

23 /05/2018

## Rapport d'étude sur la performance des toitures Vertige®

CONVENTION LOCALE ECOCITE PLAINE DE GARONNE  
Fiche 35 Ecocité –Convention d'exécution du 20/04/2016  
Maximiser les îlots de fraîcheur urbain dans l'aménagement d'une ZAC  
« ZAC Bastide Niel à Bordeaux »

## CONTENU

1. Introduction.....	3
2. Présentation de l'étude.....	4
2.1. Présentation du modèle mathématique utilisé.....	4
2.2. Présentation de la plateforme expérimentale utilisée.....	6
3. Analyse numérique préalable des effets thermiques de la végétalisation.....	8
4. Simulations numériques avec des conditions climatiques et pluviométriques réelles.....	10
4.1. Scénarii de simulation.....	10
4.2. Résultats de simulations.....	11
4.2.1. Comportement thermohydrique des toits Vertige®.....	11
4.2.2. Incidence sur la performance énergétique des bâtiments.....	14
4.2.3. Débit d'irrigation et Performance estivale.....	15
5. Résultats attendus avec différents climats français.....	16
6. Résultats de la campagne expérimentale.....	17
6.1. Mise en place des toitures Vertige® sur la plateforme de l'ULR.....	17
6.2. Instrumentation des toitures végétalisées Vertige®.....	19
6.3. Analyse des résultats.....	20
7. Conclusion.....	22
8. Références scientifiques.....	24

# 1. Introduction

Les toitures vertes ont un potentiel considérable pour répondre aux problématiques énergétiques et environnementales liées aux bâtiments. Plusieurs études sur des toitures végétales montrent divers bénéfices liés à la végétalisation sur les plans de l'économie d'énergie (Fioretti et al., 2010; Jaffal et al., 2012; Santamouris et al., 2007), du microclimat urbain (Djedjig et al., 2015a, 2013a), de la gestion des eaux pluviales (Berndtsson et al., 2009; Czemieli Berndtsson, 2010; Mentens et al., 2006), de l'isolation acoustique (Van Renterghem et al., 2013; Van Renterghem and Botteldooren, 2009), de la dépollution atmosphérique (Thoennesen, 2002; Yang et al., 2008) et même sur le plan social (Raffan, 2002; Van Den Berg et al., 2007; White and Gatersleben, 2011).

Plusieurs études scientifiques montrent que la végétalisation réduit en été les pics de la température de surface extérieure. En effet, une paroi végétalisée est le siège d'un certain nombre de phénomènes de transfert n'ayant pas lieu habituellement sur une paroi standard. Les plus importants de ces phénomènes demeurent d'un côté, l'évapotranspiration associée à la rétention d'eau et à la transpiration végétale et d'un autre côté l'ombrage du rayonnement solaire par le feuillage des plantes. Ces mécanismes de transfert, différents de ceux d'une paroi standard, conduisent à la réduction des apports de chaleur par l'enveloppe et par conséquent à la réduction des besoins énergétiques de rafraîchissement. À noter que tous ces mécanismes dépendent directement des caractéristiques thermohydrauliques des matériaux constituant les modules de végétalisation et du type de plantes utilisées. Ces impacts dépendent directement du comportement thermohydraulique que présente le procédé de végétalisation utilisé. Ils sont, en effet, liés aux caractéristiques thermophysiques et hydrauliques de ses composants et au climat considéré. Ainsi, le recours à la modélisation numérique permet d'extrapoler les résultats expérimentaux qui sont par ailleurs indispensables.

Ce rapport a pour objet l'étude des toitures végétalisées *Vertige*<sup>®</sup>. L'étude s'intéresse en premier lieu aux performances de ces toitures et à l'estimation de leur impact énergétique sur les bâtiments qui en sont équipés. La question principale à laquelle répond ce rapport d'étude est : quels sont les effets du système d'irrigation *Vertige*<sup>®</sup> sur le comportement thermo-hydraulique et de la toiture et sur les besoins énergétique du bâtiment. La présente étude repose sur le déploiement de moyens expérimentaux et numériques développés à l'université de La Rochelle pour l'étude de différents types de parois végétalisées. Ceci est rendu possible grâce à la mise en place d'une plateforme expérimentale composée d'une maquette de bâtiments et au développement préalable d'un modèle théorique et numérique pour la simulation du comportement thermohydraulique des parois végétalisées. La plateforme expérimentale est située sur un terrain extérieur et est donc soumise aux conditions climatiques réelles. La modélisation a été développée à l'échelle de la paroi végétalisée (Djedjig et al., 2012) et a été intégrée au code TRNSYS permettant la simulation thermique dynamique des bâtiments (Djedjig et al., 2015b).

Ce rapport contient une présentation des moyens expérimentaux et de modélisation utilisés dans cette étude. Les résultats de la campagne expérimentale et de des simulations numériques sont par la suite présentés.

## 2. Présentation de l'étude

### 2.1. Présentation du modèle mathématique utilisé

Pour être en mesure de simuler le comportement hygrothermique complexe des parois végétalisées, il faut tenir compte d'un grand nombre de paramètres influents. La détermination de ces paramètres passe par l'analyse de l'ordre de grandeur des différents phénomènes de transfert à l'échelle de la paroi végétalisée. Ces phénomènes sont par ailleurs directement liés à la composition des éléments de végétalisation.

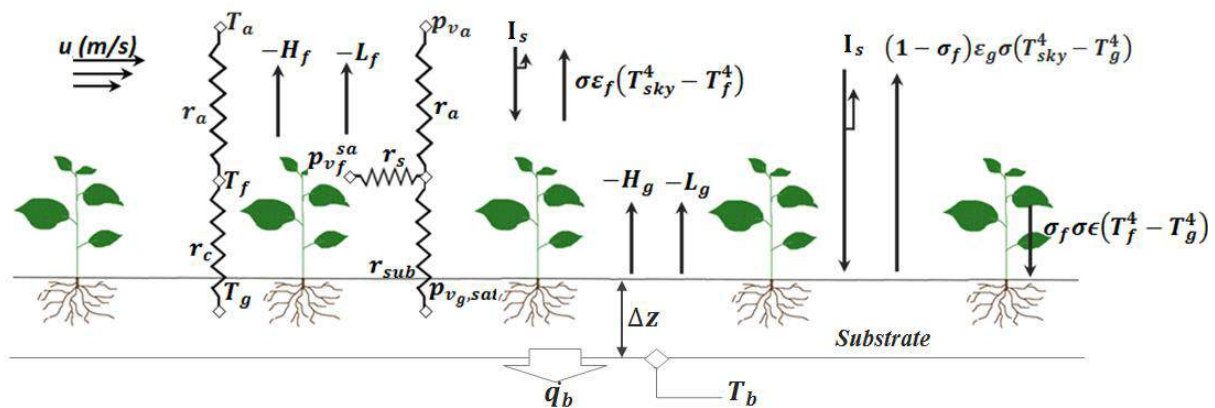


Figure 1 : Schéma des principaux modes de transferts hygrothermiques modélisés au niveau d'un composant d'un système de végétalisation en toiture

Le modèle utilisé a été validé par des données de mesures réalisées sur la même plateforme expérimentale utilisée dans la présente étude (Djedjig et al., 2012). Ce modèle considère la paroi végétale comme un revêtement composé de deux couches additionnelles : un couvert végétal (feuillage) et un milieu poreux rétenteur d'eau (substrat ou milieu de culture). Vis-à-vis du rayonnement solaire, le feuillage est représenté comme un écran semi-transparent dont la transmittance solaire dépend directement de la densité des feuilles définie par un indice de surface foliaire. Le substrat est un milieu poreux d'une épaisseur donnée. Il est caractérisé par sa capacité maximale de rétention en eau. Ses propriétés thermiques varient suivant sa teneur en eau. Le modèle thermohydrique repose sur l'établissement des bilans d'énergie et de masse sur toute la paroi végétalisée. Les bilans d'énergie considèrent les flux de chaleur radiatifs, sensibles et latents aussi bien sur le feuillage que sur le substrat (Figure 1). L'intensité de ces flux est proportionnelle aux gradients de températures et de pression de vapeur aux surfaces d'échanges considérées. Les différents termes des bilans d'énergie sont alors exprimés en fonction des écarts de température (ou de pression partielle de vapeur) entre les surfaces d'échanges et/ou l'air environnant. Ci-après, sont rappelés brièvement, les fondements théoriques de ce modèle sur lequel les simulations numériques sont basées.

Le bilan thermique sur le couvert végétal est établi comme suit:

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = Rn_f - H_f - L_f$$

Où  $Rn_f$ ,  $H_f$  et  $L_f$  [ $W.m^{-2}$ ] sont respectivement le rayonnement absorbé par les feuilles, la chaleur sensible et la chaleur latente (transpiration végétale) échangées par convection au niveau du feuillage. Dans cette expression  $Rn_f$  prend compte à la fois du rayonnement solaire et des échanges thermiques par rayonnement infrarouge :

$$Rn_f = Rn_{f,IR} + Rn_{f,s} = \sigma_f \left[ (1 - \tau_{f,s} - \rho_{f,s}) (1 + \tau_{f,s} \rho_{g,s}) \right] \times I_s + \sigma_f \left[ \varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \frac{1}{1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_g - 1} \sigma (T_g^4 - T_f^4) \right]$$

$$L_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma (r_a + r_s)} (P_{v_{f,sat}} - P_{v_a}) \quad ; \quad H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_f - T_a)$$

La modélisation du transfert thermique repose sur la résolution de l'équation de la chaleur dans le substrat, laquelle est couplée aux transferts hydriques à travers : i) les propriétés thermophysiques dépendant de la teneur en eau ( $\omega_g$ ) et ii) l'évapotranspiration. La teneur en eau du substrat est calculée à l'aide d'un bilan hydrique global.

