
Impact des toitures végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments.

Salah-Eddine OULDBOUKHITINE¹, Rafik BELARBI ²

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement LaSIE,
Université de La Rochelle (Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle
Cedex1).

¹(salah-eddine.ouldboukhitine@univ-lr.fr)

²(rbelarbi@univ-lr.fr)

RÉSUMÉ. Cet article présente une investigation expérimentale issue de la plateforme expérimentale à échelle réduite (1 :10), Climabat, permettant l'évaluation de l'incidence des toitures végétalisées. Les comportements thermo-hydriques des composantes d'une toiture végétalisée et d'une toiture conventionnelle, prise comme référence, ont été analysés et leurs incidences sur la demande énergétique des bâtiments ont été évaluées. Une différence de température de surface extérieure de l'ordre de 30°C a été observée pendant l'été entre la toiture végétalisée et la toiture conventionnelle, une réduction de la charge du bâtiment de 6% a été observée et une diminution de la température intérieure du bâtiment de 2°C est obtenue pour un climat tempéré (La Rochelle). De plus, des comparaisons ont été entreprises entre les données expérimentales et les données numériques issues d'une modélisation du comportement thermo-hydrique des toitures végétalisées, une bonne concordance est constatée.

ABSTRACT. The present paper describes an experimental investigation conducted on a reduced experimental platform scale (1:10) named Climabat. The objective consists to evaluate the incidence of green roof on building energy performance. Hence, the thermo-hydric behavior of green roof components and conventional roof taken as a reference was analyzed. Furthermore, the incidence of green roof and conventional roof on building energy demand was evaluated. A significant difference (of up to 30°C) in temperature between the outer surfaces of the two roofs was noticed in summer. The indoor air temperature was therefore decreased by 2°C and the energy demand was reduced by 6% of the annual energy demand in a temperate climate (La Rochelle). The measures issued by the experimental platform were also used to validate a coupled heat and mass transfer green roof model. In this prospect, the experimental results were compared with the numerical results obtained by the developed model. This comparison shows a good agreement between the two results.

MOTS-CLÉS : Toiture végétalisée, demande énergétique, validation expérimentale, transfert thermo-hydrique,

KEY WORDS: Green roof, energy demand, Experimental validation, thermo-hydric transfer.

1. Introduction

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de recommandations du Grenelle de l'environnement et vise plus précisément une meilleure rationalisation de l'énergie tout en protégeant l'environnement avec notamment une volonté de réduction de la facture énergétique des bâtiments et d'un meilleur bilan Carbone. Moyennant l'utilisation de toitures terrasses végétalisées TTV, ces composants jouent le rôle d'une paroi active suivant le cycle des saisons et des conditions climatiques. En effet, les TTV ont des répercussions très positives sur la performance énergétique des bâtiments : pouvoir isolant en hiver, pouvoir rafraîchissant en été, meilleur captage du soleil par des phénomènes d'inter réflexions à l'intérieur des feuillages. En réduisant la facture énergétique des bâtiments, les toitures végétalisées permettent un meilleur bilan carbone ; celui-ci est encore amélioré du fait de la fixation de carbone par les plantes lors de la photosynthèse, et par le substrat dans le cycle de transformation de la matière végétale morte. Une investigation expérimentale, issue de la plateforme Climabat permettant de valider le modèle thermohydrigue du comportement des composants de toiture végétalisée est présentée [OUL 11]. Des comparaisons entre toitures végétalisées et toitures conventionnelles ont été entreprises afin d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur le comportement énergétique des bâtiments.

2. Plateforme expérimentale Climabat

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 a été élaborée sur le site de l'Université de La Rochelle. Celle-ci est aussi utilisée pour entreprendre des comparaisons avec les résultats numériques et de valider ainsi les modèles mathématiques développés.

