

Rejets et rétentions d'éléments traces métalliques par les toitures végétalisées

Premiers résultats d'une expérimentation *in situ*

■ J. SCHWAGER^{1,2}, A. IRLES¹, J. THIRIAT¹, R. CLAVERIE^{1,2}, J.-L. MOREL³, V. RUBAN⁴

Mots-clés : toitures végétalisées, métaux traces, eaux, substrats, végétaux

Keywords: green roofs, metals, water, substrate, plants

Introduction

Les enjeux de la qualité des eaux en sortie de toitures

Les rejets urbains de temps de pluie sont désormais identifiés comme une source importante de substances prioritaires définies par la directive cadre sur l'eau 2000/60 CE (DCE) pour le milieu aquatique [NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; LAMPREA et RUBAN, 2008].

Si le ruissellement sur diverses surfaces telles que les toitures ou encore les voiries constitue une part importante de l'apport en polluants, le passage dans l'atmosphère peut en représenter de 15 à 25 % [BARRAUD *et al.*, 2009].

À l'amont du parcours de l'eau dans la ville, la toiture et la qualité de ses eaux en sortie représentent un enjeu particulier dans un contexte de gestion à la source des eaux pluviales, où l'infiltration est souvent préconisée et la protection des nappes d'eau souterraines contre l'introduction de polluants reste une priorité.

En outre, avec le développement de la récupération et l'utilisation des eaux de pluie, une connaissance plus précise des substances présentes dans ces eaux s'avérera essentielle à l'avenir si le cadre des usages autorisés en France venait à s'élargir.

Si la qualité des eaux en sortie de toitures traditionnelles a fait l'objet de multiples études [ROBERT-SAINTÉ, 2009], peu de données sont disponibles à ce jour concernant les toitures végétalisées. Pourtant cette technique tend à se généraliser. En France, si elle ne concerne à ce jour qu'environ 5 % des nouvelles toitures-terrasses construites chaque année, la filière est en forte progression depuis le début des années 2000 et pourrait nous rapprocher du marché de nos voisins allemands, où ce chiffre atteint les 12 % environ.

Des résultats mitigés issus des toitures végétalisées

Les premières études relatives à l'impact des toitures végétalisées sur la qualité des eaux pluviales datent de la fin des années 1990 et se sont développées quelques années plus tard, notamment via les recherches menées par Czemieli Berndtsson en Suède. Moins d'une dizaine d'équipes de recherche travaillant sur le sujet ont pu être identifiées et les différents résultats obtenus sont souvent contradictoires. Cela provient notamment de la diversité des sites étudiés (environnements, matériaux constitutifs et âges des toitures végétalisées différents...). Quelques tendances ont néanmoins pu être identifiées. On note notamment un impact globalement positif sur les composés de l'azote et négatif sur ceux du phosphore, ainsi qu'une majorité de rétentions d'aluminium, plomb et zinc malgré quelques rejets repérés. En ce qui concerne l'impact des caractéristiques des toitures, la fertilisation des toitures a été identifiée comme principal vecteur d'azote et de

¹ CETE de l'Est - LRPC de Nancy - 71, rue de la Grande-Haie - 54510 Tomblaine. Courriel : julie.schwager@developpement-durable.gouv.fr

² GEMCEA - 149, rue Gabriel-Péri - 54510 Vandœuvre-lès-Nancy.

³ LSE, Ensaia-INRA / Université de Lorraine - 2, avenue de la Forêt-de-Haye - TSA 40602 - 54518 Vandœuvre-lès-Nancy cedex.

⁴ IfSTTAR, Division eau et environnement - Route de Bouaye - CS4 - 44344 Bouguenais cedex.

phosphore [EMILSSON *et al.*, 2007 ; CZEMIEL BERNDTSSON et BENGTTSSON, 2005 ; CZEMIEL BERNDTSSON *et al.*, 2009 ; CZEMIEL BERNDTSSON, 2010] et l'utilisation de matériaux recyclés dans les substrats comme une source importante de métaux [KÖHLER et SCHMIDT, 2003 ; BATES *et al.*, 2007]. Ces tendances restent néanmoins à vérifier du fait du nombre limité de résultats disponibles et de la diversité des toitures végétalisées et des situations étudiées. D'ailleurs, dans la synthèse bibliographique publiée en 2010, Czemiël Berndtsson déplore le manque de travaux sur une même toiture sur le long terme qui permettraient d'identifier clairement les variations en fonction des saisons ou encore de l'âge de la toiture.

