

Concevoir des toitures végétalisées multifonctions en vue de l'épuration des eaux pluviales et du développement de la biodiversité urbaine

■ J. SCHWAGER^{1,2}, A. IRLES¹, J. THIRIAT¹, R. CLAVERIE², V. RUBAN³, J.-L. MOREL^{4,5}

Mots-clés : toitures végétalisées, métaux, eaux, végétation locale

Keywords: vegetative roof, metal, water, local plant

Introduction

Si l'on est encore loin des 10 millions de m² construits chaque année en Allemagne, le marché de la végétalisation de toiture s'est fortement développé en France depuis une dizaine d'années, multipliant par 10 la surface de construction annuelle et dépassant en 2011 le million de mètres carrés⁶. Cela s'explique notamment par les fonctions souvent vantées de cette technique qui permettent potentiellement de répondre à bon nombre des objectifs et nouveaux enjeux identifiés par les récents plans et réglementations dans le domaine de la construction et de l'aménagement durable, tels que les « plans énergie climat et nature en ville » ou encore le concours écoquartiers : gestion quantitative et qualitative à la source des eaux pluviales, support de biodiversité, isolation thermique et phonique ou encore limitation de l'effet d'îlot de chaleur urbain... Environ 50 % des écoquartiers sont d'ailleurs équipés de toitures végétalisées⁷. Cependant, si la

présence de végétaux, d'un « sol » ou encore d'une certaine épaisseur de matériaux, permet potentiellement de prétendre à ces fonctions, toutes les structures de toitures végétalisées ne peuvent répondre aux mêmes exigences.

C'est notamment le cas dans le domaine de la rétention des polluants présents dans les eaux pluviales. Du fait de la présence d'un « sol » et de végétaux, éléments parfois utilisés pour la dépollution des eaux, une certaine capacité épuratoire est attendue de ces structures. Cependant, l'impact des toitures végétalisées sur la qualité des eaux pluviales reste à ce jour mitigé. Selon CZEMIEL BERNDTSSON et coll. [2009], cela s'explique par le fait que ces structures ne sont pour le moment pas pensées pour épurer les eaux de pluie, vecteurs de polluants non négligeables [DEMBÉLÉ, 2010]. Or, tout comme l'efficacité des zones humides construites en vue de la dépollution des eaux est plus importante que celle des zones humides naturelles [MAYS et EDWARDS, 2001], des toitures végétalisées dimensionnées pour améliorer la qualité des eaux seront plus efficaces que les structures existantes.

De la même façon, la simple présence de végétaux laisse supposer que la toiture végétalisée sera un support de développement pour la faune locale. Cependant, à ce jour, la plupart des toitures végétalisées sont recouvertes de tapis de sedums très peu diversifiés avec des épaisseurs de substrat trop fines pour être véritablement favorables à la biodiversité [BENOIT *et al.*, 2011]. Ainsi, en suivant certaines

¹ Cerema – Direction territoriale Est – LRPC de Nancy – 71, rue de la Grande-Haie – 54510 Tomblaine.

² Gemcea – 149, rue Gabriel-Péri – 54500 Vandœuvre-lès-Nancy.

³ Ifsttar – BP 4129 – 44341 Bouguenais cedex.

⁴ Université de Lorraine – Laboratoire sols et environnement – 2, avenue de la Forêt-de-Haye – TSA 40602 – 54518 Vandœuvre-lès-Nancy.

⁵ INRA – Laboratoire sols et environnement – 2, avenue de la Forêt-de-Haye – TSA 40602 – 54518 Vandœuvre-lès-Nancy.

⁶ LASSALLE F. [2012] : « Panorama technique, historique et géographique de la végétalisation de toitures ». Présentation orale, Journée technique CETE de l'Est et Île-de-France – CSTB « Quelle place pour les toitures végétalisées dans la ville de demain ? », Paris, 20 novembre 2012.

⁷ LE NOUVEAU N. [2011] : « Eau et aménagement urbain : quels apports des démarches "écoquartiers" ? » Présentation orale, Journées Eau – Environnement – Risques de l'Ifsttar, Blois, 16-18 mars 2011.

préconisations relativement simples à mettre en œuvre, comme l'introduction de végétaux locaux et variés, la présence de creux et de bosses ou encore la juxtaposition de zones hétérogènes (graviers, souches...), la colonisation de ces surfaces par la faune locale, d'abord les insectes puis les oiseaux, sera facilitée [GEDGE *et al.*, 2007].

Atteindre les différentes fonctions potentielles des toitures végétalisées nécessite donc un dimensionnement adapté aux fonctions recherchées. Des travaux de recherche complémentaires sont donc nécessaires afin de pouvoir établir des préconisations allant en ce sens, notamment en vue d'optimiser les capacités épuratoires et le développement de la biodiversité en milieu urbain grâce aux toitures végétalisées.

En 2010, le Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) de l'Est a donc végétalisé plus de 600 m² de toitures sur ses bâtiments dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire sur l'impact des toitures végétalisées en matière d'isolation thermique, de biodiversité et de qualité des eaux. Cette présentation se focalisera essentiellement sur ces deux dernières fonctions.

1. Les toitures végétalisées expérimentales du LRPC de Nancy

1.1. Choix des matériaux

Lors du choix des matériaux constitutifs des différentes parcelles végétalisées, l'objectif était d'obtenir différentes structures représentatives du marché français actuel et incluant en parallèle des innovations qui pourraient permettre une optimisation de certaines fonctions. Ainsi, deux drainages ont été choisis, un matériau minéral, l'argile expansée, et une structure synthétique stockante, potentiellement intéressante pour les aspects touchant la gestion des eaux pluviales et l'isolation thermique du bâtiment. Pour les substrats, l'entreprise partenaire du projet qui fournissait ce matériau a proposé dans un premier temps le mélange qu'elle utilise généralement en toitures végétalisées, appelé par la suite « substrat classique », composé de pouzzolane, de tourbe blonde et d'écorce de pin. Ensuite, un mélange innovant comportant de la fibre de coco et de la zéolithe, matériaux étudiés pour leur capacité à retenir les polluants [CONRAD *et al.*, 2007 ; MOTSI et ROWSON,

2009], a également été proposé en plus de la pouzzolane en vue d'une optimisation de la capacité épuratoire de la structure. Enfin, le dernier substrat a été proposé par l'entreprise qui a installé les structures végétalisées, afin de s'adapter au mieux aux espèces locales introduites, grâce en particulier à une teneur légèrement plus élevée en matière organique et en carbonate. Ce matériau contient notamment de l'argile expansée, de la pouzzolane, des briques et ardoises concassées, des scories ainsi que du compost. Il sera appelé par la suite « semi-intensif » du fait de la nature des végétaux introduits sortant du cadre de la végétation extensive classique actuelle.

