

Améliorer la gestion du ruissellement des eaux de pluie dans les zones urbaines grâce aux toits végétalisés

■ C. VAN MECHELEN^{1,2}, T. DUTOIT², M. HERMY¹

Mots-clés : toits végétalisés, gestion du ruissellement des eaux de pluie, changement climatique, milieu urbain, biodiversité

Keywords: green roofs, stormwater runoff management, climate change, urban environment, biodiversity

Introduction

La croissance de la population mondiale et l'augmentation de la demande de logements ne sont pas des faits nouveaux. Dans les pays développés, le niveau d'urbanisation continue à augmenter et devrait atteindre 83 % en 2030 [1]. L'espace de construction devient de moins en moins disponible et la qualité de vie générale y diminue régulièrement. Les espaces verts sont remplacés par des nouveaux bâtiments avec, pour résultat, des villes moins attrayantes pour y vivre et y travailler. La qualité de vie en ville est également encore réduite par les températures élevées et une plus faible humidité de l'air, un phénomène déjà décrit comme « l'effet d'îlot de chaleur » [25]. En outre, la chaleur et la pollution de l'air causent des problèmes importants pour la santé. Leurs impacts négatifs devraient de plus s'intensifier avec le changement climatique [15]. Les bâtiments consomment également beaucoup d'énergie (+ 22 % depuis 1990), ce qui a aussi des effets nuisibles sur l'environnement et la santé humaine [2]. La croissance de l'étanchéité des surfaces (+ 21 % depuis 1955) et la réduction des espaces verts pourront ainsi entraîner des effets hydrologiques importants, comme une augmentation du ruissellement de l'eau, du rythme des inondations et de l'érosion des sols.

En raison de nombreux problèmes environnementaux, la gestion du ruissellement de l'eau a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années [24]. Quelques méthodes de gestion efficaces peuvent être notamment la création de plantations pour capter les eaux pluviales (conteneurs qui interceptent l'eau détournée du toit), de canaux ouverts (systèmes d'adduction végétalisés), de zones humides et, enfin, de toits végétalisés. Ces derniers sont un des aménagements les plus importants en lien avec le manque d'espace dans les zones urbaines et les grandes surfaces de toits inutilisés (40-50 % de surfaces imperméables) [8]. Les toits végétalisés peuvent alors être considérés comme le produit d'une sorte d'ingénierie écologique [9, 10], car ce sont en effet des écosystèmes artificiels qui imitent plusieurs propriétés de la végétation généralement absente sur un toit traditionnel [26]. Ils sont ainsi capables de procurer des services écosystémiques comme la production d'oxygène, l'épuration naturelle des eaux, la pollinisation et la séquestration naturelle de carbone. L'intérêt pour mettre en œuvre des toits végétalisés a augmenté exponentiellement au cours des dernières décennies, notamment dans les régions tempérées de l'Europe et de l'Amérique du Nord [11]. La couverture totale de toits végétalisés en Allemagne a ainsi augmenté en moyenne de 13,5 millions de m² par an [26]. En France, la surface des toits végétalisés extensifs et semi-intensifs (profondeur de substrat < 20 cm) a atteint 1 million de m² en 2011, et devrait s'élever à environ 1,5 million de m² en 2015 [20]. Le

¹ Department of Earth and Environmental Sciences – Division of Forest, Nature and Landscape – KU Leuven – Celestijnenlaan 200E – 3001 Heverlee – Belgique.

² CNRS-IMBE – IUT Avignon – Site Agroparc – BP 61207 – 84911 Avignon cedex 9 – France.

marché des toits végétalisés est en pleine expansion. À l'échelle mondiale, on prévoit donc un doublement des installations au cours des 5 années à venir. L'utilisation des énergies renouvelables et la mise en place de toits végétalisés à grande échelle auraient un impact significatif pour diminuer la consommation d'énergie et la pollution, permettant ainsi une augmentation de la qualité de la vie en milieu urbain [27].

1. La polyvalence des toits végétalisés

Les toits végétalisés sont constitués essentiellement de toits sur lesquels une couche de végétation est présente au-dessus d'un nombre de couches de matériaux techniquement adaptés, comme une couche antiracinaire, une couche drainante et un substrat minéral.

Ils offrent plusieurs avantages économiques et environnementaux qui peuvent être classés en trois catégories principales : la gestion du ruissellement des eaux de pluie, la conservation de l'énergie et la création d'habitats supplémentaires dans les zones urbaines [26]. Du fait de tous leurs avantages, il n'est pas surprenant que la valeur marchande des bâtiments urbains avec un toit végétalisé soit plus élevée et que ce type de bâtiment soit de plus en plus demandé. En matière de durabilité, les toits végétalisés extensifs sont de plus à privilégier par rapport aux toits végétalisés intensifs. En effet, les toits du type extensif possèdent des fonctions différentes, y compris d'isolation thermique et de contrôle du ruissellement des eaux de pluie, sans nécessiter de mesures supplémentaires d'irrigation et d'entretien. En plus, ils possèdent un substrat mince (< 20 cm) afin que leur poids soit relativement faible et qu'ils soient alors intéressants pour être appliqués sur des nouvelles constructions dans le cas de travaux de rénovation [26]. En revanche, les toitures végétalisées intensives ont, quant à elles, un effet plus grand sur la rétention d'eau, l'isolation et la biodiversité (espèces horticoles). Mais une évaluation précise de la capacité portante du bâtiment est alors essentielle du fait de leur substrat plus épais et lourd (souvent > 500 kg/m²). En outre, elles exigent une maintenance plus fréquente et demandent plus d'irrigation, ce qui augmente au final l'empreinte écologique de ce type de toitures.

