Caractérisation du fonctionnement thermo-hydrigue *in situ* d'une toiture végétalisée extensive

Ryad BOUZOUIDJA^{1,5}, Geoffroy SERE^{3,4}, Rémy CLAVERIE² et David LACROIX⁵

¹ NIDAPLAST – e-mail : rbouzouidja@nidaplast.com

² CETE de l'EST, LRPC de Nancy – e-mail : remy.claverie@developpement-durable.gouv.fr

³ Université de Lorraine, LSE UMR 1120

⁴ INRA, LSE UMR 1120 – e-mail : geoffroy.sere@univ.lorraine.fr

⁵ Université de Lorraine, LEMTA UMR 7563 – e-mail : david.lacroix@lemta.uhp-nancy.fr

RÉSUMÉ. – Il existe aujourd'hui plusieurs enjeux liés au développement des toitures végétalisées à la fois pour une meilleure connaissance et évaluation de leurs propriétés (e.g. performance énergétique des bâtiments équipés, rétention en eau), mais aussi sur un réel besoin d'innovation. Ces travaux s'appuient sur le monitoring d'une toiture végétalisée équipée de grande taille, mise en place sur un bâtiment. Elle est instrumentée à l'aide de capteurs de température, de tensiomètres capacitifs et de sondes diélectriques. Ce dispositif expérimental est complété d'une station météorologique mesurant les paramètres microclimatiques (température extérieure, hygrométrie, vitesse et direction du vent).

L'analyse des résultats des expériences *in situ* ont permis de dégager des résultats sur le comportement saisonnier de la toiture végétalisée (TVE). En effet, il est possible d'estimer la contribution de ce type de système à l'isolation thermique dans des conditions climatiques extérieures qui varient en hiver avec un gain de 5°C et en été avec une réduction de 24°C. Le suivi des données a aussi démontré qu'au printemps la TVE pouvait stocker l'essentiel des précipitations. La contribution forte du substrat au fonctionnement thermo-hydrigue est ensuite évoquée ainsi que la nécessité de mieux caractériser ce couplage.

Mots-clés : Toiture végétalisée extensive, eaux pluviales, milieux poreux, teneur en eau

Characterization of the thermo-hydric functioning of *in situ* green roof

ABSTRACT. – There are several issues related to the development of green roofs : a better understanding and estimation of their thermic and hydric performances as well as the strong necessity to develop innovations. This study is primarily based on the monitoring of a large-scale *in situ* green-roof that instrumented with temperature sensors, capacitive tensiometers and dielectric sensors. This experimental device was completed by a weather station monitoring few microclimatic parameters (ambient temperature, humidity, wind speed and direction).

The analysis of the results has lead to a better understanding of the seasonal behavior of the extensive green roof (EGR). Indeed, EGR contribution for thermal insulation has been estimated and reached maximum reduction of temperature of 24°C in summer and a temperature gain of 5°C in winter. In spring, the EGR succeeded in storing almost the whole rainfall. The substrate appeared to play an important role on the coupled thermo-hydric performances of the EGR and needed further characterization.

Key-words: Green roof, porous media, storm water, water content

I. INTRODUCTION / CONTEXTE

D'une utilisation traditionnelle de mélanges terre/végétaux ou d'écorces dans les pays nordiques comme couche protectrice pour des habitations de petite taille, le principe des toitures végétalisées est devenu aujourd'hui une innovation architecturale majeure [Dunnet, Kinsbury, 2008]. Le concept de Toiture Terrasse Végétalisée (TTV) et, en particulier, celui de Toiture Végétalisée Extensive (TVE) s'éloigne ainsi fortement des approches historiques précédemment évoquées. En effet, une TVE est une structure multicouches à forte valeur ajoutée technologique qui peut-être mise en place sur un toit en béton, en tôle ou en bois au-dessus de l'isolation et de l'étanchéité.

Cette écotechnologie émergente connaît un développement significatif aussi bien lors de la construction de nou-

veaux bâtiments que lors de travaux de rénovation. Les superficies croissantes couvertes en Allemagne (13 millions de m² en 2008) et en France avec ½ million de m² en 2008 [Lassalle, 2008] ont été notamment construites à la faveur du développement d'éco-quartiers.

