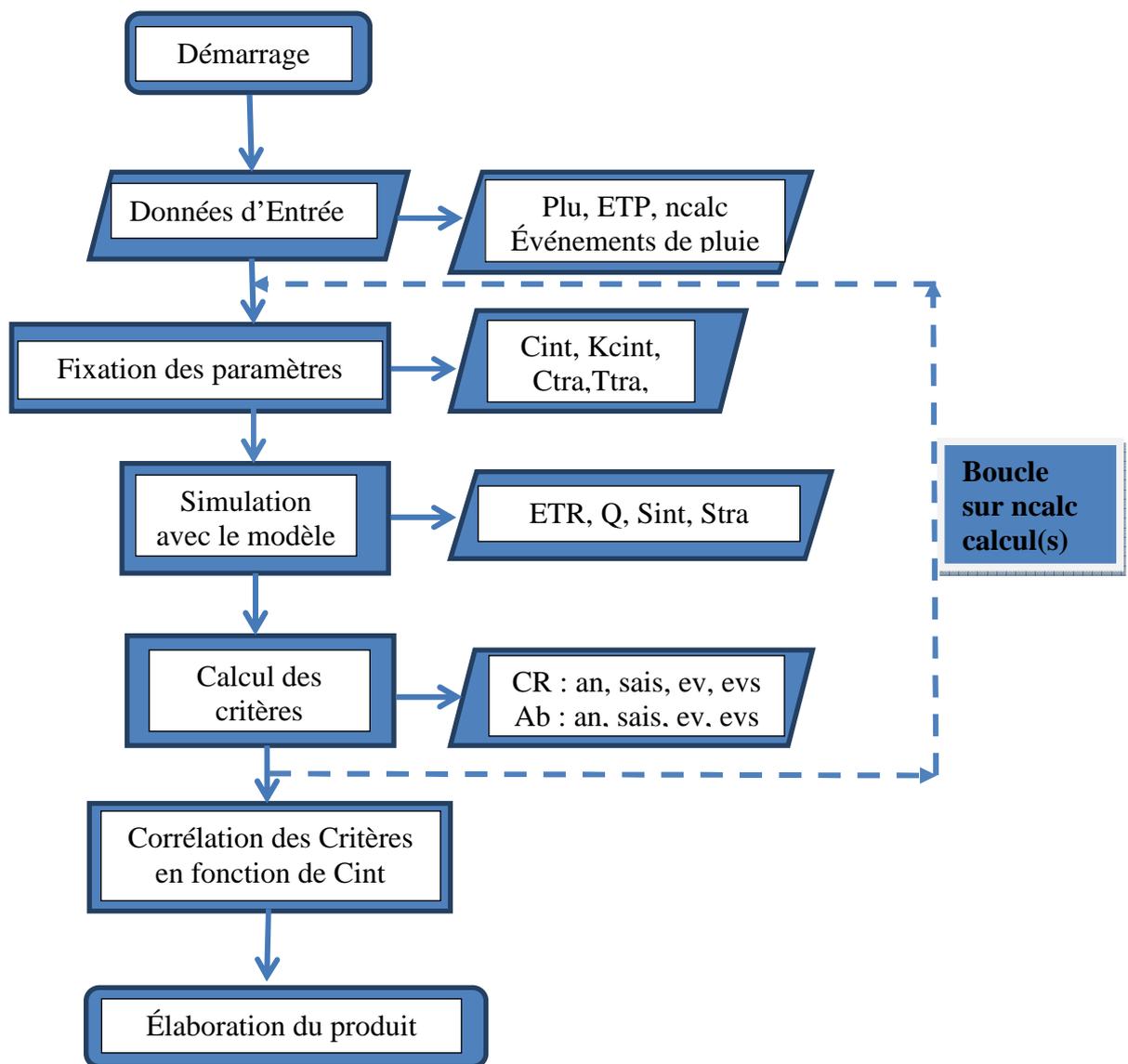
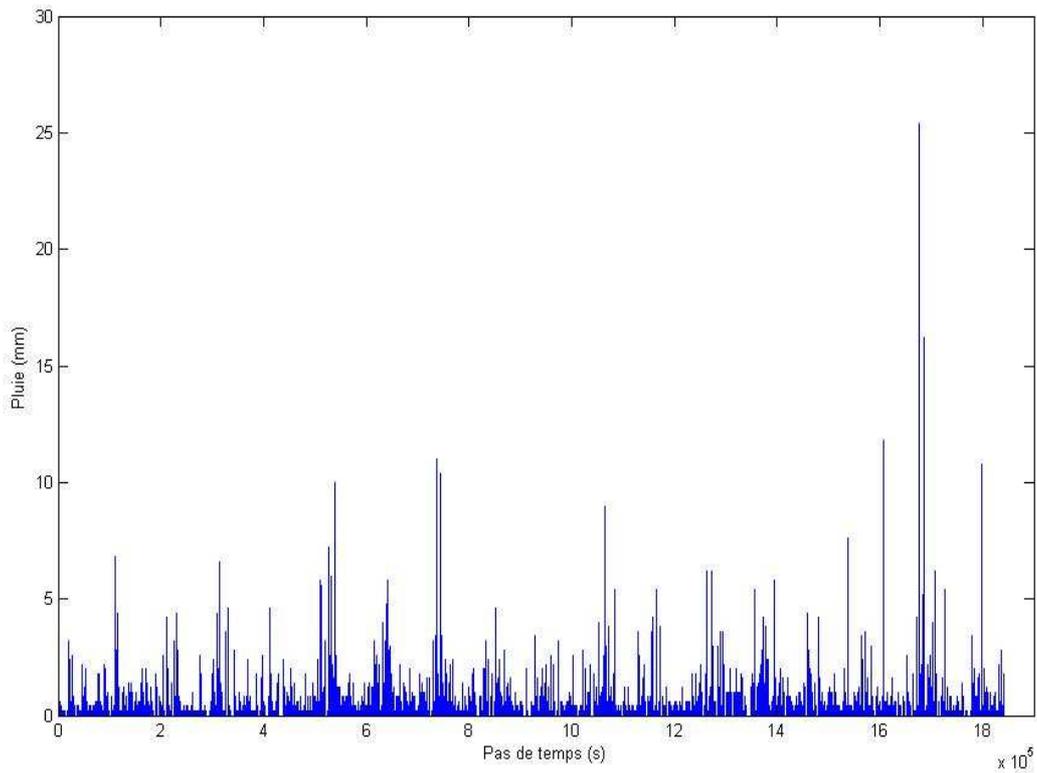


Figure 1 : Méthodologie suivie pour l'élaboration de l'outil d'aide à la conception FAVEUR

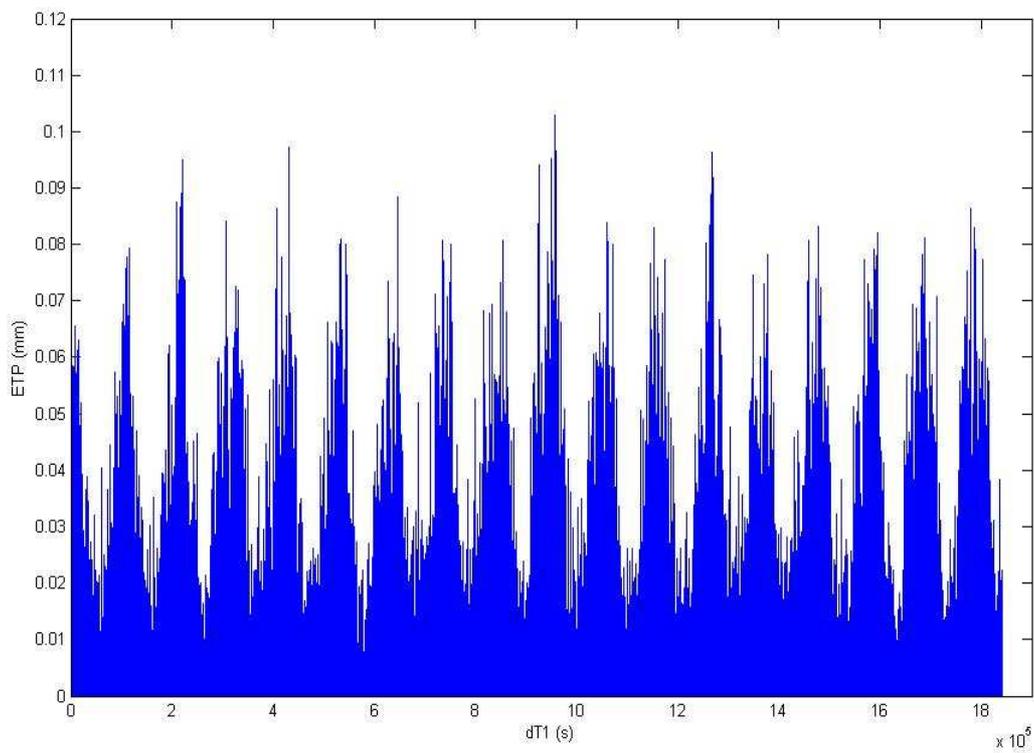
### 3.2 Illustration des résultats d'un calcul

Afin d'illustrer les ruissellements simulés et les critères calculés, ce paragraphe montre les résultats pour le calcul effectué avec les paramètres suivants :  $C_{int} = 12 \text{ mm}$  ;  $C_{tra} = 20 \text{ mm}$  ;  $T_{tra} = 20 \text{ mm}$ .

Les chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle utilisées sont représentées en Figure 2 et Figure 3. La pluviométrie annuelle oscille entre 400 et 950 mm, la moyenne de la région Île-de-France étant de 650 mm.

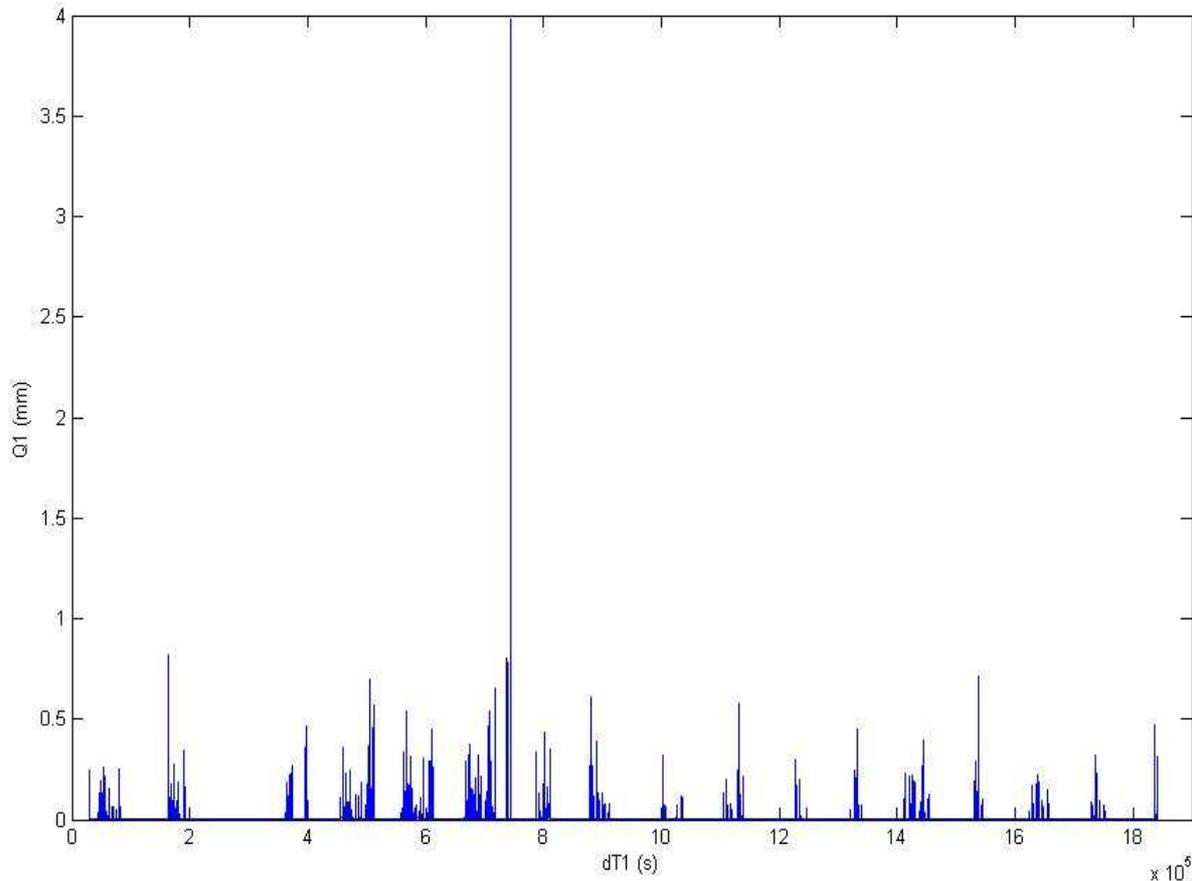


**Figure 2 : Pluviométrie utilisée pour les simulations  
(1993-2011 au pas de temps de 5min)**



**Figure 3 : Évapotranspiration potentielle utilisée pour les simulations  
(1993-2011 au pas de temps de 5min)**

Le ruissellement simulé par FAVEUR avec les paramètres cités en début de paragraphe est représenté Figure 4. Les débits sont relativement faibles par rapport aux pluies, ce qui s'explique par une valeur élevée du paramètre Cint.

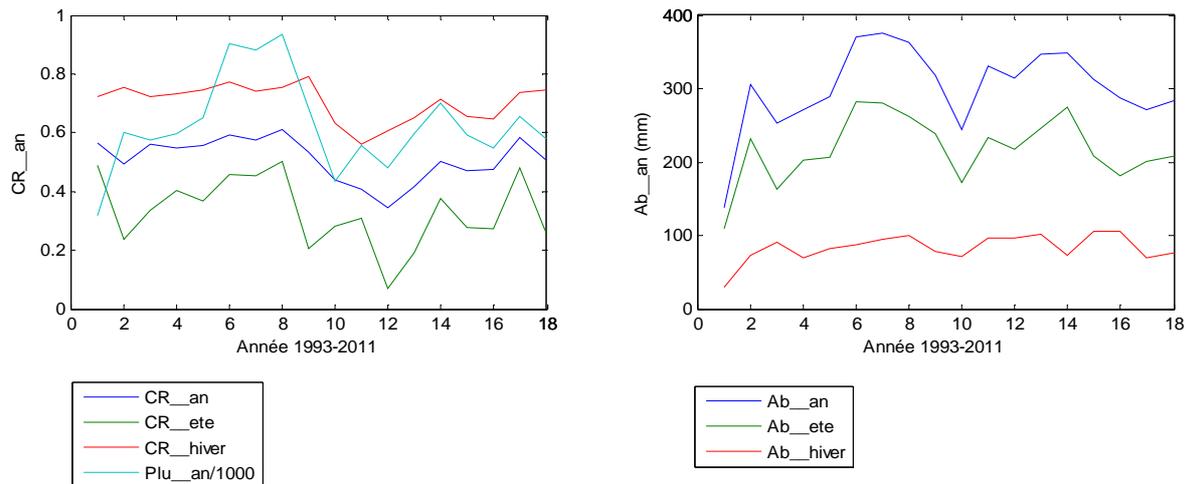


**Figure 4 : Ruissellement simulé par le modèle (1993-2011 au pas de temps de 5mm)**

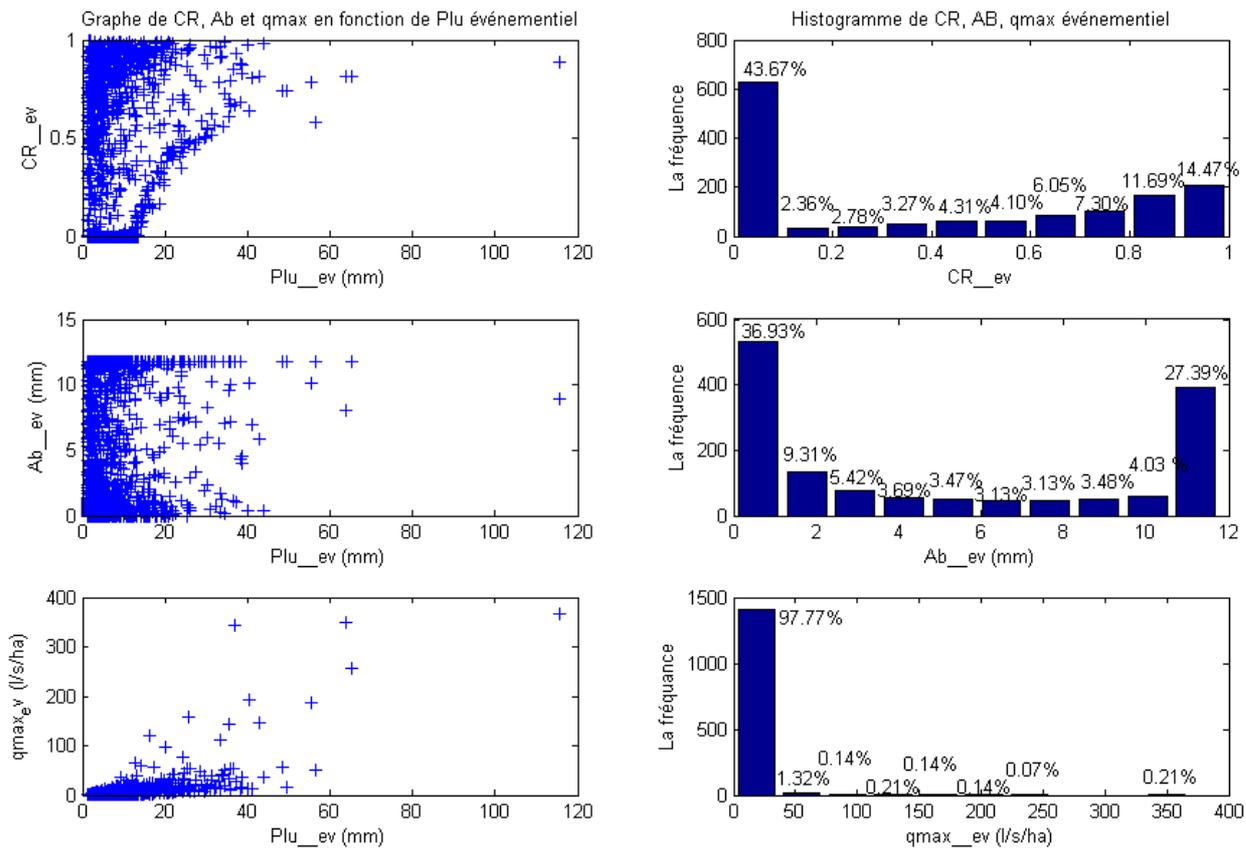
Les CR et Ab aux différentes échelles de temps sont représentés sur la Figure 5 en fonction de l'année de simulation. La pluie annuelle de chaque année est rajoutée sur le graphique. Les CR annuels ont des variations autour de 0,5. Ces variations sont assez bien expliquées par les variations de la pluie annuelle (plus il pleut et plus le CR est élevé). Les CR ont une composante saisonnière très marquée, avec une valeur moyenne proche de 0,7 en hiver, et 0,3 en été.