2. Toits végétalisés et gestion du ruissellement des eaux de pluie

Dans les zones urbaines, la gestion des eaux pluviales comprend, d'une part, le contrôle de la quantité du ruissellement et, d'autre part, la qualité de l'eau urbaine. Les toits végétalisés pourraient atteindre ces objectifs en même temps et donc contribuer ainsi à des environnements urbains plus durables [29]. Ces deux aspects sont discutés ci-dessous.

2.1. Importance des eaux de ruissellement

La figure 1 représente un diagramme schématisé de la situation après une pluie torrentielle, pour un toit traditionnel et un toit végétalisé. L'effet d'un toit végétalisé se manifeste par :

- (i) : un retard initial du ruissellement en raison de l'absorption d'eau dans le système de toit végétalisé. Une étude de CARTER et RASMUSSEN a ainsi montré une augmentation moyenne du temps de latence de ruissellement d'environ 18 minutes sur un toit végétalisé, comparée avec un toit bituminé [4] ;
- (ii) : une réduction du volume du ruissellement par rétention d'une partie de la précipitation. L'eau retenue s'évaporerait ou sera utilisée par les plantes dont une partie sera transpirée [5]. La capacité de rétention annuelle est très variable. En général, 75 % pour les toitures vertes intensives et 45 % pour les toitures végétalisées extensives [23] ;
- (iii) : une distribution de l'eau de ruissellement sur une plus longue période de temps.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la capacité de rétention et la dynamique du ruissellement de l'eau [5].

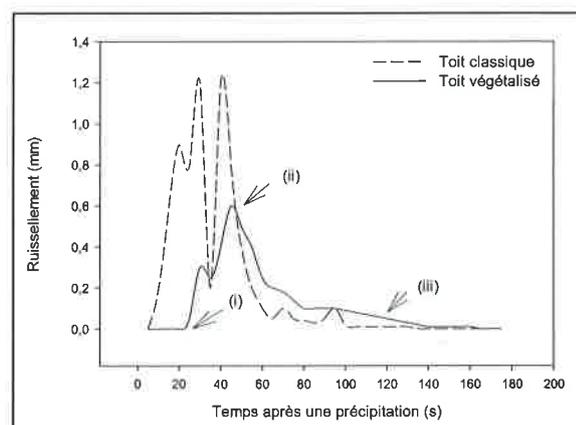


Figure 1. Réponse temporelle du ruissellement après une précipitation (adapté de [16])

Ils correspondent notamment aux caractéristiques du toit végétalisé, y compris le nombre de couches, le type de matériel, la profondeur du substrat, le type de végétation, son âge, sa position et la géométrie du toit. Plus le substrat est profond, et plus l'eau sera retenue [3, 23].

Par ailleurs, les conditions météorologiques sont également importantes comme la saison, le climat et l'intensité de la pluie. En hiver, moins d'eau sera retenue par rapport à l'été parce que, la plupart du temps, le substrat sera saturé [23]. La végétation retient aussi significativement plus d'eau en été à cause des températures et de l'évapotranspiration plus élevées [22, 28].

Pendant des petites tempêtes de pluie, environ 90 % de celle-ci peut être retenue, ce pourcentage tombe à 50 % pour les tempêtes plus importantes [4]. MENTENS et coll. ont ainsi calculé les effets des toitures extensives sur la rétention de l'eau de pluie dans la cité de Bruxelles. Si 10 % des bâtiments avaient un toit végétalisé extensif, la région totale pourrait bénéficier d'une réduction de ruissellement de 2,7 %. En général, les toits végétalisés sont donc un outil utile pour réduire le ruissellement dans des zones urbaines, mais d'autres mesures devraient bien évidemment être envisagées pour résoudre complètement ce problème [23].

2.2. Qualité des eaux de ruissellement

Pendant un orage, la pollution est mobilisée sur les surfaces imperméables et transportée avec l'eau, ce qui implique que le ruissellement urbain serait donc plus pollué que la précipitation en elle-même [7]. L'eau de ruissellement des toits classiques peut contenir des métaux lourds ou même toxiques, alors que les toits végétalisés réduisent la quantité d'eau de ruissellement, limitant ainsi la quantité de contaminants lors de la montée des eaux pluviales [3]. En général, la qualité de l'eau de ruissellement des toits végétalisés dépend des caractéristiques du toit (profondeur et composition du substrat, végétation, âge), de la maintenance, de l'environnement, de la saison, de l'ampleur de la précipitation et des sources de pollutions locales [7, 27]. CZEMIEL BERNDTSSON et coll. ont montré que les toits végétalisés extensifs sont une source de carbone organique dissous, de

phosphore et de potassium et qu'ils agissent comme un puits pour l'azote nitrique et l'azote ammoniacal [6, 7]. L'eau de précipitation ne contient que du phosphore dans des quantités insignifiantes, alors que le phosphore dans l'eau provenant d'un toit végétalisé est principalement attribuable à l'application d'engrais artificiel, soit durant la période de fabrication, soit durant la maintenance annuelle [7]. En ce qui concerne des métaux comme le zinc, le cuivre et le plomb, ils sont présents à des concentrations minimales et encore moins que les quantités typiques provenant du ruissellement d'eau urbaine [6]. Le pH de l'eau de pluie peut être un peu acide (valeurs entre 5 et 6). Les toits végétalisés peuvent également atténuer l'acidité de cette eau par l'augmentation de la valeur de pH à 7 et 8 [5].

