

# Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 25

## Créer de nouveaux écosystèmes durables par des méthodes bio-inspirées : le cas des toits verts extensifs en région méditerranéenne

Thierry DUTOIT, Carmen VAN MECHELEN  
et Martin HERMY



[www.set-revue.fr](http://www.set-revue.fr)

### Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 25 – 2016

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal

Directeur éditorial : Nicolas de Menthère

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, Thomas Curt, Alain Dutartre, André Évette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Bruno Héroult, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Jean-Michel Laya, André Le Bozec, Alette Maillard, Thierry Mougey, Christel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINOX TEN et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Caroline Martin

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DP2VIST

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : [set-revue@irstea.fr](mailto:set-revue@irstea.fr)

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © hansenn - fotolia.com



## Créer de nouveaux écosystèmes durables par des méthodes bio-inspirées : le cas des toits verts extensifs en région méditerranéenne

Outre l'aspect esthétique, de nombreuses études ont confirmé l'intérêt des toitures végétales dans une perspective de restauration ou de protection de la biodiversité et de l'environnement en milieu urbain. Leur mise en place exige toutefois quelques recommandations quant aux matériaux et techniques utilisés, qui doivent notamment s'inspirer des habitats naturels écologiquement proches. Les objectifs des travaux présentés ici sont d'élaborer et de tester de nouvelles techniques bio-inspirées pour la création de toits verts extensifs en climat méditerranéen sans recours à l'irrigation permanente.



Face à la destruction et à la fragmentation des habitats, notamment due à l'extension des zones urbaines, la biodiversité est encore aujourd'hui fortement menacée. Les stratégies de conservation mises en œuvre n'ont pas permis de limiter son érosion en 2010

contrairement aux objectifs des différentes conventions internationales. La dernière, qui s'est tenue à Nagoya au Japon en 2010, a donc acté qu'il fallait d'ici à 2020, restaurer 15 % de tous les écosystèmes de la planète en complément des politiques de conservation.

La restauration écologique des écosystèmes ne consiste pas simplement à restaurer ceux qui préexistaient historiquement (restauration écologique *sensu stricto*), mais aussi à en créer d'autres (restauration écologique *sensu lato*). En milieu urbain, les importantes surfaces de toits pourraient être ainsi une opportunité pour la création de ces nouveaux écosystèmes dans le cadre d'aménagements cohérents à une échelle plus grande (trames vertes), mais aussi de leur gestion écologique extensive afin de garantir l'expression d'une forte biodiversité sur le long terme (Madre, 2014). Ils permettraient ainsi non seulement de lutter contre la perte de biodiversité dans les zones urbaines, mais ils pourraient aussi offrir d'autres services écosystémiques<sup>1</sup>, comme la régulation thermique des bâtiments et la rétention des eaux pluviales, ou encore une certaine valeur esthétique

(Clergeau, 2007). Encore faut-il que leur mise en place réponde à des critères de durabilité au niveau des matériaux et techniques utilisés pour leur création. C'est pourquoi, il importe de s'intéresser aujourd'hui à nos capacités de création et de gestion de toits verts extensifs, dont la définition correspond à des profondeurs de substrats déposés de moins de 20 cm d'épaisseur (Benoit *et al.*, 2011).

Les objectifs de nos travaux ont été d'élaborer et de tester de nouvelles techniques bio-inspirées pour leur réalisation en climat méditerranéen, sans recours à l'irrigation permanente. Les méthodes ont été basées sur le concept de « l'habitat modèle » qui consiste à cibler les habitats naturels possédant des caractéristiques similaires aux toits verts extensifs afin de trouver les espèces végétales les plus appropriées. La mesure de traits fonctionnels<sup>2</sup> des espèces aux plus forts potentiels a également été mise en place pour accroître nos capacités de sélection. Enfin, des toits verts extensifs expérimentaux ont été créés pour tester concrètement les espèces finalement retenues en climat méditerranéen et tempéré (encadré ①).

