

---

# Modélisation dynamique des transferts hygrothermiques dans les enveloppes de bâtiments végétalisées

Rabah DJEDJIG, Emmanuel BOZONNET, Rafik BELARBI

*Laboratoire des Sciences de l'ingénieur pour l'environnement (LaSIE)*

*Université de La Rochelle, La Rochelle, France*

*rdjedj01@univ-lr.fr*

---

**RÉSUMÉ.** La végétalisation des bâtiments est l'une des techniques de revêtement extérieur d'enveloppes susceptible d'être bénéfique vis-à-vis des besoins énergétiques ou du confort intérieur d'été ainsi que des microclimats extérieurs. Cet article traite d'une part du développement d'un modèle de transferts couplés de chaleur et d'humidité à l'échelle d'une enveloppe végétalisée et d'autre part de sa validation expérimentale. L'analyse des différents mécanismes de transferts de masse et de chaleur nous permet de mettre en évidence le poids de la prise en compte de la variation d'humidité dans le substrat. La validation expérimentale s'appuie sur des mesures réalisées, durant une saison d'été, sur la plateforme expérimentale ClimaBat, échelle 1 :10, composée d'enveloppes tests végétalisées. Ce modèle validé sera intégré dans un outil modulaire de simulation thermique dynamique de bâtiment.

**ABSTRACT.** The use of vegetated building envelopes is an innovative construction technique which has a significant hygrothermal impact on building energy demand, indoor comfort and outdoor microclimate. In this work, a coupled hygrothermal model was developed for vegetated buildings envelopes. Our analysis of the different mechanisms of mass and heat transfer highlights the weight of modeling the variation of moisture in the substrate. An experimental validation was carried out using a scale model (1:10) of vegetated building envelopes. This validated model will be integrated in a modular building energy simulation tool.

**MOTS-CLÉS :** Toiture végétalisée, Transferts couplés de masse et de chaleur, Modèle numérique, Validation expérimentale, Rafrachissement passif.

**KEY WORDS:** Green roof, Coupled heat and moisture transfers, Numerical model, Experimental validation, Passive cooling.

---

## 1. Introduction

Nous présentons dans cet article un modèle thermo-hydrigue couplé d'enveloppe de bâtiment végétalisée. Le modèle développé propose un couplage dynamique fort des transferts en fonction de l'état hydrique du substrat, ainsi les paramètres d'échange (conductivité thermique, coefficients de transfert, etc.) sont redéfinis dynamiquement. La validation sur le dispositif expérimental ClimaBat [DOY 12] est également présentée.

La performance environnementale des bâtiments est liée à la performance énergétique et à la maîtrise des impacts sur l'environnement extérieur. La végétalisation des enveloppes de bâtiments est l'une des solutions techniques susceptibles de répondre en partie à cette problématique énergétique et environnementale. L'impact thermique de la végétalisation des enveloppes de bâtiments a fait l'objet de différentes campagnes de mesure expérimentales réalisées sur des bâtiments résidentiels ou commerciaux. Certaines études montrent que la toiture végétalisée améliore l'isolation thermique du bâtiment et réduit le réchauffement de 70-90% en été et les déperditions thermiques de 10-30% en hiver [LIU 05]. La durée de vie de la membrane d'étanchéité est augmentée suite à la réduction des pics de température d'environ 30°C [TEE 09]. D'autres études qui traitent de la végétalisation des façades de bâtiments montrent l'effet de cette technique sur l'augmentation de l'isolation thermique [TSO 08] et sur la réduction de la température de surface des parois extérieures [EUM 09]. L'intensité de ces effets dépend de l'orientation du bâtiment [KON 10], de la densité du feuillage et du taux de couverture [STE 05; NYU 10]

Ces résultats restent, néanmoins, spécifiques aux bâtiments étudiés et l'impact de la végétalisation dépend du type de végétation et des caractéristiques du substrat utilisés. Une modification dans ces paramètres fait varier la baisse de la consommation annuelle entre 0.6 % et 14.5 % [WON 03]. Par ailleurs, pour les toitures végétalisées, cet effet n'est majoritairement ressenti que dans le dernier étage [SAN 07]. L'ampleur des répercussions hygrothermiques d'une toiture végétalisée est fortement corrélable avec conditions météorologiques [JIM 10; JAF 12]. Ces constats montrent la nécessité de produire des outils de modélisation et d'évaluation d'impact de la végétalisation sur la performance de bâtiments.