Mieux comprendre les flux de métaux pour optimiser le pouvoir épurateur des toitures végétalisées

Comme évoqué par CZEMIEL BERNDTSSON et coll. [2009], jusqu'à maintenant, les toitures végétalisées ne sont pas pensées en vue de la dépollution des eaux pluviales. Des impacts positifs sur la qualité des eaux sont attendus de toutes ces structures simplement du fait de la présence d'un « sol » et de végétaux, systèmes parfois utilisés pour la dépollution des eaux. Tout comme l'efficacité des zones humides édifiées en vue de la dépollution des eaux est plus importante que celle des zones humides naturelles [HORNE, 2000 ; MAYS et EDWARDS, 2001], des toitures végétalisées dimensionnées pour améliorer la qualité des eaux pourraient être plus efficaces que les structures disponibles aujourd'hui sur le marché et dimensionnées essentiellement selon des critères pratiques, économiques et esthétiques.

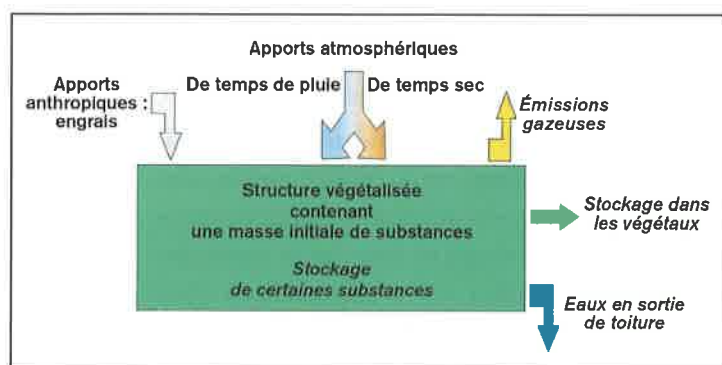


Figure 1. Flux potentiels de polluants entrant et sortant d'une structure de végétalisation de toiture

L'objectif de ce projet est donc d'établir des préconisations pour la construction et la maintenance de toitures végétalisées aux capacités épuratoires optimisées par rapport aux polluants métalliques rencontrés dans les eaux de pluie. Peu d'informations étant disponibles à ce jour sur les flux de polluants au sein des structures de toitures végétalisées, il a été décidé de se consacrer dans un premier temps uniquement aux polluants métalliques, présents en quantité non négligeable dans les dépôts atmosphériques et qui ont l'avantage de conserver la même forme tout au long de leur parcours à travers les différentes couches de la toiture. Pour cela, il est notamment nécessaire de mieux comprendre le comportement des différents matériaux composant ces structures vis-à-vis des éléments traces métalliques (ETM) et de répondre à la question suivante : les matériaux/végétaux jouent-ils le rôle de puits ou de source ?

Une démarche en trois étapes complémentaires associant suivi *in situ*, essais de caractérisation en laboratoire et modélisation du comportement des structures a été établie afin de caractériser précisément les bilans d'ETM (As, Cr, Cu, Zn, Cd, Hg, Ni, Pb, B et Sb) au sein des toitures végétalisées (figure 1). Cet article est consacré à la présentation des premiers résultats obtenus dans le cadre de l'expérimentation *in situ*.

1. Matériels et méthodes

1.1. Un site expérimental grandeur nature

Afin de caractériser ces différents flux, cette première étape se base sur l'étude de toitures végétalisées construites en octobre 2010 sur des toits du laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy (LRPC) et instrumentées de façon à pouvoir évaluer les différents flux de polluants entrants et sortants. Huit structures mettant en œuvre deux couches drainantes (argile expansée et structure de stockage synthétique), trois substrats (extensif, semi-intensif et fibre de coco) et trois associations de végétations différentes (sedums, végétaux des Vosges et des plateaux calcaires lorrains) ont été construites sur plus de 600 m². Chaque structure diffère d'une autre uniquement par un seul matériau (tableau I) dans le but de pouvoir comparer les résultats entre eux et d'identifier les impacts spécifiques éventuels des différents matériaux et leur évolution au cours du

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

Tableau I. Associations de matériaux des toitures végétalisées expérimentales du LRPC de Nancy

temps dans des conditions expérimentales et environnementales similaires. Une structure témoin en gravier a également été réalisée, afin de pouvoir comparer les résultats des toitures végétalisées à ce qui se fait classiquement sur toitures-terrasses.

1.2. Dispositif expérimental pour l'évaluation de l'état initial de la structure, des flux entrants et sortants

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

Les dépôts atmosphériques de temps sec et de temps de pluie sont récupérés à l'aide d'un système composé d'un capteur de pluie permettant l'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'eaux en sortie de toitures végétalisées sont mesurés à l'aide de débitmètres à auget placés sur les gouttières à environ un mètre du sol et permettant de récupérer environ 1 % du flux écoulé dans des bidons en PEHD.