Dans l'ensemble, il semble que les toits végétalisés aient un effet positif sur la qualité de l'eau, en absorbant et filtrant des polluants [27]. Cependant, bien que le ruissellement de l'eau des toits végétalisés ait une meilleure qualité par rapport aux toits traditionnels, les toitures végétalisées ne peuvent pas être considérées comme des outils de traitement de l'eau de pluie [6]. La qualité de l'eau de ruissellement pourrait encore être améliorée par une réduction de la fertilisation. Des recherches permettant la mise en place de substrats plus inertes et des plantes spécialement choisies pour l'absorption des nutriments et des contaminants pourraient ainsi encore atténuer l'effet de la pollution.

3. L'avenir des toits végétalisés dans un contexte de changement climatique

On peut dire aujourd'hui avec certitude que le changement climatique aura un impact sur l'environnement urbain. Des effets peuvent déjà y être observés et il y a donc un besoin urgent de développer des stratégies alternatives [14]. Globalement, les températures devraient augmenter entre 0,1-0,4 °C par décennie [17]. Un changement dans les précipitations est aussi attendu avec une augmentation en Europe du Nord et une diminution dans le Sud [19]. Plus spécifiquement, la fréquence des orages intenses augmentera avec, comme conséquence, plus de risques d'inondation [5, 33]. En été, les périodes de sécheresse seront plus fréquentes [14].

Dans une étude récente de VAN UYTRECHT et coll. [32], un modèle pour calculer le ruissellement d'un toit bitumineux (BIT) et de toits végétalisés extensifs comprenant des types de végétations différentes : *Sedum*-mousses (SM) et graminées-herbes (GH) a été proposé. Ce modèle a été testé avec les données climatiques de 1981-2010 (période de référence) en comparaison de projections pour 2050, basées sur des ensembles multimodèles régionaux (RCM) et globaux (GCM). Les modèles de climat pour 2050 prévoient une diminution importante des précipitations et une augmentation de l'évapotranspiration en été. Dans la période de référence estivale, le ruissellement des deux types de toit végétalisé était sensiblement plus bas que celui du toit en bitume. Une différence entre les deux types de toit végétalisé a également été mesurée, avec un taux de ruissellement plus bas pour les toits GH par rapport aux toits SM. Le ruissellement relatif médian (ruissellement/précipitation), qui est une mesure de l'efficacité de la réduction du ruissellement, est de 24 % pour GH, 36 % pour SM et seulement 90 % pour les toits en bitume. En hiver, le ruissellement médian devrait augmenter sur tous les types de toit en raison de l'accroissement des précipitations projetées. Le ruissellement médian estival futur serait alors plus faible (GCM) ou relativement identique (RCM) par rapport à la période de référence. Néanmoins, les toits végétalisés montrent une meilleure réduction du ruissellement que les toits en bitume. L'étude a aussi indiqué l'existence d'un compromis majeur entre le potentiel de réduction des eaux de ruissellement et la vulnérabilité des plantes à la sécheresse. Bien que l'eau de pluie soit plus retenue par GH que SM, le premier type de végétation est plus sensible au stress hydrique. Dans le futur, les toits végétalisés restent donc une option pertinente pour réduire le ruissellement, surtout en été. Mais les concepteurs devront aussi tenir compte du compromis « efficacité de réduction de l'écoulement de l'eau de pluie – vulnérabilité au stress hydrique ». Un examen attentif du choix d'espèces pour sélectionner des plantes aux caractéristiques optimales pour une utilisation sur les toits végétalisés extensifs est alors essentiel.

4. La conception de toits végétalisés pour les régions méditerranéennes

Jusqu'à présent, la mise en place des toits végétalisés a été développée principalement pour les régions tempérées (nord et centre de l'Europe et Amérique du Nord) où les conditions climatiques et le régime pluvial sont favorables à la croissance de la végétation [12]. En ce qui concerne la région méditerranéenne, les toits végétalisés n'y sont pas souvent mis en place et les études scientifiques sur ce sujet sont très limitées. L'industrie des toits végétalisés a également des doutes sur le succès de tels projets dans cette région en raison des effets du climat (sécheresse estivale, températures élevées) sur les plantes généralement utilisées. Cependant, l'installation des toits végétalisés aurait un effet positif sur l'atténuation du ruissellement de l'eau, car les précipitations peuvent y être très violentes [12]. Ces pluies violentes sont, comme cité précédemment, aussi attendues dans le futur pour les régions à climat tempéré à cause du changement climatique scénarisé. On peut donc supposer qu'il y aura les mêmes problèmes dans le futur pour l'industrie des toits végétalisés dans ces régions également.

Un deuxième problème concerne la biodiversité. Dans un monde en mutation, un grand nombre d'espèces seront nécessaires pour maintenir la multifonctionnalité des écosystèmes aux grandes échelles spatio-temporelles [18]. Il y a donc des besoins pour un choix plus vaste d'espèces régionales appropriées aux conditions écologiques des toits végétalisés.