La sélection des végétaux est l'étape qui a demandé la démarche la plus poussée. Dans un premier temps, des milieux naturels lorrains aux conditions de développement proches de ceux d'une toiture végétalisée (fortes variations de température, teneurs limitées en nutriments et en eau...) ont été sélectionnés : les Vosges et les plateaux calcaires. Ensuite, des contacts ont été pris auprès du Jardin botanique de Nancy qui dispose d'une antenne dans les Vosges et de l'association Floraine afin d'obtenir des listes de végétaux naturellement présents dans ces milieux. Une fois cette liste obtenue, les plantes compatibles techniquement avec un développement en toitures végétalisées (pas de racine pivotante, ni trop « envahissante », de préférence vivaces) sur un substrat de l'ordre de 10-12 cm d'épaisseur ont été sélectionnées. Les plantes déjà identifiées comme pouvant se développer en toiture végétalisée, dans les ouvrages de SNODGRASS et SNODGRASS [2006] et DUNNET et KINGSBURY [2008] notamment, ont été privilégiées. Ainsi, une liste de 97 plantes pour les pelouses calcaires lorraines et 49 pour les Vosges a été établie. Plusieurs sedums souvent utilisés en végétalisation extensive (*album* et *reflexum* notamment) étaient d'ailleurs présents. Ensuite, il a été demandé à l'entreprise qui installait ces toitures de choisir au minimum une dizaine d'entre elles pour chaque milieu en fonction des plantes qu'il pouvait se procurer auprès de son fournisseur. Par ailleurs, d'autres parcelles ont été végétalisées avec des assortiments classiques de sedums utilisés en végétalisation de toiture, en veillant tout de même à introduire différentes espèces avec différentes périodes de floraison. Les végétaux introduits sont récapitulés dans le *tableau I*.

Nom de la plante	Assortiment de végétaux		
	Classique	Plateaux calcaires	Vosges
<i>Sedum album</i>	X	X	X
<i>Sedum reflexum larix</i>	X	X	X
<i>Sedum reflexum germanium</i>	X	X	X
<i>Sedum spurium</i>	X	X	
<i>Sedum sexangulare</i>	X	X	
<i>Sedum floriferum</i>	X		
<i>Sedum telephium</i>			X
<i>Euphorbia polychroma</i>		X	
<i>Lavandula angustifolia</i>		X	
<i>Festuca glauca</i>		X	
<i>Potentilla erecta</i>		X	X
<i>Briza media</i>		X	
<i>Allium schoenoprasum</i>		X	X
<i>Hieracium aurantiacum</i>			X
<i>Sempervivum tectorum</i>			X
<i>Iris sibirica</i>			X
<i>Petrorhagia saxifraga (Dianthus saxifragus)</i>			X
<i>Poa alpina</i>			X

Tableau I. Liste des végétaux présents sur les toitures végétalisées dans les différents assortiments

1.2. Association des structures, construction et entretien

Les matériaux des différentes couches ont ensuite été assemblés de façon à obtenir des structures qui diffèrent d'une autre par uniquement un matériau afin de pouvoir comparer l'impact spécifique de ce matériau. Une structure témoin en gravier a également été conservée afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à la couverture la plus largement répandue à ce jour en toiture-terrasse. Les différentes structures réalisées et les noms associés sont récapitulés dans le *tableau II*. L'épaisseur d'argile expansée est de 5 cm et l'épaisseur des substrats de l'ordre de 10-12 cm. Les structures ont été construites à l'automne 2010. Quelques plants et fragments de *Sedum album* et *reflexum* ont été introduits à cette période sur l'ensemble des parcelles. Ensuite, du fait des conditions climatiques, l'implantation de la végétalisation sous forme de micro-motte a été poursuivie en avril 2011. Un ajout d'engrais a été réalisé en même temps que l'introduction de ces végétaux, pratique habituelle de l'entreprise qui a installé ces

structures, permettant ainsi de se rapprocher de ce que l'on retrouve sur les toitures végétalisées non expérimentales. Par la suite, cette pratique n'a pas été renouvelée afin de ne pas induire de dégradation de la qualité des eaux, la fertilisation étant identifiée comme l'une des principales sources de nutriments [EMILSSON *et al.*, 2007 ; CZEMIEL BERNDTSSON *et al.*, 2005 ; 2009 ; 2010]. En outre, les toitures végétalisées souffrant généralement d'un défaut d'entretien⁸, un ajout régulier d'engrais nous aurait éloignés de l'évolution réelle d'une toiture végétalisée représentative du marché. Une forte période de sécheresse ayant suivi l'installation de ces toitures, trois arrosages ont eu lieu durant la période de confortement en mai-juin 2011. La maintenance de la toiture a été par la suite conforme aux préconisations des professionnels dans le domaine, à savoir une visite périodique (au moins deux fois par an)

⁸ SCHWAGER J., DE GOUVELLO B. (2012) : « Enjeux du développement de la végétalisation de toiture : facteurs d'acceptabilité, leviers, cas particulier des techniques de maintenance ». Présentation orale, Journée technique CETE de l'Est et Île-de-France – CSTB « Quelle place pour les toitures végétalisées dans la ville de demain ? », Paris, 20 novembre 2012.

Nom	Drainage	Substrat	Végétation
Vosges	Argile expansée	Semi-intensif	Vosges
Stockage 60	Structure synthétique de stockage de 60 mm de hauteur	Extensif	Classique
Stockage 40	Structure synthétique de stockage de 40 mm de hauteur	Extensif	Classique
Plateau calcaire	Argile expansée	Semi-intensif	Plateaux calcaires lorrains
Fibre coco	Argile expansée	Fibre de coco	Classique
Semi-intensive	Argile expansée	Semi-intensif	Classique
Extensive	Argile expansée	Extensif	Classique
Gravier	—	—	—

Tableau II. Compositions des différentes structures de toitures végétalisées expérimentales

permettant essentiellement de vérifier que les évacuations n'étaient pas colmatées et de supprimer manuellement des adventices risquant d'endommager l'étanchéité. L'arrosage n'a pas été nécessaire.