1.3. 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 pendant laquelle l'ensemble des dispositifs expérimentaux fonctionnait) sur les toitures, en trois points différents par toiture, ils ont ensuite été 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'INRA d'Arras pour l'analyse des teneurs totales en ETM et extractibles en CaCl_2 , pour caractériser la fraction soluble et échangeable permettant notamment d'évaluer la phytodisponibilité de certains des ETM [TREMEL-SCHAUB et FEIX, 2000].

Un échantillon des différents végétaux introduits a également été prélevé avant plantation sur les parcelles expérimentales. Ensuite, *Sedum album* (*S. album*) et *Sedum reflexum germanium* (*S. reflexum* g.), plantes présentes dans les trois assortiments de végétaux étudiés, ont été prélevés sur chaque parcelle au printemps 2011. Ces échantillons ont ensuite été lavés à l'eau distillée. Les parties racinaires et aériennes ont été séparées puis séchées à l'étuve à 40 °C avant broyage avec un broyeur en agate.

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 est centrifugé à 4000 tours/minute pendant 40 minutes. Les dépôts issus de la centrifugation sont ensuite récupérés puis séchés à l'air ambiant. Enfin, le surnageant est filtré sur filtre Milipore 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 0,05 % 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 0,05 % par HNO₃ ultrapur puis stockée.

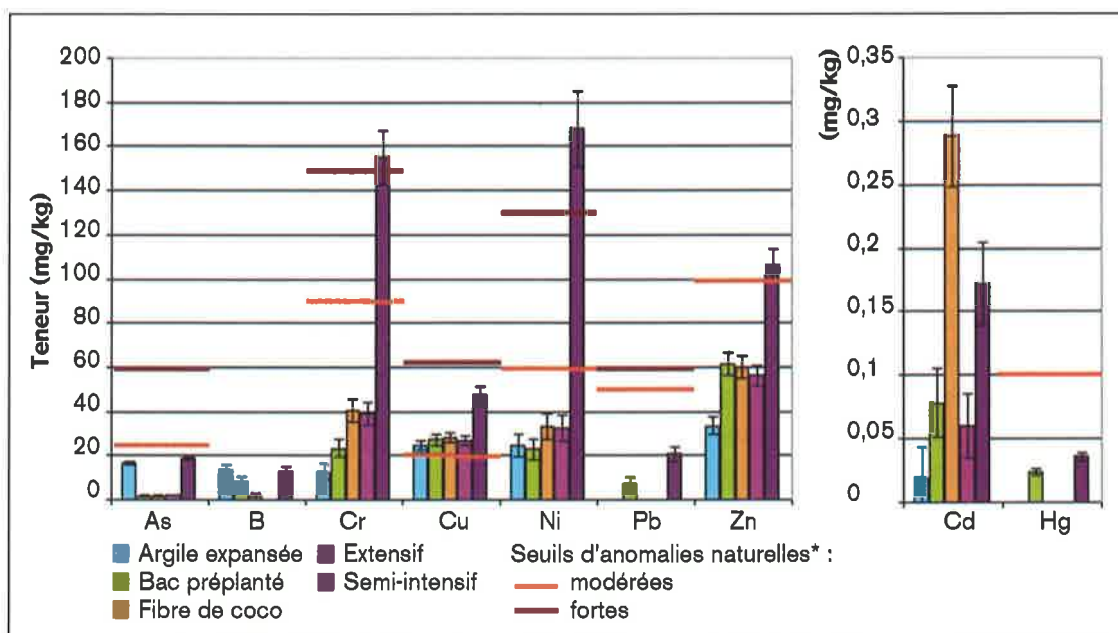
Les végétaux et phases particulaires des DATP et DATS font ensuite l'objet d'attaques acides à l'HNO₃ et H₂O₂ pour une mise en solution des ETM. Enfin, l'ensemble des échantillons est ensuite analysé par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP MS).

2. Premiers résultats

2.1. Bilan initial

2.1.1. Teneurs initiales et caractéristiques des éléments traces métalliques dans les substrats et l'argile expansée

Afin d'évaluer l'importance des teneurs totales en ETM mesurées dans l'argile expansée et les substrats, ces valeurs ont été comparées aux données fournies par BAIZE [2000] dans le cadre d'une étude sur les fonds pédogéochimiques locaux et régionaux dans des sols français, indiquant des gammes de valeurs ordinaires, présentant une anomalie naturelle modérée puis forte. Cela permet en effet de vérifier que ces teneurs restent proches de ce que l'on peut trouver classiquement comme fond géochimique en France. Certains ETM sont très peu présents comme le mercure et le plomb, absents de l'argile expansée ainsi que des substrats extensifs et fibre de coco, et présents à de faibles teneurs pour les deux autres matériaux (figure 2). L'ensemble des matériaux semble relativement riche en cuivre, en effet ces teneurs dépassent les valeurs de fonds géochimiques ordinaires. Le substrat semi-intensif présente également des teneurs importantes en Cr, Ni et Zn, avec notamment des valeurs qui dépassent les seuils d'anomalies naturelles fortes pour le Cr et Ni. Ce substrat contient notamment des scories de charbon. Une investigation sera réalisée pour identifier



*BAIZE [2000].