Afin de résoudre ces problèmes, l'université catholique de Louvain (KU Leuven) en collaboration avec l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie (IMBE) ont lancé un projet scientifique en 2011. Ce projet a notamment pour but de trouver de nouvelles espèces végétales indigènes de la région méditerranéenne où la végétation y présente les adaptations nécessaires à la survie dans des conditions environnementales extrêmes. Il est possible de trouver des espèces adaptées en regardant le microclimat des toits végétalisés extensifs (profondeur du substrat, régime de température et humidité, etc.) et en comparant celui-ci avec l'habitat originel des plantes [13]. Il apparaît en effet que des espèces qui vivent dans des

conditions extrêmes, comme des milieux rocheux et calcaires, des dunes très perméables et des zones sur substrats très superficiels, seront aussi capables de s'adapter sur les toits végétalisés, où les conditions environnementales sont quasi semblables [8, 21].

4.1. Étude de la végétation méditerranéenne

Au cours de la saison de croissance en 2011, la végétation du sud de la France a été étudiée. 20 stations dans une zone de 190 × 130 km incluse dans les régions du Languedoc-Roussillon et de Provence-Alpes Côte d'Azur ont été visitées. Au total, 253 parcelles de 1 m² ont été inventoriées où 372 espèces de plantes ont été identifiées, avec en moyenne 18 espèces par parcelle. La description et l'analyse des habitats sélectionnés ont fourni des informations sur ces espèces locales et les variables environnementales importantes [30]. Quatre groupes d'habitats ont pu être distingués avec différentes caractéristiques climatiques, géographiques et les propriétés liées au sol. Trois quarts (75,5 %) des espèces de toits végétalisés couramment utilisées dans le nord-ouest de l'Europe sont des hémicryptophytes (plantes biannuelles ou vivaces dont seuls les bourgeons au niveau du sol survivent durant les périodes défavorables). Or les plantes annuelles ne sont actuellement presque jamais prises en compte pour la réalisation des toits végétalisés. Les plantes annuelles constituent cependant une grande partie de la végétation dans le sud de la France (36 %). Ces types de plantes ont des traits spéciaux qui pourraient alors garantir la perfor-

mance des toits végétalisés dans les régions où les conditions météorologiques sont difficiles. Un mélange de différents types végétaux (y compris les plantes succulentes, les annuelles et les plantes herbacées) serait avantageux pour le fonctionnement global des toits végétalisés. Cette partie de la recherche a ainsi montré que les habitats naturels peuvent inspirer et améliorer la conception des toits végétalisés.

4.2. Phase de sélection

La deuxième partie de la recherche se composait d'une analyse des traits des espèces des toits végétalisés couramment utilisés en Europe du Nord-Ouest, analyse basée notamment sur leurs caractéristiques liées à leur tolérance à la sécheresse et à leur cycle (stratégie de régénération, durée de vie, viabilité des graines dans le sol, etc.). Les traits les plus importants pour la survie sur un toit végétalisé ont été intégrés dans un système de critères à plusieurs niveaux hiérarchiques. C'est une sorte de clé de sélection qui permet de choisir les espèces les plus adaptées. Avant d'utiliser la clé, quelques critères évidents ont été pris en compte au préalable pour éliminer les espèces sans aucun intérêt, par exemple celles dont la profondeur racinaire est supérieure à 20 cm ; pas de tolérance à la sécheresse ou au stress en général ; forme de vie de type phanérophyte (arbres) ; hauteur de la plante > 1 m. La clé de sélection a ensuite été utilisée sur la liste des plantes méditerranéennes réalisée lors de l'étude de la végétation. Le *tableau I* indique les espèces qui possèdent les meilleurs scores. Les

Espèces des toits végétalisés déjà utilisées	Forme de vie	Nouvelles espèces proposées	Forme de vie
<i>Sedum album</i>	H	<i>Silene otites</i>	H
<i>Sedum acre</i>	H	<i>Petrorhagia prolifera</i>	A
<i>Sedum dasyphyllum</i>	H	<i>Plantago coronopus</i>	H
<i>Thymus praecox</i>	H	<i>Polygala vulgaris</i>	H
<i>Thymus serpyllum</i>	H	<i>Bupleurum falcatum</i>	H
<i>Draba aizoides</i>	H	<i>Centaurium erythraea</i>	A
<i>Hippocrepis comosa</i>	H	<i>Galium boreale</i>	H
<i>Alyssum montanum</i>	H	<i>Veronica chamaedrys</i>	H
<i>Galium verum</i>	H	<i>Alyssum alyssoides</i>	A
<i>Helianthemum nummularium</i>	H	<i>Artemisia campestris</i>	H

Tableau I. Liste des plantes méditerranéennes possédant les meilleures potentialités pour une utilisation sur des toits végétalisés extensifs. À gauche : plantes déjà utilisées. À droite : nouvelles plantes. Leurs formes de vie sont également indiquées (H = hémicryptophyte ou plante en rosettes ; A = thérophyte ou plante annuelle) (adapté de [31])