Le transfert de chaleur dans le substrat est modélisé par les équations suivantes où les termes  $Rn_g$ ,  $H_g$  et  $L_g$  [ $W.m^{-2}$ ] sont définis de façon quasi-semblable à la définition des termes  $Rn_f$ ,  $H_f$  et  $L_f$ .

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

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Rn_g - H_g - L_g$$

$$Rn_g = (1 - \rho_{g,s}) (1 - \sigma_f (1 - \tau_{f,s})) I_s + \sigma_f \varepsilon_{fg} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1 - \sigma_f) \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4)$$

$$H_g = \frac{(\rho c_p)_a}{(r_c + r_a)} (T_g - T_a) \quad ; \quad L_g = \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma (r_{sub} + r_a)} (P_{v_{g,sat}} - P_{v_a})$$

Le bilan hydrique prend en compte les apports en eau liés à la précipitation  $P$ , à l'arrosage  $A$ , ainsi que les pertes en eau par drainage  $D$  et par évapotranspiration  $E$  (tous en  $kgm^{-2}s^{-1}$ ).

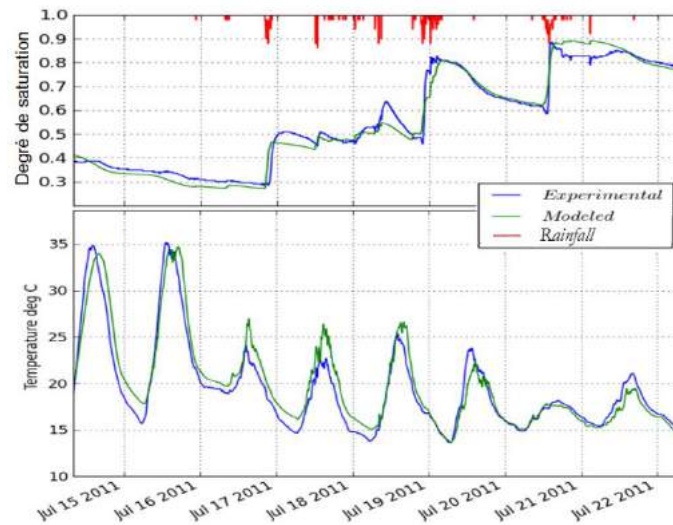
$$h_g \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = A + P - D - E$$

$$E = (L_f + L_g) / \lambda$$

Plus de détail concernant le calcul des différents termes des équations principales du modèle sont présentés dans la thèse (Djedjig et al., 2012) téléchargeable en ligne.

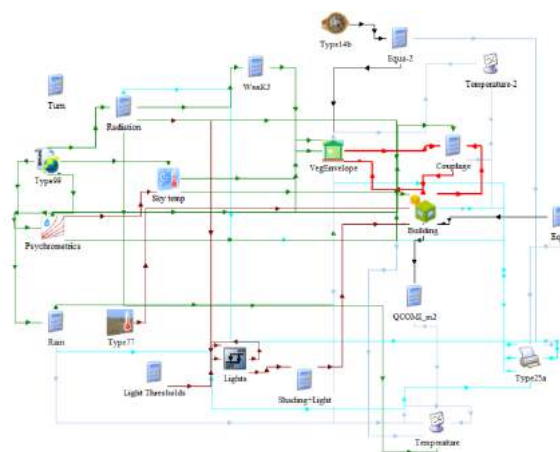
La fiabilité du modèle a été vérifiée en confrontant les résultats de simulation numérique à des mesures effectuées sur des toitures végétalisées qui ont été installés sur la plateforme expérimentale utilisée dans cette étude. Les comparaisons ont montré une bonne concordance entre la prédiction numérique et le comportement thermo-hydrique observé. La figure ci-dessous compare la prédiction numérique de la température de surface extérieure du substrat et de son

degré de saturation à des mesures effectuées sur une toiture végétalisée durant la troisième semaine du mois de juillet 2011.



**Figure 2 : Validation expérimentale du modèle de parois végétalisées : comparaison des simulations numériques aux mesures réalisées sur la plateforme de l'ULR**

Ce modèle a été intégré dans l'environnement de simulation thermique dynamique TRNSYS (Figure 3). Développé par le « Solar Energy Laboratory » de l'Université de Wisconsin, TRNSYS est distribué en France par le CSTB. Il possède un environnement de simulation modulaire de systèmes dynamiques. Il permet la simulation de systèmes complexes constitués de bâtiments y compris leurs équipements, les stratégies de contrôle et le comportement des occupants. Ce code de simulation comporte un modèle de bâtiments multizone (Type 56).



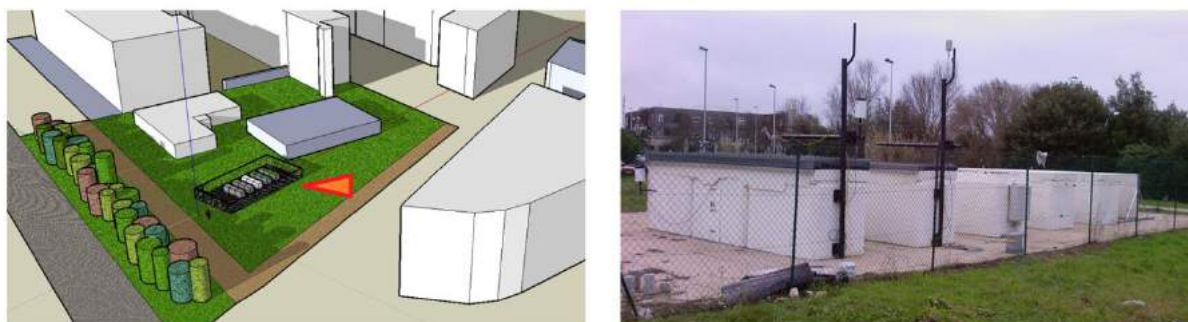
**Figure 3 : Schéma fonctionnel de la simulation de la toiture végétalisée sous Trnsys**

## 2.2. Présentation de la plateforme expérimentale utilisée

Afin d'acquérir des données fiables quant au comportement des complexes végétaux au sein des enveloppes des bâtiments et de quantifier leurs effets sur la performance énergétique des bâtiments, une plateforme expérimentale appartenant l'université de La Rochelle a été mise en

service pour collecter des données relatives au comportement thermohydrigue des toitures végétalisées étudiées.

La maquette expérimentale Climabat (cf. Figure 4) est construite sur une plateforme dallée en plein air d'une surface de  $10 \times 20 \text{ m}^2$ . Elle simule une scène urbaine à l'échelle 1:10 constituée de cinq bâtiments rectangulaires parallèles et identiques avec des façades orientées vers l'est et l'ouest. Chaque bâtiment est formé par la juxtaposition de 3 cuves de récupération d'eau pluviale. Les cuves, fabriquées en béton, ont une hauteur de 1,26 m, une largeur de 1,13 m et une longueur de 1,68 m. L'espacement régulier des bâtiments forme quatre rues canyons de rapport d'aspect Largeur/Hauteur égal à 0,8. La chaussée est équivalente à une aire piétonne légère. Elle est constituée de dalles en béton gravillonné de 4 cm d'épaisseur posées sur un lit de sable et de graviers de 80 cm.



**Figure 4 : Photographie de la plateforme expérimentale Climabat**

Les parois des cuves représentant les bâtiments à échelle réduite ne comportent ni vitrage ni isolation. L'absence de vitrages réduit les apports solaires qui représentent, pour les bâtiments réels, une source principale de chaleur. Néanmoins la faible épaisseur des parois non isolées compense en partie cette différence avec les bâtiments réels. Par ailleurs, l'inertie thermique des parois est faible. Avec une enveloppe en béton de 4,5 cm d'épaisseur, le modèle réduit correspond à un bâtiment réel à structure légère. Les différentes caractéristiques physiques de la plateforme sont listées dans le tableau Tableau 1.

D'est en ouest, la plateforme comporte deux blocs équipés de deux toitures végétalisées (sur lesquelles sont testés les systèmes *Vertige*®), un bloc témoin, et de deux blocs équipés de deux murs végétaux différents.