Les Ab connaissent des variations inverses de celles des CRs ; l'abattement hivernal représentant parfois que 30% de l'abattement annuel.

La Figure 6 représente les CR, Ab et  $q_s$  événementiel, avec leur distribution et en fonction de la hauteur de la pluie de l'événement. Les CR événementiels varient entre 0 et 1, avec 45% des valeurs  $< 0,1$ . L'importance de la pluie n'explique pas à elle seule les variations de CR (par exemple pour une hauteur de pluie de 20mm, CR vaut parfois 0,1 et parfois 1). L'autre variable explicative est bien sûr l'état hydrique initial de la toiture (représenté par le niveau dans le réservoir d'interception du modèle). Ce constat se retrouve aussi pour l'Ab, avec de nombreuses valeurs d'abattement faibles (37%  $< 1$ mm) et élevées (25%  $> 11$ mm).



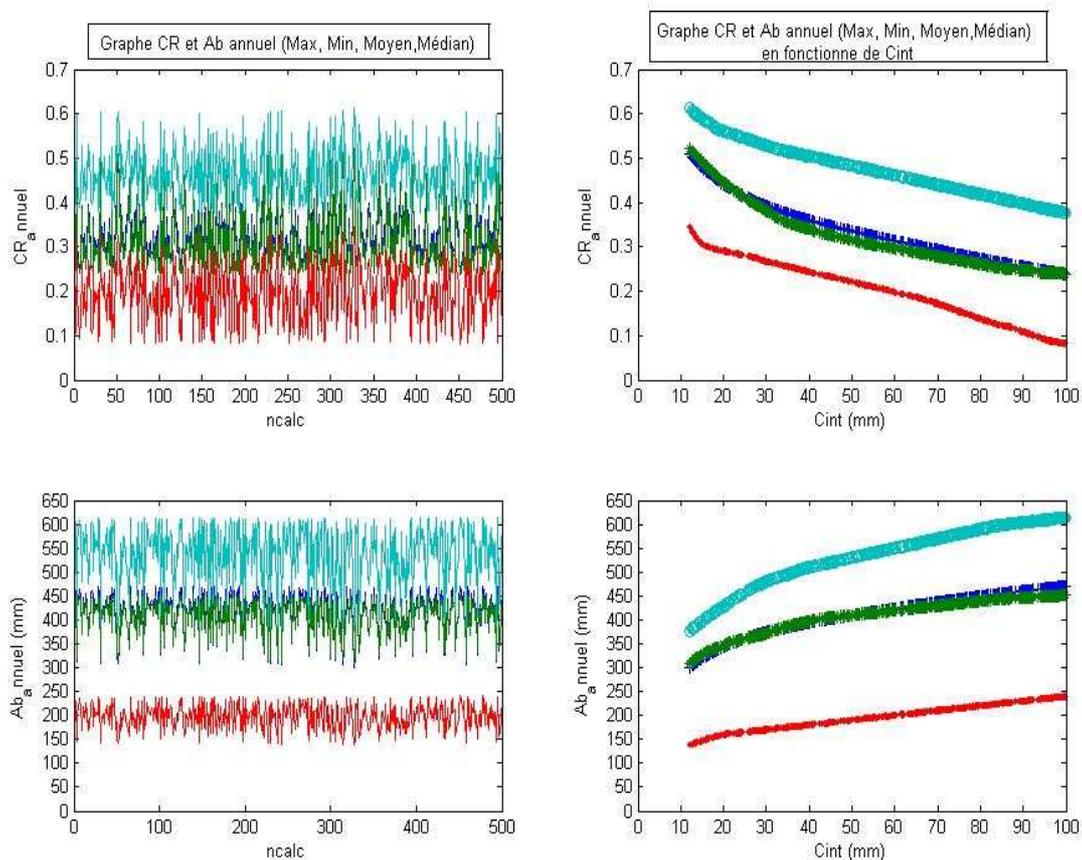
**Figure 5 : CR et Ab annuels (en bleu), en été (vert) et en hiver (rouge) en fonction de l'année de simulation. La pluie annuelle est rajoutée sur le graphique avec les CR (en m de pluie)**



**Figure 6 : CR, Ab et qs événementiel en fonction de la pluie de l'événement et histogramme (pour la série des 1438 événements où Hplu > 1mm)**

### 3.3 Relations entre Cint et les critères hydrologiques CR et Ab

Une fois les 500 calculs réalisés avec une large gamme de paramètres du modèle, il est possible de tracer les statistiques des critères en fonction du calcul et aussi en fonction de Cint. Cette démarche est illustrée sur la Figure 7 pour les CR et Ab annuels.



**Figure 7 : Variations des statistiques des CR et Ab annuels en fonction du calcul et de Cint (rouge : minimum ; bleu clair : maximum ; bleu foncé : moyenne ; vert : médiane)**

Il est alors possible de caler un polynôme reliant les statistiques des critères CR et Ab avec la valeur de Cint. En reprenant l'exemple précédant, les lois suivantes ont pu être calées :

- $CR_{max} = -2.8715e-007*(Cint^3) + 5.7573e-005*(Cint^2) - 0.0057583*Cint + 0.65988$
- $CR_{moyenne} = -4.759e-007*(Cint^3) + 0.00010361*(Cint^2) - 0.0091803*Cint + 0.59098$
- $CR_{mediane} = -6.8655e-007*(Cint^3) + 0.00015323*(Cint^2) - 0.012583*Cint + 0.6433$
- $CR_{minimum} = 8.3964e-009*(Cint^4) - 2.0573e-006*(Cint^3) + 0.00016832*(Cint^2) - 0.0078325*Cint + 0.39834$
- $Ab_{max} = 0.0003936*(Cint^3) - 0.089173*(Cint^2) + 8.2171*Cint + 297.5$
- $Ab_{moyenne} = 0.00028941*(Cint^3) - 0.0634*(Cint^2) + 5.6736*Cint + 250.99$
- $Ab_{mediane} = 0.00024384*(Cint^3) - 0.057896*(Cint^2) + 5.2941*Cint + 260.19$
- $Ab_{minimum} = 8.0152e-005*(Cint^3) - 0.015563*(Cint^2) + 1.9344*Cint + 123.57$

Cette démarche est effectuée pour toutes les statistiques et toutes les échelles de temps pour lesquelles sont calculés les critères CR et Ab.

## 4 Présentation de l'outil FAVEUR d'aide à l'évaluation des performances hydrologiques

L'outil élaboré prend la forme d'une feuille de tableur (ici Excel©) dans laquelle l'opérateur saisit une série de caractéristiques de la toiture. Les performances hydrologiques s'affichent alors dans des tableaux et graphiques voisins. C'est donc un outil très simple d'usage et qui permet très rapidement d'estimer les performances hydrologiques d'une toiture.

Les caractéristiques suivantes de la toiture se sont avérées avoir un rôle important dans le comportement hydrologique d'une TTV et donc dans ses performances en particulier en termes de coefficient de ruissellement et d'abattement : *épaisseur du substrat*, *CME* et *type de végétation*.

Une fois ces valeurs saisies, le paramètre du modèle capacité d'interception ( $C_{int}$ ) est calculé à l'aide des formules suivantes:

- si l'épaisseur du substrat  $e < 50\text{mm}$ ,  $C_{int} (\text{mm}) = \text{CME (sans unité)} * e (\text{mm})$
- si l'épaisseur du substrat  $e > 50 \text{ mm}$ ,  $C_{int}(\text{mm}) = \text{CME (sans unité)} * 50$

Ensuite les statistiques sur les critères hydrologiques sont calculées à l'aide des formules établies entre ces critères et  $C_{int}$ .

Par la suite, l'utilisation de l'outil est illustrée à l'aide de deux exemples avec des structures de TTV assez éloignées. On rappelle que ces résultats sont obtenus sur la base du régime pluviométrique d'Île de France (défini par la série de 18 années de données utilisées). L'application d'un régime pluviométrique d'une autre région (i.e. d'une autre série de données) conduirait à des résultats potentiellement différents.

## 4.1 Illustration des résultats de l'outil avec une structure « légère »

La TTV étudiée possède les caractéristiques suivantes :

- un substrat avec une CME de 20% (valeur relativement faible) ;
- une épaisseur de substrat de 3 cm (valeur quasi minimale) ;
- une végétalisation par du sedum (faiblement consommateur d'eau).

La Figure 8 est une image des résultats fournis par l'outil pour cette TTV.

Paramètres TTV		CRITERES HYDRIQUES DE LA TTV										
		CR annuel	CR ete	CR hiver	CR ev >1mm	CR ev >5mm	Ab annuel (mm)	Ab ete (mm)	Ab hiver (mm)	Ab ev >1mm (mm)	Ab ev >5mm (mm)	
CME substrat (en %):	20	minimum	0,4	0,1	0,6	0,0	0,0	135	98	14	0	0
Epaisseur substrat (cm):	3	moyenne	0,5	0,4	0,7	0,4	0,5	283	185	78	3	3
Nature de la végétation (S ou G):	S	median	0,6	0,4	0,8	0,6	0,9	290	170	81	3	2
		maximum	0,6	0,5	0,8	1,0	1,0	344	223	98	6	6
		q25				0	0				0	0
Cint (mm):	6	q75				0,8	0,9				6	6

Figure 8 : Illustration des résultats de la feuille Excel pour une TTV « légère ».

Le coefficient de ruissellement annuel moyen de la TTV est estimé à 0.5, avec des variations *a priori* assez faibles d'une année à l'autre (entre 0.4 et 0.6). En été, le ruissellement reste significatif (moyenne de 0.4) et augmente en hiver (0.7), ce comportement étant prévisible.

Pour un événement pluvieux, le coefficient de ruissellement peut varier entre 0 et 1, avec une médiane à 0.6 pour les événements vraiment fréquents, et 0.9 pour les événements dont la pluie dépasse 5 mm. Cette TTV est donc très sensible à l'importance de la pluie, et dès qu'elle est significative, le ruissellement est important.

Inversement, l'abatement annuel est en moyenne de 285-290 mm, avec de légères variations saisonnières. Comme attendu sur une structure aussi « légère », la TTV retient en moyenne 3 mm de pluie par événement, avec un maximum à 6 mm, et pour plus de 25% des événements, aucun abatement (q25=0mm).

## 4.2 Illustration des résultats de l'outil avec une structure « épaisse »

La TTV étudiée dans cette seconde illustration possède les caractéristiques suivantes :

- un substrat avec une CME de 40% (valeur élevée) ;
- une épaisseur de substrat de 10 cm ;
- une végétalisation par des graminées (plus gourmandes en eau que le sedum).

La Figure 9 est une image des résultats fournis par l'outil pour cette TTV.

Paramètres TTV		CRITERES HYDRIQUES DE LA TTV										
		CR annuel	CR ete	CR hiver	CR ev >1mm	CR ev >5mm	Ab annuel (mm)	Ab ete (mm)	Ab hiver (mm)	Ab ev >1mm (mm)	Ab ev >5mm (mm)	
CME substrat (en %):	40	minimum	0,3	0,0	0,5	0,0	0,0	175	122	41	0	0
Epaisseur substrat (cm):	10	moyenne	0,4	0,2	0,7	0,3	0,5	341	253	90	8	9
Nature de la végétation (S ou G):	G	median	0,4	0,2	0,7	0,1	0,3	363	259	104	6	7
		maximUm	0,6	0,4	0,8	1,0	1,0	468	335	113	20	20
		q25				0	0				0	1
Cint (mm):	20	q75				0,7	0,8				19	20

Figure 9 : Illustration des résultats de la feuille Excel pour une TTV « épaisse ».

Le *coefficient de ruissellement annuel moyen* de la TTV est estimé à 0.4, avec des variations d'une année à l'autre (0.3 à 0.6). En été, le ruissellement est vraiment faible (parfois même quasi nul) alors qu'il reste élevé en hiver (0.7 en moyenne). A noter donc que, *a priori*, épaissir la TTV ne permet pas de réduire significativement le ruissellement d'hiver mais agit plus sur le ruissellement d'été.

Pour les *événements pluvieux fréquents*, le coefficient de ruissellement peut varier entre 0 et 1, avec une moyenne à 0.3 et une majorité de coefficients très faibles (<0.1). Pour les événements dont la pluie dépasse 5 mm, les coefficients de ruissellement sont significativement augmentés (moyenne de 0.5) mais une majorité reste inférieure à 0.3. Cette TTV est donc moins sensible que la TTV « légère » à l'importance de la pluie.

L'*abattement annuel* est en moyenne de 340 mm, avec des variations saisonnières importantes (en moyenne 255 en été et 90 en hiver). Les abattements événementiels sont significatifs, avec en moyenne 8mm de pluie retenue. Ils se caractérisent par une forte variabilité puisque pour plus de 25% des événements l'abattement est nul, et pour plus de 25 autres % des événements l'abattement atteint 20mm.

## 5 Conclusion et perspectives

L'outil FAVEUR développé permet d'estimer les performances hydrologiques d'une TTV, il est très simple à utiliser et renseigne rapidement le professionnel. Une première version est en cours de finalisation, et sera mis à disposition des acteurs des TTV pendant l'été 2014.

Cette première version a un domaine d'application restreint, principalement lié au fait que FAVEUR-modèle et FAVEUR-outil ont été évalués et validés avec les données du banc d'essai du CETE à Trappes. Rigoureusement, l'outil doit donc être utilisé pour des configurations de TTV proches de celles de ce banc d'essai :

- la toiture doit être « plane » ;
- le substrat doit être peu épais (<15cm) et assez peu organique ;
- il doit y avoir une couche de drainage, mais non hydro-rétentrice.

Il est à noter que ce type de TTV peut paraître restreint, mais il correspond à une TTV extensive peu épaisse, type qui couvre la majorité des toitures végétalisées posées. Ces conditions d'utilisation seront bien rappelées dans la version diffusée, via l'outil et une notice associée.

Des réflexions sont aussi initiées avec les partenaires du projet TVGEP sur l'amélioration de FAVEUR-outil. Les pistes d'amélioration identifiées sont multiples :

- il pourra être possible régulièrement d'améliorer le modèle FAVEUR, modèle qui conditionne tous les résultats de l'outil. Toutes les nouvelles données, connaissances... peuvent potentiellement contribuer à son amélioration. Nous pouvons citer par exemple le nouveau projet financé par l'ADEME TERRACE dont l'objectif est d'étudier l'intérêt des TTV pour la réduction de l'îlot de chaleur urbain : le projet doit permettre de mieux connaître les conditions d'évapotranspiration sur les TTV, et donc d'améliorer potentiellement sa simulation dans FAVEUR. Un autre compartiment à améliorer est sûrement le lien entre les caractéristiques physiques de la TTV et les paramètres du modèle, ce qui devrait permettre à terme d'estimer les performances des TTV sur les débits spécifiques de pointe. Une autre piste est aussi pour les faibles épaisseurs de substrat, de tenir compte du rôle du support des tapis pré-cultivés, dans le cas où c'est cette forme de végétalisation qui a été posée (c'est le cas pour le banc d'essai du CETE à Trappes) ;
- les résultats montrés sont valables sous le climat d'Île-de-France. Ils pourraient être significativement différents sous d'autres climats. L'application sous d'autres climats nécessite de reproduire la démarche avec de nouvelles longues chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Dans un premier temps, on pourrait se concentrer sur le climat méditerranéen, *a priori* le plus éloigné du climat francilien pour la France métropolitaine et par rapport à notre problématique. Si les performances ne sont pas significativement modifiées, l'outil actuel pourra être considéré comme applicable en France métropolitaine. Sinon, des tests avec des climats intermédiaires comme le climat océanique ou continental devront être réalisés ;
- il serait intéressant de pouvoir comparer les performances d'une TTV avec des toitures terrasses « traditionnelles ». Deux types de terrasses traditionnelles pourraient être considérés : une étanchéité nue dite « auto-protégée » et une terrasse à « revêtement meuble » (i.e. avec gravillons). Les observations menées dans TVGEP sur ces deux

types de terrasses devraient permettre de caler FAVEUR sur ces solutions techniques, puis, en appliquant la même méthodologie, d'estimer leurs performances.

