
AGROnomie et BATiment : Incidence des toitures végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments selon une approche pluridisciplinaire

Rafik BELARBI, Salah-Eddine OULDBOUKHITINE

*Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement LaSIE,
Université de La Rochelle (Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex I
(rbelarbi@univ-lr.fr)*

RÉSUMÉ. Cet article présente les principaux résultats du projet ANR-Habisol AGROBAT. L'objectif final de cette étude est d'évaluer l'incidence des toitures terrasses végétalisées (TTV) sur la performance énergétique des bâtiments moyennant des investigations numériques et expérimentales. La démarche retenue est basée sur cinq phases successives :

La première a été dédiée à la caractérisation des principales propriétés de transfert thermique, hydrique et microstructurale du complexe végétalisé. Elle a permis d'alimenter le modèle de prédiction par des paramètres d'entrées fiables.

La deuxième a été consacrée au développement du modèle de transfert couplé de chaleur et de masse à l'échelle du composant de la toiture végétalisée.

Une implémentation du modèle de toiture dans un code de simulation thermique dynamique a été effectuée durant la troisième phase. En guise de validation du modèle, une confrontation entre les résultats numériques et les données expérimentales issus d'une plateforme échelle 1/10 et de bâtiments réels a été entreprise durant la quatrième phase. Une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux a été observée.

La dernière phase a été destinée à la prédiction de la performance énergétique des bâtiments munis de toitures végétalisées. Moyennant des simulations numériques annuelles, des comparaisons ont été entreprises entre un bâtiment végétalisé en toiture et le même bâtiment avec une toiture conventionnelle, pris comme référence. Les résultats montrent, notamment, que la présence d'une TV protège la membrane d'étanchéité de la toiture des températures extrêmes et des grandes fluctuations de températures. Un effet de rafraîchissement passif a été observé en été, avec une diminution des besoins du bâtiment végétalisé allant de 6 à 32 % selon les conditions climatiques.

ABSTRACT. This paper presents the main results of the project named ANR-Habisol AGROBAT. The objective of this study is to evaluate the impact of green roof on building energy performance through numerical and experimental methods. The approach is based on five phases:

First, different physical properties of green roofs were experimentally investigated to determine some of the key green roof modeling parameters. Thermo-physical, hydric and micro-structural properties were characterized.

Next, a coupled heat and mass transfer model was developed at the level of green roof components. This proposed model was coupled with a building thermal code during the third phase of this project. In order to validate the proposed model, a comparison were undertaken between the numerical results obtained by the proposed model and the experimental results obtained through a reduced green roof experimental platform scale (1:10). A good agreement between the numerical and the experimental results was observed.

The last phase of this project was aimed to predict the energy performance of green roof building. Comparisons were undertaken between building with green roof and the same building with conventional roof taken as reference. The results show that the presence of green roof protects the roof structure from extreme temperatures and large temperature fluctuations. Furthermore, a passive cooling effect was observed in summer reducing the energy demand of green roof building from 6 to 32% depending on weather conditions.

MOTS-CLÉS : Toiture végétalisée, validation expérimentale, transfert de chaleur et d'humidité, caractérisation, besoins énergétique.

KEY WORDS: Green roof, Experimental validation, heat and mass transfer, characterization, energy demand.

1. Introduction

En vue d'optimiser la consommation énergétique d'un bâtiment, il s'avère nécessaire de caractériser les ambiances intérieures en termes d'évolution de température et l'humidité relative, différentes solutions innovantes de construction peuvent être mises en œuvre. Le recours à l'utilisation des Toitures Terrasses Végétalisées (TTV) constitue une solution innovante performante. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR-Habisol «AGROBAT». Il est soutenu par la Région Poitou-Charentes. L'objectif étant non seulement l'évaluation de l'incidence des TTV sur la performance énergétique et environnementale des bâtiments mais aussi sur la qualité des ambiances habitables.

2. Caractérisation thermo-physique, hydrique et microstructurale du complexe végétalisé

Le manque de connaissances précises des propriétés thermique, hydrique et microstructurale des toitures végétalisées présente un obstacle pour leurs

dimensionnement dans le cas des projets de construction. Cette partie décrit les différentes expérimentations effectuées sur les composants de toitures végétalisées et plus particulièrement les substrats de culture afin de définir leurs principales caractéristiques intrinsèques, utile pour alimenter les modèles de prédictions de données d'entrées fiables [OUL 12].