1.3. Suivi expérimental

Des prélèvements des différents matériaux constitutifs des toitures végétalisées (étanchéité, structures de stockage, argile expansée, substrats, végétaux...) ont été effectués avant la construction afin de pouvoir connaître les concentrations initiales de ces matériaux en éléments traces métalliques.

Les dépôts atmosphériques de temps secs et de temps de pluie sont récupérés à l'aide d'un système composé d'un capteur de pluie disposant d'une ouverture alternative de deux volets roulants placés au-dessus de bacs, permettant ainsi de récupérer dans l'un d'eux les dépôts atmosphériques de temps secs (DATS) et dans l'autre les dépôts atmosphériques de temps de

pluie (DATP), selon le principe utilisé dans le cadre d'une thèse réalisée à l'INSA de Lyon [DEMBÉLÉ *et al.*, 2008]. Les quantités de pluies mensuelles sont mesurées à partir des données pluviométriques horaires fournies par Météo-France et établies grâce à un dispositif de mesure proche du site expérimental. Les volumes d'eau en sortie de toitures végétalisées sont mesurés à l'aide de débitmètres à auget placés sur les gouttières à environ 1 mètre du sol et permettant de récupérer environ 1 % du flux écoulé dans des bidons en polyéthylène haute densité (PEHD).

Trois zones de 1 m² ont été définies sur chaque parcelle afin de servir de référence pour l'observation du développement de la végétation. Ce suivi est réalisé tous les deux mois en automne et en hiver et tous les mois au printemps et en été. Une photo de chaque zone est alors prise (figure 1). Les différents végétaux présents sont également recensés. De même, leur occurrence, la hauteur ainsi que le



Figure 1. Évolution du développement de la végétation sur une des zones de suivi de la parcelle « Vosges » entre août 2011 et août 2012

diamètre moyen sont évalués. Enfin, des informations complémentaires, comme la floraison, sont aussi recueillies.

1.4. Protocoles de préparation et d'analyse des différents échantillons

Les substrats et l'argile expansée ont été prélevés directement dans les « big bags » lors de la réalisation des toitures pour la campagne de mesure initiale, puis en juillet (période à laquelle l'ensemble des dispositifs expérimentaux fonctionnait) sur les toitures, en trois points différents par toiture, puis regroupés par type de substrat.

Les prélèvements ont été effectués dans les zones encore dépourvues de végétation et sur l'ensemble de l'épaisseur du substrat, afin d'avoir un échantillon le plus représentatif possible. Ils ont ensuite été concassés afin d'obtenir une granulométrie inférieure à 2 mm, puis séchés à l'air libre pendant plus de 48 heures. Ces échantillons ont ensuite été transmis à l'Institut national de recherche agronomique (INRA) d'Arras pour l'analyse des teneurs totales en éléments traces métalliques (ETM). Des essais de lixiviation ont également été pratiqués afin d'identifier les substances potentiellement rejetées par les matériaux. Le protocole utilisé est celui de la NORME NF EN 12457-3 [2002], déjà utilisée pour caractériser des matériaux de toitures végétalisées [MOLINEUX *et al.*, 2009].

Par ailleurs, des essais d'adsorption du cuivre et du zinc ont été effectués en batch. Les différents matériaux ont été concassés après quartage. Puis des échantillons de 5 g ont été réalisés. Ils ont été mis en contact avec 50 mL d'eau de pluie simulée (eau distillée + 1/20 de Volvic [VAN DE VOORDE, 2012]) enrichie en cuivre ou en zinc (concentration allant de 0,5 mg/L à 10 g/L). Ces flacons ont ensuite été agités pendant une semaine à 16 tours par minute. Enfin, les échantillons d'eau prélevés sont filtrés et acidifiés à 0,5 % par HNO₃ Ultrapur puis analysés par spectrométrie par émission optique d'un plasma par couplage inductif (ICP OES).

Pour récupérer les DATS, une fine lame d'eau distillée est introduite dans le bac afin d'éviter la remise en suspension des particules une fois déposées

dans le bac. Ces dépôts sont récupérés une fois par mois. Dans un premier temps, les échantillons font l'objet d'une décantation. Le surnageant fait ensuite l'objet d'une centrifugation à 4000 tours/min pendant 40 min. Les dépôts issus de la centrifugation sont ensuite récupérés puis séchés à l'air ambiant. Enfin, le surnageant est filtré sur filtre Millipore à 0,45 µm préalablement séché à l'étuve à 105 °C et pesé, puis les filtres sont séchés à l'air ambiant. Le passage de la phase particulaire des DATS à la phase dissoute de l'eau distillée étant possible, l'eau est également conservée pour analyse par la suite, avec une acidification à 0,5 % par HNO₃ Ultrapur.

Les protocoles de préparation pour les DATP et les eaux en sortie de toitures végétalisées sont les mêmes. Les échantillons sont prélevés plusieurs fois par mois à la suite des événements pluvieux ayant engendré une quantité d'eau significative dans les différents systèmes de collecte. Puis chaque échantillon est filtré sur filtre à 0,45 µm préalablement séché. Le filtre est ensuite séché à l'air ambiant et la phase dissoute est acidifiée à 0,5 % par HNO₃ Ultrapur puis stockée.

Les phases particulières des DATP et DATS font ensuite l'objet de minéralisation à l'HNO₃ pour mise en solution des ETM. Enfin l'ensemble des échantillons issus de l'expérimentation *in situ* est ensuite analysé par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS).

1.5. Calculs de la capacité épuratoire des structures végétalisées

La capacité épuratoire des toitures est calculée comme la différence entre l'apport de polluant (évalué en termes de flux de métal en g/m² sur une certaine période à partir des dépôts atmosphériques) et le flux en sortie de toiture rapporté à l'apport. Une toiture végétalisée aura donc un effet épuratoire sur un élément si son efficacité épuratoire est supérieure à 0. Si celle-ci est égale à 1, cela signifie que la toiture a retenu 100 % de la quantité d'éléments apportés par les dépôts atmosphériques. Si celle-ci est inférieure à 0, il y a plus de métaux en sortie qu'en entrée et les matériaux constitutifs de la structure ont donc rejeté ces éléments.