En pratiquant l'outil, il est probable que des retours sur sa forme soient émis. Un premier retour exprimé par les partenaires opérationnels de TVGEP est le souhait « d'inverser » l'outil : l'opérateur pourrait ainsi saisir un niveau de performance souhaité, et l'outil renseignerait alors les structures permettant d'atteindre cette performance.

Enfin, des réflexions doivent être initiées quant aux modalités de diffusion de l'outil. Notre préférence irait vers un lieu sur Internet où les personnes intéressées pourraient :

- i) avoir une présentation de la genèse de l'outil et des hypothèses associées,
- ii) lire un mode d'emploi ; et
- iii) télécharger l'outil gratuitement.

La plateforme *Wikhydro* du ministère est un lieu potentiel permettant ces fonctionnalités, mais d'autres pistes sont envisagées.

## Liste des figures

Figure 1 : Méthodologie suivie pour l'élaboration de l'outil d'aide à la conception FAVEUR	6
Figure 2 : Pluviométrie utilisée pour les simulations	7
Figure 3 : Évapotranspiration potentielle utilisée pour les simulations	7
Figure 4 : Ruissellement simulé par le modèle (1993-2011 au pas de temps de 5mm)	8
Figure 5 : CR et Ab annuels (en bleu), en été (vert) et en hiver (rouge) en fonction de l'année de simulation.	9
Figure 6 : CR, Ab et qs événementiel en fonction de la pluie de l'événement et histogramme	9
Figure 7 : Variations des statistiques des CR et Ab annuels en fonction du calcul et de Cint.	10
Figure 8 : Illustration des résultats de la feuille Excel pour une TTV « légère »	12
Figure 9 : Illustration des résultats de la feuille Excel pour une TTV « épaisse »	13



**Concevoir et Construire pour  
le Développement Durable  
(C2D2)**

**Appel à projets 2009**

PROJET



**TVGEP : conception des Toitures  
Végétalisées pour la Gestion des  
Eaux Pluviales urbaines**

**PARTIE N°4  
LIVRABLE N°4.3  
Impact de la diffusion des TTV à l'échelle d'un  
bassin versant**

(version finale corrigée)

**Organisation du travail**

Rédaction du rapport :

Pierre-Antoine Versini

Organismes impliqués :

CSTB, LEESU - ENPC

Coordination Partie n°4

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

Coordination TVGEP :

Bernard de Gouvello, CSTB/LEESU

[bernard.degouvello@leesu.enpc.fr](mailto:bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

## Sommaire

<b>1. Contexte, objectifs et méthodologie</b> .....	2
<b>2. Modélisation hydrologique d'une TTV à l'échelle de la toiture</b> .....	3
2.1. Utilisation du modèle de gestion SWMM.....	3
2.2. Développement d'un module TTV .....	3
2.3. Calibration et validation du module TTV .....	5
2.3.1. Calibration du module pour la TTV S3E .....	6
2.3.2. Calibration du module pour la TTV S15E .....	7
2.3.3. Conclusion.....	8
<b>3. Cas d'étude du 92</b> .....	8
3.1. Contexte et choix des bassins d'étude.....	9
3.1.1. Bassin de Boulogne-Billancourt (5,5 km <sup>2</sup> ) .....	9
3.1.2. Bassin de Châtillon (2,4 km <sup>2</sup> ) .....	10
3.2. Représentation sous SWMM.....	10
3.3. Validation à l'aide de mesures pluie-débit.....	11
<b>4. Scénarios de végétalisation</b> .....	13
4.1. Méthodologie .....	13
4.2. Résultats sur les bassins d'étude .....	15
4.3. Interprétation dans le module TTV .....	16
<b>5. Simulations des impacts des TTV sur le ruissellement urbain</b> .....	18
5.1. Méthodologie .....	18
5.2. Présentation des résultats .....	20
5.2.1. Problèmes de débordement (Bassin de Châtillon) .....	20
5.2.2. Effet d'échelle (Bassin de Châtillon) .....	24
5.2.3. Problèmes de déversement (Bassin de Boulogne-Billancourt) .....	24
<b>6. Conclusion</b> .....	26
<b>Liste des figures et tableaux</b> .....	29
<b>Bibliographie</b> .....	30

L'objectif de la partie 4 du projet TVGEP est d'étudier l'impact hydrologique des toitures végétalisées sur le ruissellement urbain à l'échelle du bassin versant.

## **1. Contexte, objectifs et méthodologie**

La végétalisation des toitures connaît depuis quelques années un fort développement en France. Cette technique, déjà répandue dans de nombreux pays de l'Europe du Nord, produit des effets bénéfiques à l'échelle du bâtiment, comme l'amélioration de l'isolation thermique et acoustique. Elle a aussi montré une certaine capacité à modifier favorablement le ruissellement des eaux de pluie issues des toitures : diminution et retard du pic de débit, diminution du volume ruisselé.

La partie 4 du projet TVGEP consiste à étudier dans quelle mesure ces bénéfices, constatés en termes de ruissellement à l'échelle de toitures instrumentées (de l'ordre de quelques dizaines de m<sup>2</sup>), peuvent être transposés à l'échelle du bassin versant (de l'ordre de quelques km<sup>2</sup>). Pour cela, il a été décidé de travailler en collaboration avec la Direction de l'Eau du Conseil Général des Hauts-de-Seine (92) sur des cas réels où l'apport des toitures terrasses végétalisées (TTV) pourrait avoir des effets bénéfiques pour résoudre des problèmes opérationnels. Dans ce cadre, l'objectif était de travailler sur des bassins versants soumis à des problèmes récurrents de saturation des réseaux d'eaux pluviales et d'évaluer dans quelle mesure la mise en place de TTV pourrait diminuer ces risques de saturation.

Une méthodologie pour évaluer les impacts des TTV a été développée. Elle comprend :

- une méthode pour définir des scénarios de végétalisation capables d'estimer un maximum de surface de toiture végétalisable à l'échelle de la parcelle, appelé « potentiel de végétalisation ».
- un outil de modélisation susceptible de représenter le comportement hydrologique d'une TTV et d'être intégré à un modèle de gestion des eaux pluviales (SWMM) pour en étudier l'impact à l'échelle du bassin versant.

Ce livrable contient donc les résultats provenant de l'application de cette méthodologie sur deux bassins versants urbains des Hauts-de-Seine. On présentera d'abord (Section 2) le modèle de type réservoir simulant le comportement hydrologique d'une TTV et la manière dont il a été intégré au modèle de gestion des eaux pluviales. Dans la Section 3, on présentera les deux bassins retenus pour mener cette étude, ainsi que les problèmes de saturation de réseau auxquels ils doivent faire face. La méthode de définition du potentiel de végétalisation et la construction de scénarios de végétalisation seront détaillées dans la Section 4. Les résultats de modélisation faisant état de l'impact des différents scénarios de végétalisation seront présentés dans la Section 5. Enfin la Section 6 reviendra sur les principaux résultats de cette étude et conclura sur des éléments de réflexion concernant la diffusion future des TTV.

## 2. Modélisation hydrologique d'une TTV à l'échelle de la toiture

Avant de s'intéresser à l'échelle du bassin versant, il est nécessaire de disposer d'un outil capable de modéliser le comportement hydrologique d'une TTV à l'échelle du bâtiment. Celui-ci sera ensuite intégré dans un modèle de gestion des eaux pluviales pour être appliqué sur toutes les surfaces susceptibles d'être végétalisées à l'intérieur du bassin.

### 2.1. Utilisation du modèle de gestion SWMM

Le travail de modélisation à l'échelle du bassin versant a été réalisé à l'aide de SWMM (Storm Water Management Model). C'est un modèle d'hydrologie urbaine développé par l'agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis (USEPA, voir Rossman, 2004 pour une description détaillée du modèle). Il permet de simuler, à l'échelle du bassin versant, le comportement des eaux pluviales dans les réseaux d'assainissement, d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Pour cela il fragmente le bassin considéré en petites parcelles de quelques hectares sur lesquelles on effectue le bilan hydrique (infiltration, évaporation, ruissellement, ...). On parle dans ce cas de modèle semi-distribué. SWMM a le très grand avantage d'être libre et d'avoir donc un code de programmation accessible. Il est ainsi possible de le modifier ou d'y ajouter de nouvelles fonctionnalités comme un outil représentant une toiture végétalisée.

### 2.2. Développement d'un module TTV

La fonctionnalité LID (Low Impact Development control) de SWMM a été utilisée comme base pour développer un module spécifique simulant le comportement d'une toiture végétalisée. Le modèle réservoir développé par Berthier et al. (2011) a été intégré sur la structure actuelle du LID, puis modifié afin de représenter, à chaque instant  $t$ , les échanges entre les différentes couches de la toiture (voir Figure 1).

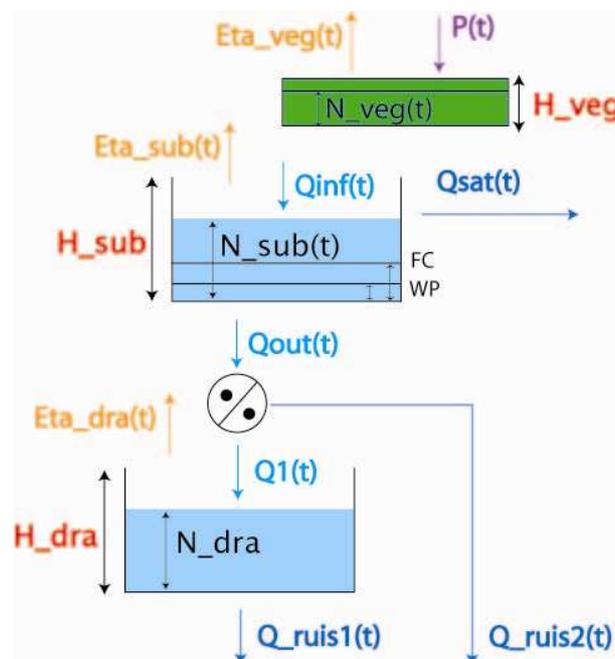


Figure 1 : Schéma du modèle réservoir développé dans SWMM (d'après Berthier et al., 2011)

Un premier réservoir modélise la couche de végétation dont on estime qu'elle peut retenir une petite quantité de pluie (< 1 mm). La partie complémentaire de la précipitation ( $Q_{inf}(t)$ ) s'infiltré alors dans le substrat.

$$Q_{inf}(t) = P(t) - (H_{veg} - N_{veg}(t)) \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

$H_{veg}$  l'épaisseur du réservoir végétation

$N_{veg}(t)$  le niveau du réservoir végétation à l'instant  $t$

$P(t)$  la précipitation

Le second réservoir représente la couche de substrat. Celui-ci crée un débit de ruissellement par saturation ( $Q_{sat}(t)$ ) lorsqu'il est complètement saturé et qu'il n'est plus capable d'infiltrer de l'eau (il est à noter que cette situation rare n'a pas été observée sur les bancs d'essai du CETE Ile de France, même pour le substrat de plus faible épaisseur) :

$$Q_{sat}(t) = Q_{inf}(t) + (\theta(t) - A_{sub}) \times H_{sub} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec :

$A_{sub}$  la porosité du substrat, soit la fraction de sol où l'on peut stocker de l'eau

$\theta(t)$  représente la fraction de substrat rempli (teneur en eau)

$H_{sub}$  l'épaisseur du substrat

Lorsque la teneur en eau du substrat est supérieure à la capacité au champ, celui-ci génère un débit de sortie ( $Q_{out}(t)$ ):

$$Q_{out}(t) = K_{sat} \times (\theta(t) - FC) \times H_{sub}, \quad \text{quand } \theta(t) > FC \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec :

$K_{sat}$  la conductivité hydraulique à saturation

$FC$  la capacité au champ

Une partie  $Q_1(t)$  de ce débit de sortie est dirigée vers un troisième réservoir dit « de transfert » symbolisant la couche de drainage (non hydro-rétentrice<sup>1</sup>). Celui-ci permet de stocker et/ou de ralentir l'écoulement. Ce réservoir génère un débit de ruissellement  $Q_{ruis1}(t)$ , tandis qu'une seconde partie  $Q_{ruis2}(t)$  est directement disponible en sortie du substrat :

$$Q_1(t) = Q_{out}(t) \times \left[ 1 - (1 - A_{dra}) \times \left( \frac{N_{dra}(t)}{H_{dra}} \right)^4 \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec :

$A_{dra}$  la porosité de la couche de drainage

$N_{dra}(t)$  est le niveau du réservoir transfert

$H_{dra}$  l'épaisseur du réservoir de transfert

$$Q_{ruis1}(t) = N_{dra}(t) + Q_1(t) - H_{dra} \quad (\text{Eq. 5})$$

<sup>1</sup> Seul le compartiment SE3Z est doté d'une couche de drainage hydro-rétentrice, ce qui n'est pas le cas des compartiments SE3Y et SE15Y qui ont été utilisés pour ce travail.

$$Q_{\_ruis2}(t) = Q_{out}(t) - Q_1(t) \quad (\text{Eq. 6})$$

Les débits de ruissellement  $Q_{\_ruis1}(t)$  et  $Q_{\_ruis2}(t)$  sont ensuite transférés à l'exutoire à l'aide d'une fonction de transfert de type Manning-Strickler :

$$Q_1(t) = \alpha \times Q_{\_ruis1}(t)^{\frac{5}{3}} \times \frac{L}{S} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\alpha = \frac{1.49}{R} \times \sqrt{p} \quad (\text{Eq. 8})$$

Avec :

$S$  et  $L$  respectivement l'aire et la largeur de la surface considérée

$R$  est la rugosité au sens de Manning

$p$  la pente

L'évapotranspiration est évaluée pour chaque couche du modèle. Elle utilise les valeurs d'évapotranspiration potentielle (mesurée ou estimée). En période sèche, l'eau est évapotranspirée du haut vers le bas, en commençant par le réservoir végétation :

$$Eta\_veg(t) = \text{Min}(etp(t), N\_veg(t) \times A\_veg) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$Eta\_sub(t) = \text{Min}(\text{Max}(etp(t) - Eta\_veg(t), 0.), (H\_sub - WP) \times A\_veg) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$Eta\_dra(t) = \text{Min}(\text{Max}(etp(t) - Eta\_sub(t), 0.), N\_dra(t) \times A\_dra) \quad (\text{Eq. 11})$$

Avec :

$etp(t)$  l'évapotranspiration potentielle (mesurée ou estimée)

$WP$  le point de flétrissement

La majorité des paramètres caractérisant les trois couches de la TTV est déterminée par les propriétés intrinsèques de la TTV (géométrie de la structure, épaisseur du substrat et de la couche de drainage, pente, ...). Au final, seuls quatre paramètres ont été calibrés, essentiellement liés aux propriétés du substrat : la porosité ( $A\_sub$ ), la capacité au champ ( $FC$ ), la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ) et la rugosité ( $R$ ).

### 2.3. Calibration et validation du module TTV

Afin d'ajuster au mieux ces paramètres, le dispositif expérimental mis en place par le CETE Ile-de-France à Trappes a été utilisé. Ce banc d'essai comprend différentes configurations de toitures combinant plusieurs types de végétation (intensive, extensive), de substrat (épaisseur de 3 et 15 cm) et de drainage (polystyrène expansé ou pouzzalane), et pour lesquelles des mesures météorologiques (précipitation, température, radiation) et débitmétriques ont été effectuées.

La végétation extensive est la plus couramment utilisée, car moins exigeante en entretien et s'adaptant bien aux nouveaux projets comme à ceux de réhabilitation en raison de sa faible surcharge pondérale. En conséquence, les toitures S3E et S15E ont été spécifiquement utilisées. Elles représentent la combinaison d'une végétation extensive reposant sur respectivement 3 cm et 15 cm de substrat et une couche de drainage en polystyrène expansé de 4 cm.

Le modèle a donc été étrenné afin de représenter correctement le comportement hydrologique de ces deux types de TTV. Les simulations de débits ont été comparées avec les observations et évaluées à l'aide de deux critères : le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) et l'erreur sur les volumes.