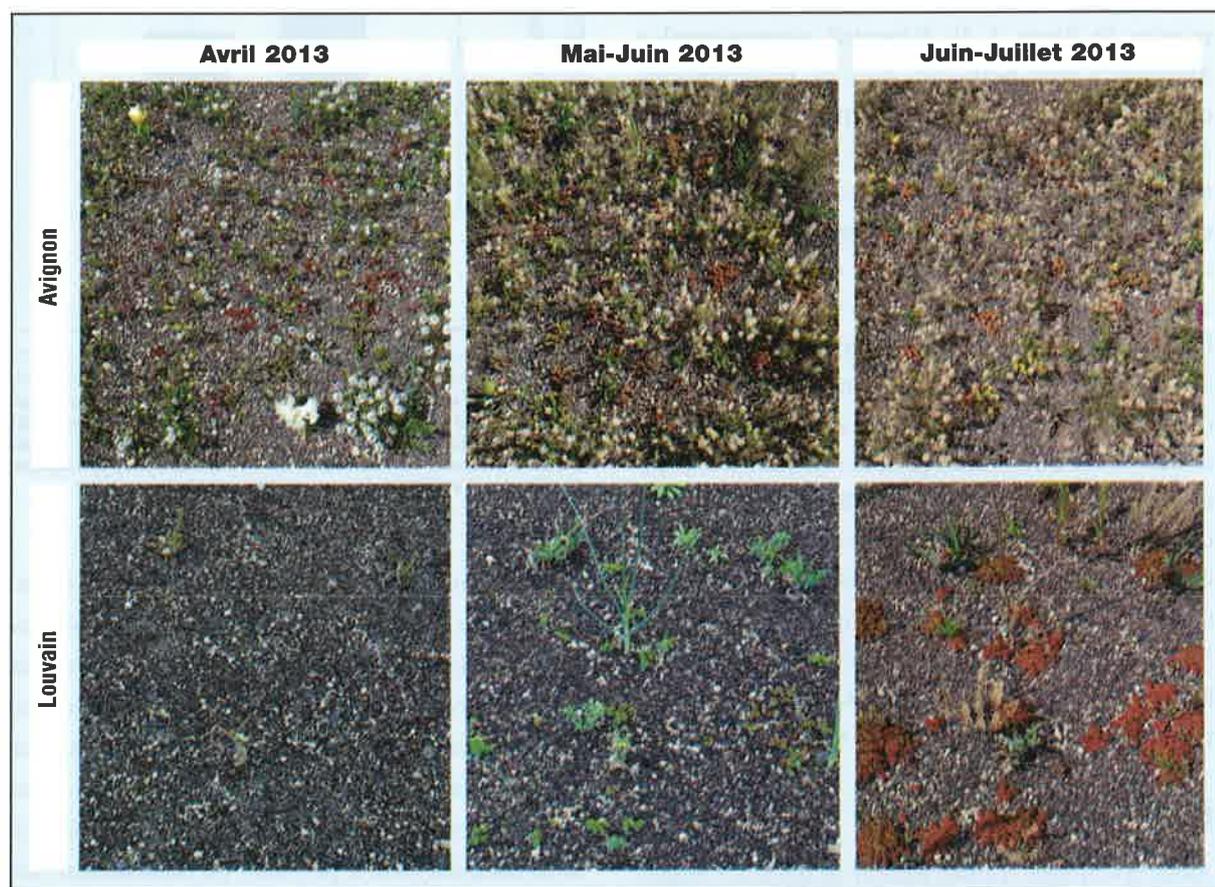
espèces de *Sedum* (espèces succulentes) paraissent avoir les meilleures propriétés pour un usage sur les toits végétalisés extensifs méditerranéens, suivies par les thym. Dans la liste des espèces déjà utilisées sur des toits végétalisés, il n'y a que des hémicryptophytes. En revanche, dans la liste avec les nouvelles espèces méditerranéennes que nous avons identifiées, quelques annuelles sont présentes, cela conforte alors notre position sur l'importance de ce type de végétaux. L'approche basée sur les caractéristiques des plantes a fourni une sélection *a priori* des attributs nécessaires pour qu'une plante puisse être considérée lors de la conception d'une toiture végétalisée. Le système de sélection multicritère peut alors guider les urbanistes dans leur recherche d'espèces de plantes locales appropriées.

4.3. Phase expérimentale

Actuellement, un sous-ensemble d'espèces de plantes potentielles est testé sur des toits végétalisés de façon

expérimentale à deux endroits différents : Avignon en France (climat méditerranéen) et Louvain en Belgique (climat tempéré). La performance des plantes est testée à l'ombre ou en plein soleil, de manière individuelle ou en mélange, et avec trois configurations pour le substrat : 5 cm de substrat pour des toits végétalisés extensifs (entreprise Peltracom) ; 5 cm de substrat plus une couche de mousse artificielle pour la rétention de l'eau (« Polygrow » de l'entreprise Recticel) ; 10 cm de substrat plus la couche de mousse artificielle. L'expérience a été installée en novembre 2012 et sera suivie pendant deux ans.

Après un premier contrôle en avril 2013, une grande différence entre les deux localités (en France et en Belgique) a pu déjà être mesurée. À Louvain, une grande partie des graines avait ainsi germé au printemps. Mais, à cause du mauvais temps (gel persistant, chutes de neige répétées), les plantes n'ont pas eu la possibilité de se développer (figure 2). En



Photos : C. Van Mechelen UMR CNRS-IRD IMBE et KU Leuven.