Figure 2. Teneurs totales en éléments traces métalliques (ETM) dans les substrats (juillet 2011) et comparaisons avec des seuils d'anomalies naturelles de sols français

l'origine et la nature de ces matériaux afin de déterminer s'ils sont responsables de ces fortes teneurs en ETM.

Cependant, la teneur totale en ETM ne permet pas de savoir si ces éléments seront mobilisés par les eaux de pluie ou encore prélevés par les végétaux de la toiture. L'extraction au CaCl_2 permet d'obtenir ces informations, d'une part concernant la forme soluble, et donc potentiellement présente dans les eaux en sortie, et d'autre part concernant les ions échangeables. Le résultat de ce test peut permettre d'évaluer la part d'ETM phyto-disponible, soit les éléments qui peuvent potentiellement être prélevés par certains végétaux [TREMEL-SCHAUB et FEIX, 2000]. Afin de pouvoir estimer la mobilité des différents ETM entre eux, le rapport teneur extraite par le CaCl_2 sur teneur totale présente dans les matériaux a été calculé. Le cadmium dans les substrats extensif et fibre de coco présente un pourcentage d'extractibilité non négligeable, de l'ordre de 14 % et 9 %. Ces taux sont très faibles pour tous les autres ETM (< 0,7 %), voire même nuls pour le plomb. Cela sera à vérifier via l'évolution au cours du temps des teneurs en ETM dans les végétaux des toitures.

2.1.2. Teneurs en éléments traces métalliques dans les végétaux avant plantation

Les teneurs en ETM observées dans *Sedum album* et *Sedum reflexum germanium* sont très éloignées des

critères de l'ordre de 100 $\mu\text{g/g}$ de Cd, 1 000 $\mu\text{g/g}$ de Ni, Cu et Pb ou encore 10 000 $\mu\text{g/g}$ de Zn permettant d'identifier les espèces végétales hyperaccumulatrices [BAKER *et al.*, 2000] (tableau II), comme le *Sedum alfredii* [WU *et al.*, 2007]. Pour la plupart de ces éléments, les teneurs sont plus élevées dans la partie racinaire qu'aérienne, stratégie de tolérance aux métaux classiquement développée par les végétaux [KAMAL *et al.*, 2004].

2.2. Entrées du système : les dépôts atmosphériques

On observe une forte variabilité mensuelle dans les apports d'éléments traces métalliques par les dépôts atmosphériques globaux, phénomènes classiquement observés [AZIMI *et al.*, 2003]. Il est prévu ultérieurement de suivre ces variations sur plusieurs années. La majorité des éléments sont apportés en plus grande proportion par les pluies que par les dépôts de temps secs sauf le plomb (figure 3a et b). Par ailleurs, ces apports ne sont pas négligeables et les concentrations dans les eaux de pluie dépassent parfois les normes de qualité environnementales établies par la DCE et leur application à l'échelle nationale, en particulier pour le Cd, Cr, Cu et Zn (figure 4), dépassement déjà observé sur la région lyonnaise notamment pour d'autres éléments tels que le plomb [DEMBÉLÉ, 2010].

Teneur dans les racines ($\mu\text{g/g}$ de matière sèche)	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
<i>Sedum album</i>	0,09	9,5	2	0,7	58,5
<i>Sedum reflexum germanium</i>	0,06	6,4	1,1	0,6	52
Caractéristique d'un hyperaccumulateur [BAKER <i>et al.</i> , 2000]	100	1 000	1 000	1 000	10 000

Tableau II. Comparaisons des teneurs initiales en éléments traces métalliques (ETM) dans les parties racinaires de *Sedum album* et de *Sedum reflexum germanium* avec les caractéristiques d'un hyperaccumulateur