- Critère de Nash : Le critère de Nash est une fonction d'erreur quadratique dont les valeurs varient entre  $-\infty$  et 1. La valeur 1 caractérise une concordance parfaite entre observations et simulations, tandis qu'une valeur négative signifie que la moyenne des débits observés donne une meilleure estimation de la série des débits observés que la série simulée. On considère généralement que la simulation est bonne lorsque le critère de Nash est supérieur à 0,6.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=0}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

Avec :

$n$  le nombre de pas de temps

$Qobs_i$  les débits observés au pas de temps  $i$

$Qsim_i$  les débits simulés au pas de temps  $i$

$\overline{Qobs}$  le débit observé moyen

- Erreur sur les volumes : elle permet de s'assurer que le volume ruisselé simulé corresponde bien à celui observé et que le bilan hydrique est ainsi bien respecté.

$$Erreur = \left| \frac{\sum_{i=0}^n (Qobs_i) - \sum_{i=0}^n (Qsim_i)}{\sum_{i=0}^n (Qobs_i)} \right| \times 100 \quad (\text{Eq. 13})$$

La série d'observation (juin 2011-juin 2012) a été divisée en deux périodes : une période de calibration et une période de validation. La période de calibration (juin 2011-décembre 2011) comprenant une saison sèche et une saison humide est utilisée pour déterminer le meilleur jeu de paramètres à l'aide d'un algorithme d'optimisation. L'algorithme choisi est celui de Rosenbrock. Il permet de déterminer quels paramètres vont minimiser le critère objectif  $fo$  combinant le critère de Nash et l'erreur sur les volumes (voir Eq. 14). La période de calibration (janvier 2012-juin 2012), comprenant elle aussi une saison sèche et une saison humide, sert à vérifier que le jeu préalablement déterminé est bien adapté.

$$fo = 0.5 \times (1 - Nash) + 0.5 \times Erreur \quad (\text{Eq. 14})$$

### 2.3.1. Calibration du module pour la TTV S3E

Les résultats obtenus pour la toiture de type S3E sont très satisfaisants avec un critère de Nash élevé (0.66) et une erreur faible sur les volumes (9%) pour la période de calibration (voir Tableau 1). On constate que la dynamique du comportement de la toiture est particulièrement

bien représentée pendant la période humide de décembre 2011 (Figure 2). Les pics de débits sont tous bien reproduits, à commencer par les plus significatifs ( $> 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tableau 1 : Résultats de la modélisation des TTV S3E et S15E sur les périodes de calibration et de validation

	Nash calib.	Erreur calib.	Nash valid.	Erreur valid.
S3E	0.66	9%	0.40	12%
S15E	0.87	9%	0.67	26%

Les résultats obtenus pour la période de validation sont légèrement détériorés (Nash=0.40 et Erreur=12%). Ceci est essentiellement dû à la mauvaise représentation (surestimation) d'un pic de débit lors de la période pluvieuse de juin 2012. Pour cet épisode, la toiture S15E donne une valeur légèrement supérieure à celle de la S3E. Il est surprenant que les deux toitures répondent de manière similaire lors de cet épisode, et ce d'autant plus qu'il était précédé de deux jours de temps sec et caractérisé par des coefficients de ruissellement (rapport entre les volumes ruisselés et précipités) de 50%. Il est donc fort probable qu'un problème de mesure soit à l'origine de la mauvaise correspondance entre simulations et observations pour cet événement. De plus, l'erreur sur les volumes (sous-estimés par le modèle) peut provenir d'une mauvaise évaluation de l'évapotranspiration. Dans SWMM, elle n'est pas issue de mesures terrain mais déterminée à partir des moyennes mensuelles Météo France. Le mois de juin 2012 étant particulièrement humide, il est possible que la quantité d'eau évapotranspirée par la toiture ait été surestimée.

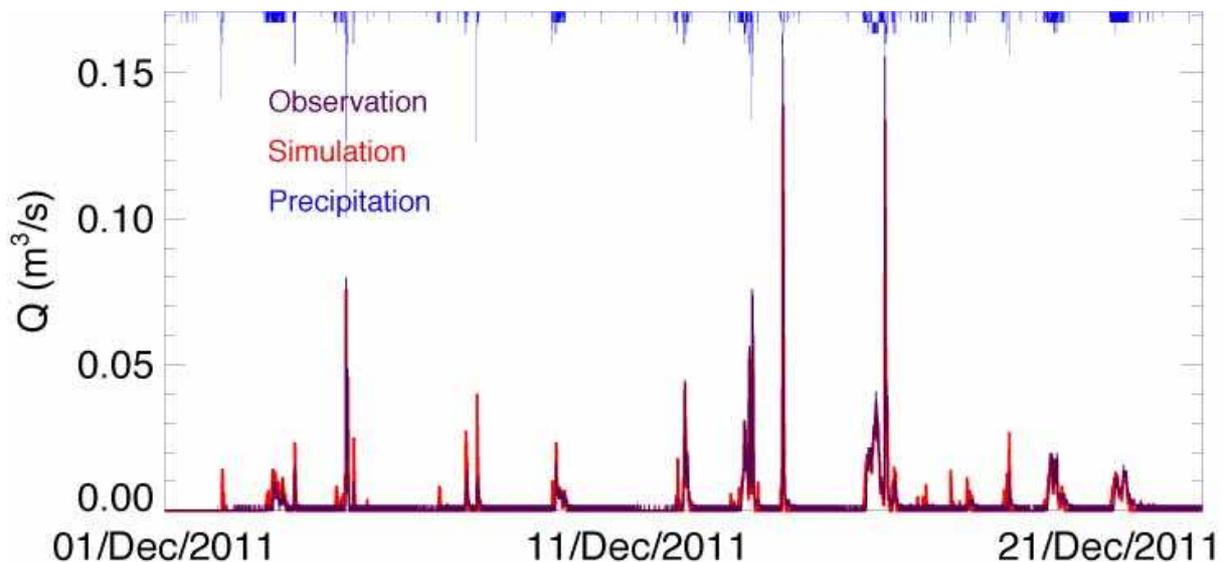


Figure 2 : Comparaison entre les débits observés et simulés sur la période de calibration pour la TTV S3E

### 2.3.2. Calibration du module pour la TTV S15E

Les simulations effectuées pour la TTV S15E sont très proches des données mesurées tout au long de l'année d'observation. Le critère de Nash est supérieur à 0.65 pour les deux périodes de calibration et de validation et les erreurs sur les volumes faibles (voir Tableau 1). Les deux

périodes pluvieuses sont particulièrement bien représentées (voir décembre 2011 sur la Figure 3) avec des pics de débit très bien simulés.

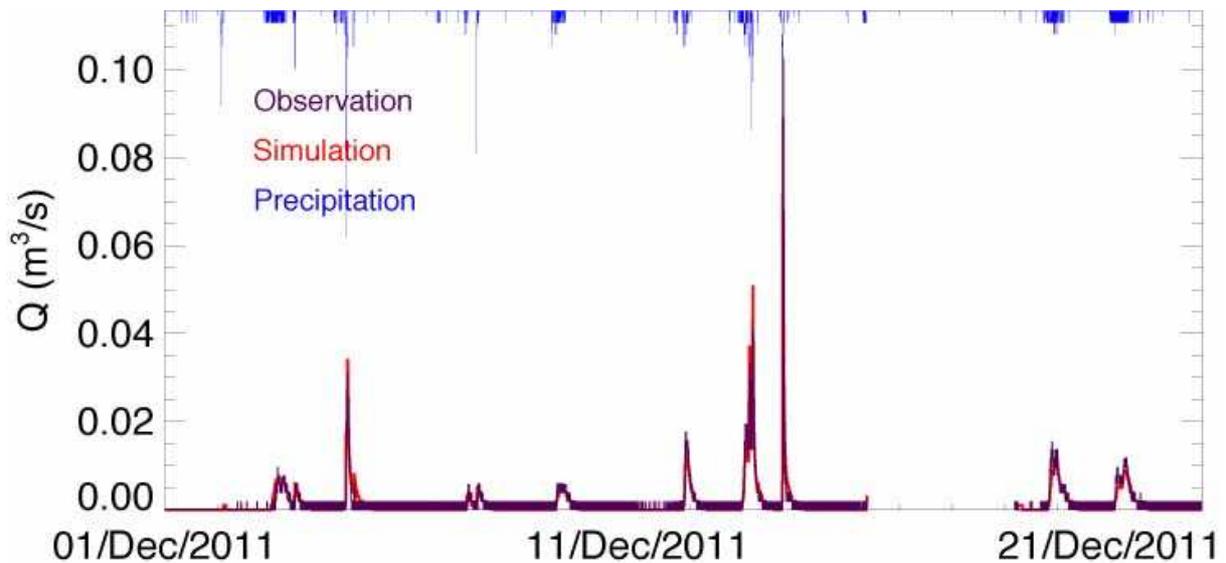


Figure 3 : Comparaison entre les débits observés et simulés sur la période de calibration pour la TTV S15E

### 2.3.3. Conclusion

Quelques mots peuvent être dits sur les valeurs numériques des paramètres calibrés. Celles-ci peuvent différer des valeurs indiquées par les fabricants. La porosité par exemple (0.65) est censée valoir 0.4. Le modèle considère donc qu'il y a plus d'espace de stockage que prévu. La capacité au champ (0.35 pour la S3E et 0.26 pour la S15E contre une valeur indiquée de 0.2) montre que le ruissellement intervient lorsque le substrat est saturé au-delà de la capacité au champ théorique. Ces différences s'expliquent par le fait que le modèle, malgré une structure proche de la réalité, reste conceptuel et qu'il représente de manière imparfaite la physique des processus intervenant dans la genèse du ruissellement.

Néanmoins, à partir de ces résultats satisfaisants, on considère que l'on dispose désormais d'un modèle apte à représenter correctement le comportement hydrologique de deux types de TTV (S3E et S15E). On suppose qu'il est transposable sur n'importe quelle toiture de bâtiment que l'on souhaiterait végétaliser dans la suite de ces travaux sous réserve que la toiture considérée est soumise aux mêmes contraintes géométriques (pente) et climatiques que celle de Trappes.

## 3. Cas d'étude du 92

Le département des Hauts-de-Seine, partenaire du projet TVGEP, doit faire face à de nombreux problèmes de saturation de réseau du fait de la forte urbanisation d'une partie de son territoire et des difficultés qui en résultent pour construire de nouveaux ouvrages de rétention. La Direction de l'Eau est donc particulièrement intéressée par l'apport potentiel des techniques alternatives d'une manière générale, et des TTV en particulier, sur la réduction du ruissellement urbain.

### 3.1. Contexte et choix des bassins d'étude

Lors de discussions réalisées à la Direction de l'Eau, il est apparu que l'utilisation de TTV peut être utile dans les situations suivantes :

- En renforcement d'une protection existante : dans les zones sensibles aux débordements de réseau, les TTV pourraient apporter une sécurité supplémentaire, sachant que leur impact reste insuffisant pour réduire de façon conséquente les besoins de stockage.
- Pour éviter la construction d'une nouvelle infrastructure : lorsque le modèle montre que la configuration actuelle du réseau est à la limite du débordement, la mise en place de TTV pourrait éviter la construction de petits bassins de stockage.
- Lorsqu'il existe des contraintes de place : s'il n'est pas possible pour des raisons d'espace de construire un ouvrage de stockage véritablement adapté, les TTV pourraient servir de complément.
- Pour réduire les apports en zone séparative : lorsque le réseau pluvial est malencontreusement raccordé au réseau d'eaux usées (la saturation de celui-ci peut alors entraîner des retours dans le réseau pluvial et engendrer des problèmes de qualité). Le prélèvement à la source de ces eaux de pluie par une TTV pourrait être moins difficile à mettre en œuvre que la reprise de l'ensemble du réseau intérieur pour obtenir une bonne séparativité des eaux.

D'une manière générale, les TTV doivent être perçues comme une variable d'ajustement de rang 2 (traitement de problèmes en limite ou en marge)<sup>2</sup>. Ces travaux devraient montrer un gisement potentiel d'amélioration qui ne représente pas un gisement réalisable dans l'immédiat pour des problèmes de réglementation (la limitation du ruissellement ne s'applique qu'aux nouvelles constructions), de coût et de temps.

En concertation avec la Direction de l'Eau du Conseil Général des Hauts-de-Seine, il a été choisi de s'intéresser à deux bassins versants confrontés à des problématiques distinctes de saturation de réseau (unitaire) : Boulogne-Billancourt et Châtillon, qui sont présentés plus en détails ci-dessous.

#### 3.1.1. Bassin de Boulogne-Billancourt (5,5 km<sup>2</sup>)

Ce bassin très densément urbanisé est soumis à des problèmes de déversements (rejets en Seine, voir Figure 4 pour leur localisation). De nouvelles consignes de gestion appliquées aux vannes automatiques ont été mises en place récemment et ont pour objectif de réduire par deux les fréquences annuelles de débordement. Les méthodes conventionnelles de réduction de ruissellement, étant liées au renouvellement urbain (disponibilité d'espace pour la mise en œuvre de stockages), requièrent un certain temps avant d'avoir un impact important en termes de déversement. L'objectif est donc de voir quelle pourrait être l'amélioration apportée par une solution alternative de type toiture végétalisée. De plus, un projet est actuellement en cours sur ce bassin pour répertorier les types de surfaces imperméables modifiables (OPH, parking, voirie, bâtiments privés, ...).

---

<sup>2</sup> Cela a été confirmé dans ces travaux en montrant qu'en termes de diminution du ruissellement, la surface végétalisée (devenue perméable) est prépondérante sur l'épaisseur de substrat. Il apparaît donc plus utile (bien que difficilement réalisable) de retenir un peu d'eau sur un large territoire que localement une quantité plus importante (voir Conclusion).

Le bassin de Boulogne-Billancourt est doté d'une station débitmétrique (pas de temps de 5 minutes) au niveau de son exutoire. Des données de débit mesuré en continu ont été fournies par la Direction de l'Eau du 92 pour les années 2010 et 2011. De plus, un inventaire des volumes déversés en Seine a aussi été remis. Il couvre la période 1997-2011.

### 3.1.2. Bassin de Châtillon (2,4 km<sup>2</sup>)

Ce petit bassin de 2,4 km<sup>2</sup> est soumis à des problèmes d'inondation (débordement) essentiellement localisés sur le Boulevard de Vanves (voir Figure 4) en amont de l'exutoire. Ces débordements se produisent lorsque le débit à l'exutoire est supérieur à la valeur seuil de 5m<sup>3</sup>/s. On y trouve à Châtillon de grandes zones d'habitats individuels au Nord-ouest, tandis que le Sud-est du bassin est davantage couvert par de l'habitat collectif et/ou des zones d'activités. L'objectif est ici d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur ces inondations et de se poser la question d'une possible réduction de la taille prévue des bassins de rétention qui a fait objet d'une étude (mise en œuvre encore non programmée).

Contrairement au bassin de Boulogne-Billancourt, le bassin de Châtillon n'est pas instrumenté pour mesurer le débit en continu. Néanmoins, des mesures ponctuelles ont été réalisées au niveau de l'exutoire pendant la période couvrant les mois avril à juin 2009.

### 3.2. Représentation sous SWMM

La Direction de l'Eau utilise le modèle de gestion Infoworks pour représenter et simuler le fonctionnement hydrologique des réseaux d'eaux pluviales du département. Ce modèle n'est pas « open source » et ne permet donc pas l'insertion d'un module de type TTV dans sa structure. Néanmoins, il dispose d'une passerelle avec le modèle SWMM qui permet d'exporter la représentation des bassins d'étude au format adéquat moyennant quelques modifications et ajouts (cf. Figure 4).

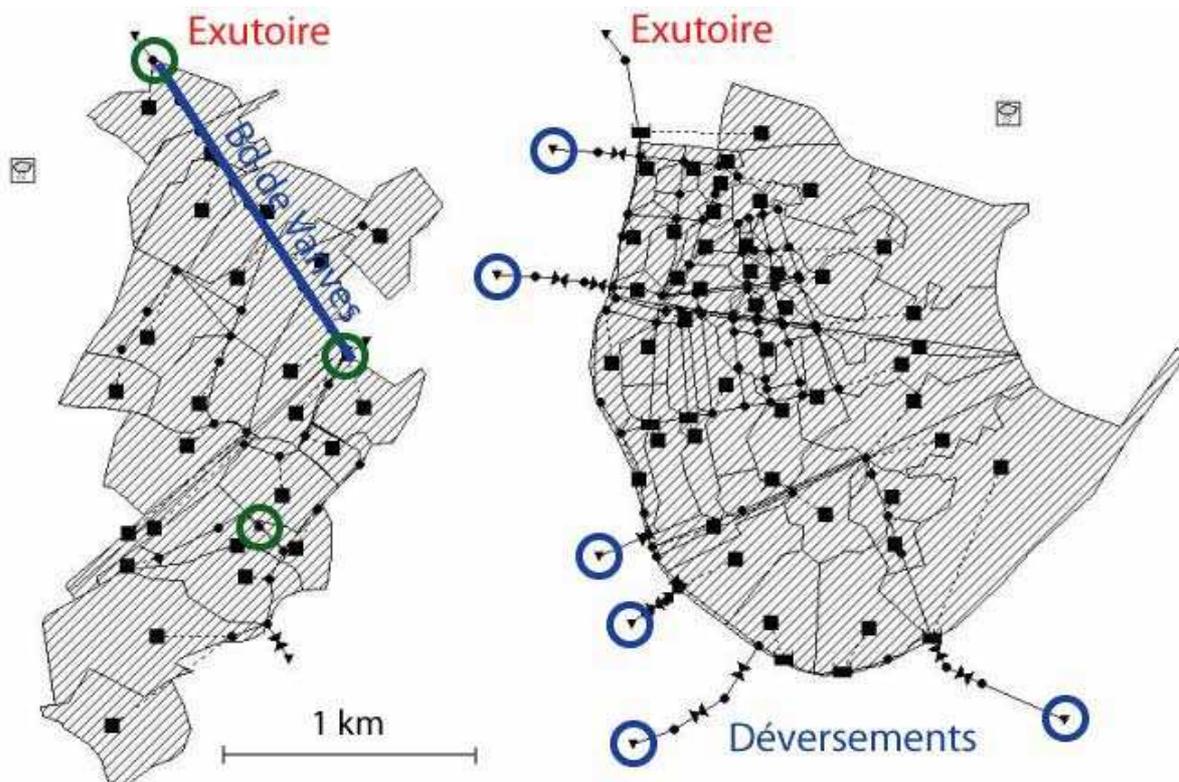


Figure 4 : Représentation des bassins de Chatillon (à gauche) et de Boulogne-Billancourt (à droite) sous SWMM : en bleu, sont indiqués les risques de débordement et de déversement ; en vert, les exutoires pour lesquels les simulations sont effectuées (cf. Section 5)

Afin de réduire au maximum le temps de calcul (alourdi essentiellement par le transfert dans les conduites), des simplifications ont été opérées dans la représentation des bassins d'étude dans SWMM. Un certain nombre de nœuds a été supprimé, allongeant ainsi la longueur des conduites ; certaines règles relatives au fonctionnement des vannes en fonction du niveau de la Seine n'ont pas été prises en compte (les crues de Seine étant rare, nous avons considéré que leur conséquence sur le réseau d'eaux pluviales pouvait être négligé pour cette étude).