2.1. Caractérisation thermo-physique

La connaissance des propriétés thermiques des substrats de culture est nécessaire afin d'alimenter le modèle qui décrit le comportement thermique des toitures végétalisées. Pour une meilleure prédiction de ce comportement, on s'est intéressé au premier lieu à la conductivité thermique de substrat de culture. Ce terme constitue l'élément de couplage entre les transferts thermique et massique [OUL 11]. En effet, la conductivité thermique varie en fonction de la quantité d'eau présente dans le substrat et a une influence significative sur le flux traversant la couche du substrat. Pour cet effet, nous avons utilisé une sonde de mesures de conductivité thermique TP08 Hukseflux avec une précision de 0.3% pour mesurer différents types de substrat de culture.

La sonde est constituée d'un fil chauffant et d'un capteur de température capable de mesurer la température de la source. La sonde est introduite dans le milieu étudié (substrat de culture). Après une courte période transitoire de la hausse de la température ΔT qui ne dépend que de la puissance de chauffe et de la conductivité thermique, une période phase linéaire est observée. L'exploitation de cette phase permet de déduire la valeur de la conductivité thermique qui dépend directement de la pente de l'équation (1) de transfert de chaleur, établie pour une géométrie cylindrique:

$$\Delta T = \left(\frac{Q}{4\pi K} \right) (\ln t + B) \quad (1)$$

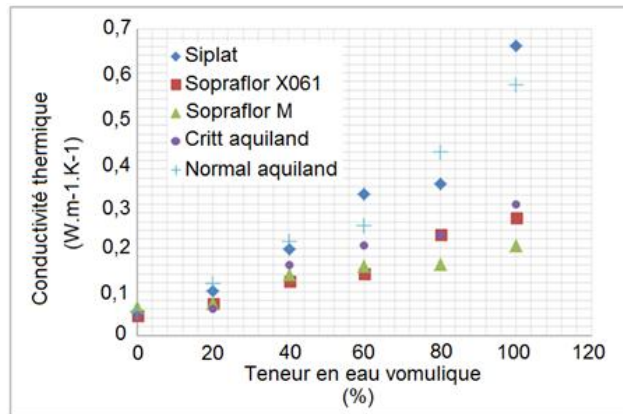


Figure 1. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique.

La figure 1 synthétise les résultats de mesures de la conductivité thermique pour cinq types de substrat de culture. Ces résultats montrent que les conductivités des substrats varient entre 0,05 et 0,7 W.m⁻¹.K⁻¹. A l'état sec, le pouvoir isolant du substrat se rapproche de celui de la laine de roche (0,045 W.m⁻¹.K⁻¹), en revanche, lorsque le substrat est humide, son pouvoir isolant demeure assez intéressant à comparer avec celui des matériaux de construction traditionnels (par exemple le béton en état sec: 0,92 W.m⁻¹.K⁻¹). L'évolution des conductivités thermiques des substrats en fonction de la teneur en eau est exprimée par des fonctions mathématiques. Ces fonctions seront utilisées pour alimenter le modèle du comportement thermique des toitures végétalisées.

2.2. Caractérisation hydrique

La méthode expérimentale adoptée pour la caractérisation hygrothermique des composants d'une toiture végétalisée est basée sur une technique gravimétrique permettant de remonter aux isothermes de sorption et désorption de ces composants. Ces courbes traduisent à l'échelle microscopique l'activité de l'eau du matériau. Elle permet de relier deux grandeurs l'une continue, l'hygrométrie, traduisant l'état de l'air et l'autre discontinue, la teneur en eau, caractérisant l'état hydrique du matériau. La pente de ces courbes définit un des paramètres d'entrée du modèle de prédiction : la capacité de stockage d'eau.

Les isothermes d'adsorption et de sorption ont été obtenues moyennant l'utilisation du DVS (Dynamic Vapor Sorption). Le principe de la mesure consiste à placer un échantillon de substrat à différents taux d'humidité entre (0 et 100%) sous une température constante et suivre l'évolution de sa masse dans le temps jusqu'à l'équilibre et ce pour chaque palier d'humidité relative, grâce à une balance de précision de l'ordre de µg. La figure 2 présente l'isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau à 25°C pour le substrat de culture type X061 utilisé dans notre étude. La masse initiale est de 0,3817g.