**Tableau 1 : Propriétés et dimensions principales de la plateforme Climabat**

Bâtiments Échelle 1:10		Rues Canyons	
Nombre	5 rangées, 3 par rangée	Nombre	5 rues
Dimensions	$1680 \times 1260 \times 1130 \text{ mm}^3$	Dimensions	$5 \text{ m} \times 1.3 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$
Matériau	Béton (5cm d'épaisseur)	Chaussée	Réflectance solaire = 0.36
Conductivité thermique	$2.36 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$		
Masse volumique	$2150 \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$		
Capacité calorifique	$915 \text{ (J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$		
Peinture Blache	Réflectance solaire = 0.64	Rapport d'aspect	$H/W \approx 1.2$

### 3. Analyse numérique préalable des effets thermiques de la végétalisation

La végétalisation des bâtiments réduit l'amplitude du flux thermique traversant l'enveloppe et atténue les pics de température de la surface végétalisée. Ceci est la résultante de trois effets distincts qui sont la résistance thermique du substrat qui diminue la valeur  $U$  de la toiture, l'ombrage par les feuilles qui diminue l'éclairement solaire et l'évapotranspiration qui dissipe la chaleur absorbée sous forme de chaleur latente. Bien qu'ils soient distincts, ces trois effets sont intimement liés et leurs incidences sont couplées. En effet, l'évapotranspiration modifie la teneur en eau du substrat, sa conductivité thermique change et par conséquent la valeur  $U$  de la paroi. Par ailleurs, l'augmentation de l'ombrage signifie l'augmentation de la couverture végétale, or une végétation plus importante signifie une plus grande évapotranspiration. Ceci affecte la température du substrat et la température du feuillage et influence les transferts sensibles et radiatifs infrarouges.

L'étude présentée ci-après a pour objectif d'étudier de manière théorique la contribution individuelle de la couche de substrat, de l'ombrage et de l'évapotranspiration en prenant en compte, successivement, ces différents effets. Pour cela, considérons 4 cas d'études numériques sont examinés (cf. Figure 5):

- Dans le premier cas, noté « REF », représente la toiture de référence dont l'albédo est fixé à 0,7.
- Dans le deuxième cas, noté « SUB », une couche de substrat de 8 cm (albédo=0,2, sans évaporation) est rajoutée sur la toiture de référence.
- Dans le troisième cas, noté « LAI », un couvert végétal d'indice de surface foliaire  $F=3$ . Les effets radiatifs et aéraulique liés au feuillage sont pris en compte mais l'évapotranspiration est désactivée.
- Dans le dernier cas, noté « ETP », la modélisation de toiture végétale est complète y compris le processus de l'évapotranspiration.

Les résultats des simulations numériques pour le climat de La Rochelle sont présentés dans la figure 6. Cette dernière illustre dans le graphique (a) les variations de la température de la membrane d'étanchéité ( $T_b$ ) (ou façade végétalisée dans le cas d'un mur) et dans le graphique (b) les variations du flux thermique ( $q_b$ ) transmis à l'intérieur du bâtiment.

Malgré la résistance thermique additionnelle du substrat, le pic de température dans la toiture « SUB » atteint 45 °C tandis qu'il ne dépasse pas 30 °C sur la toiture de référence et y reste assez proche de la température de l'air. Le pic de température élevé dans la toiture SUB, en l'absence d'évaporation, est dû à l'absorptivité solaire importante de la surface du substrat en comparaison avec celle de la toiture de référence. Il en résulte que les gains thermiques augmentent et que les pertes nocturnes diminuent. Ceci correspond à l'aire sous la courbe ( $Q_b\_SUB$ ) de la figure 6(b) qui est plus importante pour les valeurs positives et moindre pour les valeurs négatives de ( $q_b$ ).



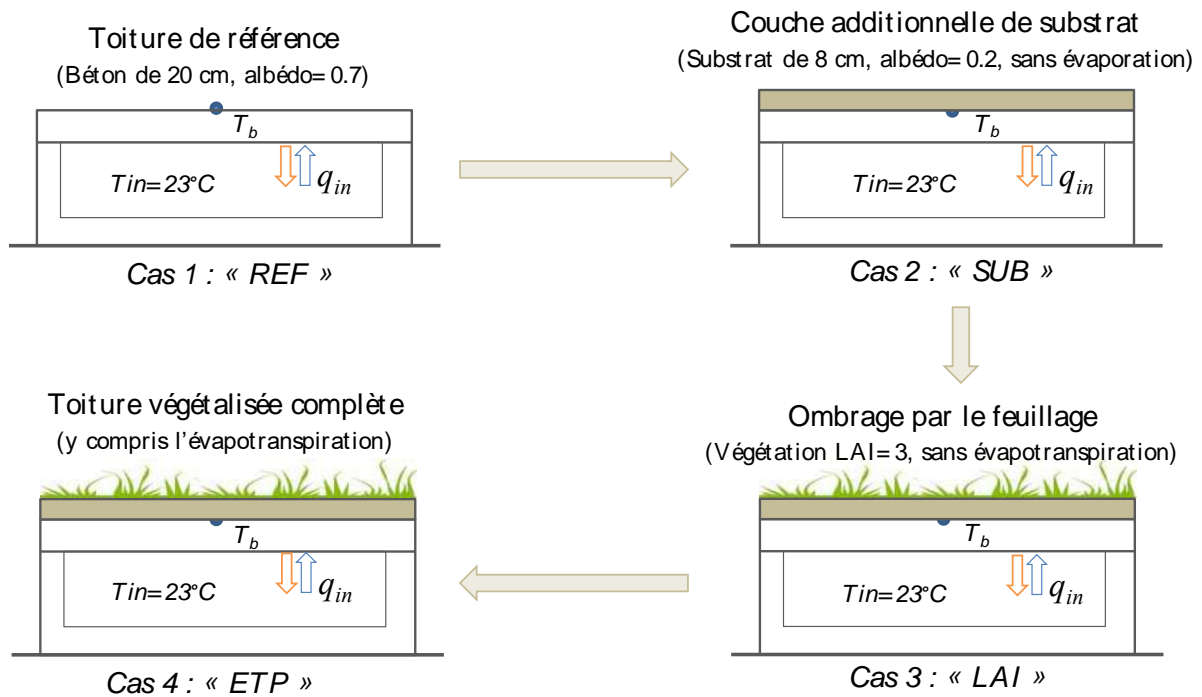


Figure 5 : Quatre cas d'étude pour l'évaluation des effets superposés de la couche de substrat, de l'ombrage foliaire et de l'évapotranspiration

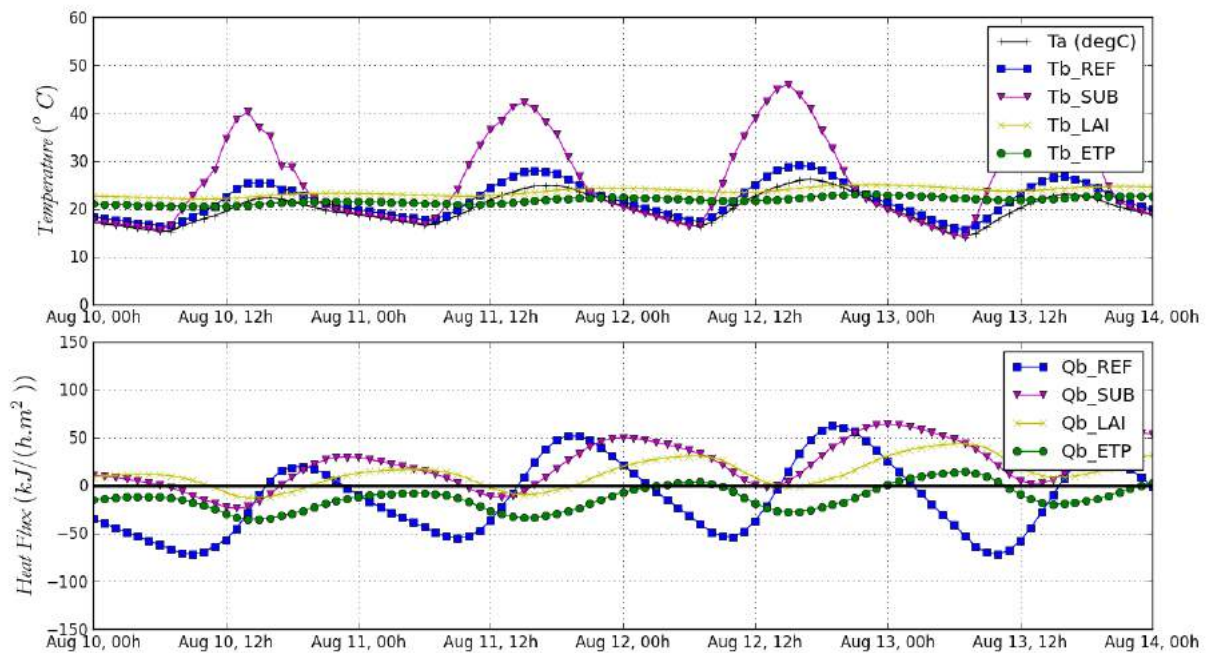


Figure 6 : Comparaison de l'évolution de la température de la membrane d'étanchéité pour les quatre cas d'étude ; (b) Comparaison de flux thermique transmis par la toiture vers le bâtiment pour les quatre cas d'étude

L'ombrage par le couvert végétal produit une baisse significative dans l'amplitude des variations de la température ( $T_b$ ). Dans ce cas, la température varie entre 20 et 25 °C. Conjointement, les gains thermiques sont réduits car l'éclairement solaire sur le substrat diminue. Toutefois, le bilan thermique de la surface reste positif (voir la courbe  $Q_b_{LAI}$ ). Donc, l'ombrage seul est peu efficace en l'absence de l'évapotranspiration. Enfin, avec la prise en compte de la transpiration

végétale et de l'évaporation directe dans le bilan thermique de la toiture végétale, la température ( $T_b$ ) diminue d'environ 3 °C. Ceci offre la propriété du rafraîchissement passif à la toiture modélisée puisque l'aire sous la courbe ( $Q_b\_ETP$ ) devient négative. Les résultats de cette étude numérique permettent de mieux appréhender le transfert de chaleur dans les enveloppes végétales et de prévoir le comportement que l'enveloppe pourrait avoir dans des conditions extrêmes suscitant le manque d'eau et de couverture végétale.