Le succès des TVE repose sur différents arguments à la fois économiques, sanitaires et environnementaux : allongement de la durée de vie de la toiture [Wong et al., 2003, Teemusk, Mander, 2009], atténuation de l'îlot de chaleur urbain [Takebayashi, Moriyama, 2007, Alexandri, Jones, 2008], diminution du taux de CO₂ dans l'atmosphère [Emilsson et al., 2007], attrait esthétique du bâtiment et augmentation de la biodiversité urbaine [MacIvor, Lundholm, 2011].

Cependant, les principales contributions attendues des TTV pour l'amélioration de la gestion de l'espace urbain se situent essentiellement à deux autres niveaux. Il y a d'une part le

stockage et la rétention des eaux pluviales pour l'amélioration du cycle urbain de l'eau [Teemusk, Mander 2009, Carter et Rhett Jackson 2007], Mentens et al. 2006] et d'autre part l'isolation thermique du bâtiment [Teemusk et Mander 2010, Santamouris et al. 2007, Delbarrio 1998]. Les performances thermiques de la TTV sont traitées uniquement en prenant en compte la couche supérieure (couche de végétation) [Jaffal et al., 2012]. Il s'agit alors pour les auteurs de mettre en évidence des différences de température au niveau du substrat à différentes périodes de l'année. A titre d'exemple, dans l'article de Jaffal [Jaffal et al., 2012], l'auteur prend un scénario (hiver froid) où la température du substrat était supérieure de 5,6°C par rapport à l'extérieur car la couche de végétation joue le rôle d'isolation en cette période de l'année. Toujours dans le même article de Jaffal [Jaffal et al., 2012], un deuxième scénario (été chaud) a été pris, où la température du substrat de 12,8°C est plus faible que la température extérieure. L'auteur explique que le phénomène d'évapotranspiration, endothermique, joue un rôle prépondérant à cette période. Il y a peu de références qui font état d'une relation entre les paramètres thermiques et hydriques. Citons cependant les travaux de Delbarrio [Delbarrio, 1998] qui fait état d'un couplage entre les paramètres thermiques et hydriques. De même, on peut citer à ce titre les travaux de Mentens [Mentens et al., 2006] qui fait état des performances hydriques annuelles de différentes toitures en Europe avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat. Ainsi, en combinant l'augmentation de l'épaisseur du substrat et sa densité apparente. Cela permet de réduire la diffusivité thermique d'un matériau [Delbarrio, 1998]. Ce qui entraîne une augmentation des performances thermiques. Mentens et al. [2006] montre aussi clairement l'efficacité des toitures végétalisées intensives dotées d'une épaisseur de substrat supérieure à 150 mm qui permettent de retenir 75 % des eaux de pluie annuelles. Quant aux toitures extensives avec une épaisseur de substrat inférieure à 150 mm, elles retiennent 52 % des eaux annuelles de pluie. Aucune des études évoquées ne s'intéresse en détail aux propriétés hydriques des matériaux.

Les limites évoquées précédemment dans les travaux de caractérisation des performances thermiques et hydriques des TVE s'expliquent par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les

TVE, de par leur position, constituent une interface entre différents milieux : l'atmosphère, l'hydrosphère urbaine, la biosphère et même dans une certaine mesure la pédosphère. Il est donc difficile de proposer des modèles de TVE ayant des conditions aux limites réalistes. De plus, la structure multicouche des toitures végétalisées rend leur étude difficile. Cette complexité est renforcée par la nature de composants tel que le substrat de croissance (milieux poreux complexe) présent dans une TVE ou bien encore par la contribution du couvert végétal qui nécessite la prise en compte de nombreux facteurs aussi bien climatiques qu'éco physiologiques.