### 3.3. Validation à l'aide de mesures pluie-débit

Afin de valider ces représentations simplifiées des bassins d'étude, des simulations ont été effectuées pour des périodes sur lesquelles nous disposons de mesures de débit au niveau de leurs exutoires respectifs. Le bassin de Châtillon n'étant pas instrumenté, nous avons utilisé les mesures de débit effectuées ponctuellement lors de la période avril-juin 2009. Durant ce court laps de temps, trois épisodes pluvieux notables ont été enregistrés (pluviométrie supérieure à 10 mm). Pour ces 3 épisodes, une simulation SWMM a été effectuée en utilisant les mesures pluviométriques. Afin de disposer d'un élément supplémentaire pour évaluer la pertinence de la modélisation SWMM, une simulation a aussi été réalisée avec Infoworks, le modèle utilisé par le CG92.

Tableau 2: Résultats des simulations de débit réalisées sur le bassin de Châtillon

	Evénement 1	Evénement 2	Evénement 3
Pluviométrie (mm)	13,6	13,5	12,8
Nash SWMM	0,96	0,93	0,85
Nash Infoworks	0,94	0,88	0,83

Les résultats obtenus par SWMM sur les trois événements sont excellents avec des critères de Nash supérieurs à 0,85, souvent meilleurs que ceux obtenus avec Infoworks (voir Table 2). La dynamique du bassin versant est correctement reproduite avec une bonne correspondance entre les montées au pic simulées et observées (cf. Figure 5).

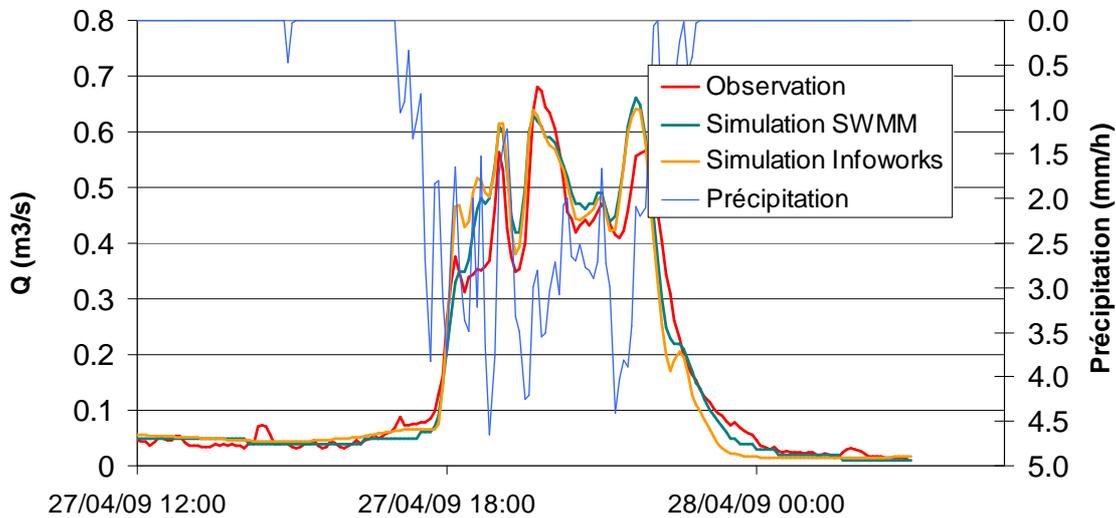


Figure 5 : Comparaison des débits observés et simulés pour le bassin versant de Châtillon lors de l'événement pluvieux du 27-28 avril 2009 (événement 1)

Contrairement au cas précédent, le bassin versant de Boulogne-Billancourt est équipé d'une mesure de débit en continu. Cela nous permet de disposer d'une longue série de mesures pour comparer les simulations SWMM avec les observations des années 2010 et 2011. Sur ces deux années, on obtient un critère de Nash de 0,65. Il semble que la diminution du critère soit essentiellement due à la mauvaise représentation du débit de temps sec. Celui-ci est estimé comme la répétition d'un cycle hebdomadaire, invariant suivant les saisons et les ans. En réalité, ces apports sont variables et fluctuent constamment au cours de l'année. Néanmoins, ces faibles débits sont négligeables en regard de la problématique étudiée (les débits en période de pluviométrie significative). Dans cette optique, les pics de débit sont très bien représentés. C'est par exemple le cas lors de l'épisode du 14 juillet 2010, le plus significatif sur cette période de deux ans, avec un débit de pointe mesuré atteignant  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . La simulation SWMM représente très bien cet événement (cf. Figure 6). Pour comparaison, la simulation Infoworks a été ajoutée à la figure. Elle montre un comportement similaire à celle effectuée sous SWMM avec une très bonne reproduction du pic de débit et une représentation de la période de récession plus imparfaite.

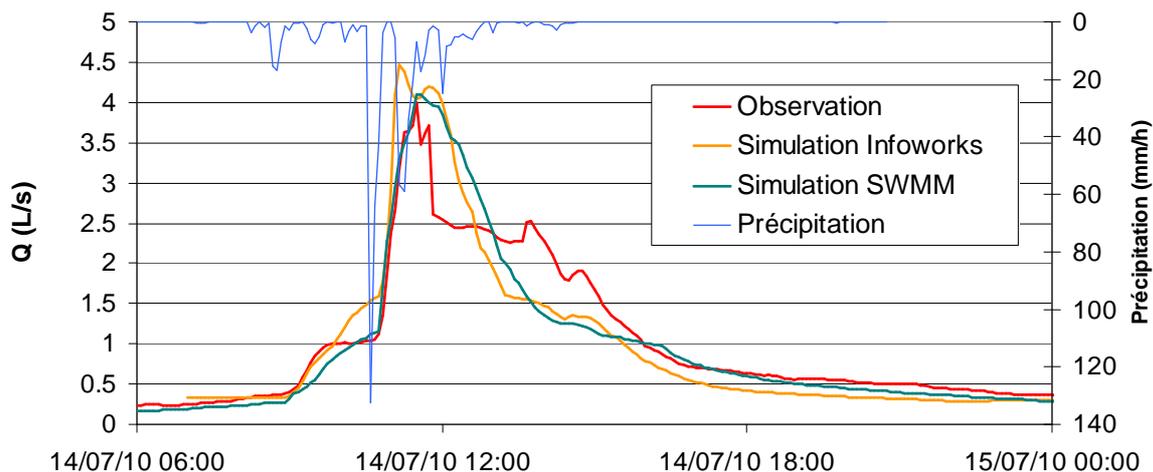


Figure 6 : Comparaison des débits observés et simulés pour le bassin versant de Boulogne-Billancourt lors de l'événement pluvieux du 14 juillet 2010

La problématique liée au bassin de Boulogne-Billancourt étant celle des déversements en Seine, nous avons aussi calculé le total des volumes déversés au niveau des différentes vannes situées autour du bassin. Ces valeurs ont été comparées aux mesures effectuées lors de cet épisode, ainsi qu'aux volumes simulés par Infoworks (cf. table 3). Il s'avère que le modèle SWMM, à l'instar d'Infoworks, reproduit très correctement les volumes déversés.

Tableau 3: Résultats des simulations de débit réalisées sur le bassin de Boulogne-Billancourt pour l'épisode du 14 juillet 2010

	Pluviométrie (mm)	Qp (m <sup>3</sup> /s)	Nash	V déversé (m <sup>3</sup> )
Observation	53,5	4,00		109547
Simulation SWMM	53,5	4,10	0,84	111951
Simulation Infoworks	53,5	4,20	0,79	93697

Ces travaux de validation étant concluants, on considère que le modèle SWMM est apte à représenter correctement le comportement hydrologique des deux bassins d'étude (Châtillon et Boulogne-Billancourt). Les configurations ainsi mises en place pourront servir de base pour tester des scénarios de végétalisation et étudier leur impact sur le ruissellement urbain.

## 4. Scénarios de végétalisation

Afin de tester le possible impact des TTV à l'échelle du bassin versant, des scénarios -plus ou moins réalistes- de végétalisation sont proposés.

### 4.1. Méthodologie

Il a été décidé de définir un potentiel de végétalisation à l'échelle de la parcelle (au sens du modèle de gestion, voir Figure 4). Cette unité géographique de quelques hectares est l'élément de base où se calcule le bilan hydrique. Pour cela, les données relatives au Mode d'Occupation du Sol (MOS) d'Ile-de-France (IAU-IDF, 2008) et de la BD TOPO Bâti (IGN, 2011) ont été combinées (cf. Figure 7). Concernant les 81 postes proposés dans la nomenclature du MOS, une sélection a été faite pour conserver uniquement les postes susceptibles d'être végétalisés. Il s'agissait de déterminer *a priori* où l'on pouvait retrouver

des toits terrasses, en privilégiant les grands ensembles (habitats, bureaux, ...) et en évitant entre autre les zones d'habitats individuels. Au final, les postes suivants ont été sélectionnés :

- Habitat collectif continu bas
- Habitat collectif continu haut
- Habitat collectif discontinu
- Activités en tissu urbain mixte
- Grandes entreprises industrielles
- Zones d'activités économiques
- Grandes surfaces commerciales
- Autres commerces
- Stations-service
- Bureaux
- Installations sportives couvertes
- Piscines couvertes
- Enseignement de premier degré
- Enseignement secondaire
- Enseignement supérieur
- Enseignement autre
- Hôpitaux, cliniques
- Autres équipements de santé
- Equipements de missions de sécurité civile
- Equipements d'accès au public limité
- Mairies
- Marchés permanents
- Autres équipements de proximité
- Gares routières
- Dépôts de bus.

A l'intérieur de ces catégories, seules les surfaces correspondant aux surfaces bâties ont été conservées. On suppose donc implicitement que la surface bâtie est une approximation acceptable la surface de toiture dans le cadre de cette étude.

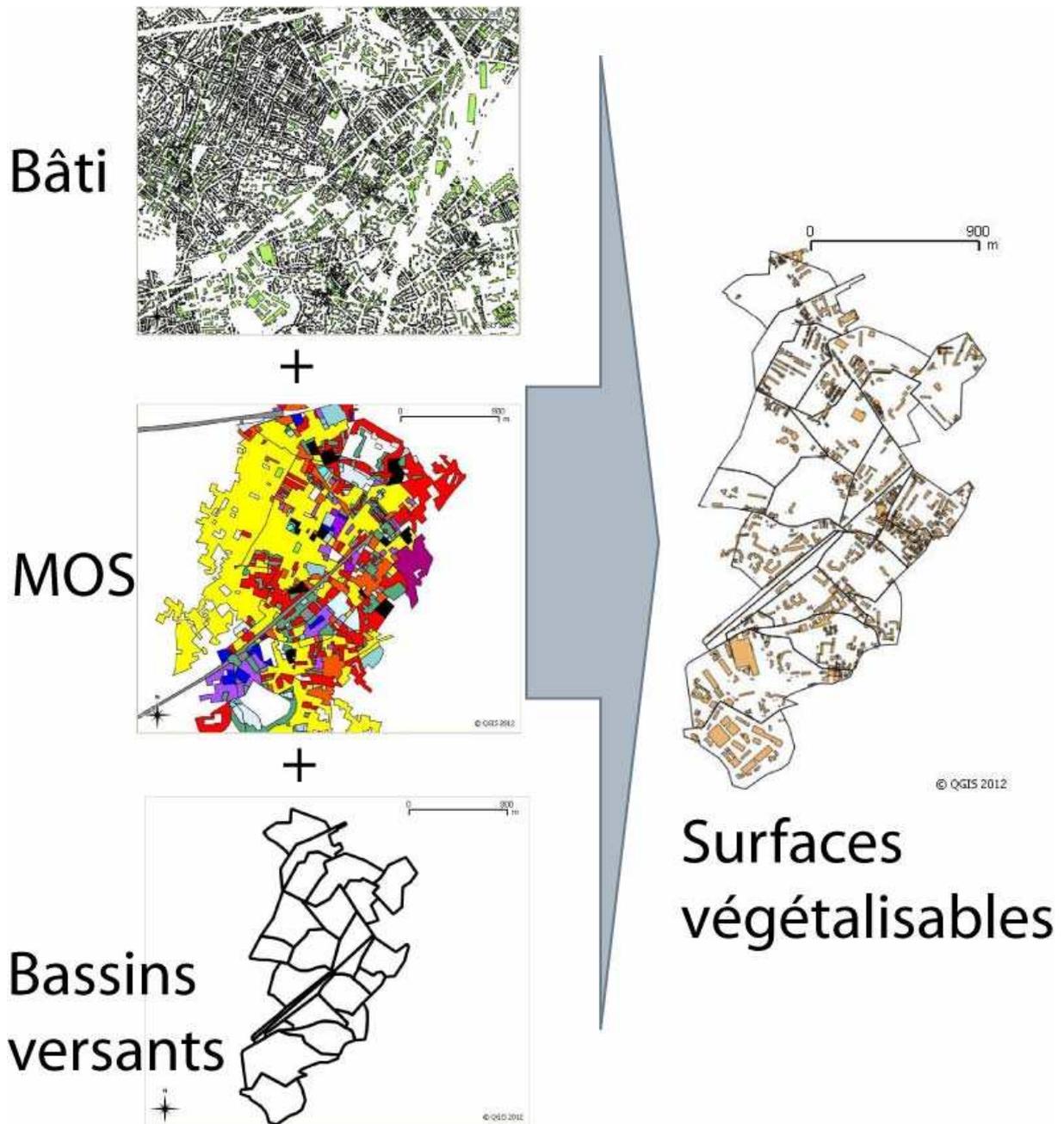


Figure 7 : Méthode de définition du potentiel de végétalisation : combinaison des informations géographiques de bâti, du mode d'occupation du sol et de la géométrie du bassin versant

Les surfaces résultantes représentent les surfaces *a priori* végétalisables de la parcelle. Il s'agit d'une approximation haute puisqu'elle suppose que l'ensemble des surfaces de toit conservées sont effectivement plates, sans micro-structure, techniquement végétalisables et actuellement non végétalisées. On définit le potentiel de végétalisation comme le pourcentage de surface de parcelle *a priori* végétalisable (ratio entre les surfaces végétalisables et la surface totale de la parcelle).

#### 4.2. Résultats sur les bassins d'étude

A l'échelle de la parcelle, le potentiel de végétalisation est calculé pour les deux bassins d'étude (Figure 8) suivant la méthode proposée dans la partie précédente.

Il s'avère que le bassin de Boulogne-Billancourt est caractérisé par un potentiel de végétalisation plutôt homogène avec entre 30 et 40 % de surfaces végétalisables dans le centre, contre 10 à 30% en périphérie. Ceci est dû à une densité des bâtiments plus faible sur les bords de Seine avec la présence d'un certain nombre d'espaces verts. Dans le centre-ville, la concentration d'habitats collectifs - pour lesquels on suppose que la couverture est végétalisable - est plus importante. Une fois encore, il faut souligner le caractère fort des hypothèses faites précédemment qui considèrent tout bâtiment d'habitat collectif comme potentiellement végétalisable et aujourd'hui non végétalisé.

Le potentiel de végétalisation apparaît plus hétérogène sur le bassin de Châtillon (Figure 8). Il peut atteindre plus de 50% de la surface des parcelles dans les zones de haute densité d'habitats collectifs, et reste inférieur à 10% pour les zones résidentielles d'habitats individuels.

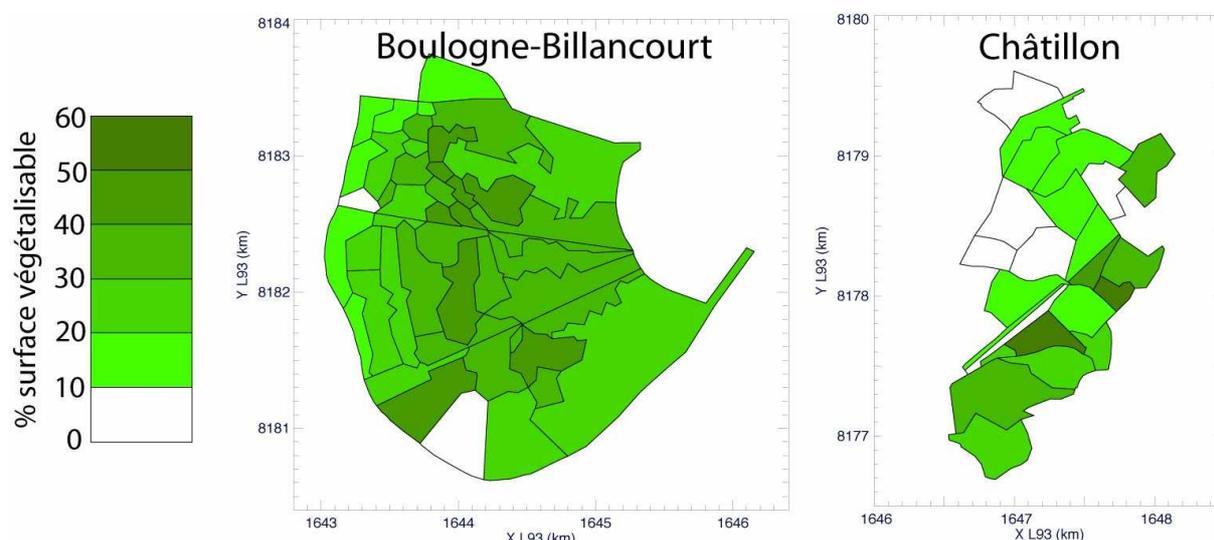


Figure 8 : Potentiel de végétalisation calculé comme le ratio entre les surfaces végétalisables et la surface totale de la parcelle pour les deux bassins d'étude.