2. Résultats et discussions

2.1. Développement de la végétation

2.1.1. Caractéristiques globales

Le pourcentage de recouvrement permet d'avoir une bonne estimation de l'aspect général des différentes parcelles végétalisées (figure 2). Une forte progression a eu lieu durant la première année de vie des toitures végétalisées. On observe ensuite une stagnation de ce pourcentage à partir de juillet 2012. Il est intéressant de remarquer qu'à cette date, soit à peine un an et demi après l'introduction de la végétation, toutes les structures atteignent un pourcentage de recouvrement supérieur ou égal à 80 %, objectif à atteindre après 3 années de vie de la toiture pour les introductions de plants en micro-mottes [ADIVET *et al.*, 2007]. La toiture « semi-intensive » montre des résultats significativement inférieurs aux autres. Cependant, des passages fréquents ont eu lieu sur celle-ci lors de travaux d'installations de garde-corps. Ainsi, le développement de la végétation a pu être ralenti. Il est également intéressant de remarquer que les végétaux locaux, en particulier ceux des Vosges, ont permis d'atteindre des pourcentages de recouvrement équivalents à l'assortiment plus classique de sedum.

La comparaison des espèces présentes dans les trois assortiments de végétaux, *Sedum album* et *Sedum reflexum germanium*, nous permet d'évaluer l'impact de la structure en ce qui concerne le substrat et le drainage. Aussi bien au niveau de la hauteur que du

diamètre des plants, surtout pour le *Sedum album*, la croissance a été plus lente sur la toiture des Vosges, comprenant un drainage en argile expansée et le substrat semi-intensif (figure 3). Cependant, à partir du deuxième printemps (avril 2012), ces valeurs se sont rapprochées des résultats observés sur la structure classique qui obtient généralement les plus grands diamètres et hauteurs de plants. Durant l'année passée, les moins bons résultats ont été obtenus pour la toiture avec substrat classique et drainage synthétique et parfois pour celle disposant du substrat contenant de la fibre de coco. Le drainage synthétique permet probablement une moins bonne rétention d'eau que l'argile et limite peut-être la mise à disposition de cet élément essentiel au développement de la végétation. Par ailleurs, ce qui différencie le substrat classique du substrat contenant de la fibre de coco est justement ce matériau qui n'apporte peut-être pas les nutriments permettant d'optimiser le développement de ce type de végétation. Le *Sedum album* et le *Sedum reflexum germanium* ont fleuri en 2011 et 2012, mais plus tard la première que la deuxième année : en août 2011 et dès juin 2012.

2.1.2. Éléments spécifiques au développement de la végétation locale

En ce qui concerne le développement des végétaux spécifiques implantés sur les toitures lorraines, seules *Hieracium aurantiacum*, *Poa alpina* et *Petrorhagia saxifraga* ont totalement disparu. Elles étaient déjà sèches dès l'été 2011. Il est rappelé que les mois

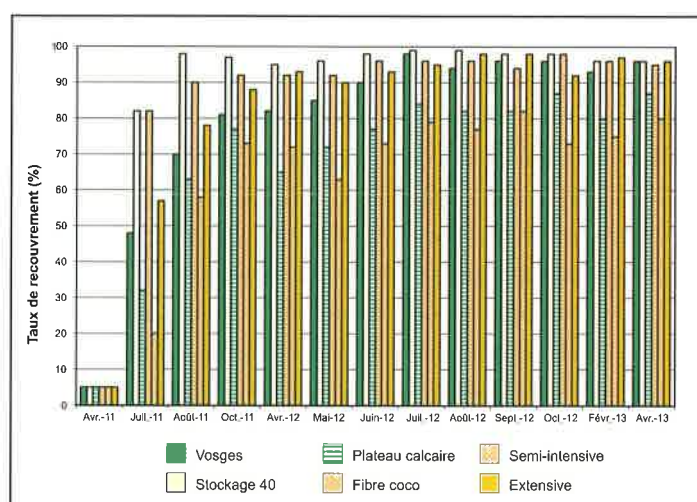


Figure 2. Évolution du pourcentage de recouvrement de la végétation entre mai 2011 et février 2013 sur les différentes toitures végétalisées considérées

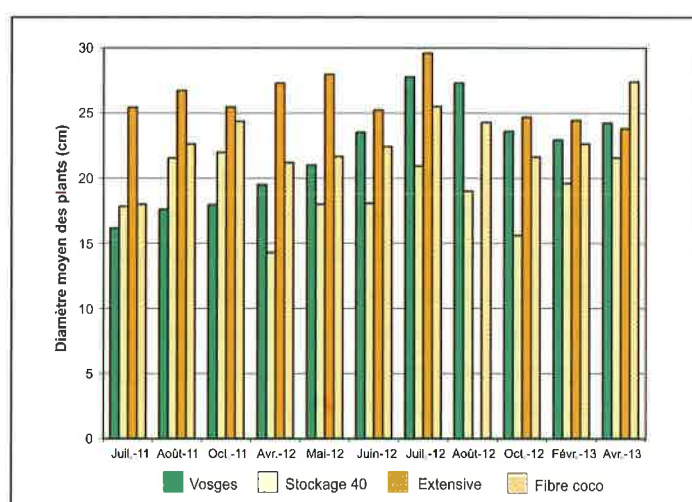


Figure 3. Évolution du diamètre des plants de *Sedum album* sur les différentes toitures de juillet 2011 à février 2013

d'avril à juin 2011 ont été particulièrement secs. Des conditions météorologiques plus favorables durant cette période charnière de l'implantation de la végétation auraient peut-être permis une meilleure adaptation de ces plantes. Ces pertes restent cependant limitées (moins de 10 % des plants initialement implantés sur ces deux parcelles) et l'ensemble des autres spécimens introduits a poursuivi son développement.

Le suivi du développement de la végétation a permis de voir que plusieurs de ces plantes se sont véritablement développées seulement après le second printemps. La *Festuca glauca*, un genre de graminée introduit sur la parcelle des plateaux calcaires lorrains, est ainsi restée à 5 cm de haut, sa hauteur initiale jusqu'en avril 2012, puis elle a progressivement atteint près de 45 cm en juillet 2012 lors de la floraison. La joubarbe des toits (*Sempervivum tectorum*) a, quant à elle, progressivement augmenté pour ce qui concerne le diamètre des plants. Cependant, la première floraison n'a eu lieu qu'en 2012 et seulement quelques plants ont fleuri (figure 4). L'*Iris sibirica* a quant à lui fleuri pour la première fois en avril 2013. Le bilan du développement de la végétation locale est donc satisfaisant après un peu plus de 2 ans de vie de la toiture.