La prédiction de l'impact hygrothermique des enveloppes de bâtiments végétalisées nécessite une modélisation fine des différents phénomènes de transfert de masse et de chaleur ayant lieu dans les différentes parties de la toiture végétalisée. L'intensité de ces phénomènes dépend, en plus des conditions météorologiques, des propriétés physiques de la composante d'enveloppe végétalisée telles que ses propriétés thermiques et radiatives, son état hydrique et des types de substrat et de végétations utilisés. Ces propriétés dépendent les unes des autres car, la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité thermique massique ainsi que les propriétés radiatives varient en fonction de l'état hydrique du milieu de culture [SAI 08; OUL 12]. Inversement, la teneur en eau du substrat varie

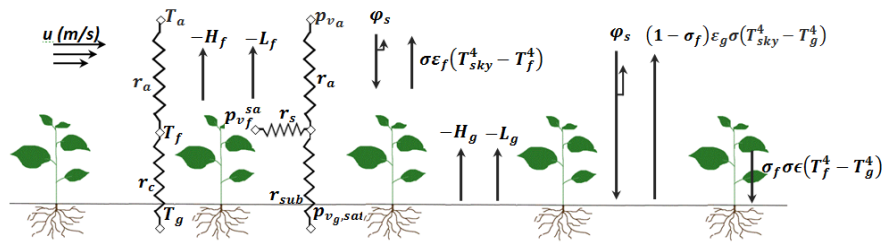
dans le temps suivant l'intensité du phénomène de l'évapotranspiration qui dépend à son tour du type de végétation, de l'indice de surface foliaire et du taux de couverture.

Le modèle présenté ici permet de s'affranchir de quelques hypothèses d'autres modèles de toitures-terrasses végétalisées (TTV) que l'on trouve dans la littérature scientifique [BAR 98; SAI 08; FRA 04; ALE 07; FEN 10]. Ces modèles, bien qu'ils reposent sur différentes approches, considèrent tous des régimes de transferts quasi-stationnaires et négligent dans l'ensemble l'effet des transferts hydriques sur la prédiction du comportement thermique.

## 2. Modèle d'enveloppe végétalisée :

Le modèle développé considère le « revêtement végétalisé » comme un système composé d'un couvert végétal (feuillage) et d'un milieu de culture (substrat). Le couvert végétal est défini par un taux de couverture ( $\sigma_f$ ) et d'un indice de surface foliaire ( $F$ ). Le taux de couverture représente la surface des parties recouvertes de végétation rapportée à la surface totale de la toiture/paroi considérée. Le couvert végétal (le feuillage) constitue un écran semi-transparent, au rayonnement de courtes longueurs d'ondes, dont la transmittance est directement liée à sa densité foliaire. Le substrat est un milieu poreux défini par son épaisseur, sa teneur en eau maximale et par les variations de ses propriétés thermophysiques suivant de son état hydrique.

Le modèle repose sur l'établissement des bilans thermo-hydriques sur chacune des deux parties du système de végétalisation. Les bilans énergétiques établis modélisent le transfert thermique radiatif, sensible, latent et conductif au niveau du feuillage et du substrat (Figure 1). L'intensité de ces phénomènes étant proportionnelle aux gradients de températures et de pression de vapeur aux surfaces d'échanges considérées, les différents termes des bilans hygrothermiques sont, par la suite, exprimés en fonction des écarts de température (ou de pression partielle de vapeur) entre les multiples surfaces d'échanges et/ou l'air environnant.