1. Bénéfices que les humains retirent des écosystèmes sans avoir à agir pour les obtenir.

2. Mesure des caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques qui affectent la performance individuelle d'un organisme vivant.



① Végétation des pelouses sèches des crêtes dans le massif du Lubéron, un habitat pris comme modèle pour la réalisation de toits verts extensifs en région méditerranéenne.

© Daniel Pavan, IMBE et université KU Leuven.

### Les habitats méditerranéens possèdent des espèces végétales adaptées aux toits verts extensifs

Dans le Sud-Est de la France, la biodiversité de la région méditerranéenne est très importante et il y existe de nombreux habitats qui présentent plus ou moins les mêmes facteurs écologiques que les toits verts extensifs (sols calcaires et très superficiels, granulométrie grossière, drainage rapide, pauvreté en nutriments, fluctuations de température, vents forts, etc.). Notre hypothèse est donc qu'il est possible de trouver dans ces habitats, des espèces végétales possédant des potentiels pour être introduites sur ce type de toit (photo ①).

Au printemps 2011, au cours d'une campagne de terrain, 372 espèces végétales potentielles ont été inventoriées dans 20 habitats naturels méditerranéens du Sud-Est de la France. La variation de la composition spécifique en relation avec les facteurs environnementaux a été analysée et la végétation inventoriée a pu ainsi être classifiée. Après avoir réalisé une comparaison de cette liste avec celle des espèces commercialisées (Snodgrass et Snodgrass, 2008), il a pu être mesuré que 80% des espèces n'étaient pas encore utilisées sur les toits verts. Ces résultats ont également montré que bien que les espèces annuelles constituent une grande partie de la végétation méditerranéenne, elles sont cependant encore très peu présentes sur les toits verts. Leur type biologique comprend toutefois quelques caractéristiques intéressantes pour des régions avec une période de sécheresse prolongée, car elles sont alors capables de perdurer sous la forme d'un stock de graines viables dans le sol pendant une à plusieurs années si les conditions restent défavorables à leur développement.

Afin de mieux cibler les espèces les plus adéquates dans cette liste de 372 taxons, une procédure de tri a été développée pour identifier les plantes qui possèdent

le potentiel le plus fort pour être installées sur les toits verts extensifs. Ce filtre a été basé sur l'utilisation des traits fonctionnels des plantes. Les traits pris en compte proviennent de bases de données accessibles gratuitement (TRY, BASECO) sur Internet. Nous avons notamment sélectionné les traits en rapport avec la tolérance à la sécheresse et l'autorégulation, car ces traits auront une importance majeure pour la survie des plantes sur des toits verts extensifs qui ne seront jamais arrosés artificiellement. Des traits en lien avec des aspects plus utilitaires ont aussi été pris en compte comme la couleur des fleurs et la période de floraison, etc. En effet, l'acceptabilité de la mise en place de toits verts extensifs passe non seulement par des critères fonctionnels objectifs, mais aussi par des critères subjectifs comme ceux reliés à la valeur esthétique des communautés végétales créées.

### ① BIBLIOGRAPHIE

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de doctorat de Carmen Van Mechelen en cotutelle entre les universités de Leuven (Belgique) et Avignon. Elle a généré des publications scientifiques internationales dont les références sont fournies ci-dessous.

- ④ VAN MECHELEN, C., DUTOIT, T., HERMY, M., 2015, Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review, *Sustainable Cities and Society*, n° 19, p.74-90.
- ④ VAN MECHELEN, C., DUTOIT, T., HERMY, M., 2015, Vegetation development on different extensive green roof types in a Mediterranean and temperate maritime climate, *Ecological Engineering*, n° 82, p. 571-582.
- ④ 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*, n° 67, p. 48-59.
- ④ VAN MECHELEN, C., VAN MEERBEEK, K., DUTOIT, T., HERMY, M., 2015, Functional diversity as a framework for novel ecosystem design: The example of extensive green roofs, *Landscape and Urban Planning*, n° 136, p.165-173.
- ④ VANUYTRECHT, E., VAN MECHELEN, C., VAN MEERBEEK, K., WILLEMS, P., HERMY, M., RAES, D., 2014, Runoff and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios, *Landscape and Urban Planning*, n° 122, p. 68-77.