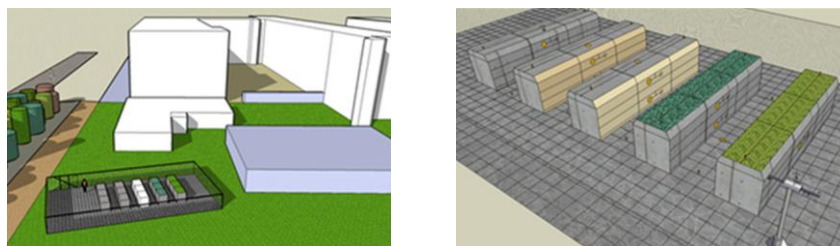


Figure 1. (À gauche) Schéma de la plateforme expérimentale dans son environnement réel, (à droite) Disposition des rues canyons expérimentales.

3. Disposition des rues canyons

Afin de refléter fidèlement un cadre urbain réel, la conception de modèles réduits exigent à la fois des similitudes physiques d'ordre dynamique et géométrique avec la réalité. Parvenir à une similitude géométrique n'est pas fondamentalement compliqué. Pour notre part nous avons choisi de nous concentrer sur une simple répétition de rues canyons formées de bâtiments rectangulaires sans vitrage. La plateforme est constituée de 15 bâtiments formant 5 rangés et donc de 4 rues canyons échelle 1:10, les 3 premières permettent d'étudier l'incidence des traitements de surface par des peintures aux propriétés optiques sélectives sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Les deux dernières sont équipées de toitures végétalisées avec deux complexes végétaux différents (sedum et graminée). (Fig. 1).

4. Caractéristiques des matériaux et type de toitures végétalisées

Le schéma techniques des cuves de récupération d'eaux pluviales utilisées pour modéliser nos bâtiments et qui seront le support de nos toitures végétalisées est présenté dans la figure 2

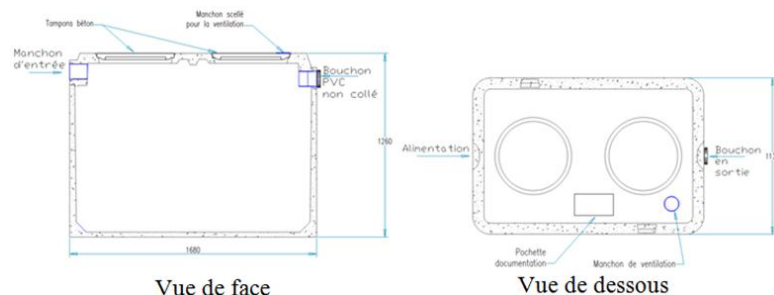


Figure 2. Cuve de récupération d'eau pluviale utilisée pour simuler un bâtiment

Tableau 1. Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Capacité thermique (J/kg.K)
Béton Cuves (+paillasse de fer)	2150	2.26-2.47	908-920
Mortier Dalles (substrat)	2780	1.90-2.19	690-700
Béton gravillonné (enduit)	2290	3.55-3.61	924-928

Les capacités thermiques des murs, toitures et des fondations de nos bâtiments sont relativement faibles, avec des parois en béton de 4 à 4.5 cm d'épaisseur. Pour limiter les infiltrations d'eau, les cuves ont été colmatées, rendant à l'occasion les infiltrations d'air relativement faibles. La masse volumique et la conductivité thermique de nos matériaux sont présentées dans le tableau. 1.

Les deux types de toitures végétalisées qui ont été sélectionnés pour couvrir les deux derniers bâtiments de la plateforme étudiée sont de type graminée « Pampa » et de type sedum « Toundra » (Fig. 3)



Figure 3. Photographie des toitures végétalisées, (à gauche) Pampa et (à droite) Toundra.