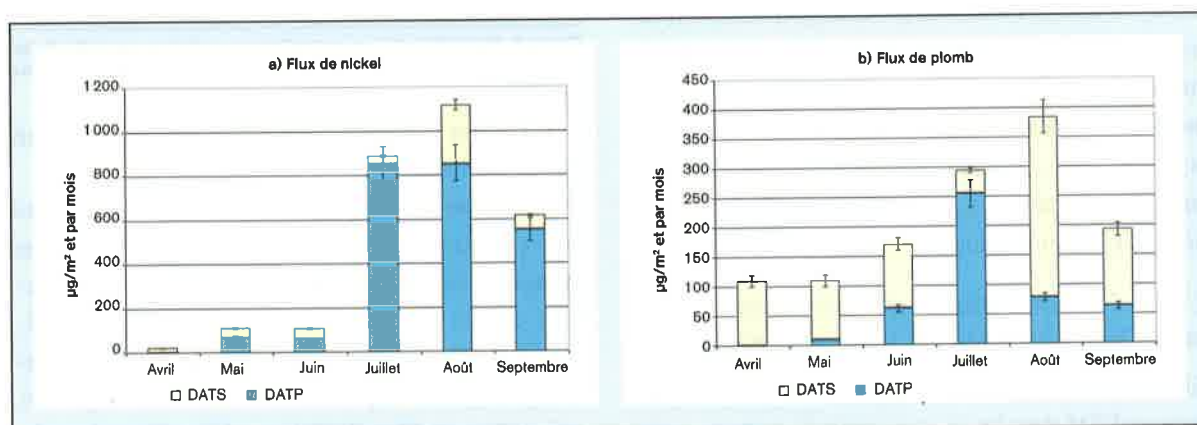


Figure 3. Variabilité au cours du temps (avril à septembre 2011) et dans les répartitions des flux de nickel (a) et de plomb (b) entre les dépôts atmosphériques de temps secs (DATS) et de temps de pluie (DATP)

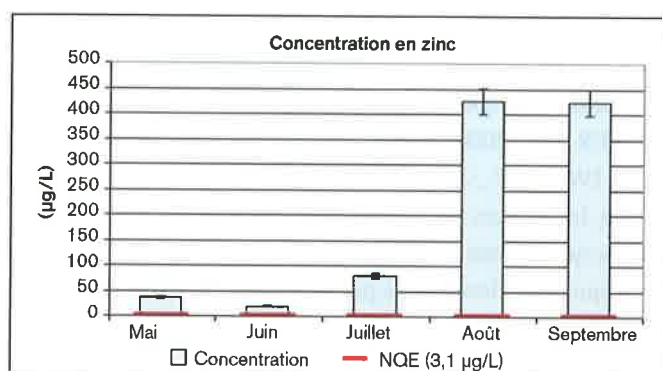


Figure 4. Concentration en Zn dans les pluies de mai à septembre 2011 et normes de qualité environnementales (NQE) de l'application de la DCE à l'échelle nationale

2.3. Éléments traces métalliques en sortie du système

2.3.1. Évolution des teneurs dans les végétaux

Après 6 mois de développement sur les parcelles végétalisées, l'évolution des teneurs en ETM dans les parties aériennes et racinaires de *S. album* et de *S. reflexum* g. reste limitée. Il est toutefois à noter une augmentation non négligeable des teneurs dans les racines en Cr (jusqu'à 10 % pour *S. reflexum* g. et 15 % pour *S. album*) et Ni (jusqu'à 50 % dans *S. reflexum* g. et 25 % pour *S. album*) avec également une légère augmentation dans les parties aériennes (de l'ordre de 5 %), malgré la faible phytodisponibilité évaluée par extraction au CaCl_2 (§ 2.1.1). Cela peut s'expliquer par une inadéquation entre le test d'extraction choisi et le contexte (végétaux, nature des substrats et ETM considérés). En effet, il n'existe pas de méthode d'extraction universelle permettant d'évaluer la phytodisponibilité de tous les ETM pour tous les végétaux [TREMEL-SCHAUB et FEIX, 2000]. D'autres méthodes d'extraction seront donc testées par la suite. En outre, une fois mis en place sur la toiture, les matériaux sont soumis à de nombreux phénomènes (variation des teneurs en eau et de la température, activités microbiologiques, exsudats issus des végétaux...) qui peuvent modifier la mobilité des ETM initialement présents.

2.3.2. Concentrations en éléments traces métalliques en sortie de toitures végétalisées

Globalement, les ordres de grandeur des concentrations en ETM dans les eaux en sortie de toitures végétalisées obtenues sont proches de celles observées

dans la littérature (notamment CZEMIEL BERNDTSSON et coll. [2006, 2009] ; BATES et coll. [2007]), mis à part pour le zinc qui est souvent présent à des concentrations sensiblement plus élevées en sortie de toiture, mais également dans les dépôts atmosphériques. Comme évoqué dans les travaux existants sur le sujet [CZEMIEL BERNDTSSON, 2010], l'impact de ces structures végétalisées sur les concentrations en ETM est mitigé. On observe notamment une augmentation systématique des teneurs en arsenic, en particulier pour les structures disposant d'argile expansée en drainage, montrant la solubilité de cet élément dont la présence a été identifiée lors du bilan initial. Pour le B, Ni et Zn, les concentrations en sortie sont généralement supérieures à l'entrée, mais pour le Cd, Cr, Cu et Pb, on observe une diminution des concentrations dans la majorité des cas entre l'entrée (dépôts atmosphériques globaux ou DAG représenté par la première barre de la figure 5) et la sortie pour les différentes toitures végétalisées de mai à décembre 2011 (figure 5).