Figure 2. Dynamique de la végétation dans une des 18 parcelles expérimentales (10 cm de substrat plus couche de rétention) au début des mesures (avril 2013), en mai-juin et en juin-juillet 2013, à Avignon (en haut) et Louvain (en bas)

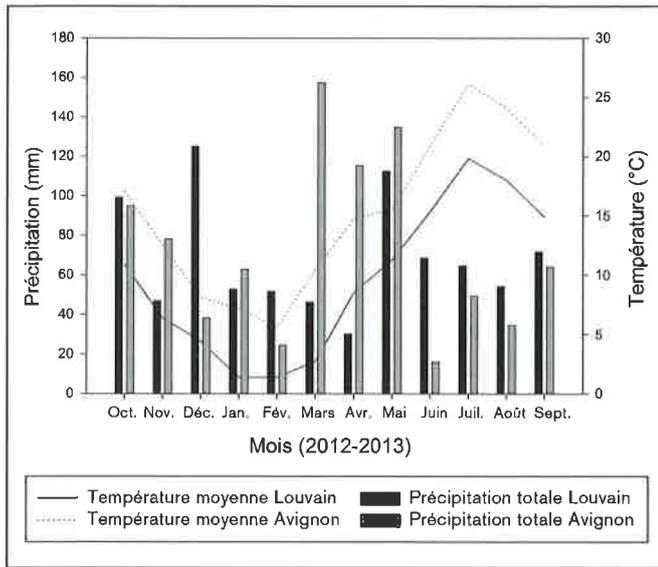
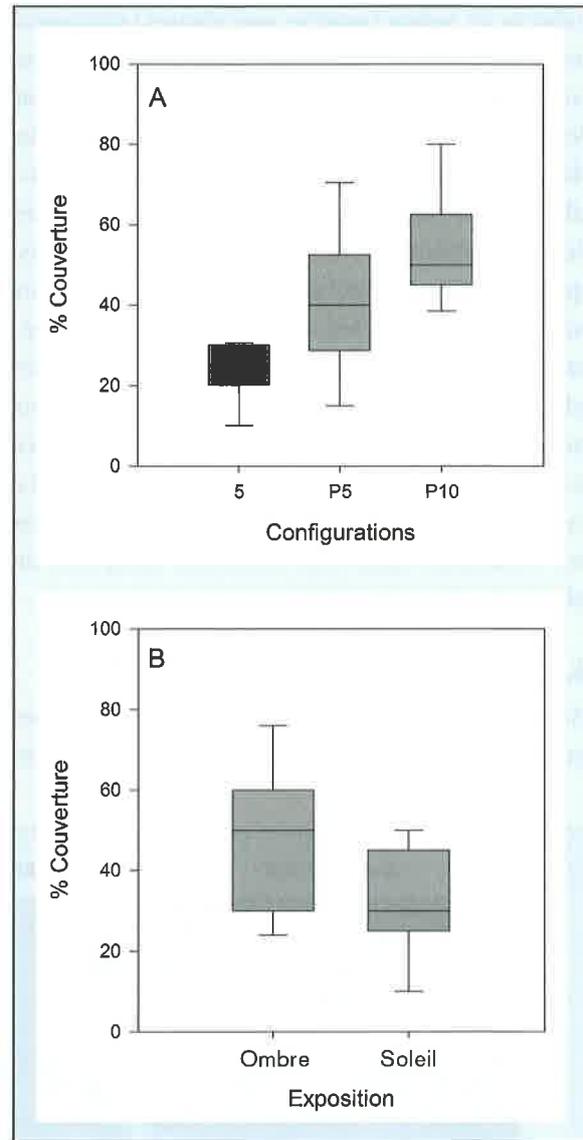


Figure 3. Histogrammes des précipitations et températures moyennes mensuelles à Louvain (Belgique) et Avignon entre octobre 2012 et septembre 2013

revanche, à Avignon, le printemps 2013 a été très avantageux pour la croissance des plantes, et quelques espèces y étaient en fleurs (*Iris lutescens*, *Lobularia maritima*, *Alyssum alyssoides*). Comme le montre la figure 3, le dispositif expérimental à Avignon a reçu beaucoup plus de précipitations en mars avec des températures plus élevées. Cette combinaison a donc procuré des conditions météorologiques plus favorables pour les plantes. Entre mai et juillet 2013, la croissance des plantes a également commencé à Louvain, mais avec un pourcentage de recouvrement beaucoup plus bas qu'à Avignon. Pour les paramètres mesurés à Avignon au printemps 2013, un recouvrement significativement plus élevé dans les parcelles possédant des substrats plus profonds et avec une couche pour la rétention a déjà pu être mesuré (figure 4A). Il existe également une tendance montrant que la couverture des plantes est plus élevée dans les parcelles à l'ombre (figure 4B). Des suivis en automne 2013 et printemps 2014 ont eu lieu pour une meilleure compréhension des effets à moyen terme de l'expérience. Les résultats seront publiés au cours de l'année 2014 ou 2015.