**Figure 1.** Principaux modes de transferts thermiques modélisés au niveau d'un composant d'un système de végétalisation en toiture

**Tableau 1.** *Nomenclature.*

$d, z$ Épaisseur, profondeur (m)	$P$ Précipitation ( $\text{kg m}^{-2}$ )
$D$ Drainage ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$r_a, r_c$ Résistances au transfert de chaleur ( $\text{s m}^{-1}$ )
$E$ Évapotranspiration ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$r_s, r_{sub}$ Résistances au transfert de vapeur ( $\text{s m}^{-1}$ )
$F$ Indice de surface foliaire	$t$ Temps (s)
$H$ Flux sensible ( $\text{W m}^{-2}$ )	$T$ Température (K)
$k$ Conductivité thermique ( $\text{W m}^{-1} \text{K}$ )	$Rn$ Flux radiatif ( $\text{W m}^{-2}$ )
$l_v$ Chaleur sensible ( $\text{J kg}^{-1}$ )	$\varphi_s$ Éclairement solaire sur l'horizontal ( $\text{W m}^{-2}$ )
$L$ Flux latent ( $\text{W m}^{-2}$ )	Indices :
$\gamma$ Constante psychrométrique ( $\text{Pa K}^{-1}$ )	$s$ Solaire
$\varepsilon$ Émissivité	$f$ Feuillage
$p$ Pression (Pa)	$g$ Sol
$\omega$ Teneur en eau volumique (%)	$w$ Eau
	$a$ Air

Dans cet article, nous présentons les équations de bilans et la démarche de modélisation du couplage hygrothermique. Le détail du calcul des différents termes des équations présentées ci-dessous est présenté dans l'article [DJE 12].

Le bilan thermique sur le couvert végétal, supposé à une température uniforme, est établi comme suit:

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = Rn_f + H_f + L_f \quad [1]$$

Où  $Rn_f$ ,  $H_f$  et  $L_f$  ( $\text{W/m}^2$ ) sont respectivement le flux radiatif absorbé, le flux de chaleur sensible échangé par convection et le flux de chaleur latente à la surface du feuillage (Fig. 1). Le flux radiatif  $Rn_f$  est la somme de l'éclairement solaire (de courtes longueurs d'onde CLO) absorbé et du flux infrarouge (de grandes longueurs d'ondes GLO) échangé avec la surface extérieure du substrat, la voûte céleste et les multiples parois et surfaces environnantes. Ces trois types de flux thermique peuvent être exprimés de façon suivante :

$$Rn_f = \sigma_f \left[ (1 - \tau_s - \rho_s)(1 + \tau_s \rho_g) \varphi_s + \varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \frac{1}{1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_g - 1} \sigma (T_g^4 - T_f^4) \right] \quad [2]$$

$$H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_a - T_f) \quad [3]$$

$$L_f = -F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_s)} (p_{v_{f,sat}} - p_{v_a}) \quad [4]$$

Les trois termes du second membre de l'équation [2] représentent respectivement l'éclairement CLO absorbé par le feuillage, le flux radiatif GLO échangé avec la voûte céleste et le flux radiatif GLO échangé avec la surface du substrat (inter-

réflexions prises en compte par la méthode des radiosités). Les flux convectifs sensibles et latents sont exprimés à travers les équations [3] et [4]. Ils sont inversement proportionnels aux résistances au transfert convectif ( $r_a$  et  $r_s$ ) que forment la couche limite formée par le vent au-dessus de la canopée foliaire et les stomates qui contrôlent l'intensité de la transpiration de la végétation (Figure 1).

Le couplage des transferts hygrothermiques dans ce modèle repose sur la résolution de l'équation de la chaleur dans le substrat, laquelle est couplée aux transferts de masse à travers les propriétés thermophysiques et la condition aux limites modélisant l'évaporation à la surface du substrat en tenant compte des variations de sa teneur en eau. La teneur en eau du substrat est calculée à l'aide d'un bilan hydrique global et est supposée homogène sur toute l'épaisseur du substrat lors de la résolution de l'équation de la chaleur.

Le transfert de chaleur dans le substrat est modélisé par les équations suivantes:

$$(\rho c_p)_{g,\omega_g} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [5]$$

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Rn_g + H_g + L_g \quad [6]$$

$$T(z = \Delta z, t) = T_b \quad [7]$$

Les termes  $Rn_g$ ,  $H_g$  et  $L_g$  ( $W/m^2$ ) de la condition aux limites [6] sont définis comme précédemment mais pour la surface du substrat (Figure 1). Ces trois flux thermiques s'expriment de la façon suivante :

$$Rn_g = (1 - \rho_g) \left( 1 - \sigma_f (1 - \tau_s) \right) \varphi_s + \sigma_f \frac{1}{1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_g - 1} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1 - \sigma_f) \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4) \quad [8]$$

$$H_g = \frac{(\rho c_p)_a}{(r_c + r_a)} (T_a - T_g) \quad [9]$$

$$L_g = -\frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_{sub} + r_a)} (p_{v_{g,sat}} - p_{v_a}) \quad [10]$$