La toiture végétalisée de type Toundra s'adapte avec tous les climats et elle peut être construite sur tous les types de supports, l'épaisseur du complexe est de 8cm et la hauteur de la végétation est de 10cm, sa capacité de rétention d'eau est de 20 à 25 litres/m². Le poids indicatif du complexe à capacité maximale en eau est de 70 à 120 kg/m². Comme la toiture type Toundra, la toiture Pampa s'adapte avec tous les types de climats mais l'arrosage est obligatoire pendant les périodes chaudes. L'épaisseur du complexe est de 15cm et la hauteur de la végétation varie entre 10 et 35cm, ces plantes couvrent de 80% le sol après 1 an de leurs plantations et de 90% après 2 ans. Le poids indicatif de son complexe à capacité maximale en eau est de 160 kg/m², elle est plus épaisse et plus lourde que la toiture type Toundra donc la structure porteuse doit être plus résistante pour pourvoir la maintenir.

5. Disposition des différents capteurs sur la plateforme expérimentale

La campagne expérimentale a lieu au niveau des complexes végétaux, à l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Les données métrologiques 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. Des thermocouples mesurant les températures à différents niveaux des complexes végétaux (surface du

substrat, surface du feuillage, dans les couches des substrats et à différentes profondeurs), au niveau de la canopée et à l'intérieur des bâtiments ont été installés. De plus des hygromètres permettant de suivre expérimentalement l'évolution de l'humidité relative à l'intérieur, à l'extérieur des bâtiments et au niveau des complexes ont été installés. Il y a eu recours à l'utilisation des TDR (Time Domain Reflectometry) 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 incident, réfléchi et conduit (Figure. 4).

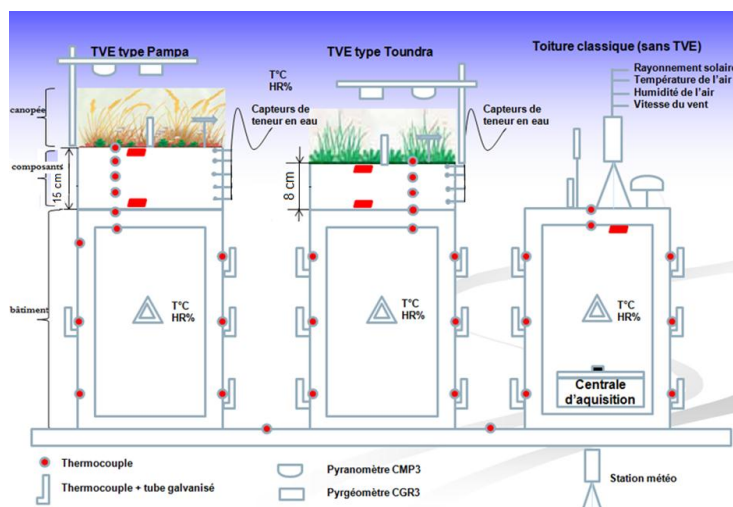


Figure 4. Disposition des différents équipements

6. Aspects techniques de la mise en œuvre

Les thermocouples (air, surface, substrat) ont été reliés à un système d'acquisition dérivé sur 1 multiplexeur, ce dernier a été équipé d'une sonde platine pour évaluer la température de référence des jonctions des thermocouples type K. L'ensemble a été étalonné dans un bain thermostaté à grande précision ($\pm 0.01^\circ\text{C}$). La centrale est installée dans l'une des cuves qui représente la toiture référence dans un boîtier étanche. Les câbles de thermocouples sont acheminés vers leur emplacement de mesure dans des gaines protectrices sous terraines. Les thermocouples de surfaces ont été disposés parallèlement à la surface des cuves après une entrée par l'intérieur, puis recouverts d'une fine couche de béton à prise rapide poncée après séchage pour gommer les aspérités.

Des protections radiatives ont été installées pour protéger les thermocouples extérieurs mesurant la température de l'air (Fig. 5), elles sont constituées de deux tubes concentriques en aluminium recouverts d'une peinture chromée à haute

réflectivité CLO et base émissivité GLO. Les tubes sont légèrement inclinés au nord pour empêcher l'éclairement solaire direct.



Figure 5. *Tube basse émissivité de protection pour thermocouples air*

Les tubes de protections ont été utilisés également pour les thermocouples d'air qui mesurent la température au niveau de la canopée et l'air extérieur près de la surface de la végétation.