Après avoir réalisé des analyses statistiques, les traits les plus importants ont été incorporés dans un filtre multicritères. Celui-ci comprend notamment des critères d'exclusion (arbres, absence de tolérance à la sécheresse) afin d'éliminer rapidement les espèces inappropriées. Ce filtre a ensuite été appliqué à la liste des 372 taxons préalablement identifiés dans les habitats modèles méditerranéens précédemment inventoriés. Nous avons ainsi pu identifier 34 espèces possédant des scores très importants mais non encore utilisées sur les toits verts. Parmi ces espèces, 35 % correspondent au type biologique annuel, confirmant ainsi les premiers résultats issus des prospections de terrain sur le fort potentiel des espèces annuelles pour s'installer et perdurer dans les communautés végétales qui seront créées sur les toits verts extensifs en région méditerranéenne.

### La diversité fonctionnelle des communautés végétales des toits verts augmente avec leur richesse taxonomique

Nous avons également émis l'hypothèse qu'au plus la diversité phylogénétique (diversité des taxons) était importante, au plus la diversité fonctionnelle<sup>3</sup> (diversité des traits) l'était également. Nous avons testé cette hypothèse dans des communautés végétales installées dans différents types de toits verts selon un gradient d'intensification (10, 15-20 et plus de 20 cm d'épaisseur de substrat). Les analyses ont été réalisées *via* des techniques de classifications hiérarchiques basées sur des coefficients de similitude qui ont permis de grouper ces systèmes en trois types de toits verts qui diffèrent en richesse et composition végétale spécifique, profondeur du substrat, méthode d'installation, diversité fonctionnelle et phylogénétique. La corrélation entre la richesse spécifique et la diversité fonctionnelle est fortement positive. Cependant, ce ne sont pas les systèmes les plus extensifs (substrat de moins de 20 cm) qui présentent la plus grande diversité taxonomique et fonctionnelle. En effet, pour ces conditions, seules des espèces succulentes comme les orpins

(*Sedum* sp.) y ont été implantées. En comparaison des communautés végétales naturelles pionnières, il manque donc bien toute une partie de types biologiques dont les espèces annuelles préalablement identifiées au cours de nos investigations précédentes sur le terrain.

La richesse et la diversité des communautés végétales des premiers toits verts extensifs sont plutôt faibles dans le Sud méditerranéen en lien avec l'effet des fortes températures et de la sécheresse estivale qui ont réduit fortement la gamme des espèces commerciales implantées. Une synthèse bibliographique a permis d'identifier si des sources d'eaux alternatives et différentes stratégies de stockage pouvaient être trouvées. L'eau pluviale pourrait être en effet être mieux conservée sur les toits, limitant ainsi les besoins d'irrigation. Une meilleure sélection des espèces végétales utilisées et/ou les matériaux mis en place permettraient aussi de faire des économies d'eau. Il serait également possible d'utiliser des sources d'eaux alternatives comme par exemple les eaux grises<sup>4</sup> ou celles récupérées à partir des précipitations (Van Mechelen *et al.*, 2014). À la lecture de la bibliographie internationale, il apparaît que l'irrigation est bien évidemment indispensable pendant la phase d'établissement des espèces végétales semées ou plantées. Elle est utile durant toute la première saison de croissance, mais sa permanence ne semble nécessaire que pour les toits verts des climats arides et semi-arides dont la période de déficit hydrique est beaucoup plus longue que celle en climat méditerranéen.