Le bilan hydrique (équation [8]) du composant d'enveloppe végétalisée inclut la précipitation  $P$  ( $kg\ m^{-2}\ s$ ), l'arrosage  $A$  ( $kg\ m^{-2}\ s$ ), le drainage  $D$  ( $kg\ m^{-2}\ s$ ) et l'évapotranspiration  $E$  ( $kg\ m^{-2}\ s$ ). La quantité d'eau évapotranspirée  $E$  ( $kg\ m^{-2}\ s$ ) est estimée sur la base de flux latents de transpiration  $L_f$  ( $W\ m^{-2}$ ) et d'évaporation  $L_g$  ( $W\ m^{-2}$ ) (équation [9]).

$$\rho_w \Delta z \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = P + A - D - E \quad [11]$$

$$E = -(L_f + L_g)/l_v \quad [12]$$

### 3. Résolution numérique et validation expérimentale

Les équations du modèle de composant végétalisé sont linéarisées et le système obtenu est résolu pour chaque pas de temps, par itérations successives jusqu'à convergence. Les données météorologiques d'entrées du programme informatique sont la température/humidité de l'air, l'éclairement solaire, les températures des échanges radiatifs GLO et la vitesse du vent.

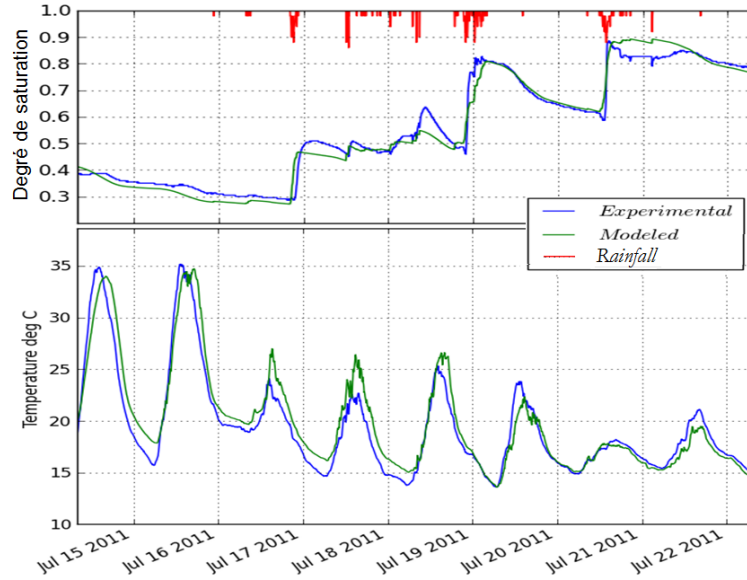
Pour mesurer l'incidence de différents revêtements d'enveloppes de bâtiments, calibrer des modèles développés au LaSIE et comparer les résultats de simulations numériques à des mesures physiques, la plateforme ClimaBat [DOY 12] a été équipée de toitures végétalisées et d'un système de façade végétalisée (dans le cadre des projets de recherche ANR-AGROBAT et ANR-VegDUD respectivement).

### 4. Résultats et analyse

Les résultats numériques du modèle développé ont été confrontés aux mesures expérimentales des TTV sur ClimaBat enregistrées durant la période estivale 2011.