Les objectifs du travail présenté ici sont donc tout d'abord de caractériser le fonctionnement couplé thermique et hydrique d'une TVE en conditions réelles. Ce projet a ensuite pour vocation de pouvoir proposer des innovations visant à optimiser les fonctionnalités de systèmes de TTV à travers l'expérimentation, la modélisation et la simulation du comportement de ceux-ci.

II MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1. Toiture expérimentale in situ

Le LRPC de Nancy s'est équipé en juillet 2011, sur ses bâtiments, d'une toiture végétalisée extensive de 600 m² décomposée en neuf parcelles (Figure 1). Le site est localisé à Tomblaine (54), à l'Est de la ville de Nancy. Les parcelles ont été installées sur plusieurs bâtiments de mi-hauteur (≈ 6 m). Les toits sont plats et conformes à la norme DTU 43-1 relative aux toitures terrasses et toitures inclinées. Ils sont composés d'un élément porteur en béton et en aggloméré. L'installation du dispositif résulte d'un financement par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, avec le soutien des entreprises Nidaplast, Végétoit et Falienor.

Le climat sur le site expérimental est de type océanique dégradé à influence continentale marquée. Les précipitations moyennes sont de 763 mm.an⁻¹, avec 31 jour.an⁻¹ de neige. La température moyenne est de 10 °C avec une forte amplitude de variations entre été et hiver.

Figure 1 : Implantation des parcelles expérimentales sur les toits des bâtiments du LRPC de Nancy

Figure 2 : Schéma de principe de la répartition des couches de la TVE et des sondes PT100 utilisé dans le système d'acquisition

II.2. Description de la parcelle étudiée

La parcelle étudiée possède une surface de 75 m² (Figure 1). Elle est composée de sept couches dont la fonction, la nature et la provenance sont détaillées dans le (Tableau 1). Cette structure est conforme aux règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées édictées en 2007 par la CSFE en partenariat avec Adivet, l'UNEP et le SNPPA [ADIVET, 2007].

II.3. Mesure des variables extérieures

La parcelle expérimentale a été équipée de capteurs permettant de mesurer des variables liées à la micro-climatologie (température extérieure de l'air, hygrométrie, pluviométrie, vitesse et direction du vent) par l'intermédiaire d'une station météo situé à 20 cm du sol (au dessus du substrat) et des conditions hydrologiques en sortie (débit d'eau évacué hors de la toiture) grâce à un débitmètre à auget basculant.

La station météo enregistre cinq variables climatiques : i) l'anémométrie, comprise entre 0 et 60 m.s⁻¹ avec une précision de $\pm 5\%$; ii) le rayonnement net à l'aide d'un pyranomètre solaire fabriqué par Davis Instruments (Le Vantage Pro2), les flux thermiques sont mesurés de 0 à 1800 W.m⁻² avec une précision de $\pm 5\%$ et une dérive de $\pm 2\%$ par an ; iii) l'humidité relative de l'air (de 0 à 100 %, avec une précision de $\pm 2\%$) ; iv) la pluviométrie à l'aide d'un capteur radar Doppler 24 Ghz (Lufft, réf. R2S) qui peut mesurer la quantité et l'intensité d'hydrométéore de 0 à 55,56 m.s⁻¹ pour une résolution allant jusqu'à 0,01 mm.m⁻².

II.4. Mesure des variables internes à la toiture

Plusieurs capteurs hydriques et thermiques ont été installés au sein de la toiture expérimentale comme le montre la

(Figure 2). Les capteurs de températures sont des sondes platines de types PT100 classe A. Elles possèdent une gamme de mesure de -40 à 100 °C avec une précision de $0,1$ °C. Afin d'effectuer la mesure du profil de température sur les différentes couches de la parcelle argile expansé, une série de 7 capteurs a été installée à différentes profondeurs :

- Sur le pare vapeur (ss-drainage),
- sur la couche d'argile expansée utilisée comme drainage (sr-drainage),
- sous la couche de substrat classique (ss-substrat),
- Un cm en dessous de la surface du substrat (1cm-ss-substrat),
- à la surface du substrat (surface-substrat).