Conclusions

Après la synthèse réalisée à partir de quelques études récentes, on peut conclure que les toits végétalisés constituent une technique multifonctionnelle qui



Les boîtes à moustaches indiquent la médiane (ligne dans les boîtes), les 25^e et 75^e percentiles (limites des boîtes) et les 10^e et 90^e percentiles (moustaches).
 Figure 4. Pourcentage de recouvrement de la végétation pour l'expérimentation menée à Avignon au printemps 2013 pour (A) les trois configurations (5 = 5 cm de substrat; P5 = 5 cm de substrat + couche de rétention; P10 = 10 cm de substrat + couche de rétention) et (B) les deux expositions (soleil - ombre)

peut être considérée comme une composante indispensable de la construction durable dans les milieux urbains. Ils permettent ainsi de mieux gérer la qualité et la quantité d'eau reçue par les précipitations en occupant des espaces existants et inutilisés pour d'autres fonctions à caractère environnemental. Il est clair que les toits végétalisés ne résoudront jamais seuls complètement le problème du ruissellement des eaux en milieu urbain. Une combinaison avec d'autres mesures en faveur de la réduction du ruissel-

lement est ainsi nécessaire. En plus de la rétention d'eau, les nombreux autres avantages des toitures végétalisées (esthétique, santé, isolation, réduction de la nuisance sonore, purification de l'air...) permettent à cette technique d'être un investissement avantageux et même nécessaire dans le cadre général du changement climatique. Il est donc essentiel de continuer à développer les toits végétalisés et à stimuler la recherche afin d'optimiser leurs différentes fonctions. Une première étape essentielle est ainsi de trouver des plantes qui sont capables de survivre aux périodes

stressantes. L'étude de l'université de Louvain et de l'IMBE offre ainsi des perspectives pour des recherches complémentaires et pour des applications à plus grande échelle. La comparaison de la performance des espèces méditerranéennes avec des espèces généralement appliquées sur les toits végétalisés peut en effet influencer la sélection des plantes et se traduire par une amélioration spécifique du fonctionnement, de la biodiversité et donc de la valeur de l'habitat constitué par les toits végétalisés dans les zones urbaines.

Bibliographie

- [1] ANTRON M. (2004) : « Landscape change and the urbanization process in Europe ». *Landscape and Urban Planning* ; 67 : 9-26.
- [2] BRUXELLES ENVIRONNEMENT (2008) : « Rapport sur l'état de l'environnement à Bruxelles 2003-2006 », Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE), 60 pp. Téléchargeable sur : http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/Brochure_Etat_environnement_2003-2006_FR.PDF (accès avril 2014).
- [3] BUCCOLA N., SPOLEK G. (2010) : « A pilot-scale evaluation of greenroof runoff retention, detention, and quality ». *Water, Air & Soil Pollution* ; 216 : 83-92.
- [4] CARTER T., RASMUSSEN T. (2007) : « Hydrological behavior of vegetated roofs ». *Journal of the American Water Resources Association* ; 42 (5) : 1261-1274.
- [5] CZEMIEL BERNDTSSON J. (2010) : « Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review ». *Ecological Engineering* ; 36 : 351-360.
- [6] CZEMIEL BERNDTSSON J., BENGTSSON L., JINNO K. (2009) : « Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs ». *Ecological Engineering* ; 35 : 369-380.
- [7] CZEMIEL BERNDTSSON J., EMILSSON T., BENGTSSON L. (2006) : « The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality ». *Science of the Total Environment* ; 355 : 48-63.
- [8] DUNNETT N., KINGSBURY N. (2006) : *Planting green roofs and living walls*. Timber Press, Portland, Oregon, 254 p.
- [9] DUTOIT T. (2012) : « Espoirs et limites de l'ingénierie écologique ». *Le Courrier de la Nature* ; 270 : 22-29.
- [10] DUTOIT T. (2013) : « L'ingénierie écologique au service de la durabilité énergétique ». In MOSSERI R., JEANDEL C. (eds.). : *L'Énergie à découvert*. CNRS Éditions, Paris, 2013, pp. 262-263.
- [11] DVORAK B., VOLDER A. (2010) : « Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review ». *Landscape and Urban Planning* ; 96 (4) : 197-213.
- [12] FIORETTI R., PALLA A., LANZA L.G., PRINCIPI P. (2010) : « Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate ». *Building and Environment* ; 45 (8) : 1890-1904.
- [13] GETTER K., ROWE D. (2006) : « The role of extensive green roofs in sustainable development ». *Hortscience* ; 41 (5) : 1276-1285.
- [14] GILL S.E., HANDLEY J.F., ENNOS A.R., PAULEIT S. (2007) : « Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure ». *Built Environment* ; 33 : 115-133.
- [15] HARLAN S.L., RUDELLE D.M. (2011) : « Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation ». *Current Opinion in Environmental Sustainability* ; 3 (3) : 126-134.
- [16] HERMY M., SCHAUVLIEGE M., TIJSKENS G. (2005) : « Groenbeheer, een verhaal mat toekomst (Gestion verte, une histoire d'avenir) ». En collaboration avec la division Bos en Groen (Forêts et espaces verts), Berchem, 576 pp.
- [17] IPCC (2007) : *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007, 996 pp.
- [18] ISBELL F., CALCAGNO V., HECTOR A., CONNOLLY J., HARPOLE W.S., REICH P.B., et al. (2011) : « High plant diversity is needed to maintain ecosystem services ». *Nature* ; 477 : 199-202.
- [19] KJELLSTRÖM E., NIKULIN G., HANSSON U., STRANDBERG G., ULLERSTIG A. (2011) : « 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations ». *Tellus* ; 63 : 24-40.
- [20] LASSALLE F. (2012) : « L'écho des toitures végétales ». Association Adivet ; *Newsletter*, n° 10. Téléchargeable sur : <http://www.adivet.net/images/stories/newsletter/newsadivet-010.pdf> (accès avril 2014).
- [21] LUNDHOLM J.T. (2006) : « Green roofs and facades: a habitat template approach ». *Urban Habitats* ; 4 (1) : 87-101.
- [22] MACIVOR J., LUNDHOLM J. (2011) : « Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate ». *Ecological Engineering* ; 37 (3), p 407-417.
- [23] 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* ; 77 (3) : 217-226.
- [24] NAGASE A., DUNNETT N. (2010) : « Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity ». *Landscape and Urban Planning* ; 97 (4) : 318-327.