## 4. Simulations numériques avec des conditions climatiques et pluviométriques réelles

### 4.1. Scénarii de simulation

Le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS a été utilisé pour évaluer le comportement thermohydrigue des toitures Vertige® et leur impacts sur la performance énergétique des bâtiments. Pour cela, un cas d'étude a été défini.

Le cas d'étude est représenté par un bâtiment de plein pied de 100 m<sup>2</sup>. Afin de mieux montrer les effets thermiques de la végétalisation, le cas d'étude suppose un bâtiment non isolé dont les murs sont en parpaings creux de 20 cm d'épaisseur et dont la toiture est en béton armé et font 12 cm. Les surfaces vitrées sur les façades Nord/Sud représentent à 20 % de la surface habitable. Le taux d'infiltration est fixé à 0,6 vol.h<sup>-1</sup> et les gains thermiques internes sont nuls. L'albédo des surfaces des façades est fixé à 0,5.

Une étude comparative est réalisée pour ce bâtiment avec trois revêtements différents au niveau de la toiture (Figure 7) :

- i. Toit « Cool Roof » : Toit ayant une réflectance solaire  $\rho = 0.7$
- ii. Toit non irrigué : Toiture végétalisée 'standard' sans irrigation
- iii. Toit Vertige : Toiture Vertige® avec système d'irrigation intégré

Les propriétés des plantes et du substrat des deux toitures végétalisées sont plutôt équivalentes (La différence majeure étant l'irrigation du toit Vertige®). L'épaisseur du substrat des toitures est de 10 cm. Le taux de couverture végétale  $\sigma_f$  est de 100% et l'indice de surface foliaire est de  $F=4$ .

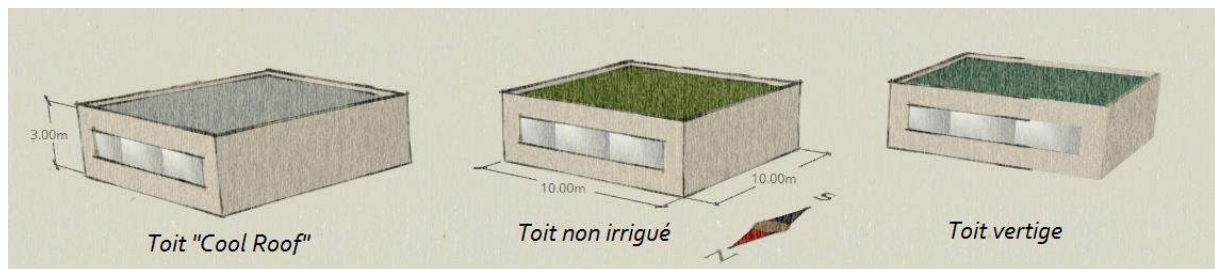


Figure 7 : Cas d'étude pour simulation et comparaison

Il a été considéré dans ces simulations, que le rafraîchissement est activé durant les trois mois de juin à Août et que le chauffage est mis en marche du mois d'octobre au mois d'avril. La température de consigne pour le rafraîchissement estivale a été fixée à 26 °C, celle de la période de chauffage a été fixée à 19°C.

L'irrigation du toit Vertige® est supposée avoir lieu uniquement en période de rafraîchissement. Les calculs sont réalisés pour un débit d'irrigation de 2 l/m<sup>2</sup> activé 4 fois par jour à 0h, 6h, 12h et 18h pendant 6 minutes (Figure 9).

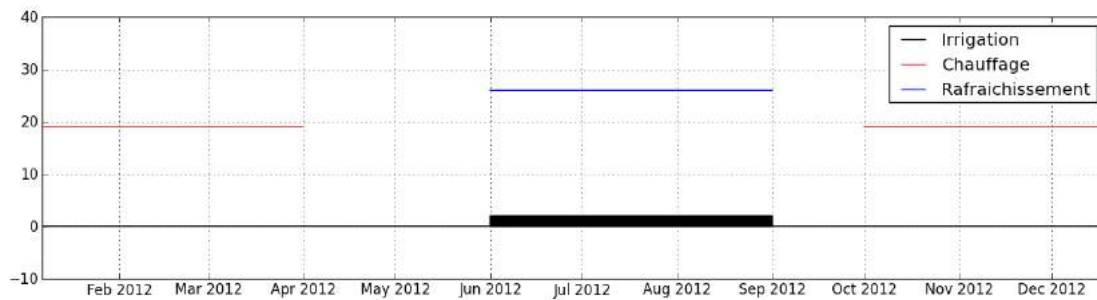


Figure 8 : Hypothèse de travail pour les températures consignes été/hiver et pour l'irrigation du toit Vertige

## 4.2. Résultats de simulations

Les simulations numériques ont été réalisées moyennant l'utilisation de données climatiques réelles enregistrées sur le site de l'université de La Rochelle durant la période allant du 7 janvier 2012 au 18 décembre 2012. Ces données couvrent quasiment toute l'année 2012 présentent l'avantage d'être très complètes et d'inclure des informations que l'on ne trouve ni dans les fichiers issues du commun des stations météo ni dans les fichiers météorologiques standardisés.

### 4.2.1. Comportement thermohydrique des toits Vertige®

La figure (Figure 9) montre un aperçu de quelques résultats des simulations réalisées sur les cas d'études présentés ci-dessus. Cette figure est composée de quatre graphiques :

- a. Le premier présente les données météorologiques principales qui sont la température de l'air ( $T_a$ ), l'humidité relative ( $HR$ ) et l'éclairement solaire sur l'horizontal ( $I_s$ ). les données de vitesse et de direction du vent et de la température fictive du ciel ne sont présentées ici par souci de clarté (la pluviométrie est représentée sur le 2<sup>ème</sup> graphe). l'utilisation de ces données réelles revêt ici tout son intérêt de l'interdépendance de ces données météorologiques entre elles. Ainsi, on peut remarquer la baisse du rayonnement solaire et de la température de l'air et la hausse de l'humidité relative lors des épisodes pluvieux des semaines du 5 au 12 mai et du 19 au 26 mai par exemple. cette interdépendance des conditions météorologiques conditionne le comportement thermohydrique dynamique des toitures végétalisées.