La mesure de la teneur en eau volumétrique est réalisée à l'aide de deux sondes TDR (*Time Domain Reflectometry, réf 5TM*). Elles sont disposées à deux emplacements de la toiture – l'un proche de l'exutoire, l'autre proche du point haut (Figure 2) – et placées à 6 cm de profondeur. Elles permettent une mesure de teneurs en eau comprises en 0 et 100 % avec une précision de 2 %. Deux autres sondes, celles-ci capacitatives sont installées aux mêmes emplacements que les sondes TDR. Ces équivalents (Decagon Devices, réf MPS-1) permettent la mesure du potentiel matriciel du substrat basée sur la mesure de la permittivité électrique. Les capteurs ont été calibrés sur un échantillon du substrat. Elles se distinguent par une plage de mesure allant de -10 kPa à -500 kPa avec une précision de 1 kPa (dans la gamme -10 à -100 kPa) et 4 kPa (dans la gamme -100 à -500 kPa).

Les données sont acquises en continu sur un ordinateur portable branché au concentrateur (réf. NI-9791) via le réseau interne du laboratoire. À ce concentrateur, sont connectés l'ensemble des capteurs de températures. Le séquençage, et l'enregistrement des données ont été programmés en langage G sous Labview (National Instrument). L'application permet l'acquisition des données des sondes de

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes couches de la parcelle

Couche	Épaisseur (mm)	Nature	Caractéristiques techniques	Fournisseur / dénomination commerciale
Végétation classique	30 à 200	Sedum principalement	Sedum album, sedum spurium, sedum reflexum arux angelina, sedum sexangulare, sedum floriferum,	Végétoit
Substrat classique	100	Tourbe, écorces, pouzzolane	60 % pouzzolane 7/15, 20 % pouzzolane 3/6, 10 % tourbe blonde balte B1, 10 % écorce de pin maritime ; densité apparente $851,1 \pm 23,4$ kg.m ⁻³ ; porosité totale $67,9 \pm 0,9$ (%.vol) ; conductivité hydraulique à saturation $1,07 \cdot 10^{-3} \pm 6,33 \cdot 10^{-5}$ m.s ⁻¹	Falienor - Terreaux de France, Falienor1
Filtre	1,7	Géotextile	polyester non-tissé 200 g.m ⁻² , conductivité hydraulique à saturation = $3 \cdot 10^{-3}$ m.s ⁻¹	Siplast, Gravifiltre
Drainage	50	Argile expansé	densité apparente 275 ± 15 % kg.m ⁻³ , conductivité thermique $< 0,11$ W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Saint-Gobain, Leca10
Étanchéité	3	Géotextile	armature en polyester non tissé (200g/m ²) paillettes d'ardoises, film thermo fusible	Soprema, Sopralène jardin
Pare vapeur	3	goudron	deux faces de pare vapeur protégées par un film thermo fusible armature en polyester non tissé et de bitume élastomère (180g.m ⁻²)	Soprema, Sopralène Flam 180
Complexe Isolant	60	mousse de polyisocyanurate rigide	densité > 30 kg.m ⁻³ , parementé d'un revêtement aluminium (0,05mm)	RECTICIEL SAS, Powerline

températures au pas de temps régulier de 15 min. Les informations sont stockées dans un fichier tableur.

III. RÉSULTATS

III.1. Suivi thermique

L'analyse du comportement thermique de la parcelle étudiée se fonde sur l'étude de deux périodes contrastées de 2 jours : i) estivale du 21 au 23 juin 2012, ii) hivernale du 14 au 16 janvier 2012.