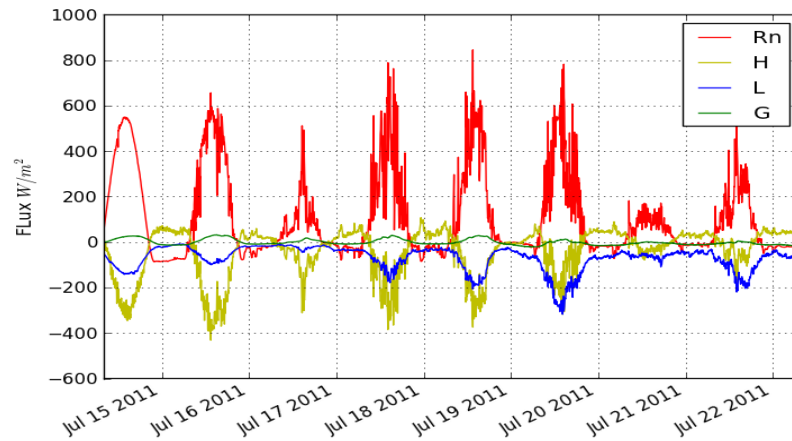
Les comparaisons montrent une bonne concordance entre la prédiction numérique et le comportement thermo-hydrigue observé durant cette période. La Figure 2 compare la prédiction numérique de la température de surface extérieure du substrat et de son degré de saturation à aux mesures effectuées durant la troisième semaine du mois de juillet. Cette figure montre que les variations diurnes de la température de surface  $T_g$  sont correctement prédites sur une période moyennement longue avec des conditions météorologiques variables. La pluie enregistrée durant cette semaine a conduit à la baisse des maxima de température atteints au cours du temps. La modélisation d'un tel comportement nécessite un couplage des transferts hygrothermique tel proposé dans ce modèle.

L'analyse du bilan énergétique global de la toiture végétalisée permet d'appréhender le lien direct qui relie l'amplitude des variations de température de surface  $T_g$  à l'état hydrique du milieu de culture. La figure 3 (simulation) montre que la baisse des maxima diurnes de la température de surface était accompagnée d'une augmentation notable de l'évapotranspiration (proportionnelle à  $L(W/m^2)$ ). En effet, le potentiel d'évapotranspiration est directement lié à la teneur en eau du milieu de culture. Ainsi, un substrat plus humide conduirait à une baisse de température de surface et du flux conduit vers le bâti ( $G (W/m^2)$  sur Figure 3).

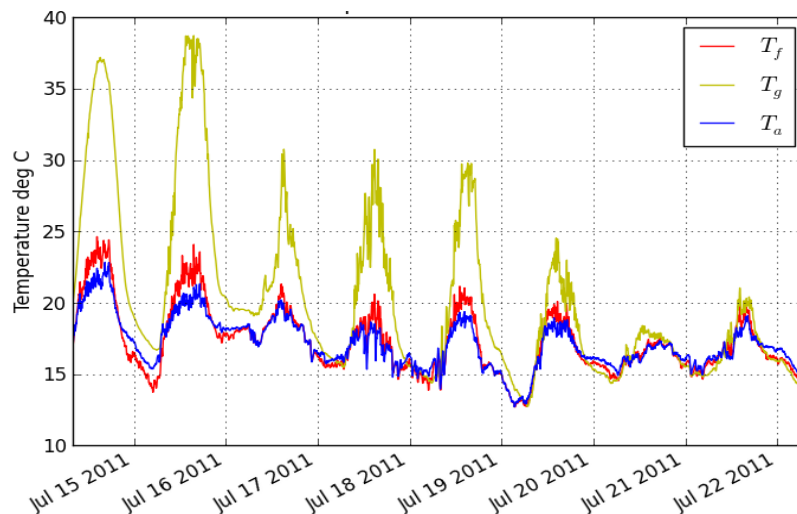


**Figure 2.** Comparaison des résultats de simulation numérique aux mesures obtenues sur ClimaBat en température et en degré de saturation du substrat

La température calculée des feuilles  $T_f$  reste très voisine de la température de l'air ambiant (Figure 4) grâce au phénomène de l'évapotranspiration. Ce constat conforme aux études sur le sujet, et d'autant plus accentué que le flux d'évapotranspiration est important. Cette basse température des feuilles en conditions estivales est susceptible d'améliorer, dans le cas d'une façade végétalisée, les conditions microclimatiques de la rue canyon.



**Figure 3.** Flux calculés (radiatifs, sensible, latent et conduit) au niveau de la TTV (orientés selon Figure 1).



**Figure 4.** Comparaison des températures calculées des feuilles  $T_f$  et du substrat  $T_g$  à la température de l'air ambiant  $T_a$

## 5. Conclusion et perspectives

Un modèle d'enveloppe végétalisée a été développé. Ce modèle permet de prédire le comportement hygrothermique du module végétalisé suivant des conditions météorologiques diverses. Il s'affranchit de certaines limitations et hypothèses simplificatrices d'autres modèles existants. Les résultats de simulations numériques s'approchent considérablement des mesures expérimentales et retracent convenablement le comportement hygrothermique de la toiture végétalisée dont les mesures expérimentales ont servi de validation. Ce modèle, appliqué dans le présent article à une TTV, sera étendu à un système de façade végétalisée.