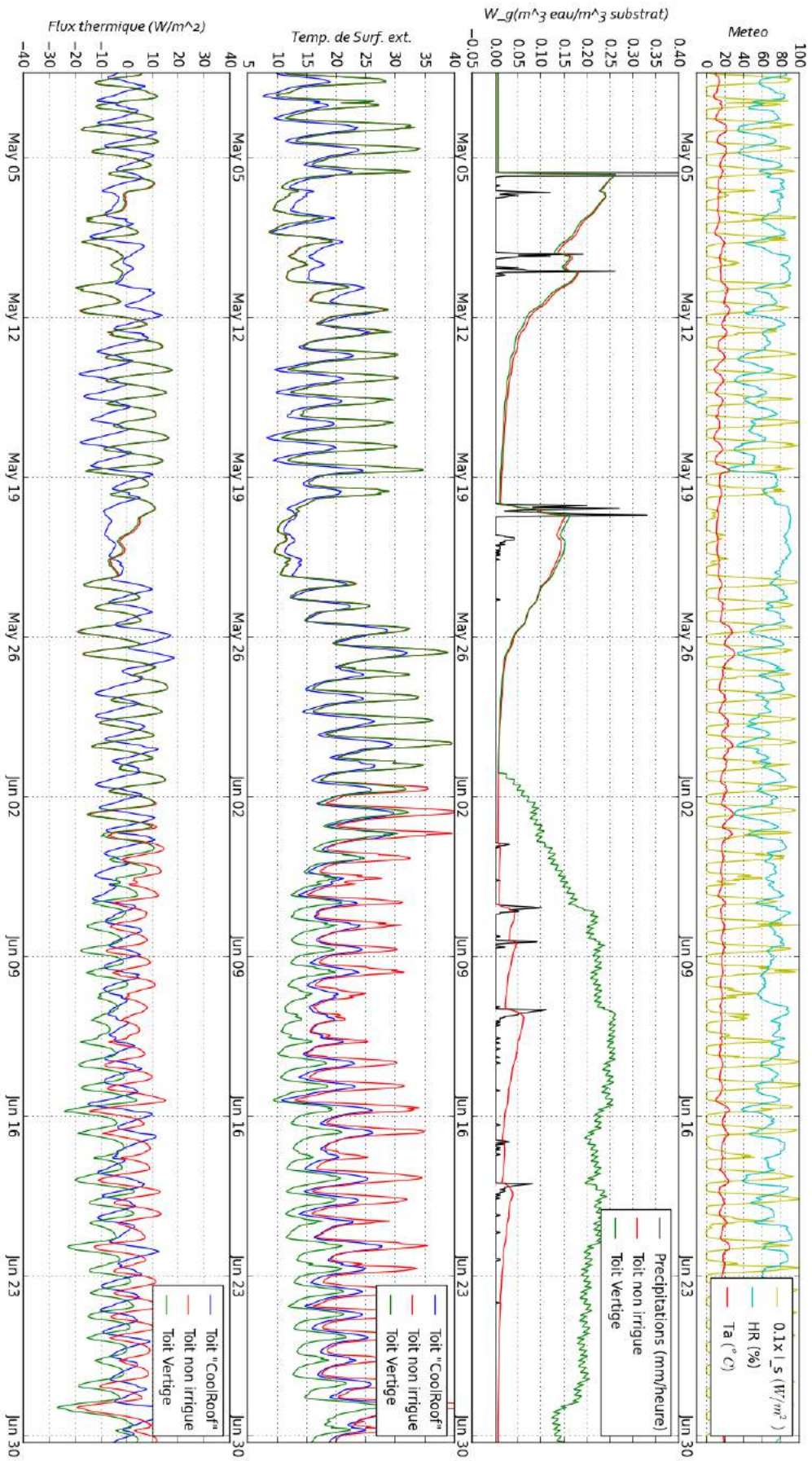


Figure 9 : Aperçu des résultats pour le comportement thermohydrrique des toitures simulées



- b. Le deuxième présente les données pluviométriques enregistrées durant cette période ainsi que les variations simulées de la teneur en eau du substrat des deux toitures végétalisées. Durant le mois de mai (avant la mise en route de l'irrigation), les deux toitures végétalisées présentent des performances comparables avec notamment des teneurs en eau qui augmentent suivant les épisodes pluvieux et qui rechutent énormément en moins d'une semaine en absence de précipitation. Dès la mise en route de l'irrigation, supposée en début du mois juin, la teneur en eau du toit Vertige® ne cesse d'augmenter jusqu'à une certaine valeur suffisamment élevée pour lutter contre cette période de stress hydrique. En fonction du débit d'irrigation imposé (ici 2l/m<sup>2</sup>, 4 fois/24h, pendant 2 min) la teneur en eau atteint maximum et se stabilise car l'intensité de l'évapotranspiration augmente avec la teneur en eau et équilibre ainsi à un certain niveau l'apport d'eau par irrigation.
- c. Le troisième graphe représente la variation de la température de surface extérieure pour chacune des trois toitures. Il s'agit ici de comparer les températures de surface extérieure de la toiture de référence « Cool Roof » avec les températures des surfaces extérieures des substrats des toitures végétalisées irriguées et non irriguée.

Durant le mois de mai (irrigation Vertige® désactivée), les deux toitures végétalisées se comportent de la même manière. En effet, la température de surface extérieure du substrat atteint des valeurs nettement plus élevées que la toiture « Cool Roof ». Ainsi pendant que la toiture Cool Roof fluctue avec une amplitude de 10°C avec des maxima autour de 25°C, la température des deux toitures végétalisées fluctue avec une amplitude 20°C avec des maxima de l'ordre de 35°C. Ceci s'explique par une très faible évapotranspiration due à la teneur en eau faible et l'absorption solaire élevées des toitures végétalisées comparées au Cool Roof (la toiture Cool Roof n'absorbe que 30% de l'éclairement solaire, tandis que les toitures végétalisées en absorbent jusqu'à 70%).

Dès que l'irrigation est mise en route dans la toiture Vertige®, la teneur en eau de cette dernière augmente ce qui intensifie le phénomène d'évapotranspiration. En conséquence, la température de surface de la toiture irriguée devient plus basse que la toiture Cool Roof ne dépassant pas ainsi les 20°C (5°C de moins que la toiture Cool roof)

- d. Le quatrième et dernier graphe de la figure 9 montre les variations du flux thermique transmis par les trois toitures à l'intérieur de leurs bâtiments respectifs. Les valeurs positives correspondent au flux thermiques entrants et les valeurs négatives correspondent aux flux sortants. Aussi, ces périodes nécessitant du rafraîchissement les flux négatifs sont synonymes d'économies de l'énergie. Ce graphe montre encore une fois que seuls des valeurs suffisamment élevées de teneur en eau confèrent aux toitures végétales leurs prétendues bienfaits thermiques. Ainsi, l'effet rafraîchissant des toitures végétales n'est observé au mois de mai que durant la semaine du 19 au 26 où il y a eu suffisamment précipitations. En outre, la mise en place de l'irrigation permet d'assurer les effets de rafraîchissement en périodes estivales qui sont liés en premier lieu à

l'intensité de l'évapotranspiration qui, elle-même, dépend directement de l'état hydrique du substrat.

#### 4.2.2. Incidence sur la performance énergétique des bâtiments

Les figure 10 et figure 11 permettent de comparer les charges énergétiques de rafraîchissement et de chauffage pour les trois bâtiments définis comme cas d'étude. Contrairement aux « besoins » thermiques, les « charges » thermiques représentent la quantité de chaleur sensible à apporter ou à soustraire à l'air intérieur du bâtiment pour respecter les consignes de températures selon la période. Cette quantité de chaleur ne tient pas donc du rendement des systèmes énergétiques. Il est à rappeler que l'étude actuelle compare trois bâtiments identiques et non isolés dont leur seule différence réside dans le revêtement du toit.

La figure 10 montre la différence entre la charge de climatisation en période estivale de chaque cas. Il est important de souligner que la charge thermique de rafraîchissement du bâtiment de référence, ici en bleu, dépend fortement de l'albédo du toit. Ainsi, pour un toit dont la réflectance solaire est moins importante que celle supposée ici pour le Cool Roof ( $\rho_s=0.7$ ). La mise en place d'une toiture végétalisée non irriguée fait baisser la charge thermique de rafraîchissement de 26% tandis la mise en place d'une toiture végétalisée irriguée de type Vertige® diminue cette charge de plus de 75% par rapport au toit de référence. En période hivernale, cette même toiture permet de réduire cette charge de climatisation de 30% en l'absence d'irrigation. Une toiture irriguée en période hivernale voit en général ses performances thermiques diminuer.

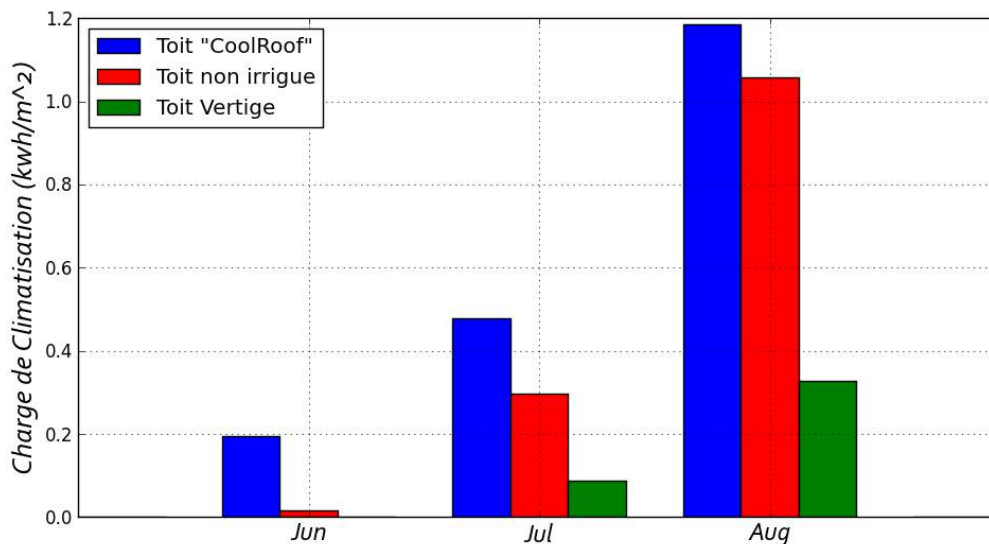
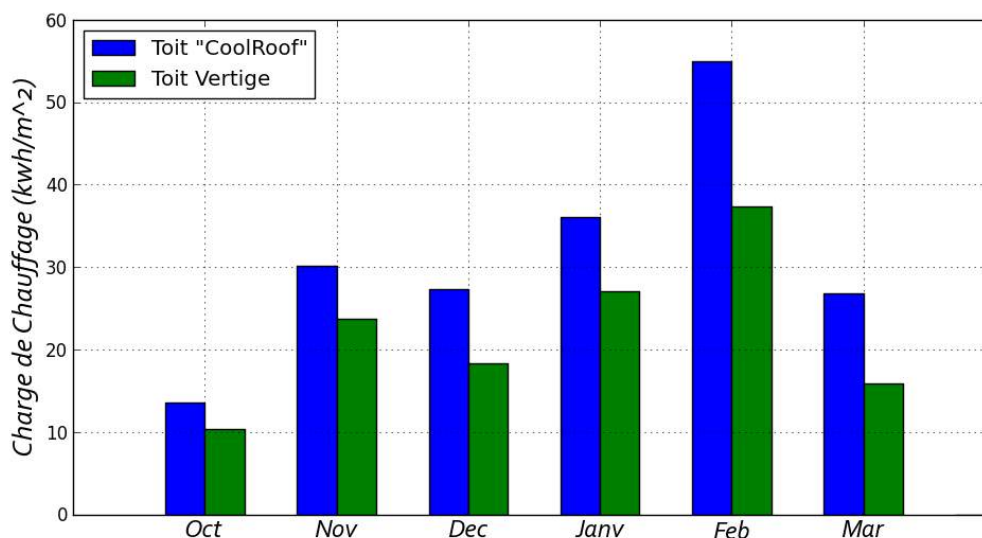