2.2. Capacité épuratoire

2.2.1. Résultats issus des toitures expérimentales et phénomènes entrant en jeu

Selon KÖHLER et SCHMIDT [2003], deux processus touchant la qualité des eaux en sortie de toitures végétalisées peuvent être présents et faire de cette structure vis-à-vis des polluants :



Figure 4. Évolution de la joubarbe des toits (*Sempervivum tectorum*) : micro-motte implantée en avril 2011 (a), développement du plant en avril 2012 (b) et florissement en juillet 2012 (c)

- soit un puits, du fait de la rétention (stockage, décomposition, adsorption) par le substrat ou les végétaux des polluants présents en phase dissoute dans les eaux de pluie ou sur les particules des dépôts de temps secs ou en suspension dans les eaux de pluie ;
- soit une source, du fait du relargage de substances à la suite de la lixiviation des matériaux constitutifs de la toiture végétalisée, particulièrement dans les premiers mois après la construction de la toiture.

Pour obtenir une toiture végétalisée aux capacités épuratoires optimisées il est donc nécessaire d'identifier dans un premier temps des matériaux qui ne rejettent pas de polluants et dans un second temps des matériaux qui ont de bonnes capacités de rétention des substances présentes dans les eaux de pluie.

Parcelle végétalisée	As	B	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
Vosges	- 40,27	- 2,08	0,98	0,96	0,97	0,60	0,99	1,00	0,70
Stockage 40	- 0,17	0,91	0,94	0,96	0,97	- 1,36	0,97	1,00	0,38
Plateau calcaire	- 45,97	- 3,94	0,95	0,96	0,97	0,54	0,79	1,00	0,63
Fibre coco	- 27,59	0,39	0,97	0,95	0,97	- 0,49	0,97	1,00	0,76
Semi-intensive	- 70,08	- 5,09	0,97	0,94	0,94	0,28	0,98	1,00	0,69
Extensive	- 68,35	0,08	0,93	0,93	0,92	- 3,20	0,98	0,79	0,91
Gravier	- 0,90	0,85	0,95	0,97	0,97	0,91	0,96	0,64	0,64

Tableau III. Capacité épuratoire des différentes parcelles végétalisées suivies sur la période mai-décembre 2011 pour les éléments traces métalliques étudiés

Le *tableau III* recense les capacités épuratoires des différentes structures végétalisées expérimentales vis-à-vis des différents ETM étudiés. On peut observer que les résultats sont très variables selon les métaux, allant de rétentions quasi totales du cuivre, du cadmium, du chrome ou encore du plomb, à des multiplications des flux par 70 pour l'arsenic en sortie de certaines structures notamment. Dans tous les cas, la capacité épuratoire représente l'équilibre entre le rejet potentiel de substances par la toiture et la rétention de ces métaux par cette même structure. Selon les fourchettes de valeurs obtenues, on peut toutefois déduire certaines informations. Ainsi, comme évoqué précédemment, les capacités épuratoires négatives indiquent forcément un apport de substances par la toiture. Les valeurs comprises entre 0 et 1 indiquent une certaine rétention de l'élément concerné par la structure, même si celle-ci peut également en avoir émis une certaine quantité contrebalancée par une rétention plus importante et qui donne globalement la capacité épuratoire observée.

2.2.2. Identification des matériaux rejetant des métaux

Des analyses des teneurs totales en ETM dans les substrats et l'argile expansée ont été réalisées sur les matériaux avant la mise en place sur les toitures expérimentales. Leur comparaison avec les capacités épuratoires des différentes structures n'a cependant pas permis d'identifier de corrélation précise entre teneurs totales et rejets par les structures [SCHWAGER *et al.*, 2013]. En effet, ce n'est pas parce qu'un élément est présent dans un matériau qu'il sera disponible pour être emporté par l'eau de pluie qui ruisselle au travers de la structure, d'où la nécessité de réaliser des essais complémentaires permettant d'avoir une idée de la quantité de métaux mobilisables par les eaux de pluie.

Les résultats de lixiviation issus de l'application de la NORME NF EN 12457-3 [2002] sur les trois substrats et les deux drainages sont présentés dans le *tableau IV*. Les quantités d'ETM en µg d'ETM par g de matériau sec obtenues à la suite des deux lixiviations consécutives ont été additionnées (*tableau IV*). Même s'il n'y a pas de lien de proportionnalité, on remarque alors que dans tous les cas pour lesquels la capacité épuratoire d'une structure pour un élément donné est négative, indiquant ainsi un rejet de cet élément plus important que la rétention, cette structure dispose du matériau ayant émis le plus de cet élément :

- l'argile expansée pour l'arsenic sur les toitures Vosges, plateaux calcaires, fibre coco, semi-intensive et extensive ;
- le substrat semi-intensif pour le bore sur les toitures Vosges, plateaux calcaires et semi-intensives ;
- les substrats fibre de coco et extensif pour le nickel sur les toitures fibre coco, stockage 40 et extensive.

2.2.3. Caractérisation de la capacité de rétention des matériaux

Les essais d'adsorption du cuivre et du zinc en batch ont permis de définir les capacités d'adsorption maximales des trois substrats et de l'argile expansée. Ces valeurs exprimées en mg d'ETM adsorbée par g de matériau sec sont représentées dans le *tableau V*. Les capacités d'adsorption de l'argile expansée sont remarquables et comparables à d'autres matériaux utilisés ou envisagés pour être utilisés pour le traitement des effluents urbains notamment [BHATNAGAR et SILLANPÄÄ, 2010]. Les conditions en batch sont cependant différentes de celles rencontrées en site réel, le temps de contact et les quantités de métaux considérés sont notamment beaucoup plus importants. Or il a déjà été observé des capacités de rétention des métaux par des matériaux de toitures

Matériau		As	B	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
Substrat	Extensif	0,012	0,293	0,002	0,005	0,057	0,150	0,005	0,003	0,348
	Fibre de coco	0,013	0,469	0,008	0,003	0,092	1,230	0,004	0,000	1,041
	Semi-intensif	0,177	1,903	0,000	0,007	0,057	0,062	0,023	0,005	0,040
Drainage	Argile expansée	0,380	0,558	0,000	0,002	0,034	0,037	0,004	0,007	0,006
	Structure synthétique	0,006	0,006	0,000	0,005	0,041	0,029	0,003	0,780	0,529

Tableau IV. Quantité d'éléments traces métalliques (ETM) rejetée cumulée (en µg d'ETM/g matériau sec) lors des deux étapes de lixiviation du protocole de la norme NF EN 12457-3 [2002] pour les trois substrats et deux drainages utilisés sur les parcelles expérimentales