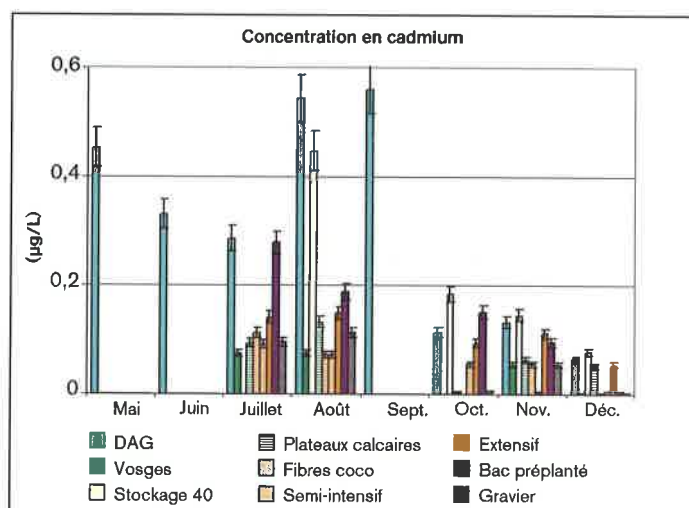


Figure 5. Diminution des concentrations en cadmium en sortie de toitures végétalisées par rapport aux dépôts atmosphériques globaux (DAG), de mai à décembre 2011

2.3.3. Flux d'éléments traces métalliques en sortie de toitures

L'évaluation de l'impact de ces structures sur les concentrations ne prend cependant pas en compte la capacité de rétention des toitures végétalisées, fonction établie de ces structures [MENTENS *et al.*, 2006]. Sur la période de mai à décembre 2011, celle-ci dépasse les 75 % pour la structure « stockage 40 », retient jusqu'à 75 % du volume d'eau apporté par les pluies et les autres structures végétalisées de l'ordre

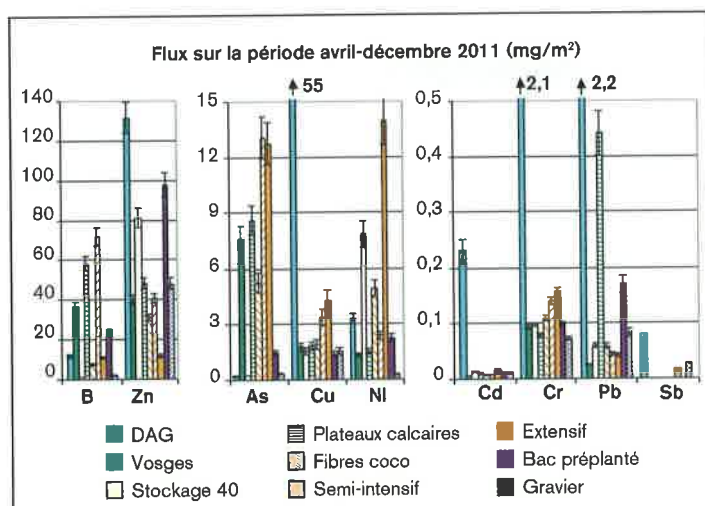
Parcelle	Diminution du volume d'eau entre l'entrée et la sortie de la structure sur la période de mai à décembre 2011 (%)
Vosges	64
Stockage 40	77
Plateaux calcaires	63
Fibre coco	63
Semi-intensif	67
Extensif	45
Bac préplanté	59
Gravier	36

Tableau III. Capacité de rétention des parcelles expérimentales sur la période de mai à décembre 2011

de 45 à 65 % contre 35 % pour la parcelle « gravier » (tableau III). Ainsi, même si les eaux sont fréquemment plus concentrées en sortie qu'en entrée, les flux totaux de polluants pourraient être moindres. Le calcul de ces flux nécessite la prise en compte des volumes d'eau entrants et sortants. Ces volumes mensuels multipliés par les concentrations sur le mois correspondant et rapportés à la surface des toitures permettent d'obtenir des flux surfaciques d'ETM, soit une masse d'ETM par m² et par mois en entrée (ETM apportés par les dépôts atmosphériques) et en sortie de toiture. Par la suite, ces flux mensuels ont été sommés sur toute la période pour laquelle des données étaient disponibles, à savoir de mai à décembre 2011.