Il est donc nécessaire d'affiner les recherches afin de sélectionner les espèces végétales les plus adaptées aux toits verts extensifs en région méditerranéenne, pour éviter toute irrigation permanente et adapter les éléments structurels des toits extensifs (type et épaisseur du substrat, couche drainante, etc.) pour mieux répondre aux exigences de ces plantes. Dans le cadre des changements climatiques prévus, la mise en place de systèmes d'irrigation n'apparaît en effet plus comme une solution durable pour assurer la croissance des plantes et leur survie.

### Les nouvelles communautés végétales de toits verts extensifs seront bien durables sur le long terme

L'étude préalable de la végétation dans les habitats naturels modèles et la procédure de filtration *via* la discrimination des traits fonctionnels a permis la sélection de 34 espèces possédant les potentiels les plus forts. Dix-huit espèces ont pu ensuite être testées rapidement car leurs graines étaient disponibles dans le commerce et provenaient bien de populations locales (tableau 1). Le mélange testé comprend pour moitié des annuelles et pérennes. Il a en effet été déjà démontré que les performances des annuelles (hauteur, biomasse, production

1 Liste des 18 espèces retenues après application des différents processus de sélection et semées dans les toits verts extensifs expérimentaux.

Espèces testées	Type biologique
<i>Allium sphaerocephalon</i>	Géophyte
<i>Alyssum alyssoides</i>	Thérophyte
<i>Carthamus carduncellus</i>	Hémicryptophyte
<i>Clinopodium acinos</i>	Thérophyte
<i>Dianthus superbus</i>	Hémicryptophyte
<i>Erophila verna</i>	Thérophyte
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Hémicryptophyte
<i>Helianthemum nummularium</i>	Hémicryptophyte
<i>Iris lutescens</i>	Géophyte
<i>Lagurus ovatus</i>	Thérophyte
<i>Linum usitatissimum</i>	Thérophyte
<i>Lobularia maritima</i>	Hémicryptophyte
<i>Petrorhagia prolifera</i>	Thérophyte
<i>Plantago agra</i>	Thérophyte
<i>Sedum acre</i>	Hémicryptophyte
<i>Sedum album</i>	Hémicryptophyte
<i>Silene conica</i>	Thérophyte

3. La diversité fonctionnelle est la valeur et la gamme de valeurs des traits des organismes d'un écosystème donné.

4. Terme d'origine québécoise qui désigne l'eau non potable. Les eaux usées provenant de douches sont des eaux grises. Par contre, les eaux usées provenant des toilettes sont appelées eaux noires et doivent subir des traitements de dépollution plus intensifs.



© Carmen Van Mechelen, IMBÉ et université KU Leuven

📍 Dispositif expérimental de toit vert extensif mis en place sur le toit de l'Institut universitaire et technologique d'Avignon (vue prise le 2 avril 2013).

de graines) sont meilleures au voisinage des pérennes en lien avec le rôle tampon de ces espèces vis-à-vis des conditions microclimatiques extrêmes qui règnent sur les toits en climat méditerranéen. La densité de semis testé est de 5 g/m<sup>2</sup> (150 graines par espèce). Pour les géophytes, 3 bulbes ont été implantés par quadrat en plus des 60 g/m<sup>2</sup> de boutures de sedums. Toutes ces densités correspondent aux recommandations issues des travaux précédents (Benoit *et al.*, 2011).

Fin 2012, des toits verts expérimentaux ont été mis en place à Avignon en climat méditerranéen, mais également à Heverlee, près de Louvain en Belgique afin de comparer nos résultats à ceux des régions à climat tempéré, qui regroupent encore aujourd'hui la très grande majorité des réalisations en matière de toits verts extensifs. Ce dispositif a aussi été testé en climat tempéré afin d'anticiper les effets potentiels des changements climatiques futurs. Les dispositifs expérimentaux mis en place comprenaient différentes compositions de substrats (profondeur 5 ou 10 cm avec ou sans couche de drainage en styrène) et deux types d'exposition (soleil ou ombre). (photo 2).