Matériau	Capacité maximale d'adsorption du cuivre (mg Cu/g de matière sèche)	Capacité maximale d'adsorption du zinc (mg Zn/g de matière sèche)
Argile expansée	20,7	31,4
Substrat extensif	11	15,2
Substrat fibre de coco	9,2	18,1
Substrat semi-intensif	7,7	13,6

Tableau V. Capacités maximales d'adsorption du cuivre et du zinc pour différents matériaux utilisés pour la construction des toitures végétalisées expérimentales

végétalisées plus importantes dans le cas de concentrations supérieures à celles présentes dans les dépôts atmosphériques [CZEMIEL BERNDTSSON *et al.*, 2006]. Il est donc intéressant de croiser ces différents résultats afin de voir si ces tendances se retrouvent sur les toitures végétalisées expérimentales. Pour le cuivre, les capacités épuratoires sont élevées pour l'ensemble des structures et aucune différence notable selon les matériaux n'est identifiable. La matière organique, site d'adsorption privilégié du cuivre [BOUVET, 2004], présente dans l'ensemble des substrats a dû être à même de retenir l'ensemble du cuivre apporté par les dépôts atmosphériques durant la première année de vie des toitures expérimentales. Il sera intéressant de voir si une évolution est visible au cours du temps, pouvant indiquer une saturation du système, voire une désorption du cuivre initialement retenu. En ce qui concerne le zinc, on observe bien une forte différence de capacité de rétention par les toitures contenant de l'argile expansée et celles n'en contenant pas. Parmi celles qui contiennent de l'argile expansée, c'est bien celle qui dispose du substrat avec la capacité de rétention maximale la plus élevée, le substrat extensif, qui obtient les meilleurs résultats. Ces essais en batch peuvent donc permettre d'obtenir une première idée sur le comportement des matériaux une fois sur site.

2.3. Compatibilité entre ces deux fonctions

La recherche de plusieurs fonctions dans une même structure végétalisée nécessite toutefois une compatibilité entre celles-ci, notamment au niveau des paramètres qui font que cette structure a ces fonctions. Si l'on considère dans un premier temps la fonction épuratoire de la toiture, le premier critère consistant à limiter les teneurs et les rejets de polluants par les

matériaux n'est pas une limite au développement des végétaux, quels qu'ils soient, puisque la majorité d'entre eux ne sont pas des oligo-éléments nécessaires à leur métabolisme. Ensuite, il faut prendre en compte le potentiel de développement des végétaux locaux sur des matériaux à fortes capacités de rétentions des polluants comme le substrat extensif, substrat montrant les meilleures capacités de rétention du cuivre et du zinc dans cette étude. Celui-ci diffère du substrat sur lequel ont été implantés les végétaux lorrains essentiellement en ce qui concerne la composition en matière organique, il contient en effet de la tourbe blonde et des écorces de pin compostées au lieu du compost. La tourbe blonde est souvent utilisée dans les mélanges de terreau et sera donc probablement un bon support de développement de la végétation locale. L'écorce de pin compostée peut avoir un pH légèrement acide qui ne conviendra pas forcément à tous les végétaux. Des essais seraient nécessaires pour vérifier que les végétaux locaux peuvent se développer sur ces matériaux, mais aucune incompatibilité radicale ne semble se dégager. Enfin, l'obtention d'une eau de bonne qualité en sortie de toitures végétalisées sur le long terme, notamment en matière de nutriments, nécessite également des pratiques d'entretiens spécifiques comme la limitation, voire la suppression des apports d'engrais. La poursuite de l'étude de ces toitures végétalisées expérimentales permettra de vérifier que ces plantes poursuivent leur développement au cours du temps en l'absence d'apports d'amendement.

En ce qui concerne l'implantation de la végétation locale en vue de la création d'un support propice au développement de la biodiversité, il est intéressant dans un premier temps de vérifier que les végétaux en eux-mêmes n'ont pas d'impacts négatifs sur la

qualité des eaux. En effet, selon la nature des exsudats produits, certains végétaux peuvent rendre plus mobiles certains ETM. Or les résultats des capacités épuratoires des toitures des Vosges et des plateaux calcaires lorrains montrent des résultats équivalents, voire meilleurs que ceux de la même structure implantée de sedums. Les assortiments de végétaux locaux ne semblent donc pas avoir une influence négative sur la qualité des eaux en sortie. Par rapport aux caractéristiques du substrat, l'introduction de ces végétaux peut nécessiter des teneurs en matières organiques et en carbonates (surtout pour les plateaux calcaires) plus élevées ainsi qu'une épaisseur plus importante que sur une toiture végétalisée extensive classique. Il est donc nécessaire d'évaluer l'impact potentiel de ces caractéristiques sur la qualité des eaux. Une part plus grande de matière organique peut avoir un impact positif sur la qualité des eaux en matière de rétention des nombreux polluants ayant une affinité pour celle-ci comme le cuivre ou encore les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [BOUR, 2005]. Selon les caractéristiques des eaux recherchées en sortie de toiture, il peut cependant être nécessaire de vérifier que les teneurs en nutriments n'augmentent pas significativement. La présence de carbonate peut permettre d'augmenter le pH et par conséquent de limiter la mobilité des métaux, induisant également un impact positif [CAMBIER *et al.*, 2009]. Enfin, une épaisseur plus importante posera problème uniquement si les matériaux rejettent des polluants, la quantité de matériau plus importante induisant également un rejet plus important. Cependant, si les rejets sont limités, comme préconisés précédemment, l'augmentation de l'épaisseur ne peut qu'améliorer la qualité des eaux, les mécanismes de filtres mécaniques étant accentués et le temps de contact étant augmenté permettant ainsi une meilleure capacité d'adsorption des polluants. La comparaison de la qualité des eaux en sortie de toitures extensives et intensives a déjà montré que les résultats obtenus avec les secondes étaient meilleurs [CZEMIEL BERNDTSONN *et al.*, 2009].

Les caractéristiques nécessaires pour un bon fonctionnement de chacune de ces fonctions ne semblent donc pas incompatibles, au contraire.