Ainsi, si l'on prend en compte les flux de polluants en sortie de toitures végétalisées, on observe un impact positif non négligeable et systématique de ces structures pour le Cd, Cr, Cu, Pb, Sb et Zn. Pour les différents ETM, les flux entrants via les dépôts atmosphériques globaux (DAG) sont représentés par la première barre dans la figure 6, ensuite les barres suivantes représentent les flux en sortie des différentes toitures végétalisées et de la toiture témoin en gravier. Les fortes capacités de rétentions du cadmium et du plomb sont notamment en adéquation avec les résultats obtenus pour ces ETM par KÖHLER et SCHMIDT [2003] et pour le zinc avec ceux de CZEMIEL BERNDTSONN et BENGTSOON [2005]. Les impacts des différentes structures sur ces résultats sont variables, montrant l'influence des matériaux utilisés. Par exemple, les toitures végétalisées avec un drainage en argile expansée ont de

meilleures capacités de rétention du zinc. Cela est en adéquation avec des essais menés en laboratoire en parallèle visant à caractériser les cinétiques et capacités d'adsorption de Cu et Zn par les matériaux utilisés sur ces sites expérimentaux [SCHAAL, 2012]. En outre, mis à part pour le nickel et le chrome, au moins une structure végétalisée a une capacité de rétention plus intéressante que le gravier. Il est donc possible de choisir des matériaux à l'impact positif sur les flux de polluants en sortie de toiture végétalisée. Ainsi le flux de cuivre en entrée (55 mg/m² sur la période avril-décembre 2011) descend à 13,8 mg/m² en sortie de toiture avec le bac préplanté. Pour le zinc, les flux d'entrée (132 mg/m²) sont divisés par plus de dix en sortie de toiture « extensive » (11,6 mg/m²). Enfin, pour la toiture des Vosges, les flux de cadmium et de plomb passent respectivement de 0,23 mg/m² et 2,2 mg/m² en entrée à 0,005 mg/m² et 0,026 mg/m² en sortie.



DAG : dépôts atmosphériques globaux.

Figure 6. Évolution des flux d'éléments traces métalliques entre l'entrée et la sortie des toitures végétalisées

Conclusion

Dans le cadre d'un projet de recherche pluridisciplinaire visant notamment à caractériser les capacités thermiques et épuratoires des toitures végétalisées, huit structures végétalisées et une structure témoin gravillonnée ont été construites à l'automne 2010 sur les toitures du LRPC de Nancy. Les expérimentations relatives à la qualité des eaux ont débuté au printemps 2011 et de premières informations sont disponibles pour les substrats et l'argile expansée, l'un des

matériaux de drainage. Ceux-ci ne sont pas exempts d'éléments traces métalliques, l'un d'entre eux présente même des teneurs relativement élevées de Cr et de Ni, en comparaison à des fonds géochimiques que l'on peut classiquement trouver en France. En outre, mis à part le Cd, ces ETM apparaissent comme faiblement extractibles à CaCl_2 . En ce qui concerne les eaux en sortie de toitures végétalisées, la tendance est majoritairement à l'augmentation des concentrations en sortie par rapport à l'entrée pour As, B, Ni et Zn et à la diminution pour les autres ETM. Cependant, ces toitures végétalisées expérimentales retiennent un volume d'eau non négligeable. Ainsi, les flux surfaciques de polluants en sortie de toitures végétalisées sont systématiquement inférieurs aux flux entrants pour Cu, Cd, Cr, Pb, Sb et Zn. En outre, les résultats varient entre les structures, soulignant l'impact des différents matériaux utilisés. La caractérisation initiale ainsi que les premiers résultats d'études en

laboratoire corroborent d'ailleurs certaines de ces variations. Des matériaux ont donc déjà pu être identifiés comme source principale d'arsenic ou encore adsorbeur performant de Zn, permettant d'établir des premières pistes pour la construction de toitures végétalisées aux capacités épuratoires optimisées.

Remerciements

Nous remercions Batec Lorraine, Comptoir du Bâtiment, Falienor, 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

- AZIMI S., LUDWIG A., THÉVENOT D., COLIN J.L. (2003) : « Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas ». *Science of the Total Environment* ; 308 : 247-256.
- BAIZE D. (2000) : « Teneurs en métaux lourds dans les sols français. Résultats généraux du programme Aspitet ». *Courrier de l'environnement de l'INRA* ; 22 : 39-54.
- BAKER A.J.M., MC GRATH S.P., REEVES R.D., SMITH J.A.C. (2000) : « Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils ». In : Terry N., Bañuelos G. (eds.), *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, p. 85-107.
- BARRAUD S., BACOT L., BEDELL J.P., BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., CHERQUI F., CLOZEL B., et al. (2009) : *Guide technique : recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Version 2*. Programme Écopluies, janvier 2009, 63 p.
- BATES A., GRESWELL R., MACKAY R., SADLER J., TELLAM J. (2007) : « Inaugural green roof research in Birmingham, UK: configuration and preliminary results ». 2nd Switch Scientific Meeting, Tel Aviv, Israel, 25-29 November 2007, 10 p.
- CZEMIEL BERNDTSSON J., BENGTSSON L. (2005) : « The influence of extensive vegetated roofs on runoff water pollution loads ». 10th International Conference on Urban Drainage, 2005, 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., BARRILLON B., COQUERY M., CREN-OLIVÉ C. (2008) : « Prototype 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, 2010, INSA de Lyon, 267 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.
- HORNE A. (2000) : « Phytoremediation by constructed wetlands ». In : Terry N., Bañuelos G. (eds.), *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Lewis Publishers, 2000, Boca Raton, FL, p. 14-37.
- KAMAL M., GHALY A.E., MAHMOUD N., CÔTÉ R. (2004) : « Phytoremediation of heavy metals by aquatic plants ». *Environment International* ; vol. 29 : 1029-1039.
- KÖHLER M., SCHMIDT M. (2003) : *Study of extensive Green Roofs in Berlin: Part III Retention of Contaminants*. International Report, Technical University of Berlin.