Trois essais par échantillon ont été réalisés. Le résultat constitue la moyenne des essais. Concernant représentativité de l'essai (volume élémentaire représentatif), des études portant sur ce sujet ont été menées sur des bétons hautes performances au laboratoire. Moyennant l'utilisation de deux méthodes : l'une basée sur l'utilisation des échantillons cylindriques du même matériau, de 11 cm de diamètre et de 5 mm puis 10 mm de hauteur (méthode de solutions salines saturées), et l'autre basée sur l'utilisation des échantillons de très faibles masses, de 0,5g à 1g (DVS). Les résultats obtenus ont montré des différences peu significatives [TRA 10].

L'isotherme d'adsorption obtenue présente une hystérésis entre la sorption et la désorption sur toute la gamme d'humidité relative. Une courbe enveloppe existe. Elle est issue de l'isotherme de sorption-désorption intégrale, autrement dit, à partir de l'état sec jusqu'à la saturation, ensuite, de la saturation à l'état sec. En phase de sorption, la teneur en eau à un équilibre hydrique donné, ne peut être inférieure à celle de l'état d'équilibre précédent. De ce fait, un écart apparaît entre les teneurs en eau à l'équilibre en phase de sorption à partir de l'état sec et celle à partir d'un état

intermédiaire en phase de désorption. Cet écart diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'état initial. Cette observation vient corroborer l'interprétation de l'hystérésis qui invoque le motif structural ou encore l'interconnexion de pores de tailles différentes. En effet, le surplus d'eau piégée en phase de désorption dans les plus gros pores reste piégé. Il engendre ainsi, une teneur en eau supérieure en cas de sorption. L'écart diminue car les plus petits pores se remplissent au fur et à mesure de l'augmentation de l'humidité relative.

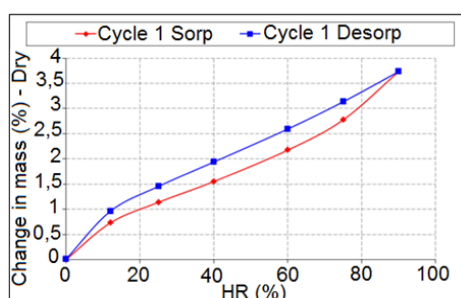


Figure 2. Isotherme de sorption/désorption de la vapeur d'eau pour le substrat de culture X061

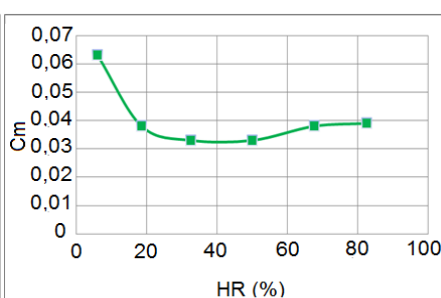


Figure 3. Capacité d'humidité pour le substrat de culture type X061

La pente de l'isotherme de désorption permet de définir la capacité du matériau à échanger de l'humidité avec son environnement et ainsi de définir le pouvoir tampon de l'enveloppe vis-à-vis des ambiances habitables. La figure 3 montre que la capacité d'humidité n'est pas constante, elle présente une grande disparité entre les valeurs, selon la gamme d'humidité relative considérée. Cela traduit le caractère non linéaire du comportement hygrothermique des milieux poreux, notamment dans les substrats de culture.

2.3. Caractérisation microstructurale

L'analyse de la structure d'un matériau poreux est indispensable pour l'étude de la durabilité. Dans le cas des substrats de culture de toitures végétalisées, il est nécessaire de quantifier la perméabilité de ce milieu connu par sa grande porosité. A travers l'étude de Holly [AIT 99], une relation entre la structure poreuse et la perméabilité a été déduite à partir de la distribution statique des tailles des pores statistiques. La technique de porosimétrie au mercure a été utilisée dans le présent travail pour réaliser cette relation. Le matériau poreux étudié est mis en contact avec le mercure.

L'essai porosimétrique se déroule en trois grandes étapes :

- Placement de l'échantillon dans un pénétromètre.
- Dégazage de l'échantillon afin d'évacuer l'air et l'humidité contenus dans le matériau.
- Le mercure envahit le matériau testé en basse et haute pressions jusqu'à atteindre la pression finale fixée par l'opérateur, en fonction de la capacité

de l'appareil et de la microporosité du matériau. L'appareil utilisé dans le cas de cette étude peut atteindre une pression de 400 MPa.