Figure 6. *CMP3 et CGR3 pour les mesures des flux radiatifs CLO réfléchis et GLO émis.*



Figure 7. *Pluviomètres pour station météo et pour le drainage.*

Le rayonnement incident de grandes et de courtes longueurs d'ondes sont mesurées à l'aide d'un radiomètre regroupant un pyranomètre CM3 et un pyrgéomètre CGR3. Au niveau de la plateforme expérimentale, nous nous sommes

intéressés à la mesure des flux radiatifs de grande longueur d'onde (GLO) émis et de courte longueur d'onde (CLO) réfléchis par les deux toitures végétalisées. Pour cela, nous avons mis en place, pour chaque toiture végétalisée, un pyranomètre et un pyrgéomètre. Ces deux capteurs sont dirigés vers le bas, c'est-à-dire vers les deux toitures pour pouvoir mesurer les flux réfléchis et émis par ces toitures (Figure. 6). Nous pouvons par la suite calculer le rapport entre le flux radiatif incident et le flux radiatif réfléchi, ce rapport nous permet de déduire la valeur de l'albédo et l'émissivité de chaque toiture végétalisée.

L'accent est mis sur la caractérisation hydrodynamique du substrat [OUL 11] du fait du rôle central de la dynamique de l'eau dans le bon fonctionnement et la pérennité des toitures végétalisées. Ainsi, des gouttières munies de pluviomètres ont été fixées sur la pente inférieure de chaque toiture végétalisée (Fig. 7) et au niveau de la station météorologique afin de collecter les eaux pluviales et celle dues au phénomène de drainage. Ceci permet d'entreprendre des bilans hydriques au niveau des Toitures végétalisées.

7. Résultats

L'acquisition des données expérimentales se fait avec un pas de temps fixé à 5 minutes. Les données enregistrées par les capteurs sont directement affichées sur les ordinateurs du laboratoire via une connexion Ethernet. La figure 8 représente les données expérimentales de température et d'humidité enregistrées par les capteurs pour une période chaude de mois de juillet allant de 25/07/2011 au 31/07/2011.

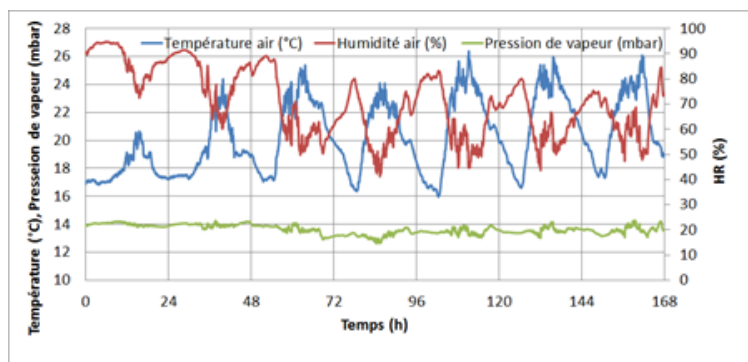


Figure 8. Température et humidité de l'air enregistrés pour une période chaude (Juillet)

La figure 9 représente les profils de températures au niveau de la toiture végétalisée de type Toundra pour la même période. Les thermocouples mesurant les températures sont positionnés au niveau de la surface extérieure de la toiture, au niveau de la membrane d'étanchéité, au niveau de substrat de culture et au niveau de la couche de drainage (Fig. 9).