L'analyse de la température à la surface de la toiture montre une évolution sinusoïdale correspondant aux alternances nuit / jour (Figure 3). La température maximale mesurée est de 48 °C à 15h30 le 21/06 et la température minimale de 10 °C est atteinte de nuit à 5h30 le 22/06 (Figure 3). Les mesures données par les 3 sondes localisées dans le substrat indiquent des variations de la température

périodiques nuit / jour similaires. L'amplitude des variations et le décalage temporel, visible notamment sur les pics de température, y sont cependant moindres. La température maximale mesurée à 1 cm dans la couche de substrat est de 30 °C à 16h00 le 21/06. Ceci confirme l'existence d'une inertie thermique de l'ordre de 50 minutes. L'inertie thermique au sein du substrat est plus faible, il en va de même pour le gradient de température qui est de 3 °C. La température minimale de 14 °C est atteinte à 06h45 le 22/06 le lendemain. Enfin l'allure de la courbe de température au niveau de la couche d'étanchéité est elle aussi de forme sinusoïdale avec une périodicité nuit / jour. La courbe a une amplitude nettement moins prononcée que les précédentes avec un gradient thermique mesuré de 9 °C où la température minimale mesurée de 19 °C à 10h30 le 22/06 et un décalage temporel très marqué entre l'évolution de la température de la couche de surface et la température de l'étanchéité de 5 heures. Ces premières observations confirment l'intérêt de la TTV qui permet « d'absorber » le pic de chaleur transitoire du milieu

Figure 3 : Évolution de la température au sein de la parcelle expérimentale, période estivale (2 jours) du 21/06/2012 au 23/06/2012

Figure : Évolution de la température au sein de la parcelle expérimentale, période hivernale (2 jours) du 14/01/2012 au 16/01/2012

de journée réduisant ainsi les besoins en climatisation aux périodes les plus chaudes.

L'analyse de la (Figure) qui correspond à une période hivernale montre un comportement sinusoïdal uniquement pour la surface du substrat, avec une alternance nuit/jour. Au plus chaud de la journée, la température maximale est de 0,5 °C à 15h30 le 14/01 et la température minimale de -2 °C est atteinte à 02h00 le 15/01. Au sein de la couche de substrat, la température varie très peu (entre 1 °C et 1,5 °C), sans périodicité nuit/jour. Enfin, la couche d'étanchéité se trouvant sous le drainage se caractérise également par une température quasiment constante du 14/01 au 16/01 avec une température maximale mesurée de 5 °C et une température minimale mesurée de 4 °C. Le gradient mesuré est de 5 à 6 °C. Quant au décalage temporel, il est assez difficile de le préciser à l'aide des ces évolutions. Toutefois, certaines hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce comportement. Si l'on se réfère aux courbes de pluviométrie correspondant à cette période (Figure), on note que le substrat conserve une teneur en eau relativement uniforme ce qui implique que les propriétés thermiques y sont uniformes avec une conductivité plus élevée que dans un substrat sec. En conséquence les gradients thermiques y sont plus faibles. Concernant la température sous le drainage, elle est pilotée par la température à l'intérieur du bâtiment qui était uniforme sur cette période.

La comparaison de l'évolution des températures à différentes profondeurs de la TVE sur deux périodes climatiques contrastées met tout d'abord en évidence un comportement semblable de la température en surface dont les valeurs varient périodiquement en fonction du temps et de l'alternance jour / nuit. Cependant, alors que les variations sinusoïdales de températures en été s'étaient traduites également dans les mesures effectuées au sein du substrat et dans une moindre mesure au dessus de la couche d'étanchéité [Jaffal et al., 2012], les mesures effectuées en hiver montrent des valeurs de températures constantes au sein de la TVE. Les fortes amplitudes de variations des températures sur la période estivales expliquent en partie cette différence de comportement, mais d'autres facteurs sont également à considérer. Ainsi, l'humidité du substrat entre les deux situations qui est très différente (Figure) a certainement contribué à expliquer ces différences d'inertie thermique. Ainsi en été,

la teneur en eau dans le substrat est plus faible et ce dernier devient alors un isolant thermique plus performant.

De forts écarts de température entre la surface et l'étanchéité ont été mesurés : 5 – 6 °C [min, max] (hiver) et 8 – 26 °C [min, max] (été). Le substrat semble ainsi jouer le rôle d'élément de transition ou de tampon. Cette différence est plus marquée en période hivernale qu'en période estivale.