3. Prise en compte de ces paramètres par les maîtres d'ouvrage et les professionnels du domaine

Les résultats évoqués précédemment sont issus d'un projet de recherche pluridisciplinaire lancé il y a plus de 3 ans et une telle démarche préalable n'est bien entendue pas concevable pour l'installation de toutes les toitures végétalisées sur le parc immobilier français. Pour ce qui concerne la biodiversité, de plus en plus de documents, destinés à l'attention des professionnels du domaine ou des maîtres d'ouvrage, fournissent des indications sur les paramètres à prendre en compte dans l'élaboration de la toiture, comme le guide *Réaliser des toitures végétalisées favorables à la biodiversité* [BENOIT *et al.*, 2011]. La recherche des végétaux locaux à introduire nécessite tout de même une démarche complémentaire qui peut être réalisée par un professionnel du domaine ou se baser sur des études existantes. En Île-de-France notamment, Natureparif met à disposition les études naturalistes réalisées dans la région.

À ce jour, moins d'informations sont disponibles pour améliorer la qualité des eaux en sortie de toiture et des recherches complémentaires sont encore nécessaires sur le sujet. Cependant, on peut imaginer que des tests permettant d'identifier les rejets potentiels de polluants par les matériaux soient développés dans les années à venir et réalisés par les fournisseurs de substrat afin de caractériser leurs matériaux. La poursuite des essais en laboratoire et la comparaison avec les recherches menées sur différents matériaux en vue de la dépollution des eaux résiduelles permettront également d'identifier des matériaux qui auront un intérêt en matière de rétention des polluants contenus dans les dépôts atmosphériques.

La prise en compte de l'ensemble de ces paramètres et contraintes, surtout dans le cas de la recherche d'une toiture végétalisée « multifonction », reste cependant complexe pour les personnes qui cherchent simplement à construire une toiture végétalisée sur un bâtiment sans avoir de connaissance technique spécifique. Ainsi, afin de rendre plus accessibles les résultats obtenus dans le cadre de ses projets de recherche et plus généralement dans le domaine des fonctions des toitures végétalisées, le CETE de l'Est

– LRPC de Nancy vient de lancer une étude exploratoire visant à terme à développer un outil à destination des maîtres d'ouvrage, qui les aidera à définir les fonctions de la toiture végétalisée qu'ils projettent de construire, puis à identifier le type de structure qui pourrait le mieux correspondre à leur besoin.

Conclusion

Un peu plus de 2 ans après la construction des toitures végétalisées expérimentales du CETE de l'Est – LRPC de Nancy, de premiers résultats sont disponibles en vue du dimensionnement de toitures végétalisées multifonctions. À la suite d'une démarche préalable au lancement du projet, il a été possible d'introduire des végétaux locaux qui devraient permettre d'offrir à la faune locale un support de développement intéressant. Si leur croissance a été moins importante durant la première année que celle des sedums classiques, elle a été considérable en 2012 et a permis d'obtenir des résultats comparables en matière de pourcentage de recouvrement. En outre, plus de 90 % des plantes introduites ont survécu. En ce qui concerne la qualité des eaux en sortie de toitures, les essais menés en laboratoire sur les matériaux permettent d'obtenir des informations qualitatives sur leur capacité à rejeter et à retenir des polluants métalliques. L'étude des différentes caractéristiques permettant potentiellement d'atteindre les fonctions recherchées en matière de développement de la biodiversité et d'épuration des eaux pluviales ne

montre pas d'incompatibilité sur le court terme, au contraire, et la poursuite des études est nécessaire pour confirmer le bon fonctionnement du système sur le long terme. Si à ce jour la prise en compte de ces préconisations dans la construction d'une toiture végétalisée nécessite encore une démarche cadrée par des spécialistes des différents domaines, de plus en plus d'outils et guides sont mis à la disposition du grand public permettant d'en faciliter la diffusion et la prise en compte. Plus généralement, ces résultats soulignent l'importance d'une démarche préalable de conception de la structure de végétalisation selon les fonctions attendues par le maître d'ouvrage, si l'on veut être certain que cette future toiture végétalisée réponde aux attentes de son propriétaire et de ses usagers.

Remerciement

Nous remercions BATEC Lorraine, Comptoir du Bâtiment, Faliénor, Nidaplast, OH Semence, Saint-Gobain Weber Portugal et Végétoit pour leur contribution à la construction de ces toitures. Nos remerciements vont également au GIP Plante & Cité, à l'association Floraine et au Jardin botanique de Nancy pour leur assistance dans le choix de la végétation introduite ainsi qu'à Météo-France qui fournit les données pluviométriques horaires. Merci enfin à la direction de la recherche et de l'innovation du MEDDTL pour le financement de cette thèse ainsi qu'au Gemcea pour son assistance technique et financière sur ce projet.

Bibliographie

ADIVET, FFB, CSFE, SNPP, UNEP (2007) : *Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*. Édition n° 2, novembre 2007. 36 p.
BHATNAGAR A., SILLANPÄÄ M. (2010) : « Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment – A review ». *Chemical Engineering Journal*, 157 : 277-296.
BENOIT A.L., ROULET A., BARRA M., LECUIR G., DAMAS O., MADRE F. (2011) : « Réaliser des toitures végétalisées favorables à la biodiversité ». Observatoire départemental de la biodiversité urbaine de la Seine-Saint-Denis, Natureparif, Plante & Cité, Muséum national d'histoire naturelle, 24 p.
BOUVET M. (2004) : *Transfert dans les sols routiers de métaux lourds issus de l'utilisation de déchets*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 195 p.

BOUR O. (2005) : *Hydrocarbures aromatiques polycycliques : données d'entrée des modèles analytiques ou numériques de transferts dans les sols et les eaux souterraines – Synthèse bibliographique relative aux paramètres Kd (sorption) et T1/2 (biodégradation)*. Rapport d'étude INERIS N° 66244-DESP-R02, 42 p.

CAMBIER P., SCHVARTZ C., VAN OORT F. (2009) : *Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels*. Éditions Quae, 308 p.

CONRAD K., BRUUN HANSEN H.C. (2007) : « Sorption of zinc and lead on coir ». *Bioresource Technology*, 98 : 89-97.

CZEMIEL BERNDTSSON J., BENGTSSON L. (2005) : « The influence of extensive vegetated roofs on runoff water pollution loads ». 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Danemark, 8 p.

CZEMIEL BERNDTSSON J., EMILSSON T., BENGTSSON L. (2006) : « The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality ». *Science of the Total Environment*; vol. 355, issues 1-3 : 48-63.

CZEMIEL BERNDTSSON J., BENGTSSON L., JINNO K. (2009) : « Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs ». *Ecological Engineering*; vol. 35, issue 3 : 369-380.