Figure 10 : Comparaison entre les besoins énergétiques de rafraichissement des trois bâtiments



**Figure 11 : Comparaison entre les besoins énergétiques de chauffage des trois bâtiments**

Ces résultats se traduisent par une réduction de la charge thermique globale de l'ordre de 30%. Car les besoins les plus importants sont les besoins de chauffage (avec plus de 98% du besoin global de référence). À rappeler par ailleurs le fait que l'impact thermique des murs végétalisés est de moins en moins important que l'épaisseur de l'isolant de plus en plus importante. Cela signifie le bénéfice énergétique des toitures végétalisées reste limité dans les villes situées dans des zones climatiques nécessitant du chauffage en premier lieu. Il est en découle que dans plusieurs situations, les effets hygrothermiques ressentis dans l'environnement extérieur sont plus importants que ceux engendrés à l'intérieur des ambiances habitables notamment dans les villes où les besoins de chauffage sont prépondérants.

#### **4.2.3. Débit d'irrigation et Performance estivale**

Les résultats présentés dans le paragraphe précédent montrent la forte réduction de la charge de rafraîchissement conférée par les toitures Vertige® grâce au système d'irrigation intégré. Ainsi, en imposant un débit d'irrigation de de 2 l/m² activé 4 fois par jour à 0h, 6h, 12h et 18h pendant 6 minutes (soit au total 0.8 l/m²/jour), nous obtenons une réduction de la charge de rafraîchissement de l'ordre de 75%.

Dans ce paragraphe, l'importance du débit d'irrigation imposé est étudiée. Tout en gardant les mêmes durées et fréquences d'irrigations, d'autres débits d'irrigations plus faibles sont simulés. La figure 12 compare les charges de rafraîchissements pour différents débit d'irrigation allant de 0 à 0.8 l/m²/jour (les deux valeurs extrêmes 0 l/m²/jour et 0.8 l/m²/jour correspondent aux cas précédents). La figure montre que la réduction de la charge de rafraîchissement est quasiment proportionnelle au débit d'irrigation. Ainsi à chaque augmentation du débit d'irrigation de 0.2 l/jour correspond une réduction de la charge de rafraîchissement d'environ 20. En effet, l'évapotranspiration s'intensifie en augmentant la teneur en eau du substrat et cette dernière se stabilise à des valeurs de plus en plus élevées en augmentant le débit d'irrigation dans la limite de la capacité maximale de rétention.

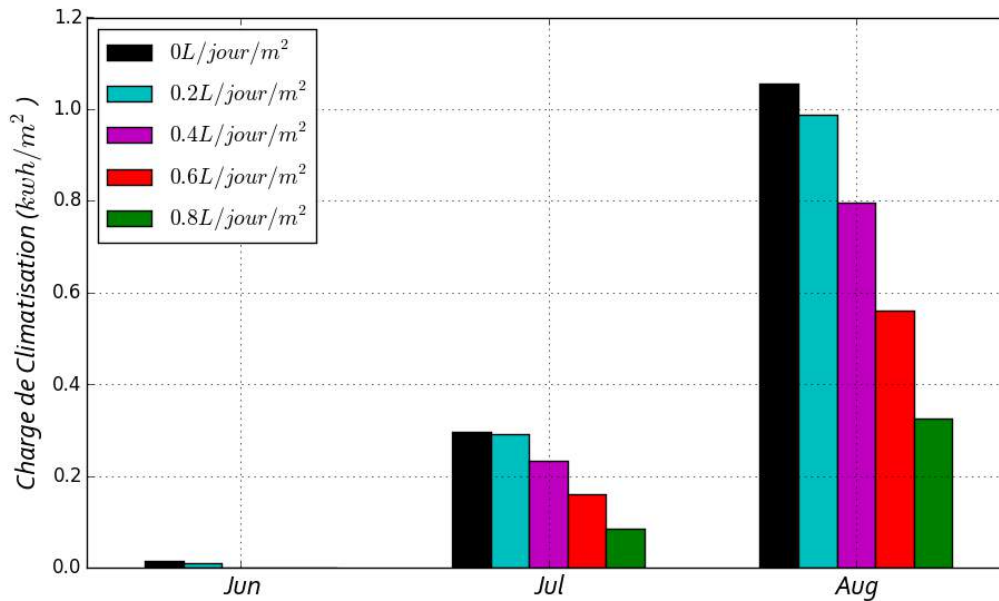


Figure 12 : Comparaison entre les charges thermiques de rafraichissements en fonction du débit d'irrigation

## 5. Résultats attendus avec différents climats français

D'autres simulations ont été réalisées pour d'autres villes françaises sujettes à d'autres types de climats. Il ne s'agit plus ici d'utiliser des données météorologiques réelles et complètes comme cela a été le cas dans le paragraphe précédent mais de réaliser des simulations numériques moyennant des fichiers contenant des données météorologiques standardisés (fournies par Meteonorm).

L'objectif est d'évaluer la variabilité des impacts thermiques et énergétiques de la végétalisation des toitures en fonction des différentes zones climatiques françaises. Ainsi, il a été choisi de comparer les résultats attendus pour le climat océanique aquitain de Bordeaux avec ceux du climat méditerranéen de Marseille et du climat semi-continentale de Strasbourg. Les résultats en termes de l'évaluation des besoins énergétiques de rafraichissement et de chauffage sont présentés dans le tableau 1. Ce tableau récapitule les résultats obtenus pour les trois villes considérées. Il présente pour chacune les besoins énergétiques en [kWh/an/m²] pour le bâtiment de référence et pour le bâtiment végétalisé par une toiture végétalisée de type Vertige® dont la teneur en eau de son substrat est maintenue à 50% de sa capacité de rétention maximale durant toute l'année.

On remarque néanmoins que les petits besoins de rafraichissement sont plus facilement couverts par le toit végétalisé. La réduction des besoins de chauffage est moins importante que celle du rafraichissement, et ce pour les trois villes considérées. Elle est plus importante pour la ville de Strasbourg du fait que les besoins de chauffages dans cette ville sont très importants par rapport aux deux autres villes (plus que le double). En termes du bénéfice global, la ville de Strasbourg est en tête du classement du fait que les besoins énergétiques de chauffage en période hivernale sont prépondérants.



**Tab. 1 : Récapitulatif des résultats de simulation des besoins énergétiques de chauffage et de rafraîchissement (en kWh/an/m<sup>2</sup>) du bâtiment défini par le cas d'étude pour les climats de Bordeaux, Marseille et de Strasbourg**

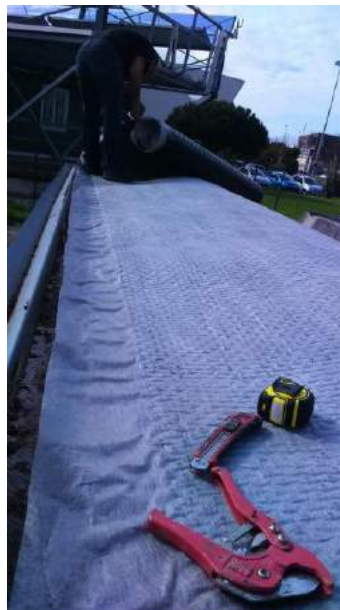
Charges (kWh/an/m <sup>2</sup> )	Toit Cool Roof ( $\rho_s=0.7$ )		Vertige® (50% CME)		Réduction des charges thermiques		
	Chauffage	Froid	Chauffage	Froid	Chauffage	Froid	Total
Bordeaux	198	1.1	171	0.0	13.5%	98.7%	14.0%
Marseille	170	9.0	143	3.0	15.8%	67.0%	18.4%
Strasbourg	289	0.6	249	0.0	13.8%	99.9%	13.9%

☞ Ces résultats sont donnés à titre indicatif car l'incidence de la toiture végétalisée dépendra à la fois de la teneur en eau, ici supposée constante (un substrat plus sec en hiver et plus humide et été donnera de meilleurs performances), et de l'isolation du toit (ici sans isolation).

## 6. Résultats de la campagne expérimentale

### 6.1. Mise en place des toitures Vertige® sur la plateforme de l'ULR

Deux toitures végétalisées Vertige® ont été installées sur la plateforme expérimentale de l'Université de La Rochelle. Les deux toitures diffèrent par leurs couches de drainage et par le raccordement des nourrices d'irrigation. La couche de drainage de la toiture n°1 est composée de pierre de verre (matériau recyclé) et de pouzzolane (roche volcanique) et celle de la toiture n°2 est composée de pierre de verre et de billes d'argile. Un branchement classique est réalisé sur la toiture n° 1 et un système de collier auto perçant (CPC) est utilisé sur la toiture n° 2. L'installation des deux toitures a été réalisée en plusieurs étapes illustrées ci-dessous.