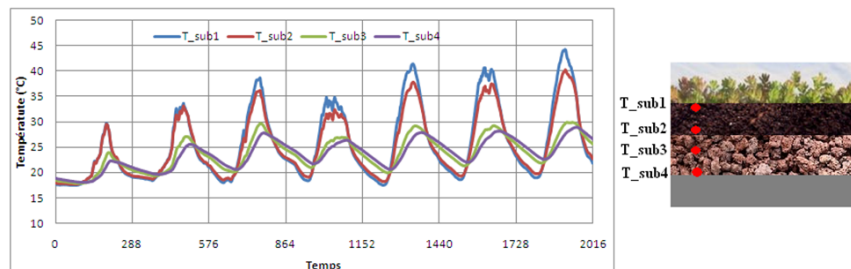


Figure 9. *Profils de températures au niveau des composants de la toiture végétalisée (Toundra)*

D'après la figure 9, la différence de température entre la surface extérieure (T_{sub1}) et la température au niveau de la membrane d'étanchéité (T_{sub4}) peut atteindre 13°C notamment pour le 7^{ème} jour. La résistance thermique de la toiture végétalisée est déduite à travers les mesures de flux de chaleur conduit au niveau de la membrane d'étanchéité (Fig. 10). Cette résistance est de $0.28 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Ces résultats montrent le pouvoir des composants de toiture de limiter le flux de chaleur conduit traversant le toit. Il est clair que la température au niveau de la membrane d'étanchéité varie dans une fourchette relativement modérée ($18\text{-}28^{\circ}\text{C}$) pour une période chaude de l'été. Cette variation de température est plus importante dans le cas d'une toiture conventionnelle en béton [JAF 12]. Les niveaux modérés de températures et les basses fourchettes auront un impact significatif sur la température de surface de la structure porteuse de la toiture végétalisée.

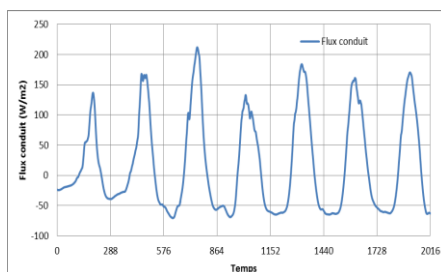


Figure 10. *Mesures de flux de chaleur conduit à travers la toiture végétalisée*

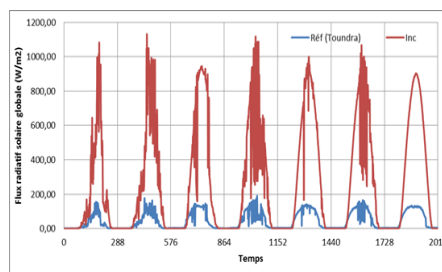


Figure 11. *Mesures des flux radiatifs incidents et réfléchis par la toiture (Toundra)*

Pour plus de précision, L'albédo caractérisant le type de toiture végétalisée a été déduit expérimentalement à travers des mesures directes de flux radiatif incident et de flux radiatif réfléchi par la toiture. La figure 11 représente les mesures des flux radiatifs solaire de courte longueur d'onde incidents et réfléchis pour la même période (25/07/2011 et 31/07/2011). A travers ces mesures, l'albédo est déduit par la division du flux radiatif réfléchi sur le flux radiatif incident. La valeur d'albédo pour cette période est de 0.2, elle est donnée finalement par la moyenne des rapports des

flux radiatifs calculés pour chaque jour. Cette valeur est moins importante comparant avec des toitures conventionnelles, cela est traduit par le rôle des plantes qui consiste à absorber une partie des rayonnements incidents pour la photosynthèse et aussi au phénomène d'inter-réflexion entre les feuilles de la végétation donc moins de flux réfléchis par la toiture végétalisée [SAI 08]. Une validation expérimentale du modèle [OUL 11] est présentée dans la figure 12 qui représente la température de la surface extérieure pour une période de 15 jours allant de 17/08/2011 au 31/08/2011.