LAMPREA K., RUBAN V. (2008) : « Micro pollutants in atmospheric deposition, roof runoff and storm water runoff of a suburban Catchment in Nantes, France », 11th International Conference on Urban Drainage, Edinbourg, Écosse, UK, 8 p.

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.

MENTENS J., RAES D., HERMY M. (2006) : « Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? ». *Landscape and Urban Planning* ; vol. 77, issue 3 : 217-226.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008) : *Urban Stormwater Management in the United States*. The National Academies Press, Washington D.C., 529 p.

ROBERT-SAINTE P. (2009) : *Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 426 p.

SCHAAL L. (2012) : *Caractérisation de l'adsorption du cuivre et du zinc par les matériaux de toiture végétalisée*. Mémoire de Master, Université de Bordeaux 1, 34 p.

TREMEL-SCHAUB A., FEIX I. (2000) : *Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes*. EDP Sciences et Ademe éditions, 413 p.

WU Q.T., WEI Z.B., OUYANG Y. (2007) : « Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: effects of chelator and co-planting ». *Water, Air and Soil Pollution* ; vol. 180 : 131-139.

Résumé

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

Rejets et rétentions d'éléments traces métalliques par les toitures végétalisées. Premiers résultats d'une expérimentation *in situ*

Avec un marché en développement en France, les multiples avantages souvent vantés des toitures végétalisées en feraient une technique de choix pour répondre aux objectifs d'aménagement durable fixés par les récents plans et réglementations comme le Grenelle de l'environnement et les concours Écoquartiers. Cependant, trop peu d'études existent à ce jour pour permettre de confirmer et chiffrer les fonctions des toitures végétalisées. Le Centre d'études techniques de l'environnement (CETE) de l'Est a donc lancé un projet de recherche pluridisciplinaire visant à mieux comprendre leurs impacts sur différents paramètres tels que la qualité des eaux, la thermique du bâtiment et la microclimatologie urbaine ainsi que la biodiversité. L'état de l'art dans le domaine de l'épuration des eaux pluviales montre des résultats mitigés expliqués notamment par le fait que ces toitures ne sont pas pensées pour

épurer ces eaux. En partenariat avec sept entreprises, huit toitures-terrasses du laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Nancy ont été végétalisées avec différents types de matériaux. Ce site expérimental grandeur nature permettra d'évaluer l'impact de ces différents types de structures en vue d'établir des préconisations pour la construction d'une toiture végétalisée permettant d'optimiser conjointement son pouvoir épurateur sur les éléments traces métalliques, son pouvoir isolant et sa capacité à être un vecteur de biodiversité en ville. Les premiers résultats sur les caractéristiques des substrats montrent notamment des teneurs en métaux parfois significatives, mais également une faible mobilité de ces éléments. Par ailleurs, les flux de polluants sortant des toitures sont inférieurs à ceux apportés en entrée par les dépôts atmosphériques pour la majorité des métaux.

Abstract

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

Leaching and retention of metals by green roofs. First results of an *in situ* experimentation

Thanks to their supposed benefits, green roofs are often held up as one of the preferred techniques to reach the objectives of sustainable development established by the recent French policies such as the Grenelle de l'environnement. However, there is a lack of scientific studies, which would allow to confirm and quantify these green roofs functions. The CETE de l'Est launched in 2009 a multi-disciplinary project, which aims to provide a better understanding of their impacts on water quality, building thermal isolation, urban heat island and biodiversity. Concerning rainwater purification, the state of the art shows mixed results, which can be explained by

the fact that green roofs are not designed to purify waters. Eight green roofs with different materials have been built on the LRPC of Nancy thanks to seven industrial partners. This real-size experimental site will allow to establish recommendations for the construction of green roofs with optimised thermal, water purification and biodiversity-enhancement functions. The first results show that substrates and a drainage material contain significant metals amount with a low mobility. Besides, for most of the substances the amounts of metals coming from the green roofs are smaller than the amount brought by atmospheric deposits.