En plus des rayons des pores qui sont estimés selon la loi de Laplace, le but d'un essai au porosimétrie à mercure est de caractériser essentiellement les dimensions et le volume des pores ouverts constituant la structure poreuse d'un milieu poreux. Cette technique, moyennant certaines hypothèses simplificatrices (pore cylindrique, mesure de la porosité ouverte), fournit des informations sur les différents paramètres physiques du matériau tels que le volume poreux global, la distribution des volumes poreux en fonction des diamètres des pores, le diamètre des pores en surface, la densité du squelette solide et la porosité globale. L'expression utilisée pour déduire les paramètres de la fonction de distribution et donnée par [AIT 99]:

$$\varepsilon_p = \pi n_{p0} R_{pm}^2 e^{2\xi^2} \quad (2)$$

α , ε_p , et R_{pmax} sont des valeurs expérimentales données par l'essai porosimétrique.

$$\xi = \frac{\varepsilon_p}{\alpha\sqrt{2\pi}} \quad R_{pm} = \frac{R_{pmax}}{e^{2\xi^2}} \quad n_{p0} = \frac{\varepsilon_p}{\pi R_{pm}^2 e^{2\xi^2}}$$

Quatre matériaux de l'enveloppe du bâtiment et toiture végétalisée ont été testés, les résultats sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Résultats de caractérisation microstructurale des matériaux de construction.

Echantillon	Porosité (%)	Rayon moyen ×10-7 (m)	Surface spécifique (ml/g)	Perméabilité ×10-14 (m2)
Béton 1	19.07	1.75	0.77	7.30
Béton 2	18.10	1.5	1.08	5.10
Tuile	24.49	3	1.93	21.76
Substrat	55.13	3,42	2,431	80.61

Cette phase de caractérisation a permis d'évaluer la microstructure des matériaux utilisés dans le bâtiment ainsi que ceux constituant les composantes de toitures classiques (tuile, ou béton) et ceux des toitures végétalisées (substrat de culture). C'est ainsi que la distributions des tailles des pores, la porosité, la surface spécifique et la perméabilité de ces matériaux ont été évaluées. Ces grandeurs sont nécessaires pour la compréhension des phénomènes physiques engendrés durant les échanges couplés de chaleur et de masse à l'échelle de chacun des composants de toitures.

3. Modélisation d'un composant d'une toiture végétalisée

Un modèle couplé de transfert de chaleur et d'humidité a été établi [OUL 11]. Ce modèle est basé sur l'établissement des équations de bilan énergétique sur la surface du feuillage et la surface du sol (Fig. 4). Le modèle développé est basé sur les travaux de [SAI 08] et ceux de [FRA 04]. La prise en compte du transfert d'humidité dans le modèle proposé est très importante car l'évaporation et le flux de chaleur par conduction sont très dépendants de sa teneur en eau [QIN 11, DAV 05]. Pour cela, un bilan hydrique a été intégré au modèle développé. Le phénomène de l'évapotranspiration pris en compte dans le modèle hydrique et basé sur l'équation de Penman-Monteith corrigé.

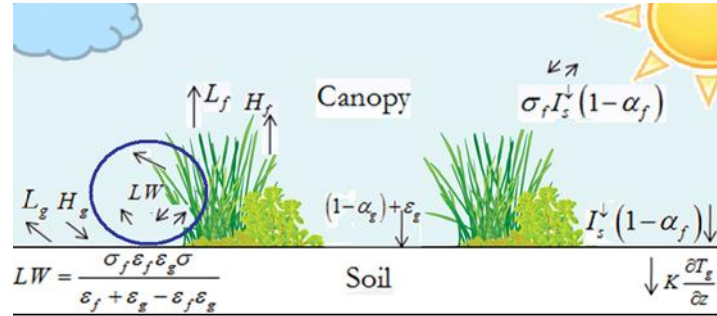


Figure 4. Schéma des différents flux de chaleur modélisés à l'échelle de la toiture végétalisée.

Le facteur de correction de l'équation de Penman-Monteith expérimental a été obtenu expérimentalement. Le principe de la mesure consiste à placer des éléments de la TTV dans un bac et d'attacher le tout à un capteur de traction-compression. Le suivi de l'évolution du poids des plateaux en fonction du temps permet de remonter à la quantité d'eau évapotranspirée du substrat.

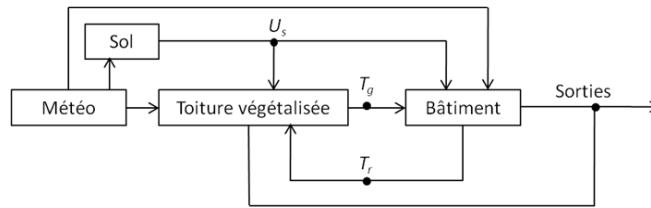


Figure 5. Couplage du modèle des TTV avec un code du thermique du bâtiment.