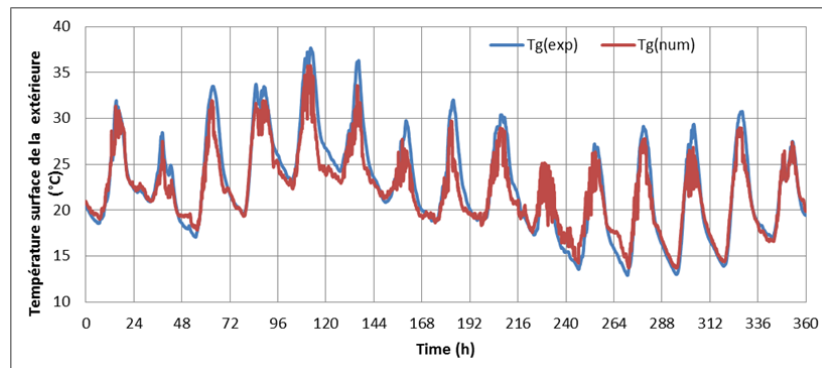


Figure 12. Comparaison entre résultats expérimentaux et numériques de la température extérieure du sol pour une période de 15 jours (17/08/2011-31/08/2011)

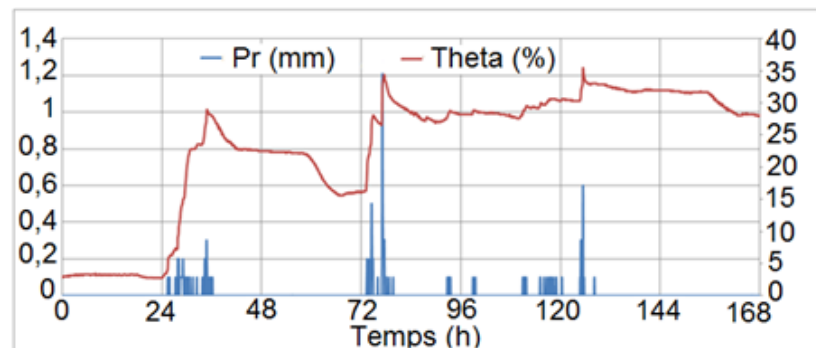


Figure 13. Mesures de précipitation variation de la teneur en eau au niveau du substrat de culture.

La figure 13 représente les données de précipitation enregistrées par le pluviomètre pour une semaine allant de 26/03/2011 au 01/04/2011. Dans la même figure, représentée en rouge, l'évolution de la teneur en eau a été tracée. Cette grandeur représentant la quantité d'eau au niveau du sol a été donnée par la moyenne des mesures enregistrées par les capteurs TDR positionnés sur différents niveaux des composants de la toiture végétalisée comme il a été montré précédemment dans la figure 4. D'après la figure 14, la teneur en eau diminue d'une

façon considérable après le deuxième jour de pluie mais après 3 jours de pluie, nous remarquons que la teneur en eau diminue légèrement à partir du 6^{ème} jour, cela est traduit par la forte rétention d'eau par le substrat culture qui peut être bénéfique pour la végétation et qui peut minimiser aussi les risques d'inondation.

8. Conclusion

La plateforme expérimentale développée au laboratoire a permis de collecter les données climatiques et d'exprimer les propriétés du substrat en fonction de l'état hydrique des matériaux. L'albédo caractérisant le type de toiture végétalisée a été déduit expérimentalement à travers des mesures directes de flux radiatif incident et de flux radiatif réfléchi par la toiture. Les résultats ont montré que la présence d'une toiture végétalisée protège la membrane d'étanchéité des températures extrêmes et des grandes fluctuations. Le suivi du comportement hydrique de la toiture a montré une forte rétention d'eau par le substrat de culture qui peut être bénéfique pour la vie des plantes et bénéfique aussi contre les inondations.

Etudier l'impact de la toiture végétalisée sur la gestion de l'eau, sur l'acoustique et sur la biodiversité demeure un sujet de recherche intéressant pour une meilleure utilisation dans les bâtiments et à l'échelle de la ville.

9. 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».

10. Bibliographie

- [JAF 12] Jaffal I., Ouldboukhité S., Belarbi R., «A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance», *Renewable Energy*, vol. 43, 2012, p. 157-164.
- [OUL 11] Ouldboukhité 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
- [SAI 08] Sailor D.J., « A green roof model for building energy simulation programs», *Energy and building*, vol. 40, 2008, p. 1246-1251.