III.2. Suivi hydrique

L'analyse du comportement hydrique de la toiture expérimentale s'est fondé tout d'abord sur l'étude d'une période courte de 9 jours au cours de laquelle se sont succédées une longue période sans précipitations, puis une pluie d'intensité 11,6 mm (quantité d'eau exprimé en litre ou dm³ rapportée à une surface en m²) et un volume cumulé de 30,2 mm (Figure 4). Par ailleurs, un suivi sur le long terme (5 mois) a également été fait afin de décrire le fonctionnement hydrodynamique de la TVE (Figure 5).

Lors de la première phase, du 14/01 au 18/01 qui correspond à une absence de pluie, il est observé une décroissance lente de l'humidité au sein du substrat avec de faibles oscillations (Figure 4). Cette baisse de teneur en eau (de 39 % à 34 %) s'explique principalement par un prélèvement – limité à cette saison – par les plantes et par des écoulements gravitaires vers la base de la toiture. Les variations de faible amplitude semblent être le résultat des conditions microclimatiques qui provoquent des phénomènes d'évaporation ou de condensation d'eau à l'interface atmosphère / substrat. Les premières pluies, le 19/01, entraînent instantanément une augmentation rapide de l'humidité. Au cours de cet événement pluvieux qui dure plusieurs jours, des pics de teneur en eau sont observés au plus fort de la pluie (jusqu'à 42,5 % le 20/01) suivi d'une décroissance rapide vers une valeur proche de 40 %, puis d'une décroissance plus lente ensuite, jusqu'à la pluie suivante. Il est complexe d'interpréter ces résultats de monitoring en termes de propriétés hydriques du substrat et en particulier de valeurs d'humidités caractéristiques. Il est cependant possible de déduire que la teneur en eau à saturation (θ_{sat}) du matériau est légèrement supérieure à 40 %. Par ailleurs, la conductivité hydraulique à saturation du substrat semble très élevée expliquant le faible temps de réponse aux évé-

Figure 4 : Évolution de la teneur en eau au sein de la parcelle expérimentale sur une période hivernale de 9 jours (14/01/2012 – 23/01/2012)

ments pluvieux. Il n'est par contre pas possible d'estimer la proportion d'eau capillaire et d'eau gravitaire.

Le suivi sur une plus longue période de temps donne d'autres informations sur le fonctionnement hydrique de la TVE (Figure 5). Il est possible de distinguer 3 sous-périodes distinctes : i) du 03/02 au 16/02, ii) du 01/01 au 03/02 puis du 16/02 jusqu'à fin mars ; iii) de début avril jusqu'à fin mai. La première période qui se caractérise par des valeurs très faibles de teneur en eau volumétrique correspond à de très faibles températures et donc à la présence d'eau sous forme de glace ; les sondes TDR ne permettent pas de mesurer une humidité dans ces conditions, la réponse des sondes est donc anormalement basse. La seconde période évoquée correspond à celle qui a été précédemment étudiée et se caractérise par des pluies régulières, des températures faibles, une évapotranspiration limitée et une teneur en eau volumétrique dans le substrat constante et élevée (entre 35 et 40 %). La troisième période – début du printemps – se caractérise par des événements pluvieux plus rares mais plus intenses, des températures extérieures ponctuellement élevée, une évapotranspiration significative et des variations d'humidité dans le substrat beaucoup plus forte. En effet, les zones de plateau sont beaucoup plus rares et la teneur en eau mesurée par les sondes TDR évolue en suivant des épisodes de forte décroissance – écoulement gravitaire, évapotranspiration, fort prélèvement par les racines des plantes – puis de croissance rapide lorsqu'une pluie intervient. L'intensité de l'augmentation de la teneur en eau de (entre 22,6 % et 23,7 %) entre le 9/04 et le 10/04 est dans une certaine mesure proportionnelle à l'intensité de la pluie cumulée de 12,7 mm. De même entre le 20/04 et le 21/04, l'intensité de la teneur en eau (entre 28 % et 34 %) est elle aussi proportionnelle à l'intensité de la pluie cumulée de 13,5 mm. Il est à noter que les observations effectuées précédemment sur l'existence de teneur en eau de saturation θ_{sat} comme valeur maximale d'humidité atteinte se confirment. En effet, quel que soit l'intensité de la pluie (ici de 15 mm), la teneur en eau volumétrique ne dépasse jamais une valeur maximale de 40,5 %. Cependant, de manière surprenante cette valeur de θ_{sat} théorique semble

avoir évolué au cours du temps. En effet, alors qu'au cours du mois de janvier la teneur en eau atteignait des valeurs de 42 %, durant les mois de mars, avril et de mai ces valeurs ne dépassent jamais 38 %. Plusieurs hypothèses peuvent être émises : i) phénomène de submersion au cours du mois de janvier conduisant à des valeurs supérieures à la capacité d'absorption du substrat correspondant à θ_{sat} ii) évolution des propriétés hydriques du substrat à la suite de la période de gel qui conduit à une évolution de l'architecture du matériau et donc de la valeur de θ_{sat} ; iii) dérive des sondes de mesure à l'issue de l'épisode de gel.

Outre un suivi de la teneur en eau au sein du substrat, une mesure des débits à la sortie de la TVE, c'est-à-dire au niveau de l'exutoire a été effectuée (Figure 6). Deux phases distinctes se succèdent. Tout d'abord la période hivernale avec une courbe de volume d'eau évacuée qui se superpose à la courbe des précipitations cumulées. Ceci est cohérent avec les observations précédentes puisque non seulement nous avons vu que la teneur en eau dans le substrat était proche de θ_{sat} mais aussi que la conductivité hydraulique à saturation était très élevée donc que le transfert d'eau supplémentaire apportée par les précipitations se fait très rapidement vers l'exutoire. Ensuite, à partir du printemps, les volumes évacués sont très faibles, nuls la plupart du temps. Ceci est également en accord avec les précédentes observations sur la baisse des teneurs en eau, qui traduisaient l'importance des prélèvements par la plante et les transferts par évaporation. Ces résultats supplémentaires permettent aussi de répondre partiellement à la question évoquée ci-dessus sur une possible évolution de la valeur de θ_{sat} du substrat. En effet, l'absence d'écoulement durant la majeure partie de la période printanière considérée montre que cette valeur de teneur en eau à saturation déclenchant des écoulements importants n'est jamais atteinte et que les précipitations sont entièrement stockées dans le substrat et plus globalement dans la TVE. Néanmoins, certains épisodes de forte intensité de 15 mm comme la pluie du 02/05 à 05h00 déclenche néanmoins une sortie d'eau de 3,4 mm (22,7 % de la pluie évacuée) alors que la teneur en eau est inférieure à la valeur de θ_{sat} théorique estimée en janvier.

Figure 5 : Évolution de la teneur en eau au sein de la parcelle expérimentale sur une durée de mesure de 5 mois (janvier – mai 2012)

Figure 6 : Évolution de la quantité d'eau évacuée de la parcelle argile expansée sur une période de 5 mois (janvier – mai 2012).

IV. CONCLUSION

Les premiers travaux qui ont été menés sur un dispositif expérimental de toiture végétalisée extensive *in situ* ont permis de décrire et de quantifier son comportement thermique et hydrique. En effet, il a été possible d'estimer la contribution de ce type de système multicouches à l'isolation thermique, aussi bien en atténuant les températures élevées en été qu'en limitant la chute de température en hiver. Par ailleurs, le suivi de l'hydrodynamique a montré que la TVE seule ne pouvait pas jouer un rôle de stockage tampon des eaux pluviales en période hivernale car le substrat est continuellement proche de la saturation en eau. Au printemps, au contraire, la baisse de la teneur en eau volumétrique causé par les phénomènes d'évapotranspiration et de prélèvement par la plante permet à la TTV de limiter très fortement les volumes d'eaux pluviales rejetées dans le réseau, mais également d'atténuer les événements pluvieux de forte intensité ($> 10 \text{ mm.h}^{-1}$) qui constituent un enjeu majeur de la gestion des eaux urbaines.