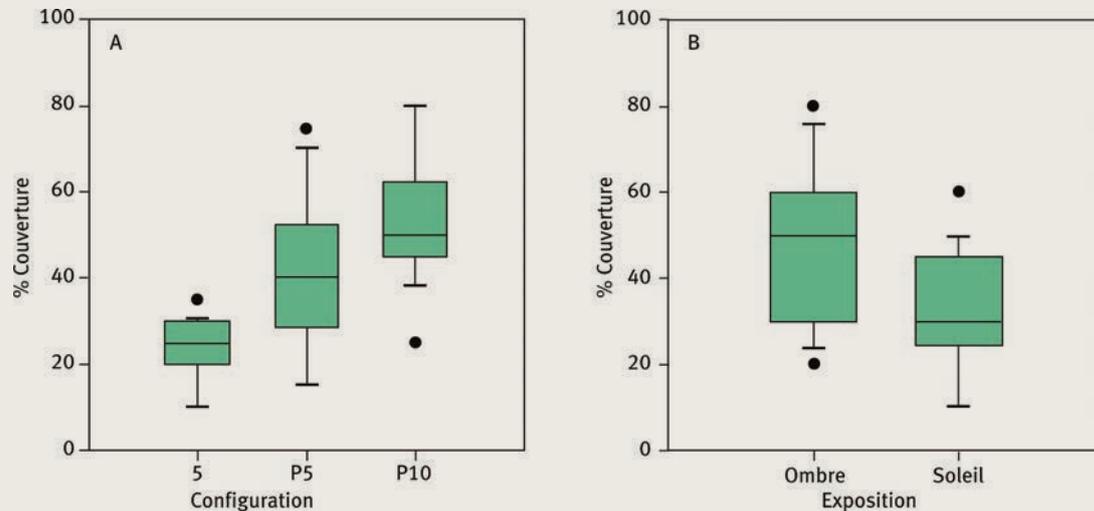
Nos premiers résultats obtenus entre 2013 et 2014 ont montré que les conditions météorologiques ont évidemment influencé le développement de la végétation entre les deux sites. Généralement, le substrat le plus épais (10 cm), combiné avec une couche de rétention d'eau, a positivement influencé le taux de recouvrement de la végétation semée (figure 1), la richesse et la diversité spécifique, notamment dans la situation à l'ombre. La performance des différentes espèces a cependant été moins affectée par le facteur d'exposition. Enfin, l'installation spontanée de mousses et d'espèces adventices a

également été constatée pendant la période expérimentale, en particulier dans les parcelles ombragées, sans pour autant que celles-ci affectent significativement la dynamique des espèces semées.

Dans les situations des toits verts extensifs qui impliquent l'utilisation d'un substrat de faible épaisseur, la croissance et la survie des plantes pendant les périodes de sécheresse peuvent être très difficiles car le substrat est très superficiel et très pauvre en nutriments. L'ajout de champignons mycorhiziens et de matière organique a donc été également testé dans une expérience conduite conjointement dans une serre et sur un toit. Des semences des espèces utilisées dans nos expérimentations ont été utilisées, ainsi qu'un inoculum mycorhizien, constitué d'espèces du genre *Glomus*, une souche commune déjà largement employée pour d'autres cas horticoles.

Nos résultats ont montré que la matière organique a positivement influencé la hauteur des plantes, leur poids sec et leur recouvrement en serre. La présence de mycorhizes n'a cependant pas influencé de manière significative la croissance et la survie initiale des plantes, bien que des associations entre les mycorhizes et les racines des plantes aient pu être observées en microscopie. Une faible augmentation de la matière organique dans les substrats utilisés pour les toits verts extensifs peut donc à elle-seule déjà stimuler la croissance des plantes. Par contre, une plus longue période sera peut-être nécessaire pour mesurer des effets positifs de la mycorhization sur la croissance et la survie des plantes utilisées. Cela est peut être à mettre en lien avec le temps nécessaire pour que les associations entre les mycorhizes et les racines soient plus effectives.