- [25] NIACHOU A., PAPAKONSTANTINOU K., SANTAMOURIS M., TSANGRASSOULIS A., MIHALAKAKOU G. (2001) : « Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance ». *Energy and Buildings*; 33 (7) : 719-729.
- [26] OBERNDORFER E., LUNDHOLM J.T., BASS B., COFFMAN R.R., DOSHI H., DUNNETT N., *et al.* (2007) : « Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services ». *BioScience*; 57 (10) : 823-833.
- [27] ROWE D. (2011) : « Green roofs as a means of pollution abatement ». *Environmental Pollution*; 159 (8-9) : 2100-2110.
- [28] SCHROLL E., LAMBRINOS J., RIGHETTI T., SANDROCK D. (2011) : « The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate ». *Ecological Engineering*; 37 : 595-600.
- [29] STOVIN V. (2009) : « The potential of green roofs to manage urban stormwater ». *Water and Environment Journal*; 24 : 192-199.
- [30] VAN MECHELEN C., DUTOIT T., HERMY M. (2014) : « Mediterranean open habitat vegetation offers great potential for extensive green roof design ». *Landscape and Urban Planning*; 121 : 81-91.
- [31] VAN MECHELEN C., DUTOIT T., KATTGE J., HERMY M. (2014) : « Plant trait analysis delivers an extensive list of potential green roof species for Mediterranean France ». *Ecological Engineering*; 67 : 48-59.
- [32] VAN UYTRECHT E., VAN MECHELEN C., RAES D., HERMY M. (2014) : « Runoff and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios ». *Landscape and Urban Planning*; 122 : 68-77.
- [33] VILLARREAL E.L., SEMADENI-DAVIES A., BENGTSSON L. (2004) : « Inner city stormwater control using a combination of best management practices ». *Ecological Engineering*; 22 : 279-298.

Résumé

C. VAN MECHELEN, T. DUTOIT, M. HERMY

Améliorer la gestion du ruissellement des eaux de pluie dans les zones urbaines grâce aux toits végétalisés

Offrant un large éventail d'avantages écologiques et économiques, les toits végétalisés sont devenus un outil important pour améliorer la qualité de vie en milieu urbain. Le marché des toits végétalisés est ainsi actuellement en pleine expansion. Dans cette publication, après avoir synthétisé les problèmes environnementaux inhérents au milieu urbain, nous développerons les avantages écologiques des toits végétalisés en portant une attention particulière sur la gestion du ruissellement des eaux de pluie. L'importance de ce type de toiture par rapport au changement climatique sera également abordée et des informations sur les recherches menées actuellement par l'université de Louvain en Belgique et l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie, à Avignon, seront alors présentées. Elles ont pour

but de sélectionner des plantes adaptées aux toits végétalisés en climat méditerranéen et tempéré. Dans un futur proche, les toits végétalisés seraient ainsi une bonne option pour réduire le ruissellement des eaux pluviales, surtout en période estivale. Le choix d'espèces végétales appropriées aux conditions inhérentes aux toitures végétalisées et dans un contexte de changement climatique sera néanmoins de plus en plus important. Les travaux de Van Mechelen et coll. [2014] montrent que les habitats naturels peuvent cependant inspirer et améliorer la conception des toits végétalisés. Cela offre donc des perspectives pour stimuler des recherches supplémentaires, essentielles pour améliorer la mise en œuvre des toits végétalisés dans la région méditerranéenne et le reste de la France.

Abstract

C. VAN MECHELEN, T. DUTOIT, M. HERMY

Improving stormwater runoff management in urban environments through green roofs

Offering a wide array of ecological and economic benefits, green roofs have become an important tool for improving urban environmental quality. This is why the green roof market is currently in full expansion. In this publication, the environmental problems linked to urban environments are synthesized, after which the advantages of green roofs will be clarified, with particular attention to stormwater management. Furthermore, the importance of green roofs in a climate change context will be discussed and recent findings from an ongoing study of the University of Leuven in Belgium and the Mediterranean Institute of Biodiversity and Ecology (IMBE) in Avignon, France, which aims at selecting specific

plant species adapted to the Mediterranean and future temperate climate, will be highlighted. We conclude that, in the future, green roofs will stay a valid option for reducing rainwater runoff, especially during summer. A vegetation choice appropriate to cope with particular green roof conditions, on top of the predicted climatic conditions, will nevertheless become more and more important. The study of Van Mechelen *et al.* [2014] shows that natural habitats can inspire and lead to an improved concept of green roof design. This work also offers perspectives to stimulate additional research which is essential in order to stimulate the application of green roofs in the Mediterranean and other regions of France.