4. Couplage du modèle avec un modèle du bâtiment

Une présentation schématique du couplage du modèle des toitures végétalisées avec un modèle du comportement d'un bâtiment est illustrée dans la Figure 5. Un

calcul détaillé du comportement thermique du bâtiment se fait dans le bloc Bâtiment en utilisant le code de thermique du bâtiment TRNSYS. Ce calcul détaillé comprend le transfert de chaleur à travers la structure porteuse de la toiture (en tenant compte de sa masse thermique) ainsi que le transfert de chaleur entre la surface intérieure de la toiture et l'intérieur du bâtiment. Une fois le nouveau composant est inclus dans TRNSYS, il peut être utilisé, de la même manière que n'importe quel composant standard pour évaluer l'impact des toitures végétalisées sur la performance énergétique du bâtiment.



Figure 6. *Plateforme expérimentale (Climabat)*

Une confrontation entre les résultats numériques et les données expérimentales issues de la plateforme (Climabat) échelle 1/10 a été entreprise. Cette plateforme a été élaborée sur le site de l'Université de La Rochelle dans le but de mesurer l'incidence des toitures végétalisées sur les bâtiments et de fournir des données qui permettent de vérifier le modèle développé (Fig. 6). Les données météorologiques du site (Température de l'air, le rayonnement incident de courtes et de grandes longueurs d'onde, humidité relative et vitesse de vent) sont mesurées et enregistrées grâce à la station météorologique disposée sur le site expérimental.

5. Résultats

Les profils de température obtenus expérimentalement et numériquement sont représentés par la figure 7 sur une séquence de 8 jours. Ces résultats mettent en évidence la prise en compte des transferts de masse dans le modèle de prédiction. En effet, l'erreur moyenne est de 2,9 °C alors elle est de 0,80C dans le cas du modèle couplé.

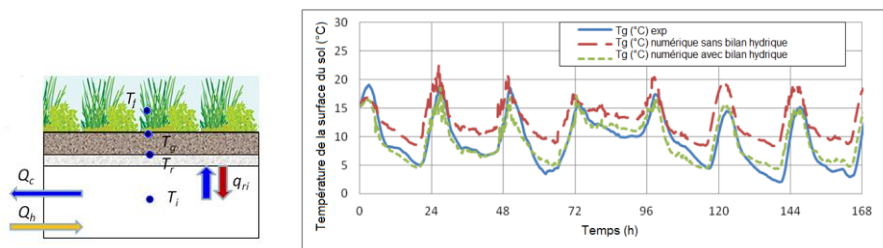


Figure 7. Comparaison entre résultats numériques et résultats expérimentaux (avec et sans prise en compte de bilan hydrique)

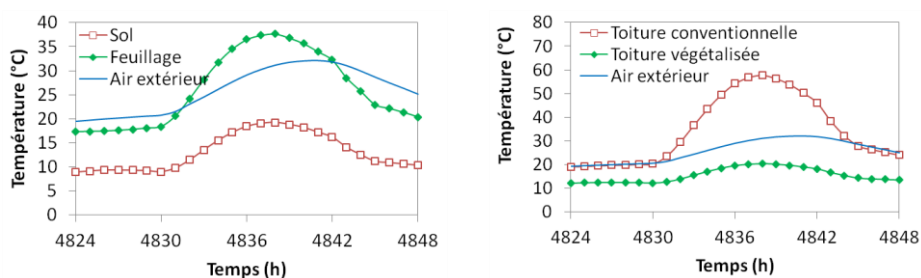


Figure 8. Durant le jour chaud d'été à La Rochelle, (à gauche) Température de la surface du sol et du feuillage, (à droite) Température de la membrane d'étanchéité.

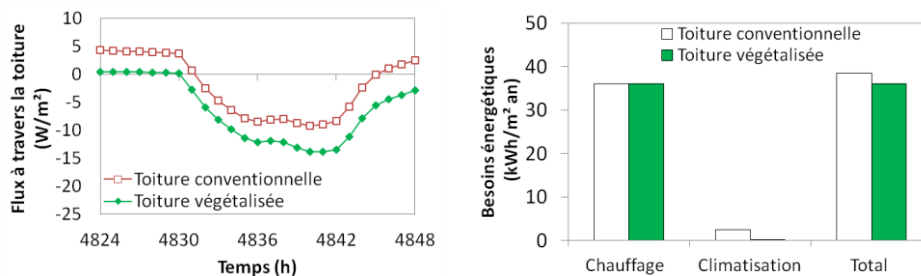


Figure 9. (à gauche) Flux thermique à travers la toiture, (à droite) Besoins énergétiques maison (La Rochelle) avec des toitures conventionnelle et végétalisée