L'intégration prévue du modèle développé dans un code de simulation thermique dynamique permettra d'évaluer l'impact de différents systèmes de végétalisation sur la performance énergétique en termes de besoins de chauffage et de climatisation. Afin d'évaluer l'impact de ces différents systèmes de végétalisation de toiture/façades de bâtiments sur les conditions microclimatiques dans un environnement proche, en l'occurrence sur la température et l'humidité de l'air dans une rue canyon ainsi que sur la réduction d'autres phénomènes inhérents à l'îlot de chaleur urbain, le couplage du bâtiment végétalisé fera l'objet d'une étude ultérieure.

## 6. Remerciement

Ce travail a bénéficié d'une aide de L'Agence Nationale de La Recherche portant la référence ANR-09-Vill-0007-04 (projet VegDUD).



## 7. Bibliographie

- [ALE 97] ALEXANDRI, E. & JONES, P., 2007. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42(8), p.2835–2849.
- [BAR 98] BARRIO, E.P.D., 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2), p.179–193.
- [DJE 12] DJEDJIG R., OULDBOUKHITINE S., BELARBI R., BOZONNET E., 2012, Development and validation of a coupled heat and 1 mass transfer model for green roofs, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Accepted on March 16, 2012.
- [DOY 12] DOYA, M., BOZONNET, E., AND ALLARD, F. (In Press). “Experimental measurement of cool facades’ performance in a dense urban environment,” *Energy and Buildings*, Available online 7 November 2011.
- [EUM 09] EUMORFOPOULOU, E.A. & KONTOLEON, K.J., 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, 44(5), p.1024–1038.
- [FEN 10] FENG, C., MENG, Q. & ZHANG, Y., 2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42, p.959–965.
- [FRA 04] FRANKENSTEIN, S. & KOENIG, G., 2004. *FASST Vegetation Models*, US Army Corps of Engineers® Engineer Research and Development Center. Available at: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA428989> [Consulté décembre 22, 2010].
- [JAF 12] JAFFAL, I., OULDBOUKHITINE, S.-E. & BELARBI, R., 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, p.157–164.
- [JAM 10] JIM, C.Y. & HE, H., 2010. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 36, p.1052–1063.
- [KON 10] KONTOLEON, K.J. & EUMORFOPOULOU, E.A., 2010. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45(5), p.1287–1303.
- [LIU 05] LIU, K. & MINOR, J., 2005. Performance evaluation of an extensive green roof. *Presentation at Green Rooftops for Sustainable Communities, Washington DC*.
- [OUL 12] OULDBOUKHITINE, S.-E., BELARBI, R. & DJEDJIG, R., 2012. Characterization of green roof components: measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment*, 56, Pages 78-85

- [SAI 08] SAILOR, D.J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40, p.1466–1478.
- [SAI 08] SAILOR, D.J., HUTCHINSON, D. & Bokovoy, L., 2008. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. *Energy and Buildings*, 40, p.1246–1251.
- [SAN 07] SANTAMOURIS, M. et al., 2007. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 32(9), p.1781–1788.
- [STE 05] STEC, W.J., van PAASSEN, A.H.C. & Maziarz, A., 2005. Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5), p.419–427.
- [TEE 09] TEEMUSK, A. & MANDER, Ü., 2009. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment*, 44, p.643–650.
- [TSO 08] TSOUMARAKIS, C. et al., 2008. Thermal performance of a vegetated wall During hot and cold weather conditions. Dans 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin. Available at:  
[http://architecture.ucd.ie/Paul/PLEA2008/content/papers/poster/PLEA\\_FinalPaper\\_ref\\_635.pdf](http://architecture.ucd.ie/Paul/PLEA2008/content/papers/poster/PLEA_FinalPaper_ref_635.pdf).
- [WON 03] WONG, N. H. et al., 2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35, p.353–364.
- [WON 10] WONG, NYUK HIEN et al., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), p.663–672.