Préparation



Dépôt du tapis de rétention d'eau en chanvre

Pose du film d'étanchéité



Mise en place du tapis d'irrigation

Dépôt de la couche de drainage



Raccord des nourrices d'irrigation  
Toiture n°1 : Branchement classique



Raccord des nourrices d'irrigation  
Toiture n°2 : système de collier prise en charge auto perçant (CPC)



Dépôt des tapis de Sédum



**Figure 13 : étapes d'installation des deux toitures Vertige® sur la plateforme de l'ULR**

## 6.2. Instrumentation des toitures végétalisées Vertige®

Différents capteurs ont été mis en place sur la surface et dans les différentes couches des toitures pour permettre l'étude de leurs comportements thermique et hydrique. Les données météorologiques du site (température de l'air, humidité relative, flux radiatif de grande et de courte longueur d'onde, vitesse du vent et pluviométrie) sont mesurées et enregistrées grâce à la station météorologique disposée à deux mètres de hauteur au-dessus des deux toitures.

Des capteurs mesurant les températures à différents niveaux des complexes végétaux (dans le substrat, dans le feuillage) ont été installés. De même, des hygromètres qui mesurent l'évolution de l'humidité relative au niveau des complexes ont été mis en place. Il y a eu recours à l'utilisation des TDR (Time Domain Reflectometry) et des sondes ML2X pour la mesure de la teneur en eau volumique dans les couches des substrats. Enfin, des capteurs de flux thermiques sont installés au niveau des toitures pour mesurer les flux de chaleur reçus et transmis vers le bâtiment (cf. Figure 14). La liste des capteurs utilisés dans la campagne expérimentale est détaillée dans le tableau ci-dessous.

Ces capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition qui stocke temporairement les données (enregistrement à intervalle régulier, ici toutes les 15 minutes). L'analyse comparative du comportement des deux toitures permet de qualifier l'intérêt que procurent la végétalisation et l'irrigation en termes du degré de confort thermique dans les ambiances intérieures. De plus, une évaluation des gains sera également réalisée.

**Tableau 2 : Liste des capteurs installés pour le suivi expérimental des deux toitures**

Centrale acquisition MA5790 N° série : A11070131								Couleur fil + tresse					
Zone de localis	Fonction	Tague	affectation connecteur sur centrale	Ref Matériel	N° série	Sensibilité	Alimentation	ø câble (mm)	1	2	3	4	Tresse
V2	Sonde de teneur en	CV2ECH1	M0	ECH20-5-20m	20m-4		3,3 V Borne 3 et	5,0	M	A+	so	so	A-M
V2	Sonde de teneur en	CV2ECH2	M1	ECH20-5-20m	20m-5		3,3 V Borne 3 et	5,0	M	A+	so	so	A-M
V2	Sonde de teneur en	CV2ECH3	M2	ECH20-5-20m	20m-6		3,3 V Borne 3 et	5,0	M	A+	so	so	A-M
V2	Sonde de teneur en	CV2MLX	M3	ML2X	370/053		12 V borne 1 et	4,5	A+	A-	M	M-	T
V1	Sonde de teneur en	CV1ECH1	M4	ECH20-5-8m	8m-4		3,3 V Borne 3 et	5,0	M	A+	so	so	A-M
V1	Sonde de teneur en	CV1ECH2	M5	ECH20-5-8m	8m-5		3,3 V Borne 3 et	5,0	M	A+	so	so	A-M
V1	Sonde de teneur en	CV1ECH3	M6	ECH20-5-8m	8m-6		3,3 V Borne 3 et	5,0	M	A+	so	so	A-M
V1	Sonde de teneur en	CV1MLX	M7	ML2X	370055		12 V borne 1 et	4,5	A+	A-	M	M-	
V1	Temp + humidité	CV1THR	M8,M18,M28,M	FHAD462L10	11070090		sans		Connecteur AMR				
CONNECTEUR UMU C1													
GR	Température surface	CGRSRF	M30	2283	2283-4		sans	3,0	R	R	B	B	
V2	température substrat	CV2SUB1	M31	3523	3523-7		sans	3,0	R	R	B	B	
V2	température substrat	CV2SUB2	M32	3523	3523-8		sans	3,0	R	R	B	B	
V2	température substrat	CV2SUB3	M33	3523	3523-9		sans	3,0	R	R	B	B	
V1	température substrat	CV1SUB1	M34	3523	3523-10		sans	3,0	R	R	B	B	
V1	température substrat	CV1SUB2	M35	3523	3523-11		sans	3,0	R	R	B	B	
V1	température substrat	CV1SUB3	M36	3523	3523-12		sans	3,0	R	R	B	B	
GR	Sonde transfert	CGRTRT	M37	HFP01-05	006005	62,60	sans	4,0	M-	M+	so	so	T
V1	Sonde transfert	CV1TRT	M38	HFP01-05*	004331	65,3 µV/W/m2	sans	4,0	M-	M+	so	so	T
V2	Sonde transfert	CV2TRT	M39	HFP01-05*	005316	65,3 µV/W/m2	sans	4,0	M-	M+	so	so	T





Figure 14 : photo de quelques capteurs et de la centrale d'acquisition utilisés dans le suivi expérimental

### 6.3. Analyse des résultats

Les données présentées dans cette partie concernent la séquence enregistrée entre le 27 septembre et le 10 octobre 2017. La figure 15 illustre la variation des données météorologiques constatées durant cette période en termes des variations journalières des températures maximales et minimales et en termes des précipitations. Durant cette période, variait quelques fois entre 15°C et 25°C et d'autre fois entre 5°C et 18°C en passant par une journée où l'amplitude des variations journalières de température enregistrées n'était que de 2°C. Durant cette période, des précipitations assez faibles en général ont été constatées à l'exception de la fin du mois de septembre et du début du mois d'octobre où l'on a enregistré jusqu'à 7 mm/jour de précipitations.

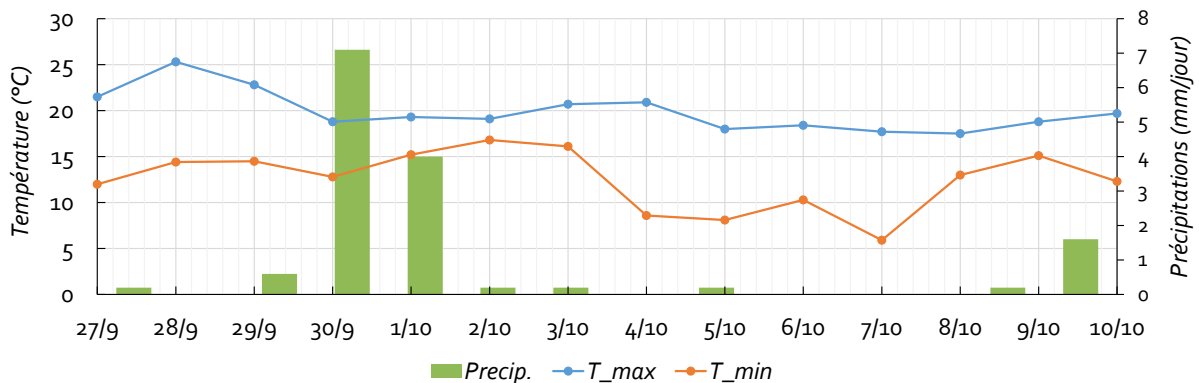
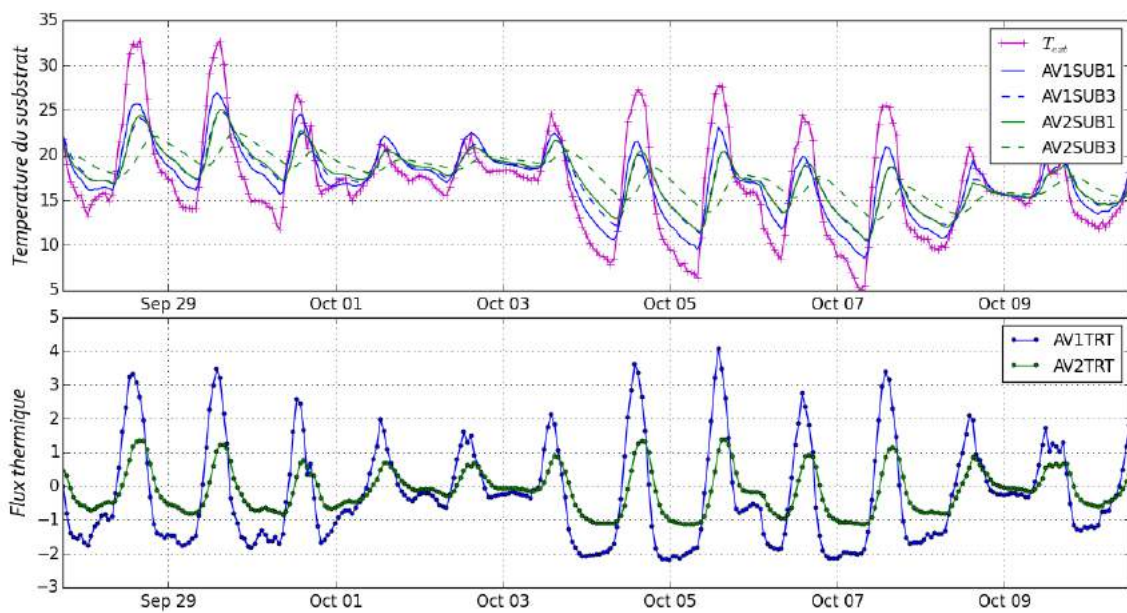


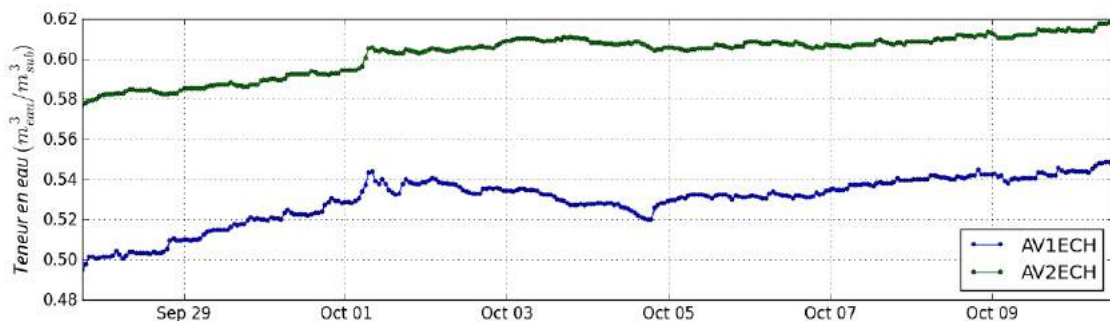
Figure 15 : Températures maximales et minimales et précipitations journalières enregistrés à La Rochelle entre le 27 septembre 2017 et le 10 octobre 2017

Les figures 16 et 17 comparent les résultats de mesures réalisées sur les deux toitures végétalisées. La toiture n°1 est notée ici AV1 et la toiture n°2 est notée AV2. Comme cela a été

détaillé dans la section §6.1, la différence entre les deux toitures réside dans la composition de la couche de drainage et dans le raccordement du système d'irrigation. La figure 16 compare, dans son premier graphe, les variations des températures mesurées en surface et en profondeur des deux toitures et illustre en même temps les variations de la température de l'air extérieur. Son deuxième graphique compare les variations des flux de chaleur traversant les deux toitures. Les valeurs positives représentent les gains thermiques à travers la toiture (flux entrant) et les valeurs négatives représentent les pertes thermiques (flux sortant). La figure 17 compare les variations des teneurs en eau volumiques dans les deux toitures AV1 et AV2.



**Figure 16 : Comparaison des mesures réalisés sur les deux toitures (AV1 et AV2) en termes des variations de températures en surface (SUB1) et en profondeur (SUB2) et en termes du flux thermique traversant (TRT)**



**Figure 17 : Comparaison de variations de la teneur en eau volumique des deux toitures AV1 et AV2**

Le premier graphe de la figure 16 montre que la température maximale journalière en surface atteint des valeurs plus élevées dans la toiture n°1 avec 2°C de plus par rapport à la toiture n°2. Cette même surface extérieure atteint des valeurs jusqu'à 3°C de moins que la toiture n°2. Il en résulte que l'amplitude de variations en surface est plus élevée dans la toiture n°1 que la

toiture n°2 avec un écart moyen de 5°C d'amplitude. Les mêmes constats sont relevés concernant la température mesurée au fond des deux toitures végétales avec une atténuation de l'écart des amplitudes de 2°C (3°C d'écart d'amplitude au lieu de 5°C en surface). En résumé les fluctuations de température sont plus faibles sur la toiture n°2.

Il existe aussi une différence notable en termes d'inertie thermique entre les deux toitures. En effet, on constate un déphasage de l'ordre 1H30 sur entre la surface et le fond de la toiture n°1 tandis que le déphasage sur la toiture n°2 atteint jusqu'à 4h. Ce déphasage a l'avantage de favoriser le confort thermique en période estivale.

Ces différences dans les variations temporelles de températures se traduisent par une différence constatée sur les flux de chaleur traversant les deux toitures et donc sur la demande énergétique des bâtiments qui en sont équipés. En effet, le deuxième graphe de la figure 16 montre que le transfert de chaleur à travers la toiture n°1 est plus important que ce qu'il est sur la toiture n°2. En effet, la quantité de chaleur mise en jeu est réduite de moitié dans la toiture n°2 par rapport à celle de la toiture n°1.

Les bonnes performances de la toiture n°2 peuvent être expliquées par sa plus grande teneur en eau comme on peut le voir sur la figure 17. Ainsi, la toiture n°2 présente de plus hautes teneur en eau durant toute la période analysée avec environ 15% de plus par rapport à la toiture n°1. En effet, la pouzzolane présenterait de meilleures caractéristiques en termes de rétention d'eau que les billes d'argiles. Par ailleurs, le raccordement classique tel qu'il est réalisée pourrait laisser passer plus facilement l'eau d'irrigation.

La teneur en eau plus élevée dans la toiture n°2 est à l'origine de la plus forte baisse de température de surface et du flux thermique traversant la toiture. Elle explique, par ailleurs, la forte inertie thermique de cette toiture qui lui est conférée grâce à la capacité thermique élevée de l'eau liquide qui est de  $4.18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Ces résultats sont en accord avec les conclusions de l'étude numérique par simulation moyennant le modèle de Djedjig et al. (2012).

## 7. Conclusion

L'étude s'est portée sur performances des toitures Vertige® et à l'estimation de leur impact énergétique sur les bâtiments qui en sont équipés. Les résultats aussi bien numérique qu'expérimentaux mettent en évidence les effets du système d'irrigation Vertige® sur le comportement thermo-hydrique et de la toiture et sur les besoins énergétique du bâtiment. L'étude a bénéficiée des moyens expérimentaux et numériques en développement à l'université de La Rochelle depuis plus de 10 ans. Ainsi, deux toitures ont été installés sur une plateforme expérimentale composée permettant le suivi continu de leur comportement thermo-hydrique. Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle théorique et numérique développé au sein du Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) a permis de simuler le comportement thermohydrique de ces toitures végétalisées et de mieux appréhender leur incidence sur la performance énergétique des bâtiments.

Les résultats numériques et expérimentaux de cette étude soulignent l'importance et l'efficacité du système d'irrigation intégré aux toitures Vertige®. Il a été trouvé que l'irrigation des toitures en périodes de sécheresse estivales améliore nettement les effets thermiques des toitures végétalisées sur les bâtiments aussi bien en termes de besoins énergétique (réduction des flux de chaleur traversant la toiture) qu'en termes de confort thermique intérieur (augmentation de l'inertie thermique). L'ampleur des effets de l'irrigation est quasiment proportionnelle aux débits d'irrigations imposés dans la limite de la capacité maximale en eau des constituants des toitures végétalisées.

## 8. Références scientifiques

- Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K., 2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering* 35, 369–380. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.09.020
- Czemiel Berndtsson, J., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36, 351–360. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.014
- Djedjig, R., Belarbi, R., Bozonnet, E., 2013. Experimental Study of a Green Wall System Effects in Urban Canyon Scene, in: *Proceedings of CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air*. Presented at the 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air, Prague, Czech Republic.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2015a. Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *Int. J. Low-Carbon Tech.* 10, 34–44. doi:10.1093/ijlct/ctt019
- Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2015b. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings* 86, 93–103. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.057
- Djedjig, R., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Bozonnet, E., 2012. Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 752–761. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024
- 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, 1890–1904. doi:10.1016/j.buildenv.2010.03.001
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43, 157–164. doi:10.1016/j.renene.2011.12.004
- Jim, C.Y., Tsang, S.W., 2011. Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs. *Energy and Buildings* 43, 1341–1350. doi:10.1016/j.enbuild.2011.01.012
- 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, 217–226. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.010
- Raffan, J., 2002. *La nature nourricière: une étude du potentiel d'apprentissage dans les cours d'école*. Evergreen, Toronto.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., Patargias, P., 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, 1781–1788. doi:10.1016/j.energy.2006.11.011
- Thoennessen, M., 2002. Elementdynamik in fassadenbegrünendem Wilden Wein, *Kölner Geograph. Arbeiten Heft* 78, 1–110.
- Van Den Berg, A.E., Hartig, T., Staats, H., 2007. Preference for Nature in Urbanized Societies: Stress, Restoration, and the Pursuit of Sustainability. *Journal of Social Issues* 63, 79–96. doi:10.1111/j.1540-4560.2007.00497.x
- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., 2009. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment* 44, 1081–1087. doi:10.1016/j.buildenv.2008.07.013
- Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., Botteldooren, D., 2013. The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment* 61, 34–44.
- White, E.V., Gatersleben, B., 2011. Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty? *Journal of Environmental Psychology* 31, 89–98. doi:10.1016/j.jenvp.2010.11.002
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P., 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42, 7266–7273. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.003