#### 4.3. Interprétation dans le module TTV

Dans leur configuration actuelle, Infoworks et SWMM distinguent deux types de surface à l'échelle de la parcelle : une surface perméable qui infiltre à 100% et une surface imperméable qui ruisselle à 100%. C'est cette dernière qui est donc responsable de la production de débit dans le réseau. La fraction de surface appelée « imperméable » n'est pas égale *stricto sensu* aux surfaces considérées comme véritablement imperméables (voirie et bâtiment essentiellement). Elle est observée ou calée, et représente donc le coefficient de ruissellement de la parcelle.

Lorsque l'on compare les coefficients de ruissellement calés avec les pourcentages de surfaces considérées comme imperméables sur les parcelles appartenant aux deux bassins d'étude (voir Figure 9), on constate une dispersion autour de l'axe  $x=y$ , les coefficients de ruissellement étant légèrement inférieurs aux proportions de surfaces imperméables.

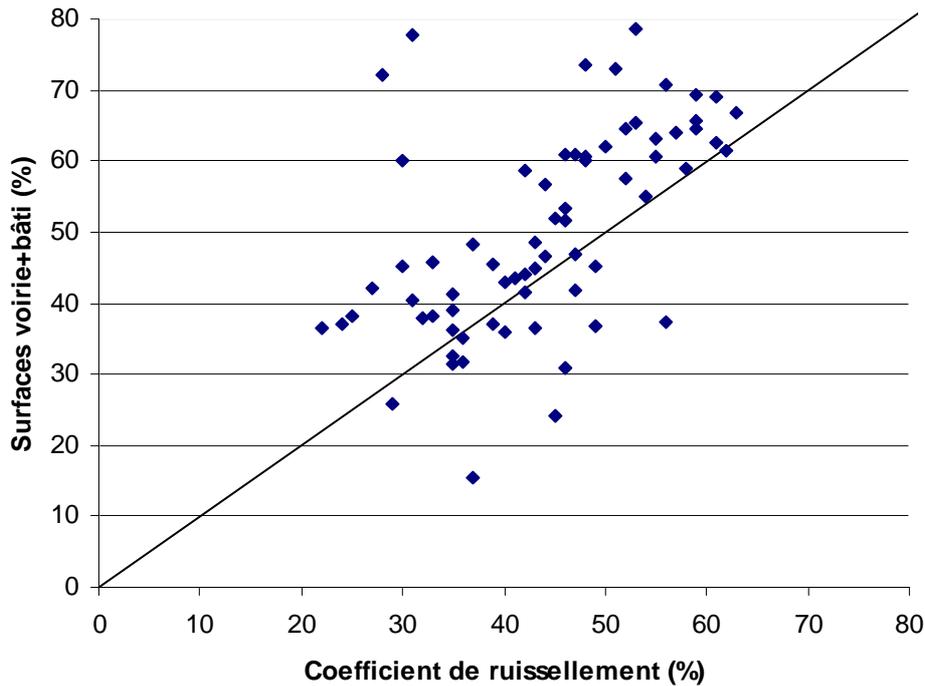


Figure 9 : Comparaison entre le pourcentage de surfaces imperméables (regroupant voirie et bâti) et le coefficient de ruissellement calibré à l'échelle de la parcelle.

Afin de tenir compte de cette asymétrie, les surfaces considérées comme potentiellement végétalisées n'ont pas été soustraites telles quelles aux surfaces imperméables. Le coefficient de ruissellement ( $\%_{Imp}$ ) a été modifié ( $\%_{Imp}^*$ ) à l'aide d'un ratio représentant la modification engendrée par la déduction des toitures végétalisées des surfaces imperméables :

$$\%_{Imp}^* = \%_{Imp} \times \left( \frac{S_{voirie} + S_{bâti} - S_{végét}}{S_{voirie} + S_{bât}} \right) \quad (\text{Eq. 15})$$

Avec :

$S_{voirie}$  la surface de voirie

$S_{bâti}$  la surface de bâti

$S_{végét}$  la surface végétalisée

Afin de rester cohérent et de conserver la surface totale à l'échelle de la parcelle, la surface végétalisée a elle aussi été modifiée en la pondérant par le même ratio :

$$S_{végét\_model}^* = S_{végét\_réel} \times \left( \frac{S_{voirie} + S_{bâti} - S_{végét}}{S_{voirie} + S_{bât}} \right) \quad (\text{Eq. 16})$$

Avec :

$S_{végét\_réel}$  la surface végétalisée de la parcelle imperméabilisée (voirie + bâti)

$S_{végét\_model}$  la surface végétalisée de la parcelle imperméabilisée résultante

## 5. Simulations des impacts des TTV sur le ruissellement urbain

### 5.1. Méthodologie

Différents scénarios de végétalisation ont été définis à partir des cartes de potentiel de végétalisation présentées dans la section précédente. Ils correspondent à la couverture par des TTV de 12,5, 25, 50 et 100% du potentiel défini pour chaque parcelle. Une simulation est aussi effectuée sans aucune végétalisation afin de représenter la situation actuelle (appelée « référence » dans la suite de ces travaux).

Pour chacun des bassins d'étude, deux types d'analyse ont été menés en parallèle : une continue et une événementielle. L'étude continue, d'ordre statistique, s'intéressera à la modification de la distribution d'une valeur représentative du problème de réseau considéré : volume journalier débordé pour Boulogne-Billancourt et débit de pointe pour Châtillon. Elle s'effectuera à l'aide d'une chronique longue de mesure de précipitation (18 ans de données au pas de temps de 5 minutes fournis par le CG 92). Une telle chronique devrait permettre de capturer des épisodes caractérisés par des périodes de retour allant jusqu'à 10 ans. L'étude événementielle analysera concrètement le comportement des bassins versants lors d'épisodes significatifs ayant causé des problèmes de débordements et/ou de déversements en Seine (définis notamment grâce à l'inventaire des volumes déversés). Sur la période d'étude, ce sont 35 épisodes qui ont été sélectionnés. Ils balayent un spectre assez large en termes de durée (de 0.33 à 25 heures), de cumul de précipitation (8.4 à 120 mm) et d'intensité maximum sur 30 minutes (de 2.0 à 49.2 mm/30 min.). Ces propriétés, ainsi que les pics de débit à l'exutoire de Châtillon et les volumes déversés en Seine à Boulogne-Billancourt correspondants, sont résumés dans le Tableau 4.

On s'intéressera plus particulièrement aux trois événements suivants qui sont caractérisés par des intensités et des durées de précipitations différentes :

- Episode des 5-8 août 2007 : cet épisode estival, relativement long, est caractérisé par des précipitations fortes (accumulation de 49 mm) réparties sur deux sous-événements. La première partie, brève, a donné lieu à des précipitations intenses (pour un cumul de 12 mm) et à un débit de pointe significatif de 5,78 m<sup>3</sup>/s à Châtillon. La seconde partie, plus modérée et plus longue (pour un cumul de 37 mm), est à l'origine d'un volume ruisselé important. Lors de cet épisode, un peu moins de 100000 m<sup>3</sup> ont été déversés en Seine autour de Boulogne-Billancourt.
- Episode du 10 Juin 2009 : cet épisode modéré de 18 mm a eu lieu alors qu'il était déjà tombé 22 mm lors des trois jours précédents. La faible précipitation, combinée à des conditions initiales d'humidité importantes, a généré un débit supérieur à 5 m<sup>3</sup>/s à l'exutoire de Châtillon et des déversements en Seine de l'ordre de 100000 m<sup>3</sup>.
- Episode du 14 juillet 2010 : c'est un épisode important de 55 mm responsable de débordements significatifs à Châtillon (débit à l'exutoire supérieur à 15 m<sup>3</sup>/s) ainsi que des déversements en Seine importants (>100000 m<sup>3</sup>) à Boulogne. Lors de cet épisode, une précipitation de 32 mm a été mesurée pendant une durée de deux heures, ce qui correspond à un événement proche d'une période de retour de 10 ans (36 mm).

**Tableau 4:** Caractéristiques des épisodes pluvieux

Episode	23/02/97	20/05/97	04/11/97	06/04/98	31/07/98	23/10/98	18/09/99
Durée (h)	6.5	4.5	11.0	12.5	3.8	25.0	2.0
Pluie tot (mm)	21.0	16.8	30.4	45.4	20.0	80.2	8.4
Intensité max (mm/30min)	3.8	3.6	2.0	5.6	5.4	3.2	4.2
Qmax Chatillon (m <sup>3</sup> /s)	2.1	1.4	1.1	3.3	2.4	2.1	1.6
V déversé Boulogne (hm <sup>3</sup> )	0.055	0.015	0.030	0.075	0.041	0.162	0.010

Episode	09/05/00	01/07/00	07/08/00	07/10/00	15/10/00	05/07/01	25/07/01
Durée (h)	4.0	18.4	4.4	11.6	23.2	10.8	1.5
Pluie tot (mm)	33.6	98.0	27.0	37.2	70.4	120.0	65.0
Intensité max (mm/30min)	11.4	8.8	6.4	4.0	2.8	38.6	49.2
Qmax Chatillon (m <sup>3</sup> /s)	4.5	6.0	4.3	1.4	1.2	18.1	18.7
V déversé Boulogne (hm <sup>3</sup> )	0.089	0.188	0.063	0.065	0.146	0.258	0.152

Episode	19/08/01	04/06/02	17/08/03	19/10/04	22/06/05	14/02/06	22/04/06
Durée (h)	2.7	6.5	4.2	3.9	1.4	10.5	2.0
Pluie tot (mm)	11.6	25.8	29.0	33.4	15.8	31.8	14.6
Intensité max (mm/30min)	3.4	4.8	12.6	15.2	10.8	2.6	5.8
Qmax Chatillon (m <sup>3</sup> /s)	1.2	3.6	4.7	9.0	5.4	0.9	2.4
V déversé Boulogne (hm <sup>3</sup> )	0.020	0.061	0.063	0.079	0.038	0.048	0.039

Episode	06/08/06	18/11/06	02/12/06	23/05/07	05/08/07	01/12/07	05/08/08
Durée (h)	0.33	2.2	2.7	1.2	9.4	9.0	4.0
Pluie tot (mm)	12.8	27.0	36.0	22.2	49.0	30.2	19.8
Intensité max (mm/30min)	12.6	3.0	6.0	16.8	8.4	2.8	4.2
Qmax Chatillon (m <sup>3</sup> /s)	8.6	1.1	2.9	9.3	5.8	1.8	1.4
V déversé Boulogne (hm <sup>3</sup> )	0.032	0.055	0.063	0.056	0.106	0.056	0.034

Episode	05/05/09	07/06/09	10/06/10	10/07/10	04/08/10
Durée (h)	8.0	14.0	2.3	3.4	4.6
Pluie tot (mm)	37.8	54.6	65.4	92.4	44.0
Intensité max (mm/30min)	7.0	9.0	28.6	27.4	20.4
Qmax Chatillon (m <sup>3</sup> /s)	3.8	5.1	20.6	16.3	14.2
V déversé Boulogne (hm <sup>3</sup> )	0.061	0.092	0.160	0.131	0.101

## 5.2. Présentation des résultats

### 5.2.1. Problèmes de débordement (Bassin de Châtillon)

D'une manière générale, les résultats obtenus pour les deux types de toiture (S3E ou S15E) sont très proches, avec néanmoins une diminution de débit toujours plus importante pour la couche de substrat la plus épaisse.

Les débits de pointe simulés semblent être influencés par la mise en œuvre de TTV lorsqu'une partie significative du potentiel de végétalisation est couverte. La distribution statistique des débits de pointe annuels représentée sur la Figure 10 montre que 50% du potentiel de toiture végétalisée (qui représente 10% de la superficie totale du bassin) doit être couverte afin de réduire le débit de pointe de 15% ; et ce quelle que soit la période de retour examinée. Lorsque 100% du potentiel est couvert, la diminution du débit de pointe peut atteindre jusqu'à 35%. D'une manière générale, la réduction du débit de pointe semble proportionnelle au pourcentage de potentiel de végétalisation effectivement recouvert (un doublement de la surface végétalisée entraîne le doublement de la réduction de débit).

Le débit de débordement de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  est caractérisé par une période de retour légèrement supérieure à un an. On s'aperçoit qu'une végétalisation faible, de l'ordre de 12.5 ou 25%, est suffisante pour sensiblement modifier cette période de retour et rendre ce phénomène moins fréquent. On n'atteint néanmoins pas 2 ans malgré la végétalisation à 100% du potentiel à l'aide d'une toiture de type S15E.

A l'échelle de l'épisode, l'impact de la végétalisation des toitures sur la réduction du pic de débit varie d'un événement pluvieux à un autre (Figure 11). La réduction moyenne est de l'ordre de 17% si l'on couvre 50% du potentiel et peut atteindre plus de 30% si l'on en couvre la totalité. Cette variation semble en partie due à l'intensité de la pluie maximale observée lors de l'événement. Au regard des 5 épisodes les plus significatifs en termes de débit de pointe, la diminution du pic est la plus importante pour les épisodes dont l'intensité pluvieuse sur 30 minutes est la plus faible. Inversement, l'épisode caractérisé par une intensité de 49 mm/30 minutes est celui pour lequel l'impact des TTV semble le plus faible.

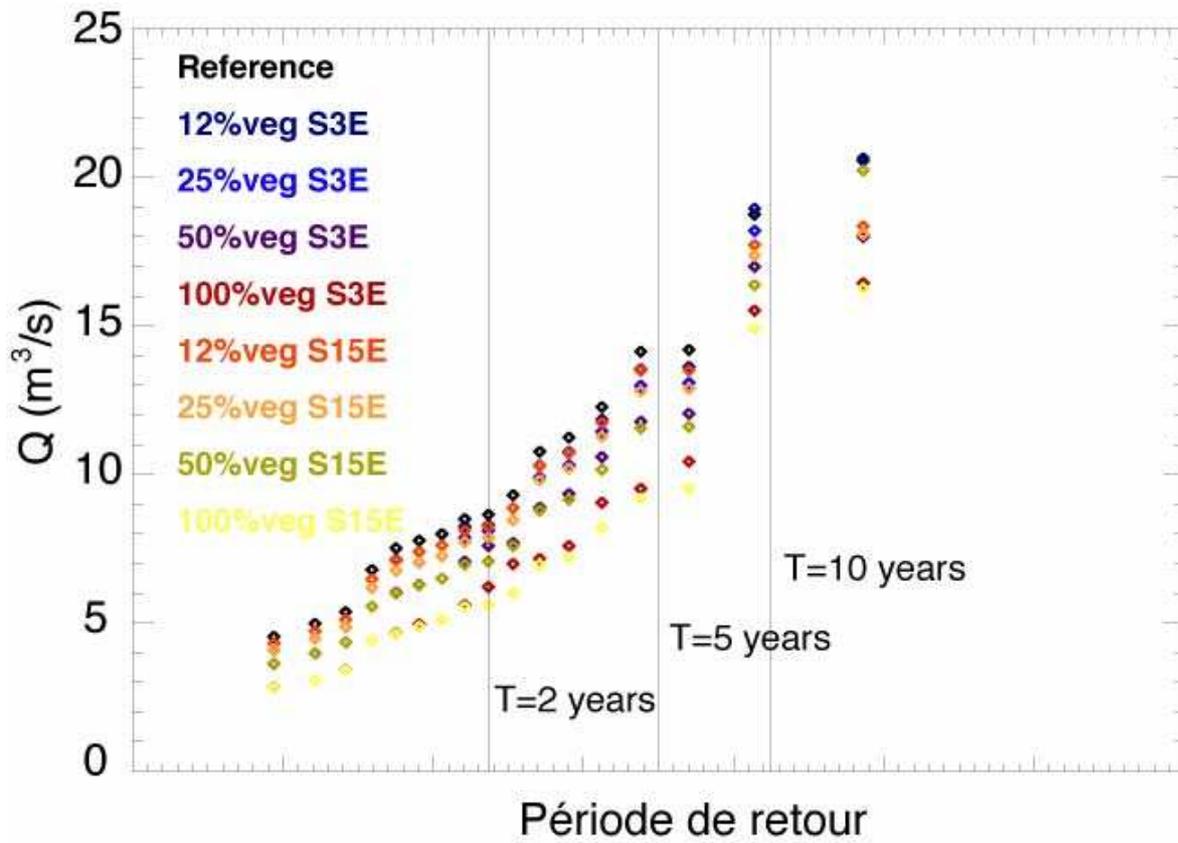


Figure 10 : Distribution statistique des pics de débit à l'exutoire de Châtillon pour différents scénarios de végétalisation

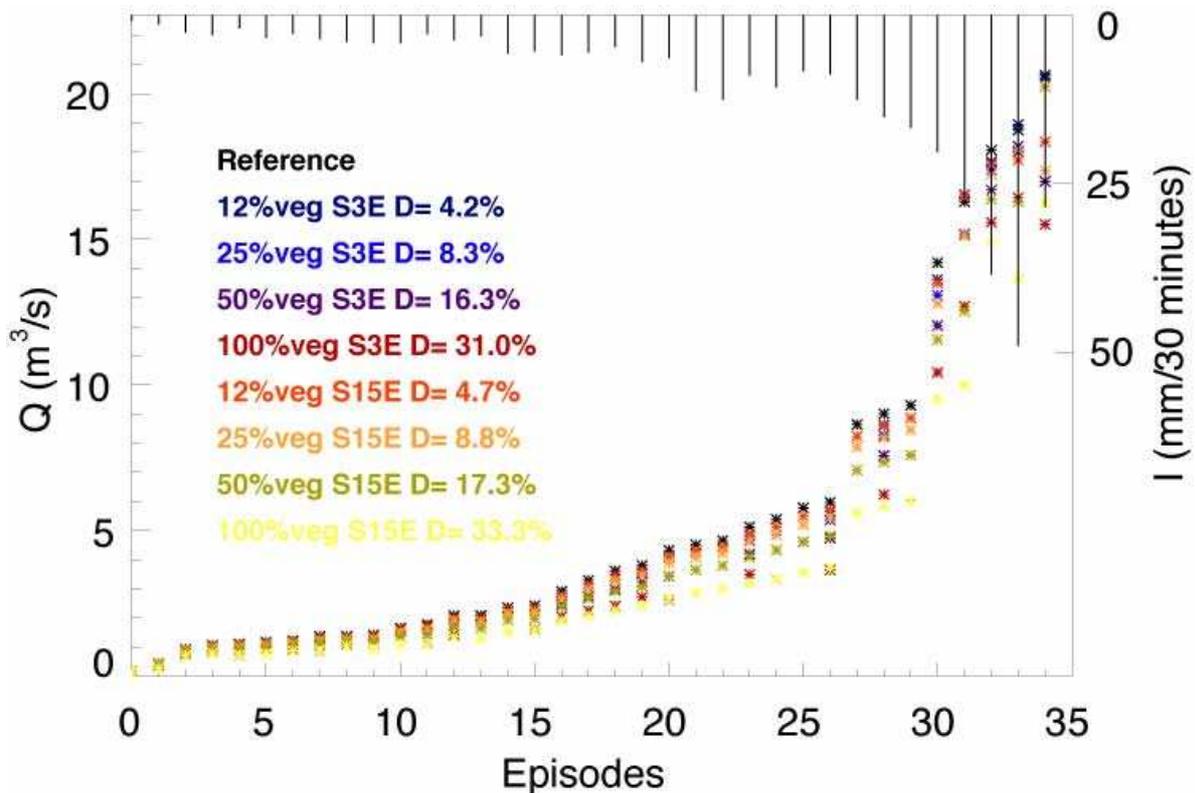


Figure 11 : Pics de débit simulés à l'exutoire de Châtillon pour les 35 épisodes sélectionnés et pour différents scénarios de végétalisation.