- ❶ Pourcentage de couverture de la végétation pour l'expérimentation menée en Avignon (printemps 2013) pour :  
(A) les trois configurations et épaisseurs de substrat testés (5 = 5 cm de substrat ; 5P = 5 cm de substrat + couche de drainage ; 10P = 10 cm de substrat + couche drainage) ;  
(B) les deux expositions testées (soleil – ombre).



## Conclusion

L'ensemble de nos résultats montre clairement que la végétation méditerranéenne peut être une source d'inspiration fiable pour la création de toits verts extensifs durables. Face à une diminution de l'accessibilité des ressources en eau, la composition structurelle des toits est importante (composition du substrat, épaisseur), mais c'est bien la sélection des espèces les plus adaptées qui garantira leur pérennité sur le long terme. L'utilisation d'espèces annuelles apparaît donc bien ici comme une innovation majeure pour la mise en place de toits verts extensifs en milieu méditerranéen. Les espèces annuelles sont en effet capables d'accomplir leur cycle avant la sécheresse estivale et se régénérer dès les premières pluies automnales. Cependant, ces résultats obtenus sur le court terme demandent maintenant à être confirmés sur le long terme. Des recherches devront également être menées pour confirmer la constitution dans les substrats d'un stock de graines viables produites par les espèces installées. La constitution de ce stock serait en effet une garantie pour les communautés de pouvoir se régénérer même après une sécheresse précoce ou tardive. ■

## Les auteurs

### Thierry DUTOIT

UMR IMBE CNRS-IRD, Avignon Université,  
Aix-Marseille Université,  
Site Agroparc, BP 61207,  
F-84911 Avignon Cedex 09, France  
✉ [thierry.dutoit@univ-avignon.fr](mailto:thierry.dutoit@univ-avignon.fr)

### Carmen VAN MECHELEN et Martin HERMY

KU Leuven, University of Leuven,  
Department of Earth and Environmental Sciences,  
Division of Forest, Nature and Landscape,  
GEO-Instituut, Celestijnenlaan 200E,  
3001 Leuven, Belgium  
✉ [vanmechelencarmen@gmail.com](mailto:vanmechelencarmen@gmail.com)  
✉ [martin.hermym@kuleuven.be](mailto:martin.hermym@kuleuven.be)

## Remerciements

Les auteurs remercient les universités de Leuven (Belgique), d'Avignon et des Pays de Vaucluse, de son Institut universitaire de technologies, le département du Vaucluse ainsi que les entreprises Sopranature, Peltracom et Ibic pour leur soutien à la réalisation de ce projet.

## EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **BENOIT, A.L., ROULET, A., BARRA, M., LECUIR, G. DAMAS, O., MADRE, F.**, 2011, *Réaliser des toitures végétalisées favorables à la biodiversité*, Guide technique OBDU, Natureparif, Plantes et Cité, MNHN, Ophélie Alloitteau Éditions, Paris, 21 p., disponible sur : <http://www.natureparif.fr/attachments/Documentation/livres/Toitures-vegetalisees.pdf> (consulté le 05/04/2016).
- 📖 **CLERGEAU, P.**, 2017, *Une écologie du paysage urbain*, Éditions Apogée, Rennes, 142 p.
- 📖 **MADRE, F.**, 2014, *Biodiversité et bâtiments végétalisés : une approche multi-taxons en paysage urbain*, thèse de doctorat du Muséum national d'Histoire naturelle, MNHN, Paris, 213 p.
- 📖 **SNODGRASS, E.-C., SNODGRASS, L.-L.**, 2008, *Guide des plantes de toits végétaux*, Éditions du Rouergue, Arles, 208 p.
- 📖 **VAN MECHELEN, C., DUTOIT, T., HERMY, M.**, 2014, Améliorer la gestion du ruissellement des eaux de pluie dans les zones urbaines grâce aux toits végétalisés, *Techniques, Sciences et Méthodes*, n° 6, p. 36-44.