Au-delà, cette étude a démontré l'intérêt de coupler l'étude des phénomènes thermiques et hydriques au sein d'une TVE pour évaluer au mieux ses performances. En effet, il apparaît à la lueur de ces résultats que le niveau d'humidité du substrat joue un rôle primordial sur ses capacités thermiques et donc sur les performances de l'installation pour le bâtiment sous-jacent. Cette approche peu explorée jusqu'à présent devrait permettre de mieux appréhender les fonctionnalités des TVE.

V. PERSPECTIVES

Plusieurs pistes de recherche sont ébauchées par l'exploitation des résultats présentés dans cet article. Tout d'abord, il s'avère indispensable de caractériser finement les propriétés thermiques et hydriques de chacun des composants de la TVE, avec une attention particulière sur le substrat, milieu poreux complexe. En effet, l'utilisation exclusive des données fournisseurs ne permet pas d'appréhender, par exemple, la dynamique de l'eau dans le substrat pour identifier précisément des valeurs caractéristiques comme la teneur en eau à saturation, la conductivité hydraulique à saturation, la capacité au champ ou bien encore le point de

flétrissement. Ces éléments pourraient pourtant permettre de mieux décrire l'hydrodynamique, la capacité de stockage en eau de la TVE ou bien encore la quantité d'eau disponible pour les plantes. En outre, il apparaît clairement que le stockage (ou non) de l'eau dans le substrat à une incidence notable sur les performances thermiques de la toiture, en particulier sur son aptitude à favoriser ou non le décalage temporel des pics de température.

Par ailleurs, à ce stade, les possibilités d'optimisation des fonctionnalités n'ont pas été explorées comme par exemple la régulation du niveau d'eau pour améliorer les performances thermiques. Pour cela, il semble pertinent d'effectuer des aller-retour entre des dispositifs expérimentaux de terrain qui permettent d'obtenir des données fiables et réalistes – mais qui sont difficiles à mettre en œuvre et coûteux – et une démarche de modélisation avancée – plus facile d'application – qui permette de tester une large gamme de scénarios d'étude.

VI. REFERENCES

- ADIVET. (2007) — *Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*. 2
- ALEXANDRI E., & JONES P. (2008) — *Temperature decreases in an urban canyon due to green wall and green roofs in diverse climates*. 43(4) 480-493
- CARTER T., & RHETT JACKSON C. (2007) — *Vegetated roofd for stormwater management at multiple spatial scales*. *Landscape and urban Planning*. 80(12) 84-94
- DELBARRIO E. P. (1998) — *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*. *Energy and Buildings*. 27(2) 179-193
- DUNNET N., & KINSBURY N. (2008) — *Toits et murs végétaux. Edition du Rouergue*
- EMILSSON T., CZEMIEL BERNDTSSON J., MATSSON J. E., & ROLF K. (2007) — *Effet of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems*. *Ecological Engineering*. 29(3) 260-271
- JAFFAL I., OULDOUKHITINE S., & BELARBI R. (2012) — *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*. *Renewable Energy*. 43 157-164
- LASSALLE F. (2008) — *Végétalisation extensives des toitures terrasse et toitures*. *Le Monitor*

- MACLVOR J., & LUNDHOLM J. (2011) — Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in maritime climate. *Ecological Engineering*. **37** 407-417
- MENTENS J., RAES D., & HERMY M. (2006) — Green roofs as tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century ? *Landscape and urban Planning*. **77** 217-226
- SANTAMOURIS M., PAVLOU C., DOUKAS P., MIHALAKAKOU G., SYNNEFA A., HATZIBIROU A., ET AL. (2007) — Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in nursery school building in Athens, Greece. *Energy*. **32(9)** 1781-1788
- TAKEBAYASHI H., & MORIYAMA M. (2007) — Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*. **42(8)** 2971-2979
- TEEMUSK A., & MANDER A. (2009) — Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane : A case study from Estonia. *Building and Environment*. **3** 643-650
- TEEMUSK A., & MANDER Ü. (2010) — *Ecological Engineering*. **36(1)** 91-95
- WONG N., CHEONG D. K., YAN H., SOH J., L O. C., & SIA A. (2003) — The effect of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*. **35** 353-364