Le débit simulé à l'exutoire du bassin est représenté spécifiquement pour les 3 épisodes marquants présentés précédemment et ayant engendré des débits de pointe supérieurs à 5 m<sup>3</sup>/s. Ils montrent des diminutions plus ou moins significatives en fonction de l'intensité de l'événement.

En août 2007, seule la première partie de l'événement a causé des débordements en centre ville. La végétalisation de 25% du potentiel est presque suffisante pour faire passer ce débit de pointe en dessous du seuil de 5 m<sup>3</sup>/s (Figure 12). La végétalisation de 50% entraîne une diminution de 20% et la disparition du risque de débordement.

Pour l'épisode du 10 Juin 2009 (Figure 13), la végétalisation de seulement 12.5% du potentiel permet de passer sous le seuil de 5 m<sup>3</sup>/s sans toutefois diminuer nettement le pic de débit (autour de 5%). La végétalisation de 50% du potentiel réduit le pic à hauteur de 20% et de 35% lorsque l'on couvre 100% du potentiel.

Concernant l'épisode de 2010 (Figure 14), l'utilisation de toitures végétalisées, même dans de très grande proportion (couverture à 100% du potentiel), ne permet pas de diminuer le débit en dessous du seuil de 5 m<sup>3</sup>/s et n'empêche donc pas les débordements pour deux des trois pics de débit. La végétalisation de 50% du potentiel n'entraîne qu'une diminution de 15% du pic principal.

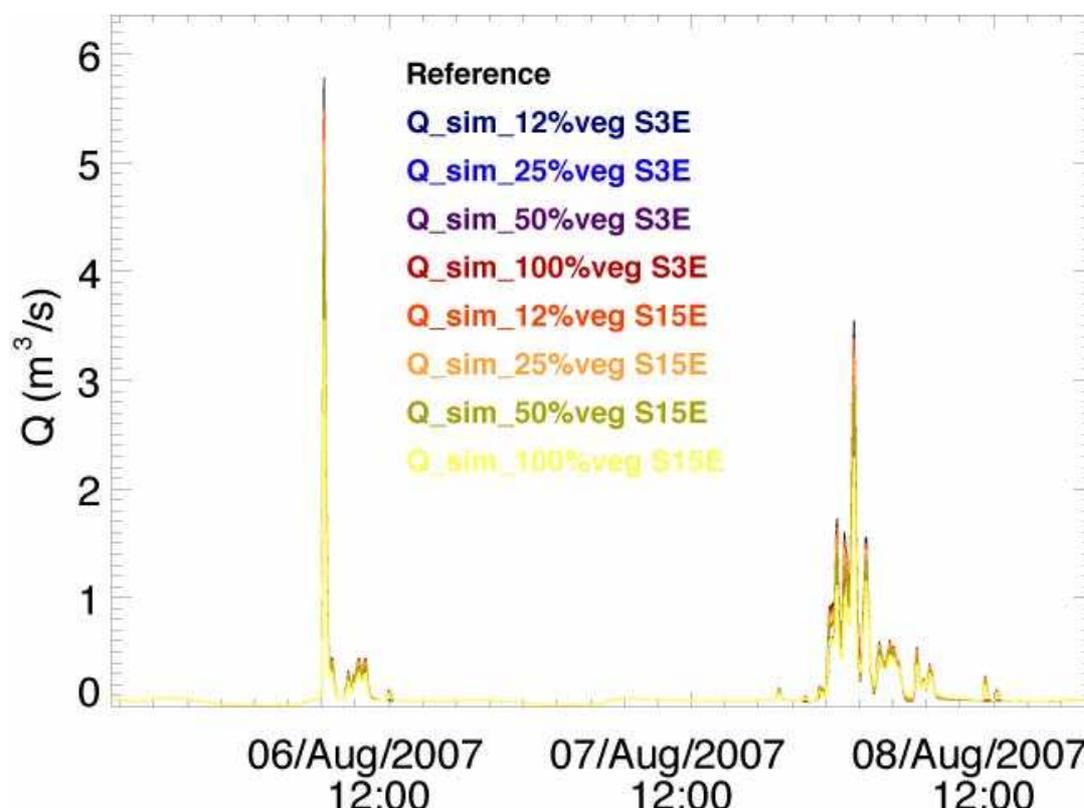


Figure 12 : Résultats des simulations pour l'épisode des 5-8 août 2007 à l'exutoire de Châtillon

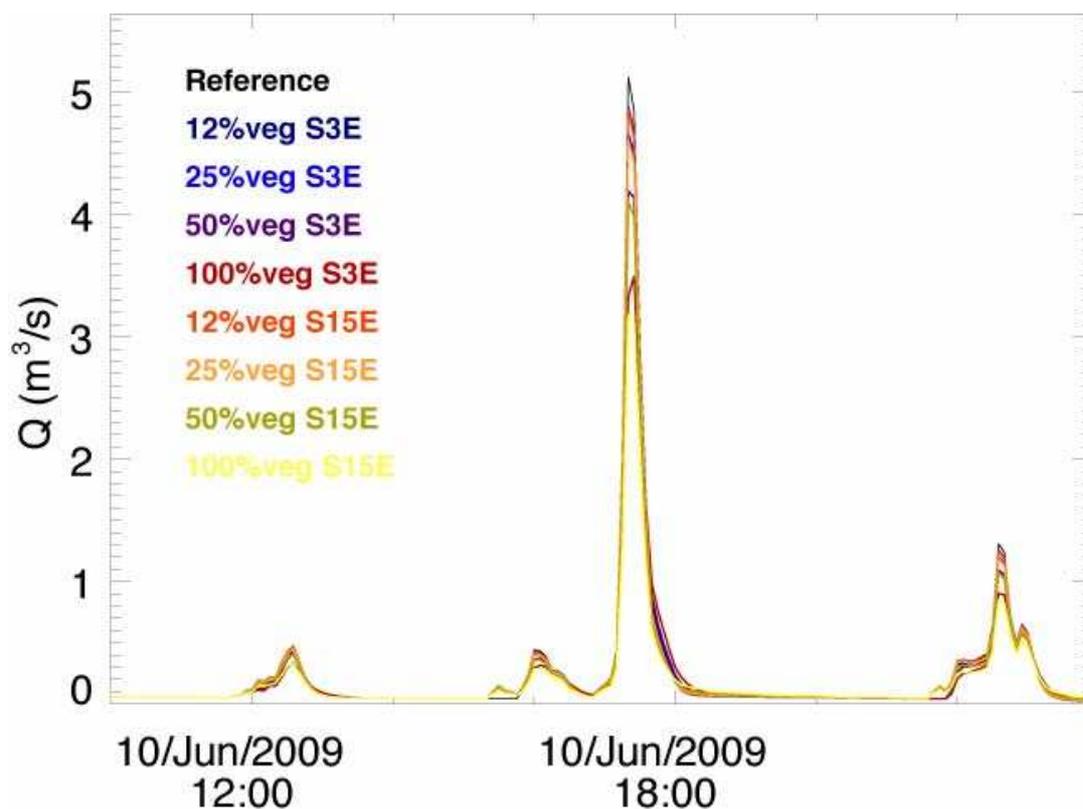


Figure 13 : Résultats des simulations pour l'épisode du 10 juin 2009 à l'exutoire de Châtillon

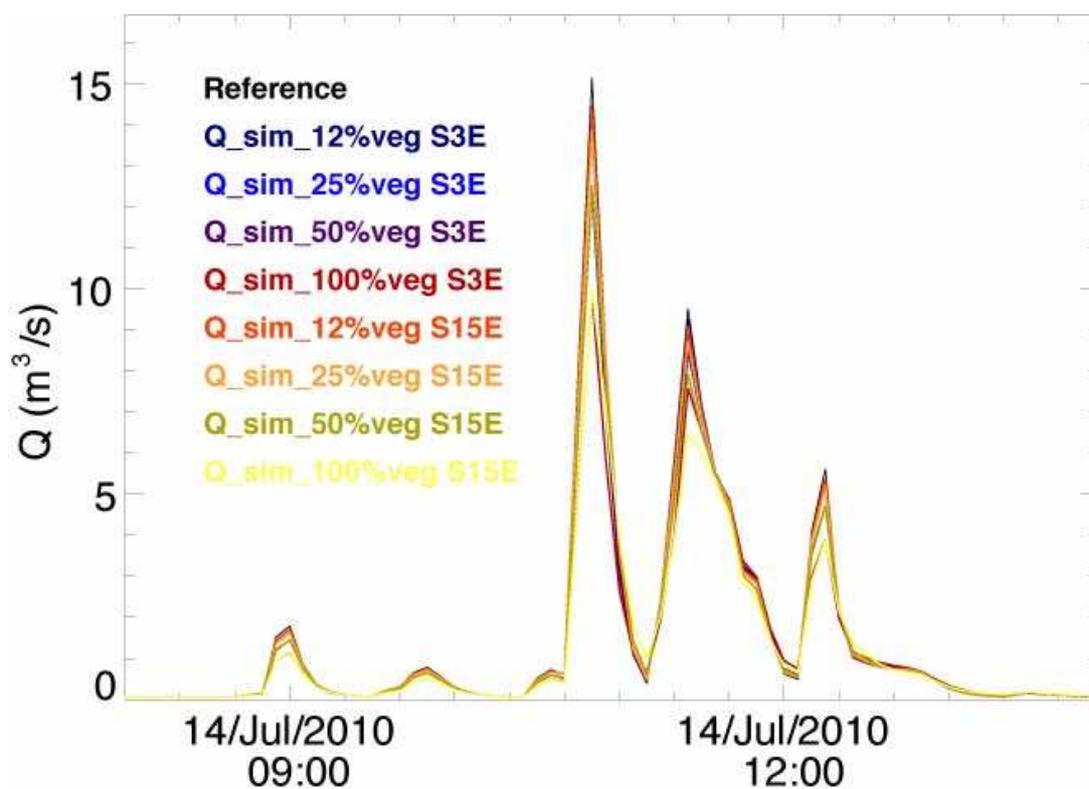


Figure 14 : Résultats des simulations pour l'épisode du 14 juillet 2010 à l'exutoire de Châtillon

### 5.2.2. Effet d'échelle (Bassin de Châtillon)

Le bassin de Châtillon a aussi été utilisé pour étudier l'existence d'un possible effet d'échelle. Ainsi, les débits simulés sous différents scénarios de végétalisation l'ont été pour trois exutoires localisés à différents niveaux du bassin versant (cf. Figure 4). Le premier est situé en aval d'une parcelle de 9 ha fortement végétalisable (potentiel de 52%). Le second est situé en amont du Boulevard de Vanves (101 ha) le long duquel se déroulent les débordements. Enfin, le troisième représente l'exutoire du bassin versant.

Les résultats obtenus pour les 3 échelles d'étude (parcelle, demi-bassin, bassin) diffèrent sensiblement. Cette différence est clairement liée au potentiel de végétalisation des 3 entités. Sur le bassin et le demi-bassin, caractérisés par un potentiel relativement similaire (entre 15% et 25%), l'impact des TTV représente une diminution de l'ordre de 35% du pic de débit et de 20% du volume ruisselé dans le meilleur des cas (scénario avec 100% de S15E). A l'échelle de la parcelle (voir Figure 15), caractérisée par un potentiel de végétalisation supérieur à 50%, ces diminutions valent quasiment le double (60% pour le pic de débit et 40% pour le volume).

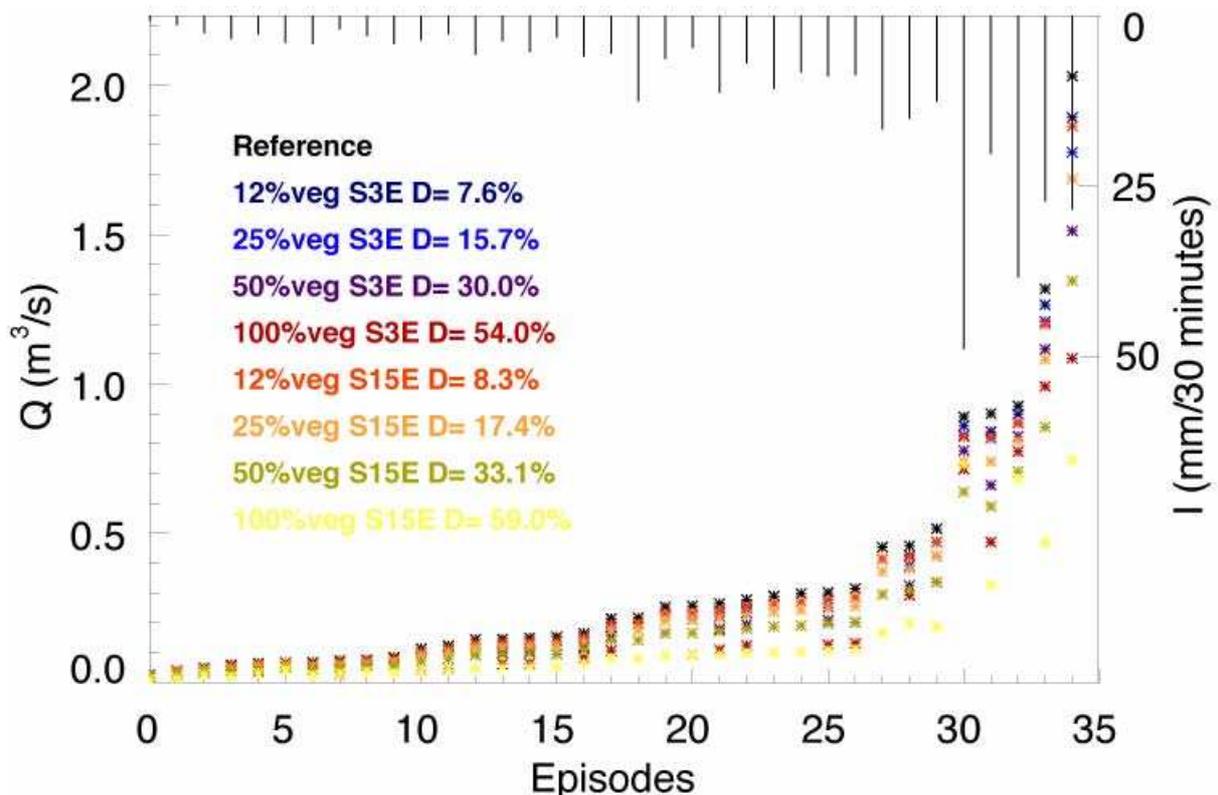


Figure 15 : Pics de débit simulés au niveau de la parcelle pour les 35 épisodes sélectionnés et pour différents scénarios de végétalisation.

### 5.2.3. Problèmes de déversement (Bassin de Boulogne-Billancourt)

La distribution statistique des volumes journaliers déversés en Seine autour de Boulogne-Billancourt est illustrée Figure 16. Quel que soit le scénario de TTV utilisé, la distribution est modifiée pour les valeurs courantes de déversement comme pour les événements les plus rares. La réduction de volume semble toutefois liée à la fréquence des phénomènes observés. Plus l'événement est fréquent et plus la végétalisation des toitures réduit la quantité de volumes déversés en Seine.

Le risque de débordement est ainsi complètement éliminé pour les événements les plus courants (période de retour inférieure à 2 mois) lorsque 100% du potentiel de végétalisation est couvert. Pour les événements moins fréquents (2 mois < T < 1 an), les volumes peuvent être divisés par deux dans les mêmes circonstances. Les scénarios intermédiaires (50% du potentiel est couvert) offrent une réduction de 30% de ces volumes.

A l'image des résultats obtenus sur le bassin de Châtillon, il apparaît que le pourcentage de toitures couvertes a plus de conséquences que le type de toiture utilisée (S3E ou S15E), bien que la structure dotée de la couche de substrat plus épaisse est censée infiltrer davantage les précipitations.