CZEMIEL BERNDTSSON J. (2010) : « Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review ». *Ecological Engineering*; vol. 36 : 351-360.

DEMBÉLÉ A., BECOUZE C., BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., BARILLON B., COQUERY M., CREN-OLIVÉ C. (2008) : « Prototypage de collecte des retombées atmosphériques sèches et humides : description du dispositif, mode de fonctionnement et premiers résultats pour les métaux dissous ». Actes des 3^{es} Journées doctorales en hydrologies urbaines, 14-15 octobre 2008, Nancy, p. 95-110.

DEMBÉLÉ A. (2010) : *MES, DCO et polluants prioritaires des rejets urbains de temps de pluie : mesure et modélisation de flux événementiels*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 267 p.

DUNNET N., KINGSBURY N. (2008) : *Planting green roofs and living walls*. Revised and updated edition, Timber Press, Portland (Oregon), 327 p.

EMILSSON T., CZEMIEL BERNDTSSON J., MATSSON J., ROLF K. (2007) : « Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems ». *Ecological Engineering*; vol. 29, issue 3 : 260-271.

GEDGE D., DUNNET N., GRANT G., JONES R. (2007) *Living roofs*. Natural England. Téléchargeable sur : http://www.wandsworth.gov.uk/download/downloads/id/424/living_roofs (accès avril 2014).

KÖHLER M., SCHMIDT M. (2003) : *Study of extensive Green Roofs in Berlin: Part III Retention of Contaminants*. Disponible en ligne : http://www.roofmeadow.com/wp-content/uploads/Study-of-extensive-green-roof-in-Berlin_rev2.pdf (accès avril 2014).

NORME NF EN 12457-3 (2002) : *Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Partie 3 : essai en bûche double avec un rapport liquide-solide de 2 L/kg et de 8 L/kg pour des matériaux à forte teneur en solides et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité)*.

MAYS P., EDWARDS G. (2001) : « Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetland receiving acid mine drainage ». *Ecological Engineering*; vol. 16 : 487-500.

MOLINEUX C.J., FENTIMAN C.H., GANGE A.C. (2009) : « Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. ». *Ecological Engineering*; 35 : 1507-1513.

MOTSI T., ROWSON N.A., SIMMONS M.J.H. (2009) : « Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite ». *Int. J. Miner. Process.*; 92 : 42-48.

SCHWAGER J., RUBAN V., MOREL J.-L., CLAVERIE R., IRLES A., THIRIAT J. (2013) : « Identification des phénomènes prépondérants de transferts de métaux entre eaux de pluie et toitures végétalisées ». Actes de la conférence Novatech 2013, Lyon, 24-27 juin 2013.

SNODGRASS E., SNODGRASS L. (2006) : *Green roof plants: a resource and planting guide*. Timber Press Incorporated, Portland (Oregon), 220 p.

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, 277 p.

Résumé

Auteurs

J. SCHWAGER, A. IRLES, J. THIRIAT, R. CLAVERIE, V. RUBAN, J.-L. MOREL

Concevoir des toitures végétalisées multifonctions en vue de l'épuration des eaux pluviales et du développement de la biodiversité urbaine

Le marché français de la végétalisation de toiture poursuit son développement et le million de m² construit annuellement a été dépassé en 2011. Si ces structures peuvent disposer de multiples fonctions, toutes les toitures végétalisées n'ont pas les mêmes avantages et une réflexion préalable est nécessaire pour la conception d'une toiture végétalisée adaptée mettant en avant certaines de ces fonctions. En vue d'établir des préconisations pour la construction de toitures végétalisées optimisées en ce qui concerne la rétention des polluants métalliques, le développement de la biodiversité et l'isolation thermique du bâtiment, le Centre d'études techniques de l'environnement (CETE) de l'Est - Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Nancy a commencé une expérimentation

sur les toitures végétalisées grandeur nature à l'automne 2010. Cet article présente la démarche adoptée pour la conception des différentes structures en matière de développement d'un support pour la biodiversité en ville et de système de rétention des polluants métalliques. Les résultats obtenus *in situ* et en laboratoire ont permis d'identifier de premières pistes pour le choix de matériaux optimisant cette dernière fonction. Par ailleurs, l'introduction de végétaux locaux montre une implantation et un développement satisfaisants sur ces deux premières années. Des pistes pour la prise en compte de ces éléments par les acteurs de la filière sont également indiquées, permettant d'aider les maîtres d'ouvrage à orienter leur choix vers une toiture végétalisée adaptée aux fonctions qu'ils en attendent.

J. SCHWAGER, A. IRLES, J. THIRIAT, R. CLAVERIE, V. RUBAN, J.-L. MOREL
**Conception of multi-function green roofs to improve water quality and
to enhance urban biodiversity**

The French market for vegetative roofs is continuing to develop rapidly and more than one million square meters were built in 2011. If these structures can offer various functions, not all green roofs have the same advantages and preliminary thinking is required to conceive a suitable system. The CETE de l'Est – LRPC de Nancy has launched a research project on vegetative roofs in autumn 2010 to establish guidelines for the construction of vegetative roofs with optimized abilities to retain pollutants, enhance biodiversity and improve thermal insulation. This article is dedicated to these first two functions. It

describes the approach for the structures' conception and presents *in situ* and in laboratory results. These results allow identification of first tracks for the selection of materials with optimized ability to improve water quality. The introduction of local plant species has also shown a good implantation and development during these first two years. In addition, information allowing the actors of this sector to take into account these elements in a vegetative roof project is signaled. It could help the building owners to focus their choice toward a vegetative roof suited to the functions that they are expecting.



La collection est maintenant complète!

La nature et les causes des risques sanitaires liés à la consommation d'eau contaminée sont multiples et le rôle joué par le réseau de distribution est loin d'être négligeable.

Retrouvez dans les tomes 2 et 3 de cet ouvrage, **le manuel du parfait opérateur** qui aborde l'exploitation et la maintenance du réseau et les aspects liés à la surveillance permanente de la qualité de l'eau mise en distribution.

Ils complètent le tome 1 qui traite de la nature et des origines des problèmes de qualité.

Ces ouvrages s'adressent à l'ensemble des acteurs opérationnels : autorités organisatrices, opérateurs et gestionnaires des services d'eau, responsables institutionnels, maîtres d'œuvre, chercheurs, enseignants et étudiants.

Bon de commande sur le site www.astee.org