Par ailleurs, des comparaisons ont été entreprises entre une toiture végétalisée et toiture classique (Fig. 8) pour une maison type située à La Rochelle dont les critères étudiés sont présentés dans la figure 7 (à gauche). Une différence de température de surface extérieure de 30°C pendant la période d'été et des réductions des besoins énergétiques de 6% ont été noté (Fig. 9). Les résultats des simulations montrent que

la végétalisation des toitures de bâtiment améliore non seulement les conditions de son confort thermique mais aussi sa performance énergétique.

6. Conclusion

Cette étude a permis de développer un modèle numérique de prédiction du comportement thermo-hydrique des composants de toitures végétalisés. Ceci a nécessité au préalable la caractérisation expérimentale des principales propriétés de transferts hydrique, thermique, botanique et physiologique des composants constituant la TTV. Cette phase a permis une meilleure compréhension du comportement des plantes et des substrats. De plus, les principales propriétés de ces complexes ont été évaluées expérimentalement permettant ainsi d'alimenter le modèle numérique du comportement des complexes végétalisés par des données d'entrée fiables. Pour cela des plateformes expérimentales ont été développées au laboratoire. Elles ont permis d'exprimer les propriétés du substrat en fonction de l'état hydrique des matériaux. Ensuite, une validation expérimentale à l'échelle du composant a été effectuée. Elle a permis d'implémenter avec assurance le modèle de toiture dans un code de simulation thermique dynamique. Des simulations ont été effectuées pour évaluer la performance des toitures végétalisées par rapport à des toitures conventionnelles prises comme référence. Les résultats ont montré, notamment, que la présence d'une toiture végétalisée protège la membrane d'étanchéité des températures extrêmes et des grandes fluctuations de températures. Un effet de rafraîchissement passif a été observé en été, avec une diminution des besoins du bâtiment avec végétalisation en toiture allant de 6 à 32 % selon les conditions climatiques. De plus, une amélioration des conditions de confort des occupants a été révélée. En effet, pendant l'été, une réduction de la température intérieure de 3 °C est enregistrée.

Le suivi expérimental du comportement des bâtiments réels permettra de valider les modèles développés et de montrer l'intérêt que procurent les complexes végétalisés sur la qualité des ambiances (confort des usagers), sur les performances énergétique et environnementale ainsi que sur le microclimat urbain (réduction des phénomènes d'îlots de chaleur urbain).

7. Remerciements

Ce travail est supporté par l'Agence National de la Recherche (ANR) à travers le programme « Habitat intelligent et solaire photo-voltaïque » (projet AGROBAT n°ANR-09-HABISOL-001) et par le fonds européen FEDER à travers le programme Compétitivité régionale et emploi Poitou-Charentes «développement d'une plateforme de caractérisation thermo-hydrique de composants de toitures végétales».

8. Bibliographie

- [SAI 08] Sailor D.J., « A green roof model for building energy simulation programs», *Energy and building*, vol. 40, 2008, p. 1246-1251.
- [FRA 04] Frankenstein S., Koenig G., «FASST Vegetation Models, in: Technical Report», US Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, New Hampshire, 2004, p. 04-25.
- [OUL 11] Ouldboukhitine S., Belarbi R., Jaffal I, Trabelsi A., «Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model» *Building and Environment*, vol. 46, 2011, p. 2624-2631.
- [OUL 12] Ouldboukhitine S., Belarbi R., Djedjig R., «Characterization of green roof components: measurements of thermal and hydrological properties» *Building and Environment*, 2012.
- [DAV 05] David M.S., Jennifer M.J., «Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration» *Journal of hydrology*, vol. 308, 2005, p. 81-104.
- [QIN 11] Qin M., Walton G., Belarbi R., Allard F., «Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates» *Energy conservation and Management*, vol. 25, 2011, p., 1470-1478.
- [AIT 99] Ait-Mokhtar., Amiri O., Sammartino S., «Analytic modeling and experimental study of the porosity and permeability of porous medium, application to cement mortars and granitic rock» *Magazine of concrete Research*, vol. 51, 1999, p., 391-396.
- [TRA 10] Abdelkrim Trabelsi, «Études numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction », Université de La Rochelle 2010.