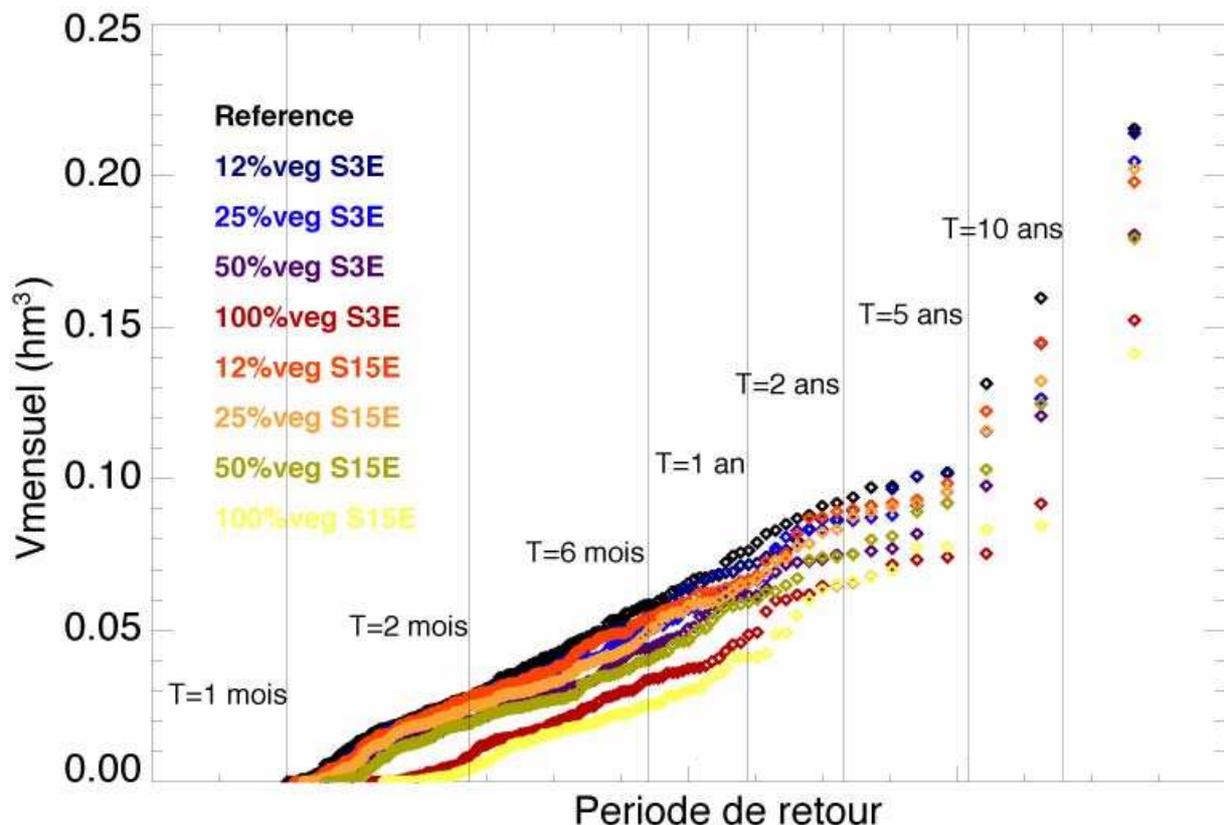


Figure 16 : Distribution statistique des volumes déversés autour du bassin de Boulogne-Billancourt pour différents scénarios de végétalisation

En ce qui concerne les résultats obtenus pour les 35 événements (Figure 17), la couverture de seulement 12,5% du potentiel ne semble pas produire d'impact significatif en termes de réduction des volumes déversés (une baisse moyenne d'environ 7,6%). Le revêtement de 50% du potentiel entraîne une diminution moyenne de 35% des volumes déversés et une plus significative pouvant atteindre 60% lorsque le revêtement atteint 100% du potentiel. Là encore, on s'aperçoit que l'impact des TTV est lié à la nature de l'événement pluvieux et plus particulièrement à l'intensité maximale. Pour les événements les plus intenses, par exemple, la diminution des volumes atteint à peine 40%.

Cette variabilité inter-événementielle est bien mise en évidence lorsque l'on regarde en détails les trois épisodes de 2007, 2009 et 2010 (représentés à titre indicatif sur la Figure 17). L'épisode d'août 2007 n'est que modérément atténué par l'installation de TTV (moins de

20% pour une couverture de 50% du potentiel, moins de 50% si l'on en recouvre 100%). Des résultats similaires sont obtenus pour l'épisode de juillet 2010. Dans le premier cas, il semble que cela soit dû à l'état de saturation du substrat. Dans le second, c'est davantage l'intensité des précipitations. Inversement, les conséquences de l'épisode de 2009 sont fortement diminuées par l'utilisation de toitures végétalisées : réduction de près de 50% pour la couverture de 50% du potentiel et de plus de 80% si la totalité du potentiel de végétalisation est recouvert.

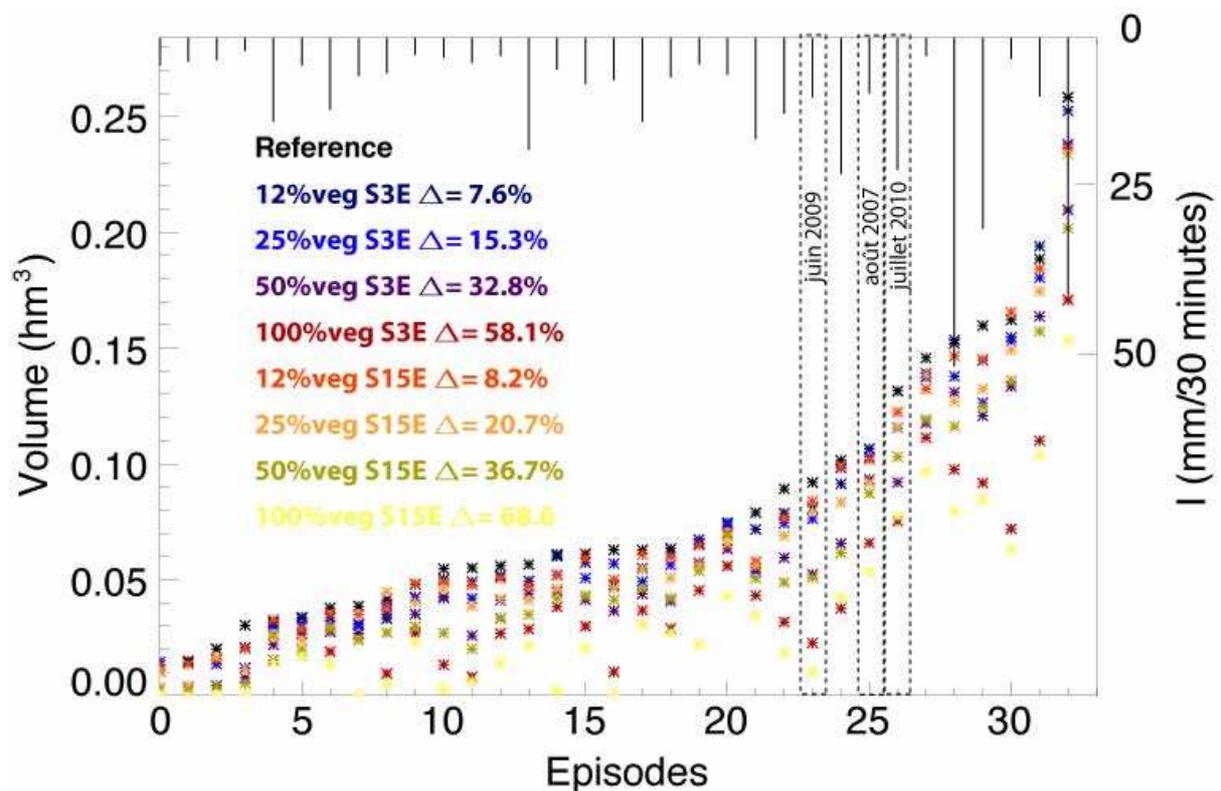


Figure 17 : Volumes déversés à Boulogne-Billancourt pour les 33 épisodes sélectionnés et pour différents scénarios de végétalisation.

## 6. Conclusion

Dans la partie 4 du projet TVGEP, une méthodologie a été développée pour étudier l'impact des TTV sur le ruissellement urbain à l'échelle du bassin versant. Elle comprend, d'une part, la conception de scénarios de végétalisation issus d'une analyse du mode d'occupation des sols et de la définition d'un potentiel de végétalisation représentant le maximum de surfaces de toits qui puissent être couvertes à l'échelle de la parcelle. D'autre part, elle utilise un modèle capable de simuler le comportement hydrologique de ces surfaces végétalisées. Intégré dans un modèle de gestion du ruissellement urbain (SWMM), cet outil a été appliqué sur deux bassins versants urbains des Hauts-de-Seine soumis à des problèmes opérationnels de saturation de réseau (débordements et déversements en Seine).

Les résultats présentés montrent l'intérêt des TTV pour réduire dans une certaine mesure les risques issus des trop-pleins du réseau d'eaux pluviales. L'ampleur de la réduction du débit de pointe comme des volumes débordés dépend fortement de la surface de toiture végétalisée,

mais aussi de l'événement pluvieux. La couverture de 100% des surfaces identifiées comme végétalisables impliquent une diminution très significative du débit de pointe (entre 30 et 60% en fonction du potentiel), du volume de ruissellement (entre 15 et 45%) et du volume débordé (plus de 60%). Une couverture moins importante du potentiel (entre 25 et 50%), plus représentative de la réalité, est censée réduire partiellement les problèmes étudiés.

Cependant, ces résultats encourageants sont basés sur un certain nombre d'hypothèses impliquant des limitations qui valent la peine de discuter :

- Estimation optimiste du potentiel de végétalisation : comme indiquée lors de la présentation de la méthode, le potentiel de végétalisation estimé à l'échelle de la parcelle surestime probablement le potentiel réel. En effet, on suppose que tous les bâtiments appartenant aux modes d'occupation des sols sélectionnés peuvent effectivement être couverts par une TTV. Ce qui signifie qu'ils sont tous recouverts par des toits plats, sans micro-structure et que la mise en œuvre d'une TTV est techniquement possible (mais actuellement pas réalisée). Bien que la végétalisation de toit légèrement en pente puisse être possible, les scénarios basés sur la couverture de 100% du potentiel semblent assez irréalistes. Néanmoins, cette étude illustre l'intérêt de telles structures et encourage la mise en œuvre de toitures végétalisées dans des projets de réhabilitation et/ou de développement futur. Les résultats obtenus pour les scénarios intermédiaires (couverture de 25 à 50% du potentiel) démontrent qu'une couverture significative - mais plus réaliste - d'une partie des surfaces de toitures peut avoir des impacts positifs en termes de gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Par ailleurs, cette étude a été réalisée en utilisant des TTV classiques, donc non régulées. L'utilisation de TTV régulées – encouragée par les Hauts-de-Seine pourrait encore améliorer leurs performances en stockant davantage d'eau sur la structure du toit.
- La courte durée d'observation des toitures instrumentées : les paramètres de modèle hydrologique ont été ajustés en utilisant une année de débit observée sur le site de Trappes. Néanmoins, de Juin 2011 à Juillet 2012, aucun épisode intense n'a été observé (en regard des courbes Intensité-Durée-Fréquence des précipitations, la période de retour maximale dépassée est de l'ordre de 6 mois). Cela signifie que le modèle a été calibré pour reproduire des événements communs, et nous supposons qu'il est en mesure de représenter correctement les événements rares caractérisés par des précipitations plus intenses. Pour cette raison, l'observation des toitures expérimentales doit se poursuivre afin de disposer à l'avenir d'épisodes pluvieux plus rares. Ces nouvelles données seront utilisées pour améliorer et / ou valider le modèle dans le futur. Néanmoins, l'utilisation des données actuelles permet de conclure que la mise en œuvre de TTV peut être utile pour limiter les conséquences d'épisodes pluvieux communs sur le réseau des eaux pluviales.
- La présente étude a été menée sur deux bassins versants des Hauts-de-Seine caractérisés par des configurations spécifiques et des problèmes de réseau propres à celles-ci. Les résultats obtenus ne peuvent donc pas être généralisés en l'état et faire l'objet d'un transfert sur d'autres bassins versants urbains. La géométrie atypique d'un bassin versant, conjuguée à la mise en place de TTV, pourrait engendrer des problèmes de concomitance (le retardement du pic de débit produit par un sous-bassin végétalisé coïnciderait désormais avec celui d'un autre sous-bassin). La définition de recommandations générales pour réduire le ruissellement urbain à l'aide de TTV

représente de vastes perspectives pour les investigations futures. C'est d'ailleurs l'un des objectifs du projet TVGEP.

Malgré ces limites, les résultats présentés dans ce livrable encouragent la mise en œuvre et la diffusion à grande échelle des toitures végétalisées pour réduire localement les problèmes de saturation du réseau d'eaux pluviales. En plus des propriétés thermiques et environnementales, les TTV peuvent être utiles d'un point de vue de gestion des eaux urbaines. Combinées à d'autres infrastructures de contrôle à la source des eaux pluviales ou / et de stockage, les TTV peuvent participer à réduire considérablement la quantité d'eau s'écoulant dans le réseau d'eaux pluviales en période de pluie. Ce type d'étude pourrait être utilisé par les collectivités territoriales et les gestionnaires de réseaux pour promouvoir la diffusion de TTV à l'avenir en faisant évoluer les documents d'Urbanisme en y incluant de façon idoine les TTV.

## Liste des figures et tableaux

### Liste des figures

<i>Figure 1 : Schéma du modèle réservoir développé dans SWMM (d'après Berthier et al., 2011)</i>	3
<i>Figure 2 : Comparaison entre les débits observés et simulés sur la période de calibration pour la TTV S3E</i>	7
<i>Figure 3 : Comparaison entre les débits observés et simulés sur la période de calibration pour la TTV S15E</i>	8
<i>Figure 4 : Représentation des bassins de Chatillon (à gauche) et de Boulogne-Billancourt (à droite) sous SWMM : en bleu, sont indiqués les risques de débordement et de déversement ; en vert, les exutoires pour lesquels les simulations sont effectuées (cf. Section 5)</i>	11
<i>Figure 5 : Comparaison des débits observés et simulés pour le bassin versant de Châtillon lors de l'événement pluvieux du 27-28 avril 2009 (événement 1)</i>	12
<i>Figure 6 : Comparaison des débits observés et simulés pour le bassin versant de Boulogne-Billancourt lors de l'événement pluvieux du 14 juillet 2010</i>	13
<i>Figure 7 : Méthode de définition du potentiel de végétalisation : combinaison des informations géographiques de bâti, du mode d'occupation du sol et de la géométrie du bassin versant</i>	15
<i>Figure 8 : Potentiel de végétalisation calculé comme le ratio entre les surfaces végétalisables et la surface totale de la parcelle pour les deux bassins d'étude</i>	16
<i>Figure 9 : Comparaison entre le pourcentage de surfaces imperméables (regroupant voirie et bâti) et le coefficient de ruissellement calibré à l'échelle de la parcelle</i>	17
<i>Figure 10 : Distribution statistique des pics de débit à l'exutoire de Châtillon pour différents scénarios de végétalisation</i>	21
<i>Figure 11 : Pics de débit simulés à l'exutoire de Châtillon pour les 35 épisodes sélectionnés et pour différents scénarios de végétalisation</i>	21
<i>Figure 12 : Résultats des simulations pour l'épisode des 5-8 août 2007 à l'exutoire de Châtillon</i>	22
<i>Figure 13 : Résultats des simulations pour l'épisode du 10 juin 2009 à l'exutoire de Châtillon</i>	23
<i>Figure 14 : Résultats des simulations pour l'épisode du 14 juillet 2010 à l'exutoire de Châtillon</i>	23
<i>Figure 15 : Pics de débit simulés au niveau de la parcelle pour les 35 épisodes sélectionnés et pour différents scénarios de végétalisation</i>	24
<i>Figure 16 : Distribution statistique des volumes déversés autour du bassin de Boulogne-Billancourt pour différents scénarios de végétalisation</i>	25
<i>Figure 17 : Volumes déversés à Boulogne-Billancourt pour les 33 épisodes sélectionnés et pour différents scénarios de végétalisation</i>	26

### Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Résultats de la modélisation des TTV S3E et S15E sur les périodes de calibration et de validation</i>	7
<i>Tableau 2: Résultats des simulations de débit réalisées sur le bassin de Châtillon</i>	11
<i>Tableau 3: Résultats des simulations de débit réalisées sur le bassin de Boulogne-Billancourt pour l'épisode du 14 juillet 2010</i>	13
<i>Tableau 4: Caractéristiques des épisodes pluvieux</i>	19

## Bibliographie

- Berthier, E., Ramier, D., et de Gouvello, B. 2011. *Simulation of Green Roof Hydrological Behavior with a Reservoir Model*. In ICUD, 11 au 16 septembre 2011, Porto Alegre, Brésil.
- van Genuchten, M. Th. 1980. *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Sci Soc Am J 44 (5): 892–898.
- IAU-IDF (2008). *Base de connaissance sur le Mode d'Occupation du Sol (MOS)*. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Ile de France: <http://www.iau-idf.fr/>
- IGN (2011). *BD TOPO® Descriptif de contenu*. Institut Géographique National: <http://professionnels.ign.fr/>
- Mentens, J., Raes, D., et Hermy, M. 2006. *Green Roofs as a Tool for Solving the Rainwater Runoff Problem in the Urbanized 21st Century?* Landscape and Urban Planning 77 (3): 217–226.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. *River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.
- Ramier, D. 2012. *Suivi hydrique de toitures végétalisées et modélisation*. Livrable 2.2 du projet TVGEP, 25 p.
- Rossman, L.A. 2004. *Storm water management model User's manual version 5.0*. Cincinnati, OH: U.S. EPA. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory.