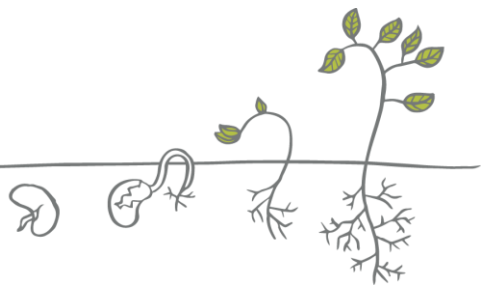
Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville
Center for landscape and urban horticulture

26/10/2017

IMPACT DES TOITURES VEGETALISEES SUR LA QUALITE THERMIQUE DES BATIMENTS ET LE MICROCLIMAT LOCAL DANS LE CANTON DE GENEVE

[Fiche de synthèse]



hepia
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland

Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville
Center for landscape and urban horticulture

TITRE :

Impact des toitures végétalisées sur la qualité thermique des bâtiments et le microclimat local dans le canton de Genève – **Rapport final du projet TVEG 2014-2016**

AUTEUR :

Damien VARESANO, assistant de recherche, Sylvie MARIGOT, assistante de recherche, Victor GUILLOT, assistant HES, Peter GALLINELLI, chargé d'enseignement HES, Reto CAMPONOVO, professeur HES, responsable LEEA

THEMATIQUES :

Agronomie - Sols urbains - Conduite des végétaux, Choix des végétaux et innovation végétale

MOTS-CLES :

Toitures végétalisées, qualité thermique, Genève, microclimat, bâtiments

RESUME :

Cette étude propose d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur la qualité thermique des bâtiments afin d'apporter des connaissances complémentaires sur la thématique dans un contexte genevois. Les mesures in-situ de flux thermiques et de températures effectuées sur une toiture végétalisée extensive - 10 cm de couche végétale et déjà bien isolée - indiquent que son coefficient de transmission thermique U est très proche de la même toiture recouverte simplement d'une couche de gravier rond. La capacité des toitures végétalisées à réduire les déperditions thermiques en hiver ne semble donc pas une hypothèse généralisable. Concernant leur capacité à améliorer le confort thermique estival à l'intérieure des bâtiments, les mesures ne permettent pas de se prononcer concrètement sur l'impact du substrat sur le climat intérieur. Un albédomètre - composé de deux pyranomètres - a mesuré en continu l'albédo du couvert végétal sur une période de plusieurs mois à l'été 2015. Les résultats montrent que les valeurs varient entre 0.12 et 0.24 sur la période de mesure pour une moyenne de 0.19. La capacité de cette surface à absorber la chaleur par rayonnement n'est donc pas négligeable. Concernant l'impact sur le micro climat local, les résultats de mesure de la température de l'air au niveau de plusieurs points stratégiques montrent que, dans le contexte des fortes températures estivales de 2015 et d'un substrat pauvre en eau, les effets de la toiture végétalisée extensive étudiée sur la réduction des températures de l'air sont absents. Dans les conditions de l'expérience, il semble que la capacité en termes d'évapotranspiration et de réduction du flux de chaleur sensible de la toiture extensive étudiée soit en effet très limitée sur cette période sèche.

Genève, le 19 février 2016

SOMMAIRE

NOMENCLATURE 4

1.1 TERMES GÉNÉRAUX 4

1.2 TRANSMISSION ET ÉCHANGES DE CHALEUR 5

1.3 RAYONNEMENT 5

1.4 INSTRUMENTS DE MESURE 5

1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE 7

2 PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL 8

3 PARTIE 2 : TRAVAIL DE RECHERCHE APPLIQUÉE À GENÈVE 17

3.1 TOITURES À L'ÉTUDE 17

3.2 GÉNÉRALITÉS SUR LES EXPÉRIENCES ET LA PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 20

3.3 EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS 21

3.3.1 Albédomètrie 21

3.3.2 Mesure des flux thermiques et des températures afférentes 24

3.3.3 Mesure de température de l'air ambiant 36

4 PARTIE 3 : CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS 39

BIBLIOGRAPHIE 41

NOMENCLATURE

- **mètre (m)**
- **centimètre (cm)**
- **mètre carré (m2)**
- **mètre cube (m3)**
- **kilogramme (kg)**
- **Watt (W)**
- **Joule (J)**
- **Degrés Celsius (°C)**
- **Kelvin (K)**

1.1 TERMES GÉNÉRAUX

- **Toiture végétalisée (TV)** = élément de construction horizontal qui consiste à mettre en œuvre une couche végétale dans la partie supérieure de l'élément, couche ayant pour but d'accueillir de la végétation. [1]
- **Végétalisation extensive** = végétalisation ne nécessitant qu'une couche végétale mince (épaisseur 80 à 200 mm). Les végétaux qui conviennent sont les mousses, plantes grasses, herbacées et graminées, adaptées aux conditions extrêmes de l'emplacement et qui ont une grande capacité de régénération. [1]
- **TV intensive** = végétalisation nécessitant une couche végétale d'épaisseur moyenne à forte – de 120 à 500 mm, qui reçoit des végétaux bas à moyennement élevées et permettant la plantation de plantes vivaces et d'arbres. [1]
- **Toiture standard 1 (TS-1)** = Toiture recouverte d'une couche de gravier rond.
- **Toiture standard 2 (TS-2)** = Toiture recouverte d'une couche d'étanchéité bitumineuse.
- **Ilot de chaleur urbain (ICU)** = augmentation des températures en milieu urbain par rapport à sa périphérie.
- **Substrat** = Matériau produit industriellement, constitué de plusieurs composants mélangés, utilisé comme couche végétal [1].
- **Sol** = Couche de terre meuble dans laquelle peuvent pousser les végétaux ; elle comporte une partie supérieure et une partie inférieure.
- **Géotextile** = Natte filtrante empêchant les particules fines provenant de la couche végétale d'atteindre la couche située en dessous et protégeant l'étanchéité contre la perforation par les racines. [1]
- **Etanchéité à l'eau** = Couche protégeant la structure du bâtiment des infiltrations d'eau provenant de l'extérieur. [1]
- **Couche drainante** = Couche généralement situé sous le géotextile et au-dessus de l'étanchéité. Elle offre un espace pour drainer l'eau vers les évacuations de la toiture. [1]
- **Evapotranspiration (ET)** = Phénomène combiné de perte en eau par transpiration et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. Il correspond au phénomène physique du passage de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. [2]
- **Formule de Penman-Monteih (PM-FAO)** = Formule permettant le calcul de l'ET potentielle théorique (ETp) d'un couvert végétal. Elle a l'avantage de considérer tous les paramètres qui règlent la balance énergétique du sol à l'atmosphère en passant par la végétation. [2] L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) considère cette méthode comme la référence mondiale pour le calcul de l'ET de référence d'une surface végétalisée. [21]
- **Photosynthèse (PS)** = Pour les plantes, processus de synthèse de la matière organique par absorption d'énergie lumineuse et transformation d'eau. [2]
- **Surface foliaire** = Division de l'espace occupée par les feuilles au-dessus de la couche végétale. [1]

1.2 TRANSMISSION ET ÉCHANGES DE CHALEUR

- **Coefficient de transmission thermique (U) en W/(m2.K)** = Flux de chaleur qui s'écoule, à l'état stationnaire, à travers une section de 1 m2 d'un élément de construction, perpendiculairement à sa surface et lorsqu'une différence de température de 1 K est maintenue entre ses deux faces. Plus il est faible, plus le pouvoir isolant de l'élément est meilleur. [19]
- **Conductivité thermique (Lambda) en W/(m.K)** = Quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique à travers une section de 1m2, sur une épaisseur de 1m et pour un gradient de 1 kelvin dans le matériau. [19]
- **Résistance superficielle extérieure (Rse) en (m2.K)/W** = Quantité de chaleur échangé par convection et par rayonnement entre la face extérieure d'un élément et l'air ambiant. [19]
- **Capacité thermique en J/K** = Quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'un matériau. [19]
- **Chaleur massique (c) en J/(kg.K)** = Capacité thermique rapportée à la masse du matériau. [19]
- **Diffusivité thermique en m2/s** = Rapidité à laquelle une perturbation de la température se propage dans un matériau. Plus elle est faible, plus [19]
- **Effusivité thermique en J/(m2.K.s0.5)-1** = Capacité d'accumulation de chaleur d'un matériau de construction homogène et d'épaisseur semi-infinie. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. [19]
- **Déphasage thermique** = Dans le domaine du bâtiment, le décalage temporel entre l'apparition des valeurs extrêmes de température à l'extérieur et à l'intérieur est décrit comme déphasage thermique. [19]
- **Chaleur sensible** = Chaleur échangée entre différents corps sans transition de phases. [19]
- **Chaleur latente de vaporisation de l'eau (L)** = 2.45*106 J/kg = Quantité d'énergie nécessaire pour évaporer 1 kg d'eau.

1.3 RAYONNEMENT

- **Rayonnement solaire incident (SWin) en W/m2** = Rayonnement global reçu par une surface horizontale dans le domaine des courtes longueurs d'ondes. [2]
- **Rayonnement solaire réfléchie (SWout) en W/m2** = Rayonnement global d'origine solaire réfléchi par une surface horizontale dans le domaine des courtes longueurs d'ondes. [2]
- **Albédo (a) sans unité** = Fraction du rayonnement global d'origine solaire (rayonnement direct et diffus) qui est réfléchie par une surface horizontale dans un hémisphère ; autrement dit elle correspond au quotient de SWin sur SWout. [2]
- **Pouvoir émissif (ou exitance énergétique) (Me) en W/m2** = Puissance rayonnée par unité de surface et dans un hémisphère valable pour l'ensemble du spectre de rayonnement électromagnétique. [2]
- **Emissivité spectrale (e) sans unité** = Propriété caractéristique d'un matériau donné conditionnant son pouvoir émissif ; autrement dit il est important de connaitre l'émissivité d'un corps pour estimer le rayonnement qu'il émet – exitance énergétiques, en fonction de sa température. [2]

1.4 INSTRUMENTS DE MESURE

- **Pyranomètre – Hukseflux NR01** = Mesure le rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale dans un angle solide de 2π stéradian et dans le domaine spectrale des courtes longueurs d'ondes (0.3 à 3 micromètres).
- **Fluxmètre – Hukseflux HFP01** = Capteur donnant un signal électrique qui est fonction directe du flux thermique qui le traverse.
- **Thermocouple – Type K** = Capteur donnant un signal électrique qui est fonction de leur température.

- **Datalogger- Campbell scientific CR800/1000** = Enregistreur de données programmable sur lequel viens se connecter des sondes.
- **Sonde Rotronic Hygroclip2 HC2-S(3)** = mesure la température et l'humidité relative de l'air.
- **Sonde Rotronic PT-100** = mesure la température basé sur le principe de la variation de la résistance électrique.
- **Boitier Rotronic Log-HC2** = Enregistreur de données programmable sur lequel vient se connecter les sondes Rotronic

1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dans le contexte de changement climatique global, des phénomènes d'îlots de chaleur et d'accroissement du nombre d'événements climatiques extrêmes ont été constatés depuis plusieurs années et inquiètent les planificateurs et les habitants des villes. La problématique est identifiable à l'échelle du climat urbain et également à l'intérieur des bâtiments où les températures peuvent atteindre des valeurs élevés créant de l'inconfort et/ou obligeant les concepteurs à recourir à des solutions techniques actives, peu rationnelles au niveau énergétique et qui ne font qu'aggraver la situation.

Dans la perspective de mettre en place des mesures de mitigation, de plus en plus d'études sont réalisées afin de bien comprendre et objectiver l'effet de la végétalisation des infrastructures et la protection des espaces verts sur l'acclimatation et l'adaptation des habitants.

Au niveau du Canton de Genève, qui compte une des plus grandes villes de Suisse, l'impact des toitures végétalisées sur le climat, sur l'hydrologie urbaine et sur la biodiversité, n'a pas encore fait l'objet d'évaluations. Afin d'apporter des connaissances et de comprendre dans quelle mesure et comment ces toitures végétalisées doivent s'intégrer dans le développement territorial, un projet a été initié en 2014 par une équipe de chercheurs de la haute école du paysage d'ingénierie et d'architecture – hepia, de Genève.

Le projet TVeg consiste en une étude de recherche appliquée multidisciplinaire. En tant que partie prenante, l'équipe du Laboratoire Energie Environnement et Architecture – LEEA hepia, se propose d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur le micro climat urbain et sur la qualité thermique des bâtiments. Ce rapport rend compte du travail qui a été mené. Il est structuré en plusieurs parties. Une première consiste en une revue de l'état de l'art sur la thématique des toitures végétalisées et ses impacts du point de vue thermique, énergétique et climatique. La seconde - Travail de recherche appliquée à Genève, présente les expériences in situ et les résultats concernant les objets étudiés localement à l'échelle du canton de Genève. Enfin, la troisième et dernière partie consiste en une conclusion et propose des recommandations et des ouvertures.

2 PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Les toitures végétalisées (TV) sont des éléments de construction horizontaux qui consistent à mettre en œuvre un substrat dans la partie supérieure de la toiture plate. Cette couche plus ou moins végétale a pour but d'accueillir de la végétation. La norme *SIA 312:2013 Végétalisation de toiture [1]* est la référence actuelle en Suisse. Elle explique les principes de conception et de mise en œuvre d'une TV, détaille les couches nécessaires à la végétalisation des toitures et fournie des informations concernant le choix des matériaux et des végétaux. De façon générale, une TV se compose de 4 éléments principaux comme représenté sur la Figure 1 et qui ont des fonctions bien définies - de l'intérieur vers l'extérieur : une couche d'étanchéité*, une couche de drainage*, une couche de substrat* et une couche de végétation*.

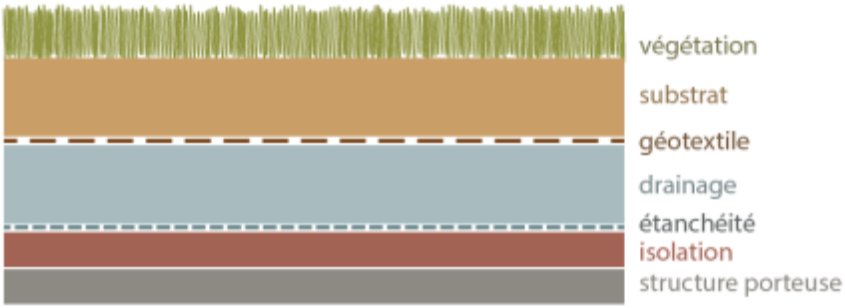


Figure 1 : Composants d'une toiture végétalisée classique.

Partant de ce standard, il existe ensuite de nombreux types de TV et de variante. Elles se différencient par l'épaisseur et le type de substrat mis en œuvre, par son ensemencement* de départ et par le type de végétation que l'on y trouve : on distingue généralement les TV extensive* et intensive* pour respectivement les toitures qui ne nécessite qu'une couche végétale mince – de 80 à 200 mm, contre des épaisseurs moyennes à élevées – de 120 à 500 mm, pouvant donc accueillir des végétaux de plus grandes hauteurs comme des plantes vivaces ou des arbres. De façon plus générale, les toitures plates se différencient également par la nature de la structure porteuse, la position et le niveau d'isolation et la situation de la couche d'étanchéité. La toiture est dite froide* lorsque l'isolation est située à l'intérieur par rapport à la structure porteuse et chaude* dans le cas inverse. Dans cette disposition, l'étanchéité peut se situer en dessous de l'isolation ; on parle alors de toiture inversée*.

Comparativement à d'autres types de toiture plates tels que les toitures recouverte de gravier rond (toiture standard 1 - TS-1) ou simplement d'une couche d'étanchéité bitumineuse (TS-2), les TV sont généralement présentées dans la littérature comme des éléments ayant des effets directs et indirects plutôt positifs. Plus particulièrement et pour le volet qui nous intéresse ici, elles permettraient d'une part d'améliorer les performances thermiques des bâtiments en hiver et en été, et d'autre part de limiter la formation des îlots de chaleur urbain (ICU), c'est-à-dire le différentiel de température entre le milieu urbain et sa campagne environnante.

Le rôle de la végétation sur la régulation des écosystèmes climatiques est une thématique bien connue qui est notamment traité dans une approche globale au sein d'ouvrage tel que *Climatologie de l'environnement* de Gérard Guyot *[2]*. Dans ce livre, l'auteur détaille les échanges énergétiques de l'échelle planétaire, à l'échelle de la plante et les mécanismes complexes qui interviennent dans la formation des climats. L'approche pédagogique de cet ouvrage permet une compréhension générale des phénomènes en jeu et fournit une base de réflexion essentielle pour comprendre et analyser des objets et des contextes particuliers à l'image des TV

dans un environnement et un climat urbain spécifique. Il traduit également la complexité des mécanismes mis en jeu et la multiplicité des facteurs influençant le climat.

A une autre échelle de travail, de nombreuses études scientifiques sont menées sur la thématique particulière des TV dans différents contextes et depuis plusieurs années. Elles ont conduit à de nombreuses publications qui présentent des résultats d'expériences in-situ sur des TV extensive ou intensive, pour plusieurs types de végétation et dans différents contextes climatiques. Certaines se penchent sur les effets des TV vis-à-vis des performances thermiques et énergétiques des bâtiments alors que d'autres se concentrent d'avantage sur l'échelle du microclimat urbain et sur l'influence des TV sur l'ICU. On trouve également dans la littérature des ouvrages qui adoptent une approche holistique et qui réunissent les connaissances actuelles sur la thématique proposant ainsi une vision large des rôles physiques de la végétation. C'est le cas par exemple de l'ouvrage *La nature en ville [3],* dans lequel Marjorie Musy propose un état de l'art pluridisciplinaire et systémique de l'influence du végétal urbain sur les enjeux du développement durable. Les chapitres relatifs aux impacts respectivement sur le microclimat urbain et sur la consommation énergétique et le confort dans les bâtiments font références à de nombreuses publications, détaillent les approches expérimentales et numériques et offre donc une base de réflexion complète et moderne sur la thématique spécifique qui nous intéresse. De plus, ses analyses sont nuancées et tempèrent certaines conclusions aujourd'hui bien établies dans les consciences collectives.

La presse de tous les niveaux s'est également intéressée à la thématique des TV par une vulgarisation des conclusions des études, participant ainsi à la diffusion d'un message essentiellement positif concernant les TV auprès d'un plus large public que la simple communauté scientifique. A une autre échelle encore, ceux sont les entreprises de construction de TV qui utilisent les conclusions comme arguments marketing et qui ventent notamment les effets de synergie entre les TV et le rendement des panneaux solaires photovoltaïques. On peut toutefois s'interroger sur la valeur de ces annonces, qui généralisent entre autre les conclusions d'études scientifiques indépendamment du contexte et de la situation.

Les paragraphes suivants passent en revue et détaillent les connaissances actuelles concernant les TV. Les informations sont extraites de différentes sources et sont organisées selon trois axes qui constituent les trois hypothèses prises en compte tout au long du travail de recherche appliquée qui a été menée.

En hiver, les toitures végétalisées permettent de limiter les déperditions thermiques grâce à des performances thermiques accrues.

Il est fréquent de lire que les TV permettent d'améliorer les performances thermiques des bâtiments. En ajoutant une couche à la structure de la toiture, on apporte d'avantage de résistance thermique* (R) et on renforce l'isolation thermique de l'élément de construction. C'est la conductivité thermique* (Lambda) du substrat végétalisé et son épaisseur qui devrait notamment conditionner cette amélioration. La composition des substrats varie généralement d'une toiture à une autre – terre végétale, cailloux, briques, sables, limons, pouzzolane, etc. Dans *Sols caillouteux et production végétale [4],* Raymond Gras présente les méthodes de calcul des caractéristiques thermiques des sols caillouteux composés à la fois de terres fines plus ou moins humides et de cailloux. Les informations extraites – voir tableau 1, indiquent les caractéristiques thermiques de chacun des composants mais l'ouvrage ne fournit pas de valeurs pour des sols qui réunissent les deux. Contrairement à la chaleur spécifique, Raymond Gras explique que la conductivité thermique du matériau composite ne peut pas être calculée simplement à partir des lambdas de chaque composant et peut également fortement varier dans le temps en fonction de sa teneur en eau. Le but n'est pas ici de détailler ces méthodes mais plutôt de définir si possible un ordre de grandeur pour la conductivité thermique des substrats présents sur les TV. A l'échelle européenne par exemple, les normes *[5]* stipulent qu'une « résistance thermique additionnelle pour les toits verts tient compte d'une valeur par défaut de 2 W/(mK) en ce qui concerne la conductivité thermique de la terre ». Toutefois, au regard de la diversité des TV et des substrats végétalisés, il semble de toute évidence délicat de donner un lambda précis et surtout unique pour ce matériau et il semble plus pertinent de définir une plage de variabilité de 0.2 à 2 W/(mK).

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques de différents matériaux.

Nature	Conductivité thermique W/(m·K)	Chaleur massique J/(Kg.K)	Masse volumique Kg/m3	Capacité thermique J/K (*10^{-6})	Diffusivité thermique* m²/s (*10^{-6})	Effusivité thermique* J/(m2.K.s$^{0.5}$)$^{-1}$
TERRES FINES						
Sable sec (a)	0.57					
Limon calcaire sec (a)	0.33					
Argile (a)	0.58					
Terre sèche (b)					0.5	
Terre sableuse (c) travaillée, humidité 12.5%	0.71			1.29	0.55	
Terre sableuse (c) non travaillée h. 17.5%	1.42			1.83	0.775	
Limon sableux (d) sec	2.5			1.17	0.21	
Limon sableux (d) saturé en eau	25			2.80	0.92	
Argile (e) non saturé en eau	0.25			1.25	0.20	
Argile (e) saturé en eau à 40%	0.16			2.92	0.54	
ROCHES						
Grès (quartzite) (f)	4.40			2.84	0.154	
Schiste (h)	0.02			1.95	0.97	
Roche non poreuse (b) : granite, basalte, silex	3.50			2.17	16110	
MATERIAUX DE CONSTRUCTION						
Béton armé (I)	1.8	1080	2400		0.694	2160
Panneau plâtre (I)	0.4	792	1000		0.505	563
Brique terre cuite (J)	0.640/1.040	1008	1600-2400		0.397/0.430	1016/1586
Cuivre (J)	380	396	8930		107	36658
Laine de mouton, plumes (J)	0.06	1584	20		1.894	44
Laine de verre, panneau 20-60kg (I)	0.04	612	40		1.634	31
Polystyrène expansé, panneau 20-28kg (I)	0.038	1404	24		1.127	36
Polystyrène extrudé, panneau>25kg (I)	0.036	1404	25		1.026	36
Argile expansé, 350kg (I)	0.11	900	350		0.349	186
Terre compacte, humidité naturelle (I)	2.09	864	1700		1.422	1752
Gravier rond (I)	2.00	1051	2000		0.951	2050
Sable et gravier pour toiture (I)	0.7	792	1900		0.465	1026

(a) Fabry, 1942 (b) CSTB, 1977 (c) Van Wijk et Derksen, 1966 (d) Johnson, 1937 (e) Van Wijk et Vries, 1966
(f) De Vries, 1966 (g) Patten, 1909 (h) Handbook of Chemistery and Physics, CPC (I) SIA 381/1 (J) Courgey, 2006

Dans l'absolue, l'ajout d'une couche permet d'améliorer la performance thermique d'un élément de construction. La couche de substrat végétalisé supplémentaire, qui différencie les TV d'autres types de toiture, permettraient dans ce sens de réduire les flux thermiques des espaces intérieurs chauffées vers l'extérieur et donc la consommation énergétique pour le chauffage des bâtiments. Cependant, le lambda de cet élément est de l'ordre de 10 à 100 fois supérieur à celui d'un matériau dit isolant ; en effet, à notre époque, les matériaux utilisés dans le domaine de la construction pour l'isolation des bâtiments se caractérisent par des valeurs comprises entre 0.06 et 0.028 W/(mK) pour les plus efficaces – voir tableau 1. L'effet de la couche de substrat végétalisé sera d'autant plus négligeable que la toiture est bien isolée. Cette observation est également mise en avant par Majory Musy [3] dans son ouvrage où elle précise que « les impacts seront plus faibles dans le cas

de toitures déjà fortement isolées sous le substrat ». Connaitre l'épaisseur d'isolant à partir de laquelle l'impact du substrat végétalisé peut être considéré comme négligeable est cependant une question qui reste en suspens. Elle rend également attentif au fait que « l'impact de la végétalisation du toit sur les besoins énergétiques [...] est moins important lorsque la surface représentée par le toit par rapport à l'enveloppe du bâtiment est faible», ce que confirme une étude de Martens et al. en 2008 qui montre également que «l'effet du toit végétalisé sur l'ensemble du bâtiment est plutôt faible dans des immeubles multi-étages [...]» [3].

Les TV et les TS devraient également se différencier au niveau de la résistance superficielle extérieure (RSe). Cette caractéristique quantifie la transmission de chaleur par convection et par rayonnement entre l'air ambiant et une surface extérieure [19]. A ce sujet, la norme *SIA 180 Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments* [7] fournit les valeurs conventionnelles des résistances de la couche limite extérieure en fonction de la direction du flux thermique, de la situation et de l'exposition de l'élément – voir tableau 2. Dans l'ouvrage *Mesures in situ en énergétique du bâtiment [8]*, il est également indiqué que la température ambiante et la vitesse de l'air ainsi que l'état des surfaces, sont les facteurs qui influencent cette valeur[1].

Au regard des formules – voir tableau 2, la vitesse de l'air et la température de surface de l'élément s'avèrent être des variables prépondérantes respectivement pour la part convective et la part rayonnante. Or l'air s'écoulerait en théorie moins vite au-dessus de la végétation qui agit comme brise-vent et la température de surface des TV est en principe toujours plus faible au niveau des TV comparé au TS[2]. L'émissivité* des surfaces rentre également dans le calcul de la part rayonnante. D'après la littérature, elle est plus faible pour du gravier et que pour une surface « végétalisée » – voir tableau 3. En théorie donc, la Rse pour une TV devrait être plus élevée que ces valeurs conventionnelles et participer à améliorer la performance thermique par rapport à une TS-1 par exemple.

Il faut cependant bien comprendre que les phénomènes décrits s'établissent à travers une surface foliaire* existante et une végétation en bonne santé ce qui implique une énergie solaire suffisante et un stock d'eau disponible.

[1] [8] page 355
[2] [3] page 74 [2] page 15

Tableau 2 : Valeurs conventionnelles des résistances des couches limites et formules théoriques avec part convective et rayonnante. Source des formules : [19].

Intérieur _ Rsi	(m²·K)/W
Paroi *	0.13
Plafond *	0.13
Dalle contre extérieur *	0.17
Elément contre non-chauffé *	0.08
flux ascendant **	0.10
flux horizontal **	0.13
flux descendant **	0.17
surface intérieur ***	0.13
Extérieur _ Rse	
Cas normal *	0.04
Situation protégée *	0.10 - 0.05
Constructions serrées *	0.05 - 0.04
Constructions éloignées *	0.04 - 0.02
Bâtiment solitaire *	0.02 - 0.01
surface extérieur ** et ***	0.04
surface en contact avec la terre ***	0.00

source: SIA D 027:1989
**source: SIA 180.071:2007*
**** source: SIA 180:2014*

part convective:

$h_{e,cv} \approx 7.13 \cdot v^{0.8} \cdot [T_e / 273]$ [W/(m²·K)]

avec:

v	vitesse du vent (>1 m/s)	[m/s]
T_e	température extérieur	[K]

part radiative:

$h_{er} \approx 4 \cdot \varepsilon_n \cdot \sigma \cdot T_m^3$ [W/(m²·K)]

avec:

ε_n	émissivité de la face extérieure de la paroi	[-]
T_m	température moyenne tel que:	
	$T_m = \frac{T_n + T_{équ}}{2}$	[K]
T_n	température de surface	[K]
$T_{équ}$	$\approx T_e$ par temps couvert	[K]
$T_{équ}$	$\approx T_e$ -7 par ciel clair, paroi sans vis-à-vis immédiat	[K]

En conclusion, le fait que les toitures végétalisées permettent de limiter les déperditions thermiques en hiver grâce à des performances thermiques accrues ne semblent donc pas généralisables. L'état de la couche végétale, tel que sa teneur en eau et la qualité de sa couche foliaire, semble fortement conditionner ses caractéristiques thermiques et peuvent fortement modifier ces effets de ce point de vue. De plus, une même épaisseur d'un matériau isolant aura sans équivoque un impact nettement plus important sur les déperditions énergétiques et l'effet du substrat végétalisé sera d'autant plus négligeable que la toiture est bien isolée.

En été, les toitures végétalisées permettent de limiter les surchauffes à l'intérieure des bâtiments en évacuant la chaleur provenant du rayonnement solaire par évapotranspiration et agissent comme des climatiseurs passifs.

Sous l'effet du rayonnement solaire direct et diffus, les toitures, comme toute surface exposée, absorbent des quantités d'énergie sous forme de chaleur. L'albédo*, qui correspond à la fraction du rayonnement global d'origine solaire (rayonnement direct et diffus) qui est réfléchie par une surface horizontale dans un hémisphère, conditionne la quantité d'énergie qui sera absorbée[3]. Cette grandeur sans dimension est comprise entre 0 et 1 : un albédo nul correspond au corps noir parfait qui absorbe la totalité de l'énergie incidente alors qu'un albédo de 1 se rapporte au miroir qui réfléchit l'ensemble du rayonnement. L'albédo d'une surface

[3] [2] page 10

dépend de sa couleur, de sa géométrie et peut également varier en fonction de l'humidité de sa surface[4]. Ainsi, les albédos de certaines surfaces sont fixes alors que d'autres, à l'image de l'eau, de la neige, des nuages et des couverts végétaux, se caractérisent par un albédo variable dans le temps et en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement. Dans ce contexte, la surface d'une TV devrait voir son albédo varier en fonction des saisons et de son activité photosynthétique qui modifie sa couleur au cours de l'année. Gérard Guyot [2] explique notamment que « lorsque le taux de chlorophylle est faible, la réflectivité peut largement dépasser les valeurs utilisées pour les surfaces végétales idéalisées »[5]. Au vue de la structure foliaire complexe de ces surfaces, l'albédo devrait également varier en fonction de l'incidence du rayonnement.

Tableau 3 : Propriétés radiométriques de différentes surfaces.

Type de surface	autres caractéristiques	Albédo (a)	Emissivité (Ɛ)
Métal poli *	-	0.90 - 0.99	0.01 - 0.10
Eau *	faible angle zénithal de visée	0.03 - 0.10	0.92 - 0.97
	fort angle zénithal de visée	0.10 - 0.50	0.92 - 0.97
Neige *	ancienne	0.40 - 0.70	0.82 - 0.89
	fraîche	0.45 - 0.95	0.90 - 0.99
Glace *	de mer	0.30 - 0.40	0.92 - 0.97
	de glacier	0.20 - 0.40	-
Sable nu *	sec	0.35 - 0.45	0.084 - 0.90
	humide	0.20 - 0.30	0.91 - 0.95
Sol nu *	argileux sec	0.20 - 0.35	0.95
	argileux humide	0.10 - 0.20	0.97
	sol humide avec chaumes	0.05 - 0.07	-
Surfaces artificielles *	béton	0.17 - 0.27	0.71 - 0.88
	route goudronnée	0.05 - 0.10	0.88 - 0.95
Surfaces agricoles *	prairies	0.16 - 0.26	0.90 - 0.95
	cultures: blé, riz, etc.	0.10 - 0.25	0.90 - 0.99
	vergers	0.15 - 0.20	0.90 - 0.95
Forêts *	à feuilles caduques	0.10 - 0.20	0.97 - 0.98
	conifères	0.05 - 0.15	0.97 - 0.99
Gravier **		0.72	0.28
Sable **		0.24	0.76
Brique rouge **		0.20 - 0.30	
Goudron et gravier **		0.08 - 0.18	
Tôle ondulée **		0.10 - 0.16	
Herbe sèche **		0.3	
Sable sec **		0.20 - 0.30	
Gazon artificiel **		0.05 - 0.10	
Pigment blanc **		0.85	0.96
Pigment gris **		0.03	0.87
Pigment vert **		0.73	0.95

* source: G. Guyot_climatologie de l'environnement [2]

** Bretz et al, 1992

Il n'existe pas à notre connaissance d'étude précise concernant l'évolution en fonction du temps et des saisons de l'albédo d'une surface végétalisée que l'on peut trouver sur une TV. La littérature fournie cependant des valeurs générales pour des couverts végétaux – voir tableau 3. Les valeurs pertinentes à retenir pour ces surfaces vont alors de 0.10 à 0.26. Dans la catégorie des TS, on peut extraire de la littérature des valeurs de 0.08 pour le « goudron et gravier » – TS-2 - alors que le gravier - TS-1 -pourrait atteindre une valeur de 0.72 –

[4] [2] page 15

[5] [2] page 10

voir tableau 3. En résumé, lorsque l'on compare les valeurs, il semble que les TV se caractériseraient plutôt par des albédos relativement faibles et absorberait dans ce contexte des quantités d'énergie relativement importante alors que d'autres toitures aurait la capacité de réfléchir plus de rayonnement et d'absorber moins de chaleur à l'image des TS-1.

Cependant, les phénomènes d'évapotranspiration* (ET) et de photosynthèse* (PS) caractéristiques de la végétation ont la capacité de dissiper la chaleur absorbée provenant du rayonnement solaire[6]. Sur les TV, ces processus permettraient de limiter l'accroissement de la température de surface, notamment au niveau de la membrane d'étanchéité au-dessus de l'isolation. Ce résultat est mis en exergue dans de nombreuses publications[7]. Dans ce sens, Marjorie Musy [3] site l'étude réalisée au Japon en 1991 où Onmura et al. (2001) parlent d'une réduction de température de surface au niveau de la membrane d'étanchéité de 30°C grâce à l'application de module de toitures végétalisées et Teemusk et Mander confirme cette tendance avec leur étude réalisée entre juin 2004 et avril 2005 en Estonie. En effet, le changement de phase de l'eau consomme une certaine quantité d'énergie – chaleur latente d'évaporation de l'eau*, chaleur qui n'est pas utilisée pour réchauffer la matière.

Par conséquence donc, lorsque la température extérieure ambiante est importante en été, les processus d'ET et de PS, qui limite l'accroissement de la température de surface extérieure des TV par rapport aux TS, permettrait de réduire le flux de chaleur entrant dans le bâtiment, les surchauffes intérieures et donc les besoins en climatisation. Ce phénomène a été apparemment mis en avant dans plusieurs études expérimentales, notamment aux EU[8] et au Canada[9]. Les graphiques publiés montrent des amplitudes de flux thermiques mesurés plus faibles à travers des toitures équipées d'un système de végétalisation extensive comparé à la même toiture non végétalisé ou seulement recouverte d'une couche de gravier.

Toutefois, on peut s'interroger sur la robustesse des conclusions que nous en tirons. En effet, le capteur de densité de flux thermique* est dans les deux cas positionné à l'extérieur au-dessus de l'isolation de la toiture et dans le cas de la TV en dessous du substrat végétalisé[10]. Dans ce contexte, ceux sont les flux thermiques qui entrent ou qui sortent au niveau de ces couches que nous examinons en premier lieu. En effet, il est important ici de considérer le phénomène de déphasage thermique* qui consiste à obtenir un décalage temporel entre le pic de chaleur extérieur et intérieure en période estivale. Au vue notamment des phénomènes de stockage et de déstockage de chaleur journalier qui s'opèrent généralement dans les éléments de construction selon leurs caractéristiques, nous n'avons ici que peu d'informations sur les charges qui affectent réellement les espaces intérieures.

De plus, l'analyse journalière des profils de températures de surface, notamment dans le contexte de ces études, montre que la réduction de la température au cours de la journée est suivie par une température plus haute durant la nuit[11]. Les phénomènes de déstockage de chaleur au cours de la nuit lorsque la température extérieure est plus faible que la température de l'élément devraient donc être plus limitées au niveau d'une TV et donc réduire le « rafraichissement » nocturne potentiel dans ce sens.

Dans tous les cas, les processus d'ET nécessitent de l'énergie à convertir et surtout un stock d'eau à évaporer. Il est donc important de noter qu'en l'absence d'eau et dans un contexte de sécheresse, la capacité de la TV à évacuer la chaleur par ET est faible. De plus, le phénomène de transpiration des plantes dépend également de

[6] [2] page 33 [3] page 37
[7] [3] page 74
[8] [8] Saadatian et al. (2008) A review of energyaspects of green roofs.
[9] [9] Liu, K ; Minor, J. (2010) Performance evaluation of an Extensive green roof, city of toronto.
[10] [8] page 159 [9] page 3
[11] [3] page 74

l'espèce, «les plus résistantes ayant la capacité de retenir l'eau qu'elles contiennent» comme le précise Marjory Musy dans son ouvrage[12].

Comme cela a déjà été souligné dans les paragraphes précédents, il faut également noter que l'intensité des effets théoriques induits par les TV sur les espaces intérieures est relative au rapport entre la surface de la toiture et le reste de l'enveloppe ainsi qu'au niveau d'isolation de base de l'élément.

En conclusion, la mise en œuvre de TV pour limiter les surchauffes estivales à l'intérieur des bâtiments ne semble pas non plus être une affirmation généralisable. La présence d'un substrat végétalisé et les effets sur les flux thermiques dans cette couche ou sur la température de la membrane d'étanchéité par exemple sont confirmés dans plusieurs études. Cependant, l'impact sur les espaces intérieurs et le rôle de « climatiseur passif » que joue la TV ne semble pas avoir encore été clairement mis en exergue en conditions réelles.

En été, les TV permettent de rafraichir le microclimat environnant et limite la formation des îlots de chaleur urbain et leurs impacts sur le confort en ville.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) correspond à une augmentation des températures en milieu urbain par rapport à sa périphérie. Il représente un problème non négligeable car il occasionne de l'inconfort thermique pour les habitants ainsi que des problèmes de santé publique. De nombreuses recherches ont été menées afin de comprendre le processus de formation des ICU et de proposer des solutions dans le but de favoriser l'acclimatation des habitants des villes et de réduire l'augmentation des températures. L'environnement construit est considéré comme un des vecteurs d'influence important notamment au regard des matériaux minéraux à forte inertie thermique qui piège la chaleur et la restitue de manière défavorable sur des cycles journaliers. De manière générale, les surfaces à faible albédo et à faible perméabilité sont également mises en cause.

Parmi les techniques aujourd'hui connues pour mitiger le phénomène d'ICU, les toitures réfléchissantes de couleur clair et caractérisées par un albédo élevé sont aujourd'hui dans la boite à outils des planificateurs et des concepteurs[13] [14]. La capacité de ces toitures à renvoyer une grande quantité d'énergie reçue directement vers le ciel grâce à leur albédo est un moyen de limiter le stockage de la chaleur.

La végétalisation des toitures est également considérer comme un moyen pour limiter le phénomène d'ICU. Toutefois, au vue de l'albédo, il faut bien comprendre que les TV ne sont pas dans la catégorie des toitures dites réfléchissantes tel que présenté précédemment. Une autre stratégie est à mettre en avant dans ce cas. Comme expliqué dans les paragraphes précédents, les TV ont la capacité de dissiper la chaleur provenant du rayonnement solaire par ET et PS. Ces processus peuvent théoriquement influencer la limitation des surchauffes à l'intérieur des bâtiments - effets directs - ceci étant également très dépendant du mode de construction et de l'inertie thermique du support. Ils peuvent parfois aussi avoir des effets indirects comme la limitation de la formation des ICU. En effet, une partie de la chaleur absorbée par les TV va pouvoir être dissipé sans réchauffer la matière et l'atmosphère en induisant un flux de chaleur sensible plus faible[15].

Dans son ouvrage, Marjory Musy précise cependant que cet impact indirect reste faible vis-à-vis de la modification du climat urbain et de l'amélioration du confort des habitants en ville[16]. De plus et encore une fois, ceci implique qu'il existe un stock d'eau suffisant dans le substrat pour que les processus d'ET et de PS ait lieu. Dans le cas contraire, il semble que les toitures dites réfléchissantes – caractérisé par un albédo élevé, soit une solution plus robuste et rationnelle pour limiter l'augmentation de la température de l'air extérieur en renvoyant une quantité plus importante de rayonnement solaire directement vers la voûte céleste.

---

[12] [3] page 36

[13] [11] Köhler et al (2003) Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands. Germany.

[14] [12] CREM (2008) Matériaux réfléchissants et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains. Canada.

[15] [3] page 56

[16] [3] page 106

Il existe d'autres concepts qui encouragent aujourd'hui la végétalisation en ville dans une perspective de limiter l'ICU et d'améliorer le confort. Certains types de végétation apportent de l'ombre et permettent à l'instar d'un parasol de protéger les surfaces et les personnes d'un rayonnement solaire fort et direct. On parle alors de masque solaire et ce ne sont plus des TV. Dans ce sens, on peut toutefois distinguer les effets entre une toiture végétalisée intensive et extensive. La première pourra accueillir des arbres et arbustes qui ont une structure racinaire plus profonde et éventuellement un effet de masque solaire alors que l'autre se compose uniquement d'une surface foliaire de faible hauteur.

Synthèse

Les effets attendus des TV ont été présentés. Des nuances ont également été mises en avant et elles encouragent à poursuivre les études sur cette thématique. Chaque TV est différente en fonction du substrat et de la végétation qu'elle supporte mais également de l'épaisseur de l'isolation et des caractéristiques du support qui la compose. Il semble donc pertinent de chacune les étudier comme des objets spécifiques dans des contextes particuliers.

Cette revue de littérature et les nuances mises en exergue sont importantes dans la mesure où notre souhait est d'évaluer correctement l'impact des TV par rapport aux TS sans exagérer hâtivement ces effets positifs du point de vue thermique et énergétique, notamment en se référant concrètement à l'intérieur du bâtiment étudié. L'approche de la mesure et surtout la définition des limites des systèmes considérés s'avèrent primordiales à toute interprétation des résultats d'études expérimentales.

Les recherches sur ce thème sont nombreuses et les conclusions sont globalement bienveillantes concernant les TV. A l'échelle des autorités publiques, notamment des villes, l'intéressement pour les TV est par conséquent assez net et les programmes d'incitation prennent place au sein des politiques publiques urbaines afin de favoriser et inciter à la mise en œuvre des TV. Dans *Green roof policies : tools for encouraging sustainable design* en 2004[17], Goya Ngan montre très clairement l'engouement des collectivités territoriales sur cette thématique en analysant les politiques mises en place à une échelle mondiale. A notre échelle géographique, la ville de Lausanne par exemple, à travers le Service des parcs et domaines de la ville, a notamment publié un guide de recommandation sur les TV[18] en 2014 afin d'assurer leurs promotions auprès des professionnels de la construction et des propriétaires et inciter leurs implémentations et leurs mise en œuvre dans les projets. Le document annonce également la possibilité d'obtenir un « coup de pouce financier » dans le cas de la végétalisation extensive de toitures plates relevant du domaine privé, ce qui représente un réel parti pris.

A Genève, les planificateurs sont encore dans une phase de recherche afin d'orienter correctement leur gouvernance à ce sujet. Il s'agit également avec cette étude à une échelle locale de fournir des recommandations et des aides à la décision.

[17] [13]Ngan, Goya (2004) Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design.

[18] [14] Service des parcs et domaines de la ville de Lausanne (2014). Toitures végétalisées - Guide de recommandations Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit.

3 PARTIE 2 : TRAVAIL DE RECHERCHE APPLIQUÉE À GENÈVE

Dans le cadre de ce projet et en tant que partie prenante, l'équipe du Laboratoire Energie Environnement et Architecture – LEEA hepia, a pour mission d'investiguer l'impact des toitures végétalisées sur le micro climat urbain et sur la qualité thermique des bâtiments. L'étude est guidée par les trois hypothèses de travail définies dans la revue de littérature ci-dessus et l'analyse prête une attention particulière aux nuances identifiées dans les paragraphes précédents.

A travers plusieurs expériences, il s'agira de :

- Mesurer l'albédo d'un couvert végétal de TV afin de catégoriser les TV pour cette composante thermique ;
- Mesurer les flux thermiques au niveau de TV et de TS ainsi que les températures qui régissent ces flux, afin d'évaluer l'impact de la couche végétalisée sur l'enveloppe et la qualité thermique du bâtiment ;
- Mesurer les températures extérieures en différents lieux afin d'évaluer l'impact de la TV sur l'ambiance climatique environnante ;

3.1 TOITURES À L'ÉTUDE

Pour ce volet de l'étude, plusieurs critères étaient recherchés afin de sélectionner les TV à étudier. La situation de la TV en zone urbaine dans des milieux relativement « minéral » est une première caractéristique importante afin de d'exclure le plus possible les effets potentiels d'éventuels « espaces verts » à proximité.

L'étude des quatre types de TV, à savoir des TV extensives et intensives de moins et de plus de dix ans - considérés comme la première clef de classement - a également été intégré dans le travail de sélection, au même titre que la nature des espaces situés directement en dessous : en effet la présence de locaux chauffés est un élément important pour la pertinence des mesures.

Enfin l'accessibilité du site avec le matériel de mesures et l'accord des propriétaires des bâtiments où sont implantées les TV pour déployer les installations et réaliser les expériences décrites dans les paragraphes suivants, ont été des critères également déterminants.

Ainsi, sur les dizaines de TV disponibles, quatre ont été retenues pour ce volet de l'étude. Elles sont présentées et décrites dans le tableau 4 et aux figures 2 et 3.

Figure 2 : Repérage géographique des 4 toitures végétalisées à l'étude – source du plan : sitg.ch

Tableau 4 : Description des quatre TV à l'étude.

La valeur « U calculé » est obtenue par calcul à partir de la composition théorique – voir figure 3 – et des valeurs sur les caractéristiques thermiques des matériaux du tableau 2 – pour le substrat végétalisé, le calcul a été effectué avec une valeur de conductivité thermique de 0.2 et de 2W/(mK) – voir tableau 1.

Dénomination de la TV	HEAD TV	HEAD TG	EUROPE	HUGUP	PETIT-SENN
Bâtiment	Haute école d'art et de design, HES-SO Genève	Haute école d'art et de design, HES-SO Genève	Ecole de l'Europe	Hopitaux Universitaire de Genève - Urgence pédiatrique	Ecole du Petit-Senn Agrandissement
Adresse	Rue de la Prairie, 4 1202 Genève	Rue de la Prairie, 4 1202 Genève	Avenue d'Aire, 42 1203 Genève	Avenue de la Roseraie, 47 12 Carouge	Avenue du Petit-Senn, 13 1225 Chêne-Bourg
Numéro de référence	14	14	15-16-17	62	44
Type	Extensive de moins de 10 ans	Extensive de moins de 10 ans	Extensive de plus de 10 ans	Intensive de moins de 10 ans	Intensive de plus de 10 ans
Année de réalisation	2010	2010	1996	2003	1992
Locaux situés en dessous	Salles de classe chauffées	Salles de classe chauffées	Salles de classe chauffées	Salles d'attente et bloc opératoire	Salles de classe chauffées
Nombre d'étages	4 niveaux	4 niveaux	4 niveaux	2 niveaux	1 niveau
Surface (m2)	630	20	550	700	450
Standard de construction	HPE	HPE	-	-	-
U calculé	0.130 - 0.138	0.138	Absence de plans	0.242 - 0.309	0.270 - 0.330
U limite ou considérée dans le projet	0.16 Projet	0.16 Projet	0.40 SIA 380/1 1988 [17]	0.30 SIA 380/1 2001 [18]	0.40 SIA 380/1 1988 [17]

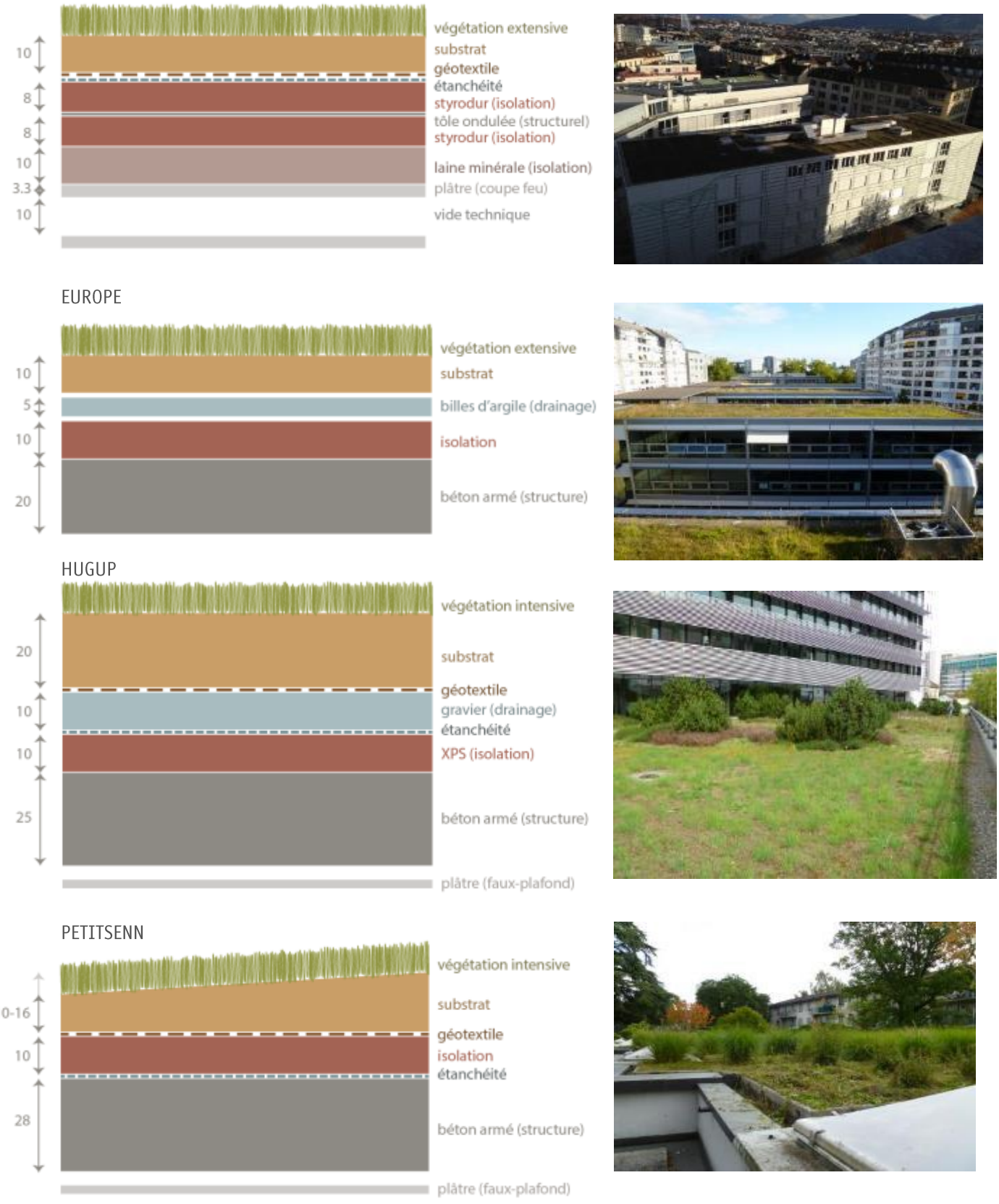


Figure 3 : Illustrations et coupes schématiques des quatre TV sélectionnées pour le volet Thermique de l'étude; de haut en bas et de gauche à droite : HEAD, EUROPE, HUGUP et PETIT-SENN. Les cotes sont en cm.

3.2 GÉNÉRALITÉS SUR LES EXPÉRIENCES ET LA PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'analyse du comportement thermique d'un bâtiment est complexe. La nature et les interactions entre les différents éléments qui le composent sont nombreuses. Les approches expérimentales consistent à étudier les éléments indépendamment des autres afin de comprendre leur comportement ou à étudier les éléments avec le reste de la structure. Les expériences peuvent être menées dans l'environnement maitrisé d'un laboratoire à l'échelle 1 :1 ou sur des maquettes à échelle réduite. L'étude peut également être conduite in-situ dans leur contexte réel. Dans ce dernier cas, les objets sont alors exposés aux conditions météorologiques et climatiques réels et également aux effets des installations techniques et des usagers.

Un certain nombre d'expériences décrites dans les paragraphes suivants ont été réalisées sur l'ensemble des TV à l'étude. Elles permettent de comparer les résultats en fonction du type de toiture – extensive et intensive de plus ou moins 10 ans.

D'autres mesures n'ont été réalisées que sur la HEAD. Lors de la mise en œuvre de la végétalisation sur la toiture au-dessus de l'étanchéité et du géotextile, une surface d'environ 20 m2 n'a pas était recouverte par du substrat mais simplement avec du gravier rond – voir Figure 4. Les deux zones ont alors été instrumentées : la partie recouverte de gravier rond - HEAD TG assimilable à une TS-1 - sert de toiture de référence pour mettre en perspective les résultats obtenus au niveau de la partie végétalisée – HEAD TV.

Cette situation est relativement idéale car l'espace situé directement en dessous de la toiture correspond presque à la même pièce et les conditions en termes de température et d'humidité de part et d'autre de ces éléments devraient être relativement similaires. De plus, ce terrain d'expérience a l'avantage d'être facilement accessible.

Figure 4 : Toiture de la HEAD – photographie montrant les zones TG et TV

3.3 EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

3.3.1 ALBÉDOMÈTRIE

Expérience et protocole

L'albédo d'une surface peut être mesuré en utilisant un albedomètre. Cet instrument – figure 5, se compose de deux pyranomètres* positionnés à deux mètres de haut et qui mesurent respectivement le rayonnement solaire incident* (SWin), et réfléchi* (SWout). L'appareil de type Hukseflux NR01/RA01* est connecté à un *datalogger* CR1000* qui enregistre une valeur par minute. Elle correspondant à la moyenne des valeurs mesurées toutes les 10 secondes pendant cette minute. Cette expérience a été menée entre le 24 avril et le 16 octobre 2015 sur la TV HEAD. La position de l'appareillage sur la toiture est indiquée à la figure 5.

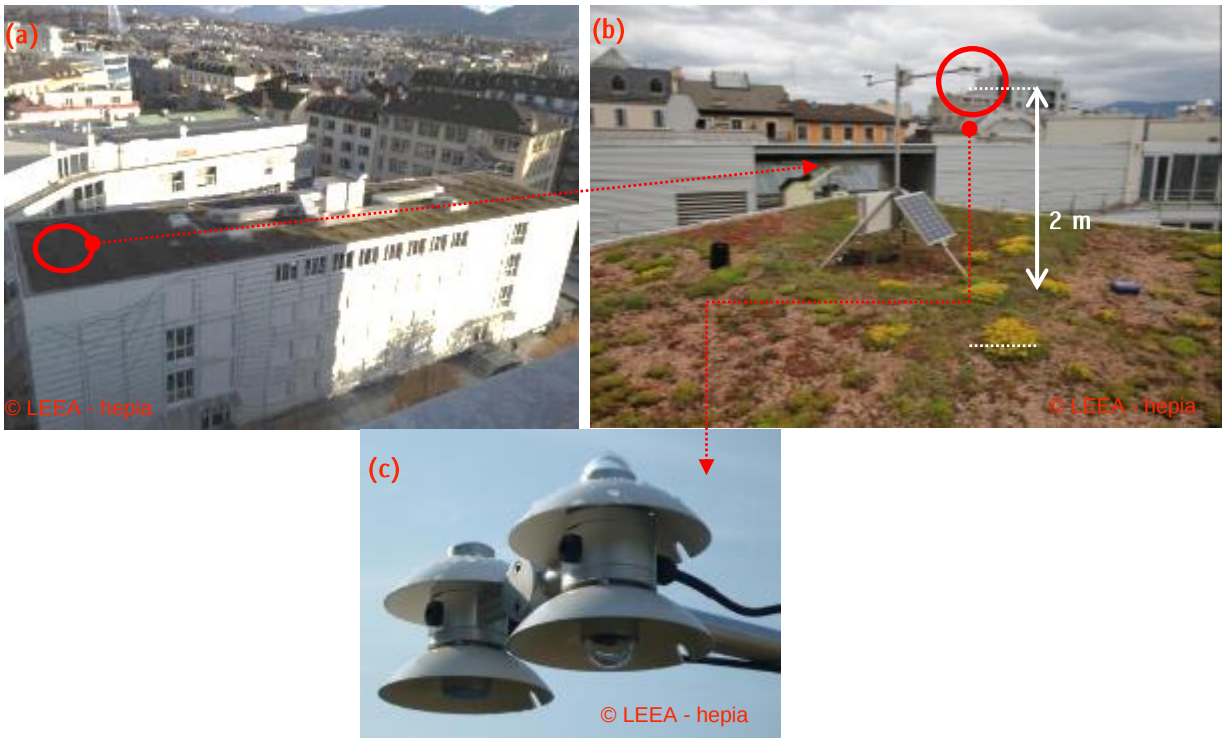


Figure 5 : Albédomètrie.
(de haut en bas et de gauche à droite) (a) Position de l'albedomètre sur la toiture de la HEAD (b) Appareil de mesure complet développé pour le calcul de l'Etp* (c) Zoom sur le radiomètre net qui mesure les 4 rayonnements longues et courtes ondes, entrants et sortants (SWin, SWout, LWin, LWout).

Ces mesures sont également utilisées pour le calcul de l'Evapotranspiration potentielle* (ETp) pour lequel le LEEA a développé un appareil de mesure complet – voir Figure 5. Il consiste en une station climatique fixe qui mesure et enregistre un nombre important de grandeurs physiques. En collaboration avec les équipes « Hydrologie » et « Substrat », elles sont ensuite utilisées pour le calcul de l'ETp* d'une surface végétalisée standard à travers la formule de Penman-Monteih* de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (PM-FAO). Cette formule a l'avantage d'être très complète et de prendre en compte une quantité importante de grandeurs physiques pour évaluer l'ETp. Pour plus de détails concernant cette mesure et les résultats, consultez le chapitre X de la partie X de ce rapport.

Résultat : albédo de la surface végétalisée

Le graphique à la figure 6 représente le quotient SWout/SWin en fonction du temps, c'est-à-dire l'albédo calculé instantanément à chaque pas de temps. Cette représentation permet d'apprécier l'évolution de l'albédo dans le temps mais de nombreuses valeurs sont à écarter, par exemple celles de nuit qui n'ont pas de sens en l'absence de rayonnement solaire. Durant la période de mesure la TV HEAD s'est retrouvée dans différents états en fonction des saisons et des interventions sur la toiture – une entreprise de paysagisme est intervenue fin juillet 2015 pour effectuer un entretien. Ces événements sont repérés temporellement sur le graphique et complétés par des photographies de la TV HEAD.

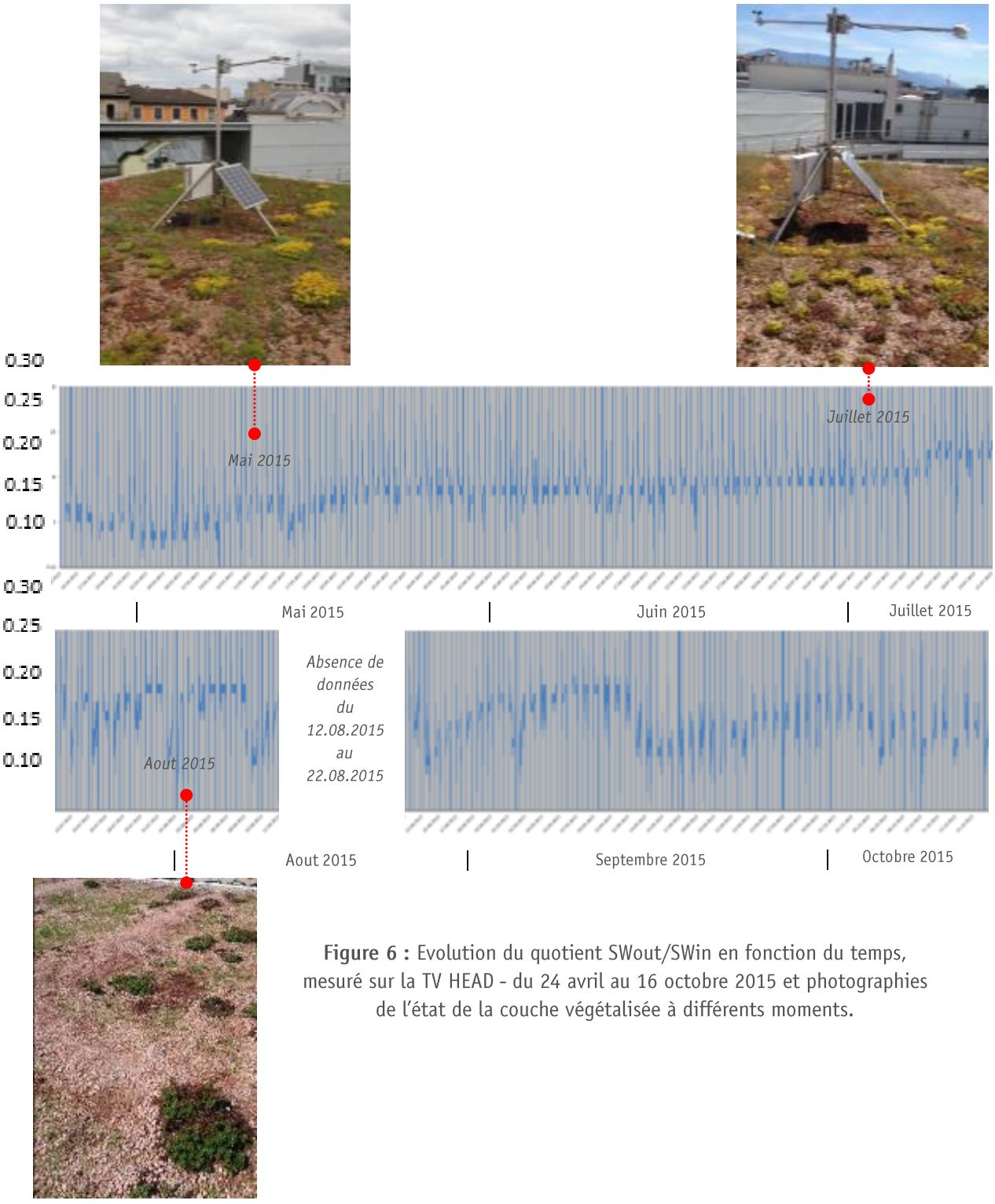


Figure 6 : Evolution du quotient SWout/SWin en fonction du temps, mesuré sur la TV HEAD - du 24 avril au 16 octobre 2015 et photographies de l'état de la couche végétalisée à différents moments.

Cette mise en forme des données permet d'apprécier la variation de l'albédo instantané durant la période de mesure. Les valeurs oscillent globalement entre 0.12 à 0.24 et reflètent de toute évidence les changements d'état de la TV HEAD au cours du temps.

Afin d'obtenir une valeur représentative et caractéristique de l'albédo moyen de cette surface, un calcul statistique a été réalisé sur une série de valeurs d'albédo journalier répondant à un certain nombre de conditions, telles qu'un rayonnement solaire incident suffisamment élevé – supérieur à 200 W/m2, et la prise en compte des valeurs de rayonnements seulement entre 12h et 15h. La figure 7 présente le boxplot obtenu.

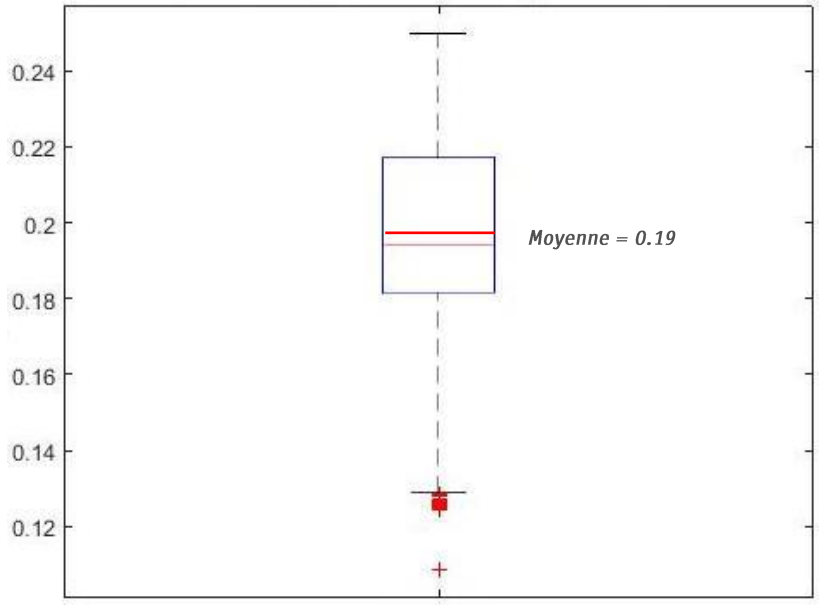


Figure 7 : Boxplot représentant la répartition statistique des valeurs d'albédo mesurées sur la TV HEAD entre le 24 avril et 16 octobre 2015.

Sur les 25'199 valeurs d'albédo éligibles, la valeur moyenne à retenir est donc **0.19** pour la TV HEAD avec une plage de variabilité dominante entre 0.18 et 0.22 et des valeurs extrêmes de 0.13 et 0.25.

Dans le cadre d'un autre projet effectuant la même expérience – projet TherSOL[19], une valeur de **0.33** a été mesuré au-dessus d'un couvert végétal type gazon de nature et composition différente. Cette seconde expérience pourrait traduire la variabilité de l'albédo d'une surface végétalisée et le fait qu'il semble difficile de définir une valeur précise et unique pour ce type de surface.

Les valeurs obtenues ici sont cependant comparables aux données de la littérature et les mesures confirment la catégorie relativement « absorbante » de ce type de surface par rapport à d'autre type de toiture pouvant être bien plus réfléchissante.

Il parait important de renouveler cette mesure sur d'autres TV extensives et intensives et également des TS afin d'évaluer les albédos de ces éléments dans l'objectif de valider clairement la catégorie d'albédo grâce à un échantillon plus étendu mais également pour identifier les différences qui peuvent exister d'une TV à une autre. Le couvert végétal de la TV étudié dans le cadre de cette expérience est relativement particulier. En effet, la toiture de la HEAD a fait l'objet d'un entretien à la fin juillet qui a mis à l'air libre une bonne partie du substrat composé à 80 % de brique concassée. D'un point de vue général, ce serait des événements à prendre en considération et il serait intéressant de pouvoir analyser plus en profondeur l'albédo en fonction de l'évolution de la végétation au fil des saisons.

[19] TherSOL est également est également un projet du programme Nature et ville.

3.3.2 MESURE DES FLUX THERMIQUES ET DES TEMPÉRATURES AFFÉRENTES

Expérience et protocole

FLUXMÉTRIE

Cette expérience consiste en l'installation d'un capteur de mesure de la densité du flux thermique, couramment appelé fluxmètre - Hukseflux HFP01*, et de capteurs de mesure des températures ambiantes et de surfaces à l'intérieur - thermocouples type K, branchés sur un Datalogger CR800* qui enregistre une valeur par minute. Cette valeur correspond à la moyenne des valeurs mesurées toutes les secondes pendant cette minute. La figure 8 présente le schéma de principe de l'installation ainsi que plusieurs photographies illustrant les installations in situ.

Le fluxmètre est positionné sur l'élément à l'intérieur du bâtiment. Ce choix est principalement motivé par le fait que nous souhaitons étudier les charges de chaleur et les phénomènes physiques qui s'opèrent et affectent concrètement les espaces intérieures ; comme expliqué précédemment dans la revue de littérature, un fluxmètre positionné à l'extérieur nous semble moins pertinent pour observer les phénomènes physiques qui nous intéressent ici. De plus, le guide SIA [8] et les normes ISO 9869:1994 [15] et 9869-1:2014 [16] Isolation thermique-Eléments de construction-Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique fournit le cadre expérimentale pour le « mesurage des propriétés de transfert thermique de composants de bâtiment plans » et précise que le fluxmètre doit être positionné à l'intérieur à l'abri du rayonnement solaire direct et où la température est normalement plus stable. Une fine couche de pate thermique a été utilisée pour assurer le contact thermique entre le capteur et l'élément de construction – voir figure 8.

Les thermocouples utilisés pour la mesure des températures de surfaces intérieures sont positionnées sous le fluxmètre, comme le précise les normes ISO 9869 [15] [16] et dans l'optique d'éviter certaines corrections d'erreurs d'opération20. Pour la mesure des températures ambiantes intérieures, le thermocouple est positionné à environ 30 cm de l'élément à mesurer à l'aide d'une tige de support – voir figure 8.

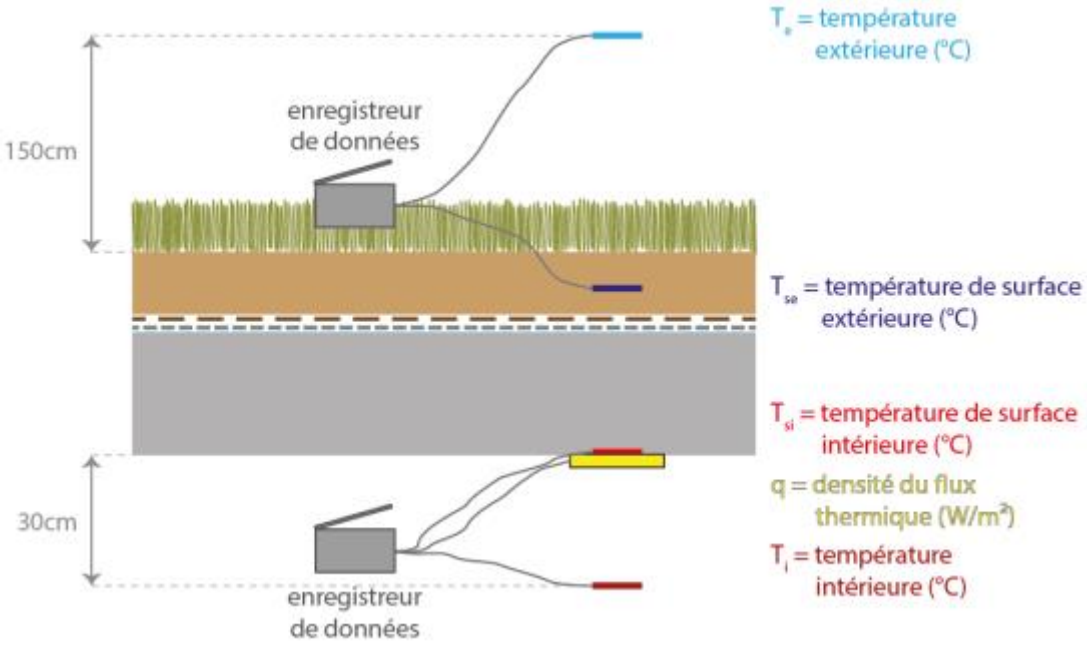
L'expérience a été conduite entre décembre 2014 et janvier 2016 afin de compiler des mesures sur au moins une année entière au niveau de chacun des cinq points de mesure répartis sur les quatre toitures à l'étude.

HIVER : MESURE DES TEMPÉRATURES DES COUCHES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES

Pendant la période hivernale, les températures ambiantes et des couches superficielles extérieures ont été mesurées dans l'optique de mesurer les valeurs du coefficient de transmission thermique U comme décrit dans le guide SIA [8] et les normes ISO 9869 [15] [16]. Pour des bâtiments chauffés, on réalise généralement cette expérience en hiver, quand la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est la plus importante impliquant ainsi des flux thermiques élevés.

Dans ce sens, deux stations de mesure ont été préparées et installées sur les toitures – voir figure 8. Elles sont chacune équipées de sondes Rotronic PT-100* et Hygroclip2 HC2-S(3)* positionnées respectivement dans le substrat à 5cm de la surface et à 150cm de haut et branchées sur un boitier Rotronic Log-HC2* qui enregistre les valeurs de température instantanée toutes les 5 secondes. Entre décembre 2014 et février 2015, elles ont effectuées des rotations d'au minimum deux semaines sur chacune des TV à l'étude.

[20] [15] page 9



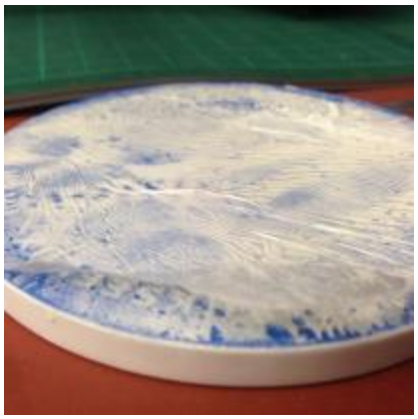


Figure 8 : Fluxmétrie et mesurage des températures des couches superficielles extérieures en hiver - Schéma de principe et illustrations des points de mesure.

ETÉ : MESURE DES TEMPÉRATURES DES COUCHES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES

Afin d'étudier les phénomènes au niveau de la surface de la toiture en période estivale et d'alimenter la réflexion sur les régimes de flux thermique, plusieurs thermocouples ont été installés sur la toiture de la HEAD – voir figure 9. Les quatre mesures sont les températures de surfaces de la membrane géotextile au niveau de la TG – TStg, et au niveau de la TV sous le substrat – Tssub, la température du substrat mesuré au milieu de l'épaisseur – Tsub, et la température à la surface extérieure du substrat - TStv. Durant la période allant du 21 aout au 16 octobre 2015, les données ont été enregistrées à intervalle de 30 minutes.

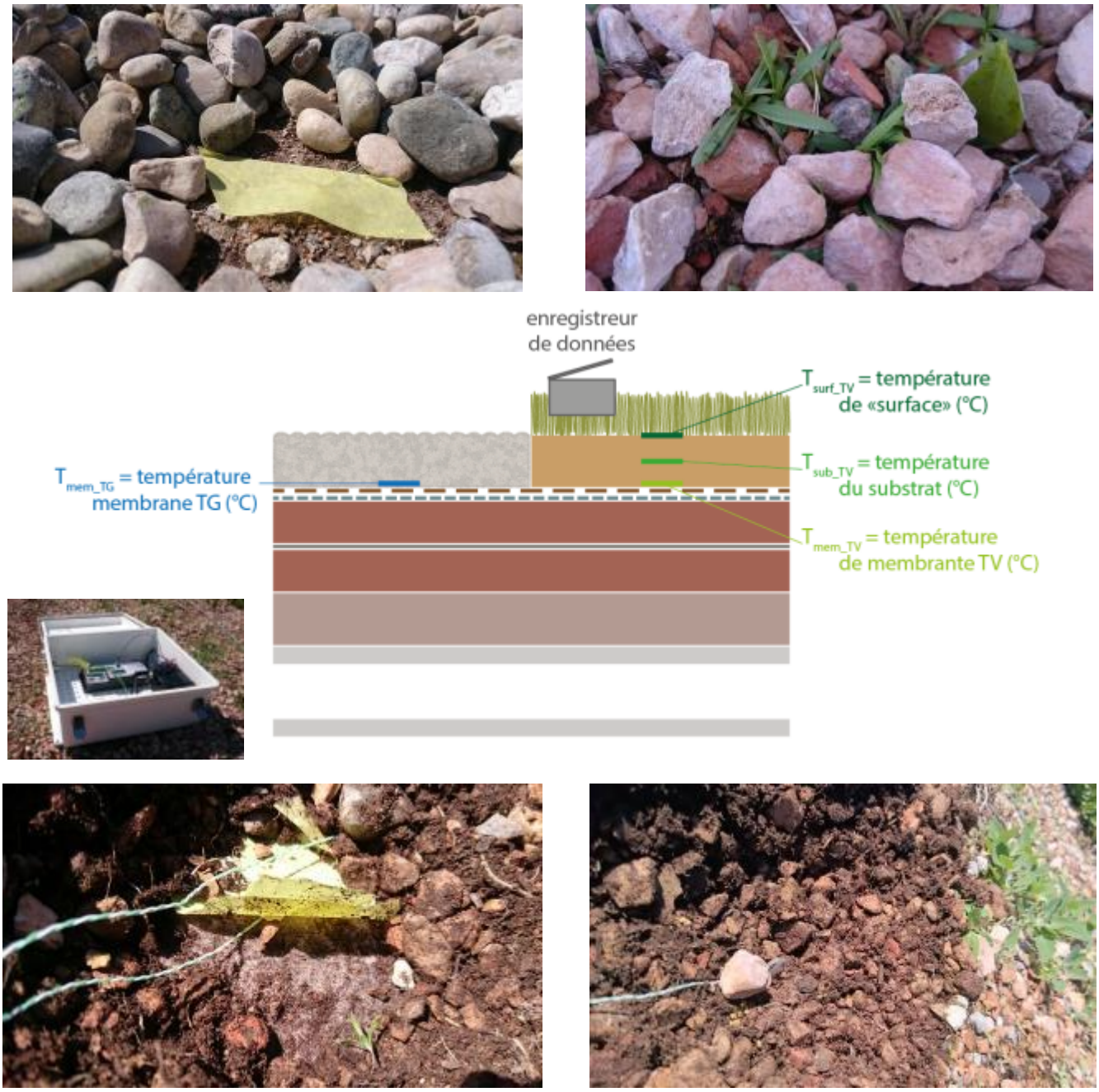


Figure 9: Station de mesure installée sur la toiture de la HEAD pour les températures de surface et du substrat.

Résultats

HIVER

Pour la mesure de la valeur U* et dans le contexte d'ambiances hygrothermiques maitrisées de part et d'autre de l'élément mesuré en régime stationnaire – méthode des boites chaudes et froides par exemple, il est relativement aisé d'obtenir une mesure fiable et de qualité sur des périodes courtes. Dans notre cas, la méthode consiste à admettre que les valeurs moyennes de densité de flux thermique et des températures prises sur une durée suffisamment grande donnent une bonne estimation du régime stationnaire [8] [15] [16].

L'application des techniques d'évaluation in situ des performances thermiques des éléments de construction est stricte et nous permet d'obtenir des valeurs fiables seulement dans certaines conditions. Ainsi, la quantité de chaleur contenue dans l'élément doit être la même à la fin et au début de la mesure et donc que les températures et la distribution de l'humidité de part et d'autre de l'élément soit similaire à la fin et au début de l'expérience. La stabilité des températures intérieures est également une caractéristique importante pour l'obtention d'une valeur fiable. Le fluxmètre ne doit pas être exposé à des flux thermique perturbateurs - éclairage, équipement et occupation - et au rayonnement solaire direct tout comme la surface extérieure de l'élément mesurée. Le respect de ces conditions apportent de la qualité aux résultats obtenus in situ et sont indépendants des tests qu'il faut également réalisés sur les valeurs enregistrées pour la validation des mesures – voir paragraphes suivants.

Deux méthodes de calcul et d'analyse ont été considérées dans le cadre de cette expérience. La méthode de la moyenne consiste à calculer le coefficient de transmission thermique U (W/(m2.K) à partir de la formule ci-dessous - avec q, la densité du flux thermique (W/m2) et Ti et Te, les températures intérieures et extérieures (°C). L'indice j dénombre les mesures prises à chaque enregistrement.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q}{\sum_{j=1}^{n} (Ti - Te)} \ [W/(m2.K)]$$

Si l'estimateur est calculé après chaque enregistrement – U instantané, on observe une convergence vers une valeur asymptotique – U convergent, proche de la valeur réelle si les conditions de mesurage in situ sont réunies. Pour des éléments lourds, dépassant 20 kJ.m2.K – ce qui est le cas de nos toitures, la durée d'enregistrement minimale est de trois jours sur un nombre entier de jours[21]. Cette approche représente la première méthode. La documentation SIA [8] présente une méthode permettant de s'assurer de la fiabilité du résultat basée sur le seul critère intrinsèque, c'est-à-dire celui provenant de la mesure elle-même[22]. Cette approche – méthode 2, a également a été considéré pour valider les valeurs mesurées sur le terrain.

Les normes [15] [16] documentent une approche qui également sur cette formule et sur une durée minimale de test de 72 heures et une validation de la valeur calculée avec plusieurs conditions[23]. Cette approche représente la seconde méthode utilisée dans ce projet – méthode 3.

Pour la sélection des échantillons d'analyse, une attention particulière a donc était portée sur la stabilité des températures de part et d'autre de l'élément, sur le rayonnement solaire et sur les installations techniques des bâtiments étudiés. Les locaux situés en dessous de la toiture de la HEAD, sont des salles de classe utilisées par les étudiants de l'école ; PETITSENN et EUROPE sont quant à elles des écoles primaires. Les mesures effectuées durant les périodes de vacances scolaires de fin d'année 2014-2015 – du samedi 20 décembre 2014 au lundi 4 janvier 2015 , et en février 2015 - du samedi 7 au lundi 16 février 2015, représentent en principe des séries de données intéressantes dans le sens où les espaces intérieures chauffés sont potentiellement moins utilisées pour HEAD et fermées pour PETITSENN et EUROPE.

---

[21] [8] page 358
[22] [8] page 360
[23] [15] page 7

Pour 3 des 5 points de mesure – HEAD-TV, HEAD-TG et EUROPE - cette stratégie a parfaitement fonctionné et des périodes d'au moins 6 jours ont pu être retenues là où la norme recommande un minimum de 3 – voir figure 10 (A) et (B). Dans le cas de HEAD et EUROPE, les graphiques permettent d'apprécier la stabilité du profil de température intérieure et les conditions thermiques similaires à la fin et au début de l'expérience de part et d'autre de l'élément.

HEAD-TV et TG

Dans le cas de HEAD et EUROPE, les graphiques permettent d'apprécier la stabilité du profil de température intérieure et les conditions thermiques similaires à la fin et au début de l'expérience de part et d'autre de l'élément.

Pour HEAD-TV et HEAD-TG, les valeurs U sont respectivement de 0.132 et de 0.139 W/m2K – voir figure 11 et 12. Leurs fiabilités sont confirmées par la méthode 2 présenté dans les paragraphes précédents. La méthode 3 n'a pas pu être appliquée en l'absence de mesure des températures de surface pour cet échantillon de données. Les résultats sont également cohérents vis-à-vis des valeurs de calcul théorique – entre 0.130 et 0.138 pour HEAD-TV (selon le lambda considéré pour la couche de substrat – voir tableau 4) et de 0.138 W/m2K pour HEAD-TG – voir tableau 4.

EUROPE

Pour EUROPE, la valeur U obtenue par la méthode 1 est de 0.354 W/m2K – voir figure 13. Sa fiabilité est confirmée par la méthode 2. On obtient 0.337 W/m2K avec la méthode 3. En l'absence de détails précis concernant cet objet d'étude, plus particulièrement concernant l'épaisseur de la dalle en béton et de l'isolation ainsi que les caractéristiques thermiques de la couche de drainage – en billes d'argile, la mesure ne peut pas être comparée à la valeur théorique mais elle est cohérente avec la valeur limite SIA 380/1 1988 [17] de 0.4 W/m2K en vigueur à l'époque de la construction du bâtiment.

PETITSENN

Pour PETITSENN, les valeurs enregistrées correspondent à la période avant les vacances de février lorsque les locaux sont occupés du aux aléas de la prise de mesure in situ et à l'autonomie des instruments. Dans ce cas, les résultats sont obtenus sur la base d'un signal mesuré dans des ambiances thermiques relativement instables – voir figure 10 (C). Cependant, l'analyse effectuée sur une période de plus de 20 jours montre que la valeur de convergence est très stable et semble donc fiable – voir figure 14.

La valeur U obtenue par la méthode 1 est de 0.324 W/m2K – voir figure 14. Sa fiabilité est confirmée par la méthode 2. On obtient 0.337 W/m2K avec la méthode 3. Elle est de plus cohérente avec la valeur théorique calculée sur la base des plans et de la visite sur place.

HUG-UP

La sélection des échantillons pour la toiture HUGUP a été plus délicate dans le sens où les espaces situées en dessous correspondent à la salle d'attente des urgences pédiatriques et qu'il n'y a dans ce contexte aucune régularité dans les fréquences d'occupation – voir figure 10 (D). Le traitement a révélé qu'en effet les données ne sont pas exploitables dans ce contexte pour l'obtention d'une valeur acceptable et analysable dans le cadre de cette étude – voir figure 15.

Incertitude

La précision du mesurage dépend de plusieurs facteurs qui sont listés dans le tableau ci-dessous. Chacun d'entre eux représente un certain pourcentage d'erreur. En réalisant la somme quadratique – respectivement la somme arithmétique, de ces erreurs, on obtient l'incertitude moyenne – respectivement l'incertitude maximale.

Tableau 5 : Liste des facteurs pris en compte pour le calcul de l'incertitude type et maximale.

Fluxmètre	3.4%	La plupart des fluxmètres sortant d'usine, on peut considérer qu'ils sont bien étalonnés.
Thermocouple intérieur	0.4%	Documentation des TC type K
Thermocouple extérieur	0.4%	
Datalogger	0.1%	Documentation Campbell Scientific
Contact thermique	5%	Norme ISO 9869
Erreur opérationnelle	3 %	Norme ISO 9869
Erreurs causées par la variation de températures et de flux thermique	10 %	Norme ISO 9869
Mesure du coefficient de	5 %	Norme ISO 9869
Incertitude type – somme quadratique		13%
Incertitude maximale – somme arithmétique		27%

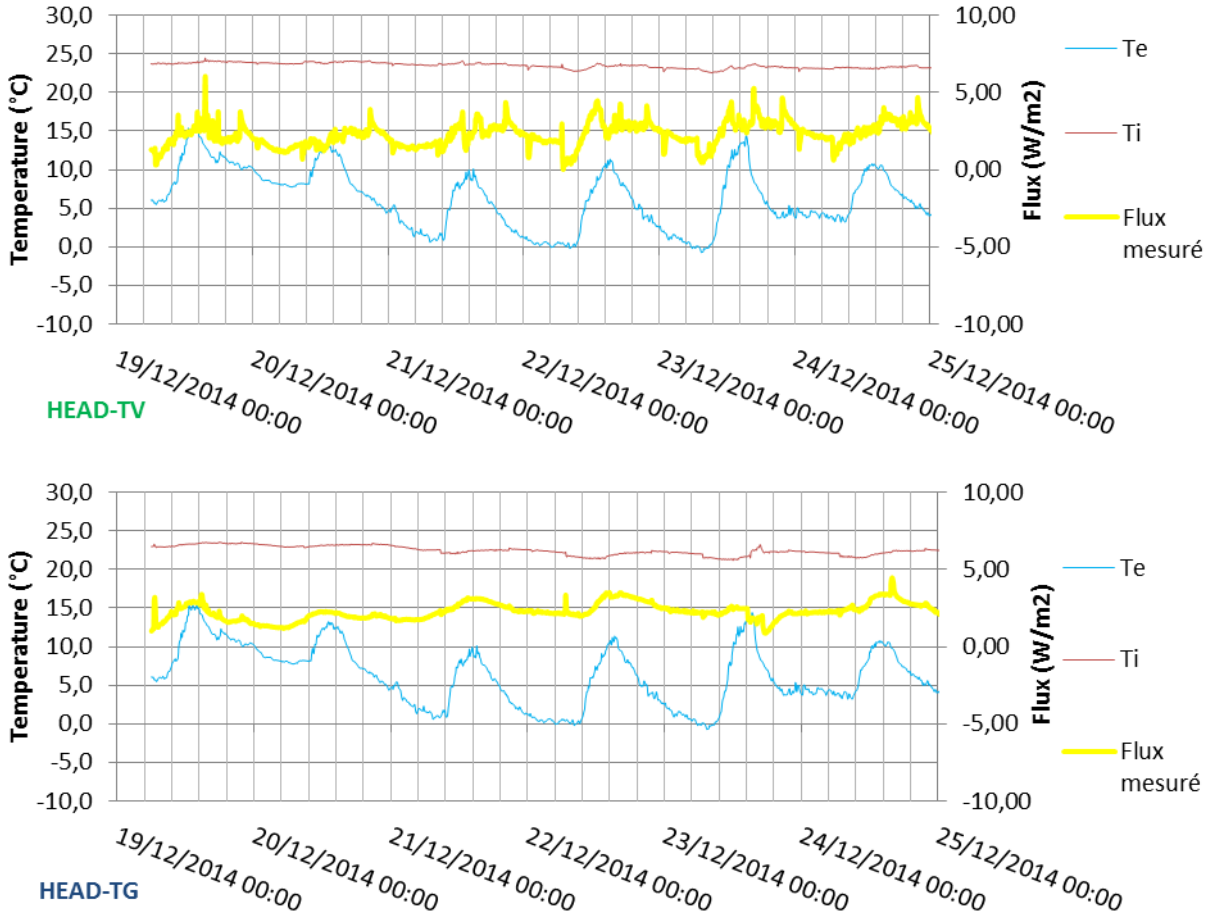


Figure 10 (A) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de mesure HEAD-TV et HEAD-TH retenues pour le calcul de la valeur U.

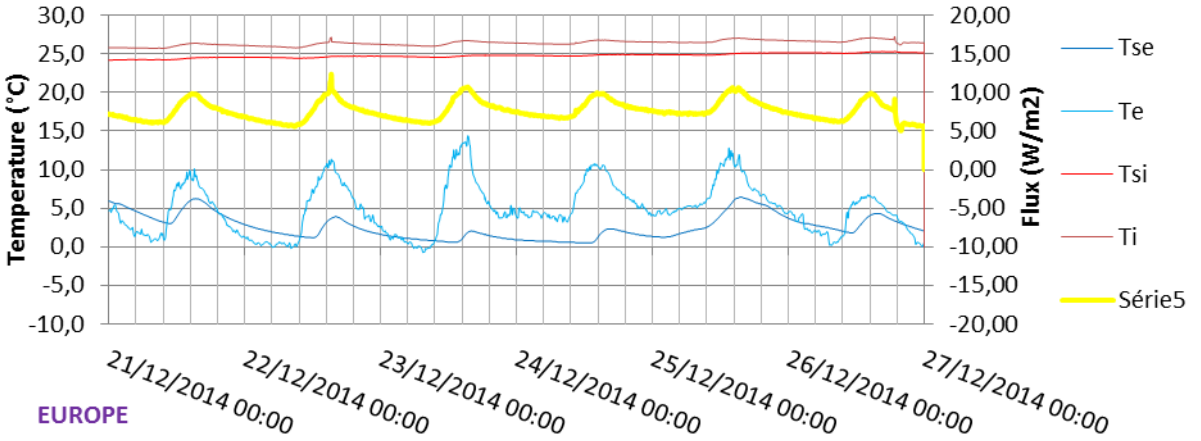


Figure 10 (B) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de EUROPE retenues pour le calcul de la valeur U.

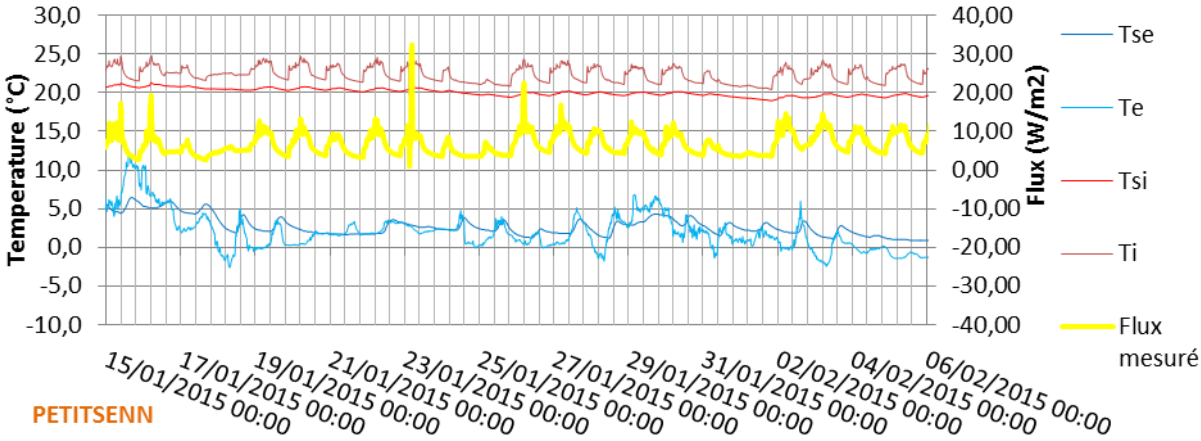


Figure 10 (C) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de PETITSENN retenues pour le calcul de la valeur U.

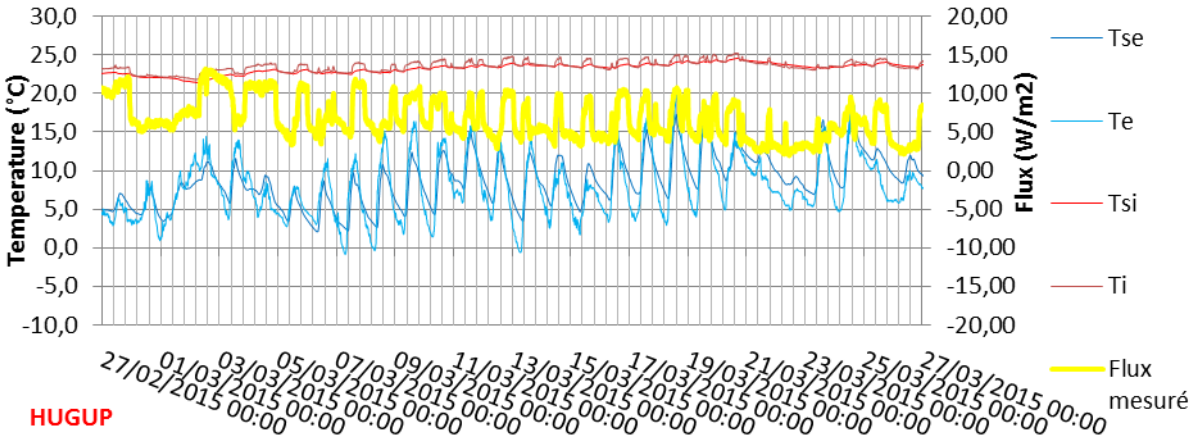


Figure 10 (D) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de HUGUP non retenues pour le calcul de la valeur U.

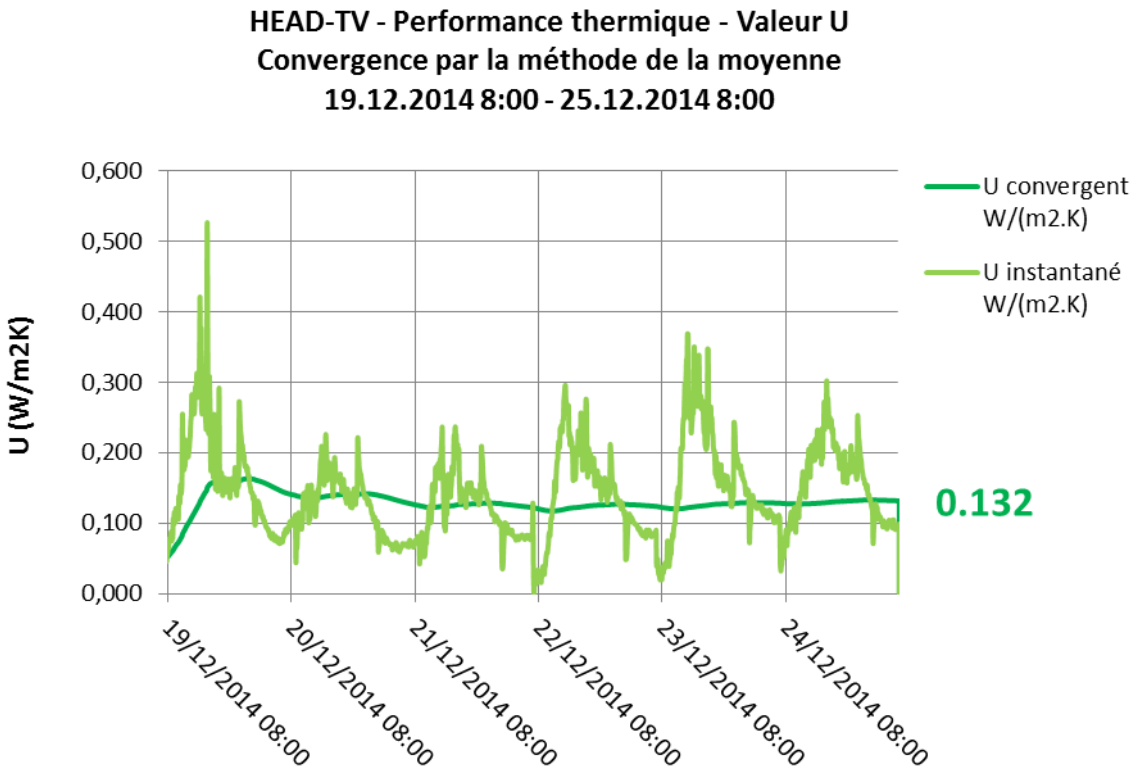


Figure 11 : HEAD-TV_Valeur U – Convergence par la méthode de la moyenne.

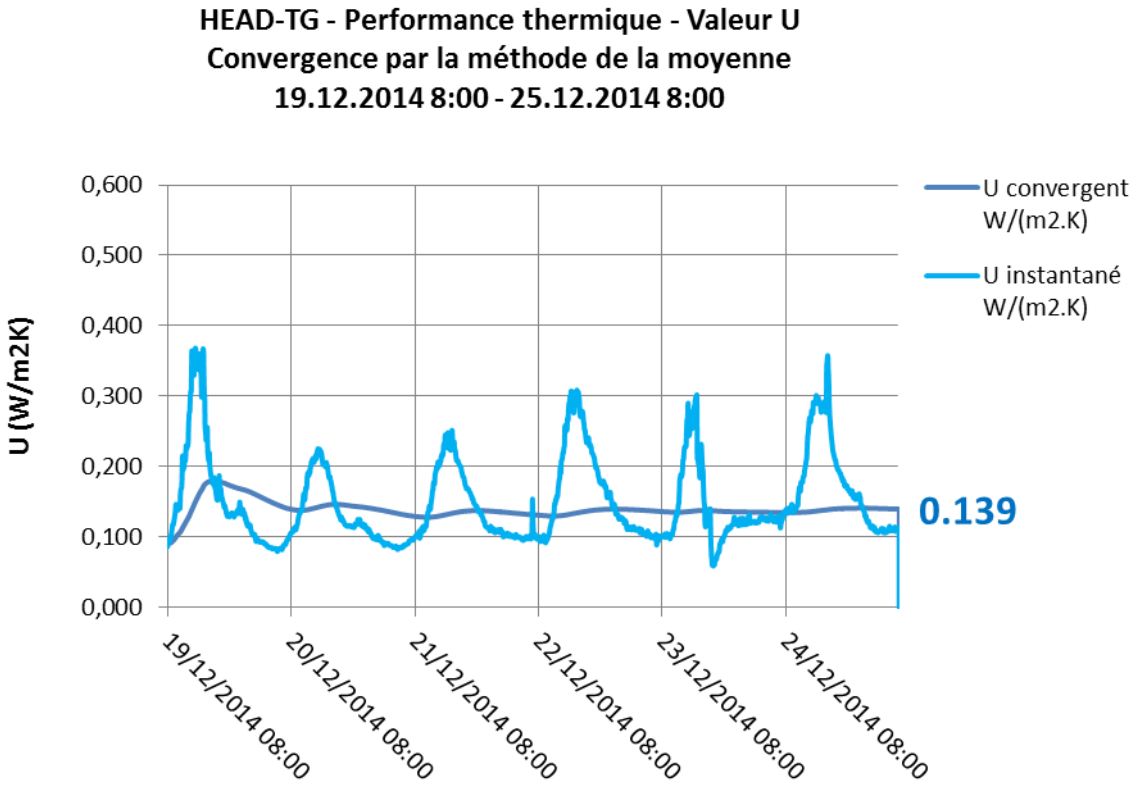


Figure 12 : HEAD-TG_Valeur U – Convergence par la méthode de la moyenne.

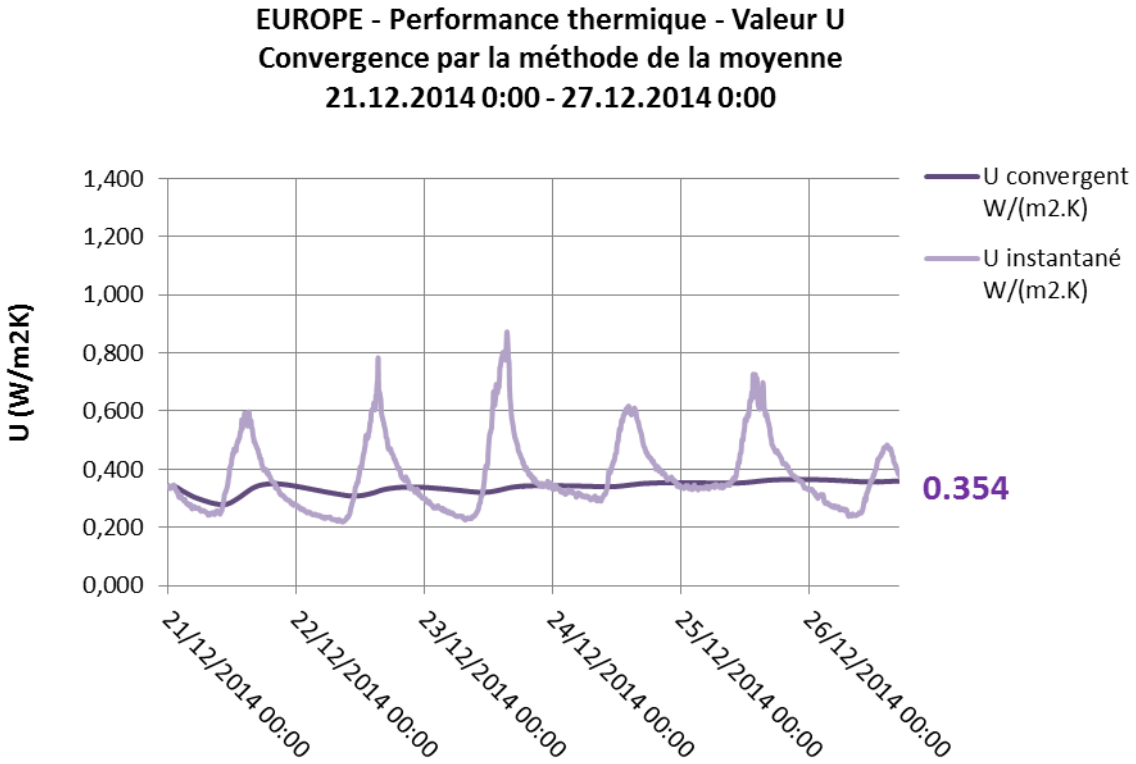


Figure 13 : EUROPE-Valeur U – Convergence par la méthode de la moyenne.

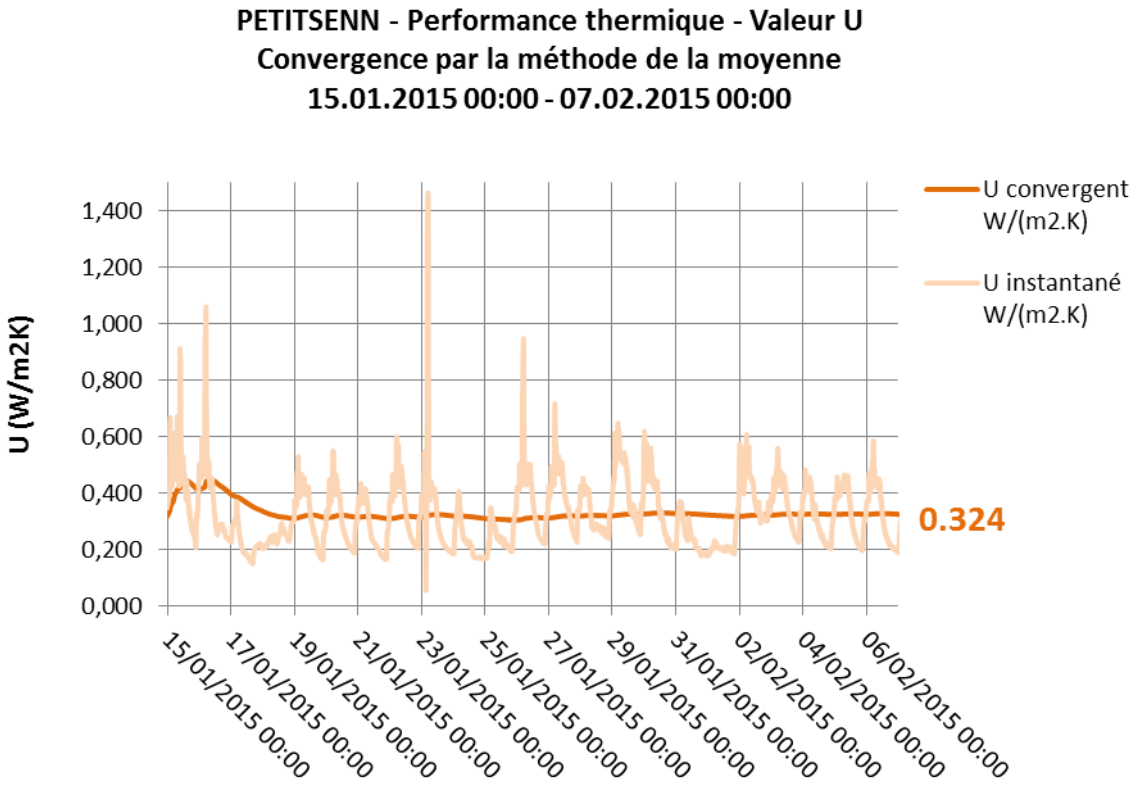


Figure 14 : PETITSENN_Valeur U – Convergence par la méthode de la moyenne.

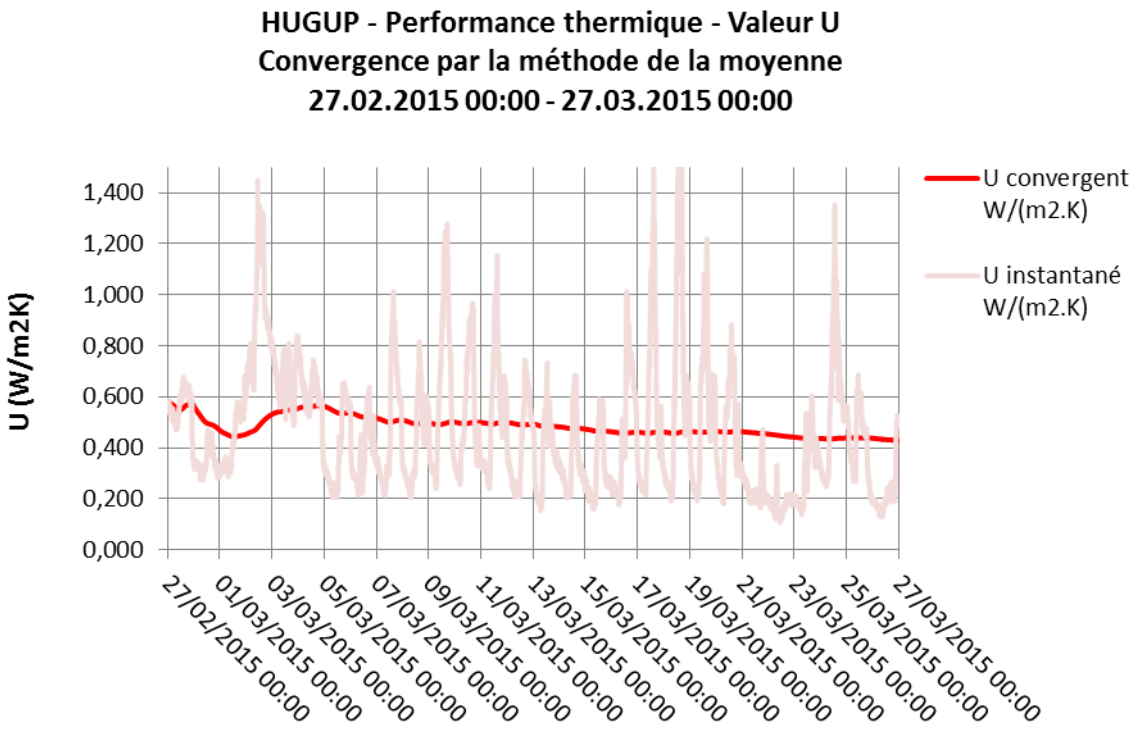


Figure 15 : HUGUP_Valeur U – Convergence par la méthode de la moyenne.

Synthèse

Les analyses ont permis d'extraire plusieurs valeurs qui caractérisent au niveau thermique les toitures à l'étude – voir tableau 22. En comparant les résultats pour HEAD-TV et HEAD-TG, on note qu'il n'existe pas d'amélioration nette de la performance thermique de l'élément de construction. Le faible écart concernant la valeur U mesuré ne peut être considéré comme un apport conséquent en termes de résistance thermique, particulièrement dans le cas des mesures et de l'incertitude qui doit être considérer – voir paragraphes précédents.

Tableau 22: Performances thermiques des TV – Tableau de synthèse.

	HEAD-TV	HEAD-TG	EUROPE	PETITSENN
U calculé selon lambdas théoriques considérés – voir tableau 4	0.130 - 0.138	0.138	-	0.270 - 0.330
U li projet ou norme	0.16 (Projet)	0.16 (Projet)	0.40 SIA 380/1 1988 [17]	0.40 SIA 380/1 1988 [17]
Année de construction	2010	2010	1996	1992
Isolation	26	26	10	10
Substrat	10	10	10	15
U mesuré – Méthode 1	0.132	0.139	0.354	0.324
Méthode 2 validée	Oui	Oui	Oui	Oui
U mesuré – Méthode 3	-	-	0.337	0.345

L'hypothèse 1, qui consiste à affirmer que les TV permettent de limiter les déperditions thermiques en hiver, ne peut donc pas être validée dans le cadre de cette expérience et confirme les points de nuance mis en évidence dans la revue de littérature. Le substrat végétalisé ne peut pas et ne doit pas être considéré comme une couche supplémentaire d'isolation thermique, particulièrement dans le contexte actuelle de mise en œuvre d'isolation thermique performante dans les éléments de construction, toitures plates incluses.

ÉTÉ

Pour étudier l'impact du substrat végétalisé sur le comportement thermique des toitures en période estivale, les mesures réalisées au niveau de HEAD-TG et de HEAD-TV ont été comparées. Pour la sélection de l'échantillon d'analyse, une série de données pendant la période des vacances scolaires d'été 2015 - où les espaces intérieures sont potentiellement moins utilisées - a été retenue – du 5 juillet 2015 au 26 août 2015. Cette série de données a de plus l'avantage d'avoir été mesuré pendant une période de canicule sur Genève avec des pics de températures extérieures élevées.

Sur cet échantillon, on observe un décalage temporel entre les profils de températures de surfaces intérieures – Tsi - et de flux thermiques - q. Autrement dit, les pics journaliers de Tsi et de q enregistrées au niveau de HEAD-TG se produisent avant ceux enregistrées au niveau de HEAD-TV – voir figure 16.

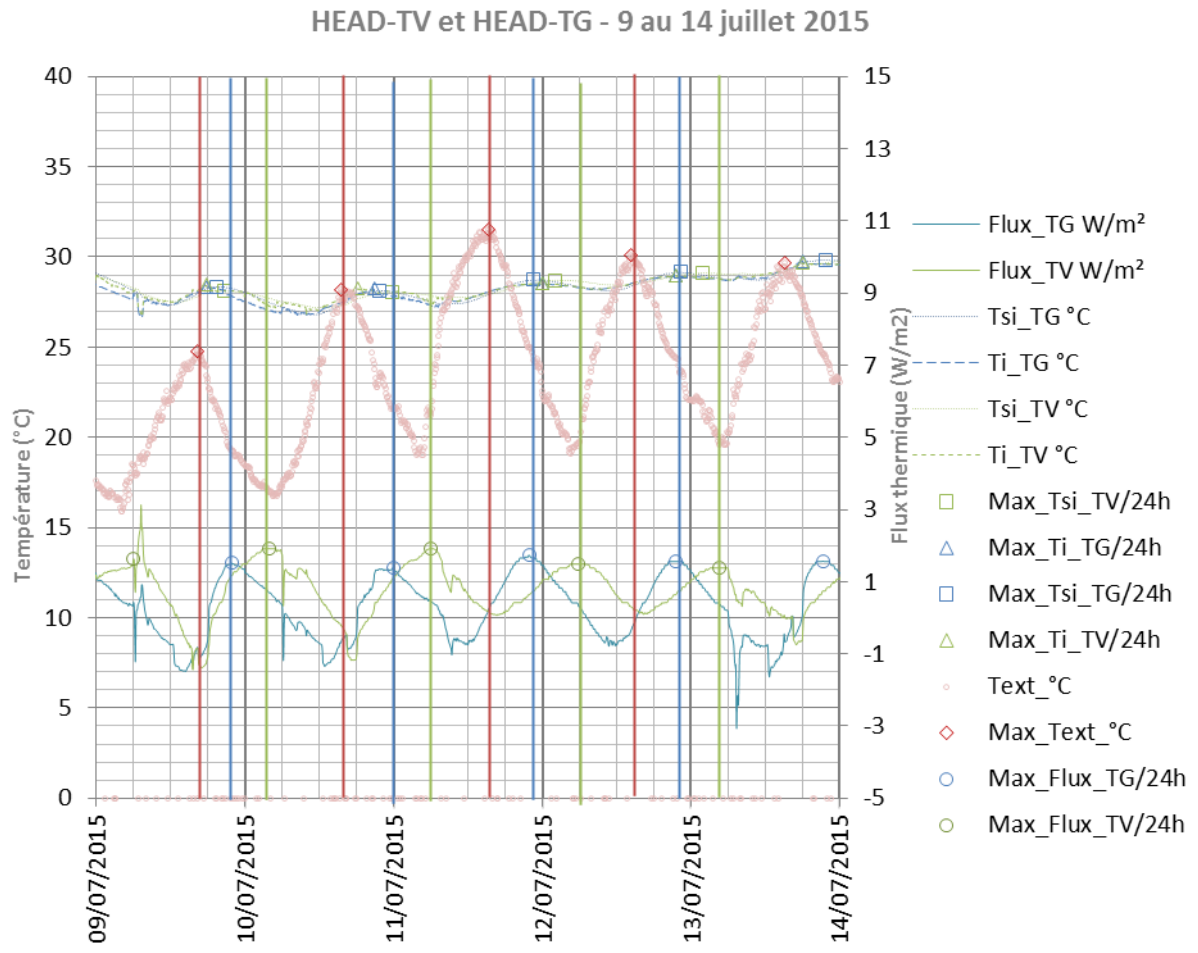


Figure 16: Flux thermique et temperatures - Juillet-Aout 2015 - HEAD-TV vs HEAD-TG.

Analyse

La tendance observée sur les mesures effectuées dans le bâtiment de la HEAD ne permet cependant pas de procéder à une analyse détaillée. Les valeurs quantitatives - notamment au niveau des temps de décalage - ne peuvent pas être validé scientifiquement dans le contexte de cet environnement de mesure perturbé. En effet, malgré une diminution de l'occupation des locaux, les perturbations liées à d'autres sources comme les installations techniques du bâtiment, sur lesquelles nous n'avons pas pu interagir, rendent délicates l'interprétation des résultats. Dans ce sens, il n'est pas possible de réellement qualifier et quantifier l'impact sur le climat intérieur.

Synthèse

En conclusion, il n'est pas possible de se prononcer quant à l'hypothèse 2 concernant la mise en œuvre de TV pour limiter les surchauffes estivales à l'intérieur des bâtiments. Des expériences complémentaires sur la base du même protocole mais dans de le contexte d'un environnement d'étude stable et maitrisable seraient une piste d'investigation pour traiter plus en détails cette hypothèse.

3.3.3 MESURE DE TEMPÉRATURE DE L'AIR AMBIANT

Expérience et protocole

Afin d'évaluer l'évolution et la distribution des températures au-dessus des toitures, deux stations de mesure – station Rotro, ont été montées – voir figure 17. Elles permettent de mesurer en continue la température à 3 hauteurs différentes, 50, 100 et 150 cm. Pour cela des sondes Rotronic Hygroclip2 HC2-S(3)* montées dans des abris climatiques et connectées à des acquisiteurs Rotronic HC2* ont été installés sur des mâts. Une valeur par heure est enregistrée. Les valeurs de vitesse du vent mesurées au niveau de la station Climacity de la Prairie[24] ont été considérées dans le cadre de cette expérience.

Durant la période allant du 30 juin au 17 aout 2015 – période effective de canicule à Genève, les deux stations Rotro ont été respectivement installées sur la toiture de la HEAD et sur la toiture gravier – type TS-1, du bâtiment B d'hepia – voir figure 18. Ces deux toitures sont exposées à des conditions météorologiques relativement comparables du point de vue du rayonnement solaire et du vent.

Figure 17 : Stations de mesure des températures de l'air en été vues depuis la toiture gravier et repérage des emplacements sur plan. Source du plan : sitg.ch

[24] www.climacity.ch

Profils verticales de températures comparées

L'évolution des températures en fonction du temps au niveau de chaque point de mesure montre que les profils sont relativement similaires. Il existe de légères différences et une tendance non généralisable à l'apparition de pics journaliers de températures faiblement plus élevés au niveau de la TG que de la TV – voir figure 18. Les moyennes journalières suivent également cette tendance. Cependant, les écarts restent négligeables pour affirmer qu'il existe une atténuation des températures au-dessus de la TV par rapport à la TG.

Précision de mesurage de[25] *+/- 0.1°C*	Différence des pics journaliers			Différence des moyennes journalières		
	T50	T100	T150	T50	T100	T150
Minimum (°C)	-0.9	-0.4	-0.7	-0.3	-0.1	-0.1
Moyenne (°C)	0.2	0.5	0.2	0.5	0.6	0.4
Maximum (°C)	1.5	1.6	1.5	0.1	0.2	0.1

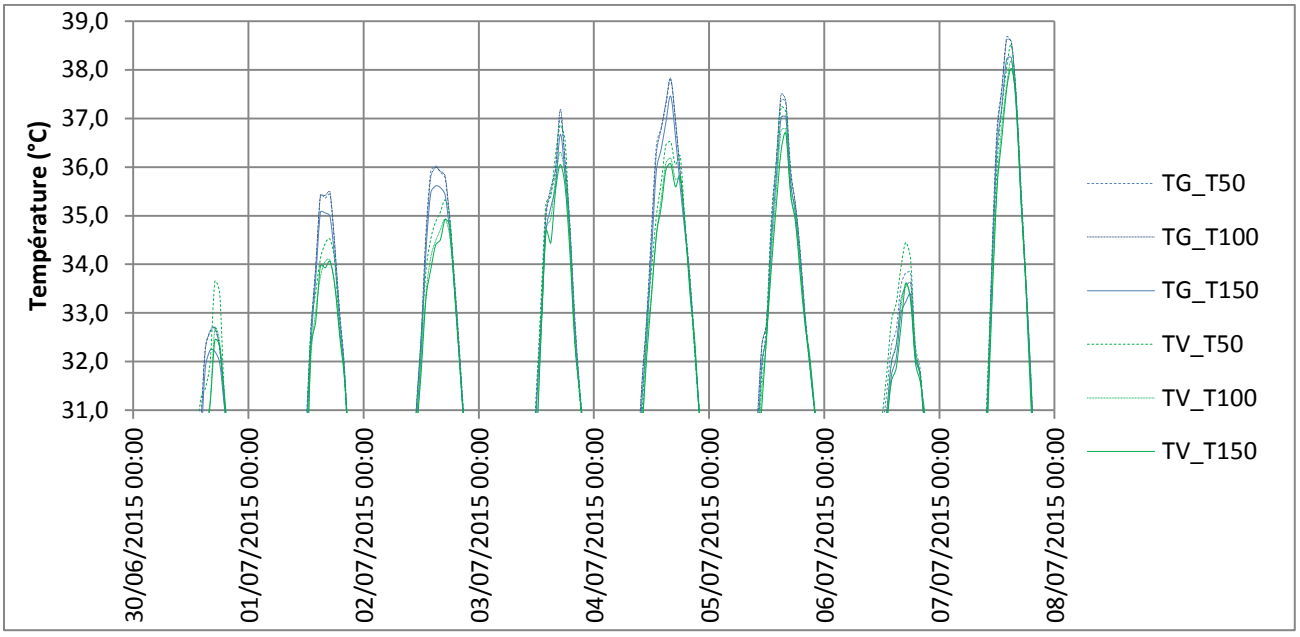
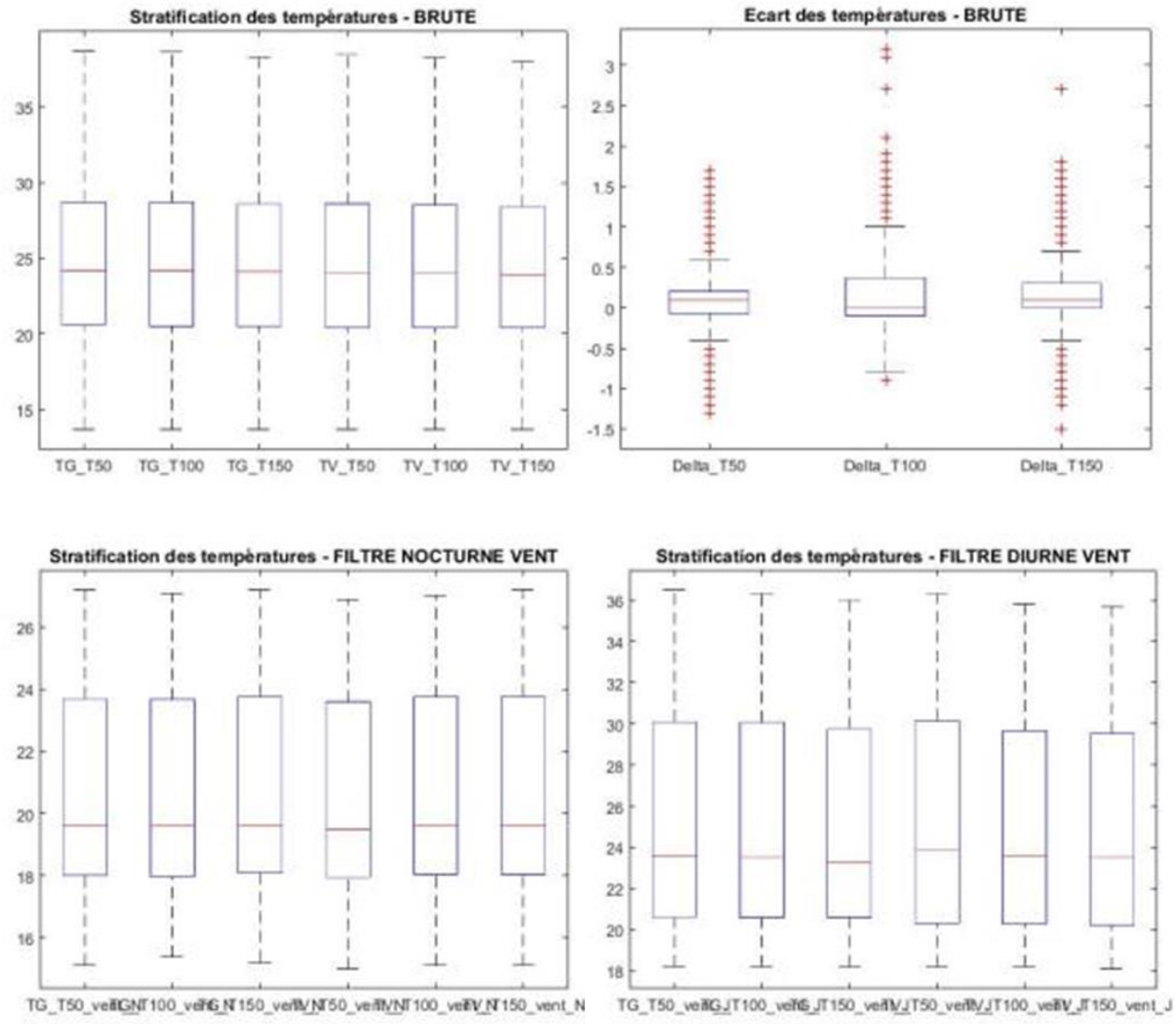


Figure 18 : Tableau des résultats et graphique de l'évolution des températures – zoom sur la période caractéristique du 30.06.2015 au 10.07.2015.

L'analyse statistique des données confirme cette distribution relativement similaire des températures au niveau des six points de mesure – voir figure 19. La distribution des différences entre les températures mesurées à la même hauteur sur la TV et sur la TG appuie cette tendance avec des valeurs médianes légèrement supérieures à 0.

D'autres séries ont également été étudiées : des filtres ont été appliqués afin d'analyser séparément les valeurs de jour et celles de nuits et également afin d'isoler les mesures lors de vent modéré – les valeurs de températures mesurées lors de vent supérieur à 2 m/s ont été évacuées. Elles ne permettent pas non plus de faire apparaitre une différence significative entre les mesures aux différentes hauteurs.

[25] www.rotronic.ch - http://uk.rs-online.com/web/p/thermohygrometer-accessories/7259527/



Dessus de la TV HEAD (en haut, à gauche), différences entre les températures mesurées à la même hauteur – 50, 100 et 150 cm, sur la TV et sur la TG (en haut, à droite), les températures avec application de filtres diurne (en bas, à gauche) et nocturne (en bas, à droite) pour une vitesse de vent maximum (2m/s).

L'hypothèse 3 qui traite du phénomène de rafraichissement de l'environnement proche du à la présence d'une TV ne peut donc pas être validé dans le cadre de cette expérience effectuée sur une période de fortes températures à Genève.

C'est le phénomène d'ET qui permet en théorie de limiter le flux de chaleur sensible et l'augmentation des températures au-dessus des TV. Or les mesures parallèles effectuées par le groupe « Substrat et Hydrologie » confirment l'absence d'eau dans le substrat pour cette période. Les valeurs d'ET réelle calculées ponctuellement sur plusieurs journées à l'été 2015 sont très faibles – voir rapport « Substrat et hydrologie ». Ceci pourrait expliquer les résultats obtenus et confirmer la remarque mise en avant dans la revue de littérature concernant la nécessité de bénéficier d'un stock d'eau suffisant dans le substrat pour que le phénomène d'ET soit significatif.

4 PARTIE 3 : CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Dans cette étude, il était proposé d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur la qualité thermique des bâtiments et sur le micro climat local. Dans ce contexte, plusieurs TV ont été étudiées sur le canton de Genève autour de trois axes d'investigation. Cette conclusion résume les résultats obtenus et propose des recommandations.

Hiver et déperditions thermiques

Concernant la capacité des TV à réduire les déperditions thermiques par la toiture en hiver, les résultats montrent que cette hypothèse ne semble pas généralisable. En effet, les mesures effectuées sur une toiture végétalisée extensive - HEAD-TV - composé de 10 cm de couche végétale, indiquent que son coefficient de transmission thermique U est très proche de la même toiture recouverte d'une couche de gravier rond - HEAD-TG. Le substrat végétalisé n'a donc qu'un impact faible sur les déperditions thermiques de cet élément.

En conclusion, il semble donc important de ne pas systématiquement considérer le substrat végétalisé des TV comme une couche d'isolation supplémentaire. Dans le contexte actuel de construction/rénovation de bâtiments énergétiquement performant, les performances en termes d'isolation thermique dépendent principalement de l'épaisseur de matériau isolant mis en œuvre.

Confort estival dans les bâtiments

Concernant la capacité des TV à améliorer le confort thermique estival à l'intérieur des bâtiments, les résultats ne permettent pas de se prononcer concrètement sur l'impact des TV sur le climat intérieur.

De façon générale, on retiendra que la forme du bâtiment est un élément essentiel à considérer et qu'on ne devrait dans tous les cas s'intéresser à la mise en œuvre d'une TV que lorsque sa surface représente une fraction suffisante de l'enveloppe thermique du bâtiment.

Ilot de chaleur urbain

Dans cette étude, nous avons mesuré en continu l'albédo d'un couvert végétal de TV – HEAD-TV - sur une période de plusieurs mois en été. Les résultats qui en découlent montrent que les valeurs varient entre 0.12 et 0.24 sur la période de mesure pour une moyenne de 0.19. La capacité de cette surface à absorber de la chaleur par rayonnement n'est donc pas négligeable.

Concernant l'impact de la TV sur le micro climat local, les résultats montrent que, dans le contexte des fortes températures estivales de 2015 et d'un substrat pauvre en eau, les effets de la TV sur la réduction des températures de l'air sont absents. Dans les conditions de l'expérience, il semble que la capacité en termes d'évapotranspiration et de réduction du flux de chaleur sensible soient en effet très limités sur cette période sèche.

En résumé, il parait donc important de retenir que la mise en œuvre systématique d'une TV ne semble pas représenter une stratégie généralisable pour limiter le réchauffement de l'air. En l'absence d'eau dans le substrat et de phénomène d'évapotranspiration, la diminution du flux de chaleur sensible ne sera de toute évidence pas significative. La mise en place de système d'arrosage pourrait être une solution pour assurer un stock d'eau disponible mais il représente sans équivoque des couts et des contraintes supplémentaires notamment liés à la disponibilité de l'eau. Dans ce sens, d'autres alternatives peuvent être intéressantes à considérer, comme par exemple des revêtements de toiture ayant des albédos élevés.

Finalement, lorsque l'on envisage le recours à une TV sur un bâtiment, il est essentiel de prendre en considération sa situation dans le milieu urbain dans laquelle elle s'incorpore. En effet, au contraire d'arbres dans une rue, une TV à plusieurs mètres au-dessus des piétons a peu de chance d'impacter réellement leur confort thermique. Chaque TV est différente en fonction du substrat et de la végétation qu'elle supporte mais

également de l'épaisseur de l'isolation et des caractéristiques du support qui la compose. Il est donc important de chacune les considérer comme des objets spécifiques dans des contextes particuliers et de ne pas généraliser les services qu'elles peuvent ou non apporter.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Norme SIA 312 (2013) Végétalisation de toiture.

[2] Guyot, Gérard (2013) Climatologie de l'environnement : cours et exercises corrigés. Paris:Dunod.

[3] Musy, Marjory (2014) Une ville verte : Les rôles du végétal en ville. Versailles :Quae.

[4] Gras, Raymond (1994) Sols caillouteux et production végétale. Paris :Inra

[5] Normes européenne NBN B62-002 (2009) Performance thermique des bâtiments.

[6] Courgey, S. Oliva, J.P. (2010) La conception bioclimatique. Mens :Terre vivante.

[7] Norme SIA 180 (2014) Protection thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments.

[7] Documentation SIA D027 (1989) « Mesure in situ » en énergétique du bâtiment.

[8] Saadatian et al. (2008) A review of energyaspects of green roofs.

[9] Liu, K ; Minor, J. (2010) Performance evaluation of an Extensive green roof, city of toronto.

[11] Köhler et al (2003) Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands. Germany.

[12] CREM (2008) Matériaux réfléchissants et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains. Canada.

[13] Ngan, Goya (2004) Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design.

[14] Service des parcs et domaines de la ville de Lausanne (2014) Toitures végétalisées - Guide de recommandations Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit.

[15] Norme ISO 9869 (1994) Isolation thermique – Eléments de construction – Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique.

[16] Norme ISO 9869-1 (2014) Thermal insulation – In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1 : Heat flow meter method.

[17] Norme SIA 380/1 (1988) Energie thermique dans le bâtiment.

[18] Norme SIA 380/1 (2001) Energie thermique dans le bâtiment.

[19] Zurcher, C. Frank, T. (2014) Physique du bâtiment : construction et énergie. Zurich/Vdlf.

[20] Norme SIA 381/1 (1980) Caractéristiques des matériaux de construction.

[21] Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (2006) Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements.