

Rapport de stage master 1 : Impact des murs végétalisés sur le bâtiment et son environnement

Tom DEYDIER



Tuteur de stage : Sophie Allebone-Webb

Tuteurs pédagogiques : Guillaume Guimbretière et Benjamin Pillot

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à Guillaume Guimbretière et Benjamin Pillot qui m'ont accordés leur confiance et permis de réaliser ce stage. Ils ont fait preuve de disponibilité, tout au long de la période de stage pour m'apporter de précieux conseils et me permettre de mener à bien les missions qui m'ont été confiées.

Je souhaite également remercier ma tutrice Sophie Allebone-Webb et Nolwenn Boudoir pour m'avoir transmis tout leur savoir-faire durant cette période de stage. Je les remercie pour le temps qu'elles m'ont consacré et le partage de connaissances dont elles ont fait preuve.

J'aimerais aussi remercier Anna Pautard, coordinatrice du tiers-lieu Macondo, sans qui ce stage n'aurait pas pu se réaliser.

Un grand merci, à l'ensemble de l'équipe de Macondo, pour les moments chaleureux partagés sur ce lieu rempli d'idées novatrices et inspirantes.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Le tiers lieu Macondo	2
2.1.	Les différents acteurs	2
3.	L'entreprise Ecosec.....	4
3.1.	Présentation générale	4
3.2.	L'organisation	4
4.	Le projet Cycloasis.....	5
4.1.	Partie technique	5
4.2.	Valeurs écologiques.....	6
4.3.	Utilisation des urines.....	6
4.3.1.	Intérêt agronomique et énergétique des urines	6
4.3.2.	Hygiénisation des urines	7
5.	Les murs végétalisés.....	8
5.1.	Etat de l'art.....	8
5.1.1.	Typologie	8
5.1.2.	Impact des murs végétalisés sur le bâtiment.....	9
5.1.3.	Impact des murs végétalisés sur l'environnement.....	9
5.1.4.	Impact sur le confort thermique	9
5.1.5.	Le phénomène d'évapotranspiration.....	11
5.1.6.	Axes d'améliorations de la technologie	11
6.	Etude témoin.....	13
6.1.	Protocole de Surya consultants.....	13
6.2.	Points de mesure.....	14
6.2.1.	Mesure sur les parois extérieures (points verts).....	14
6.2.2.	Mesure à l'extérieur (points jaunes)	15
6.2.3.	Mesure au niveau de la paroi végétalisée (points gris).....	15
6.2.4.	Mesure de l'ambiance intérieur (croix jaunes et points oranges)	16
6.3.	Analyse des conditions thermo-hygrométriques	17
7.	Protocole de caractérisation du mur végétalisé en situation d'usage.....	20
7.1.	Protocole de mesure	21
7.1.1.	Points de mesures	21

7.1.2.	Matériel mis à disposition	21
7.1.3.	Limite de l'étude.....	22
7.2.	Analyse des résultats de mesure.....	23
7.2.1.	Avant-propos.....	23
7.2.2.	Déphasage de chauffe	23
7.2.3.	Isolation thermique du bâtiment	24
7.2.4.	Inertie thermique du bâtiment	25
7.2.5.	Confort thermique dans le bâtiment	26
7.2.6.	Variation de température de la paroi végétalisée	27
8.	Ilots de chaleur urbain.....	29
8.3.	Définition	29
8.4.	Impact des murs végétalisées sur les îlots de chaleur	29
9.	Conclusion	31
10.	Table des illustrations.....	33
11.	Bibliographie.....	35
	Annexe 1 : Résultats des mesures de température de paroi sur le site de la Mosson	36
	Annexe 2 : Etude techno-critique et sociologique du mur végétalisé	38

1. Introduction

Dans le cadre de ma première année de master énergie au sein de l'Université de Montpellier, j'ai réalisé un stage d'une durée de 10 semaines au sein de l'entreprise Ecosec spécialisé dans la fabrication de toilettes sèches ainsi que l'élaboration de murs végétaux. Ecosec se développe à Macondo, tiers lieu de la transition énergétique situé à Montarnaud (34).

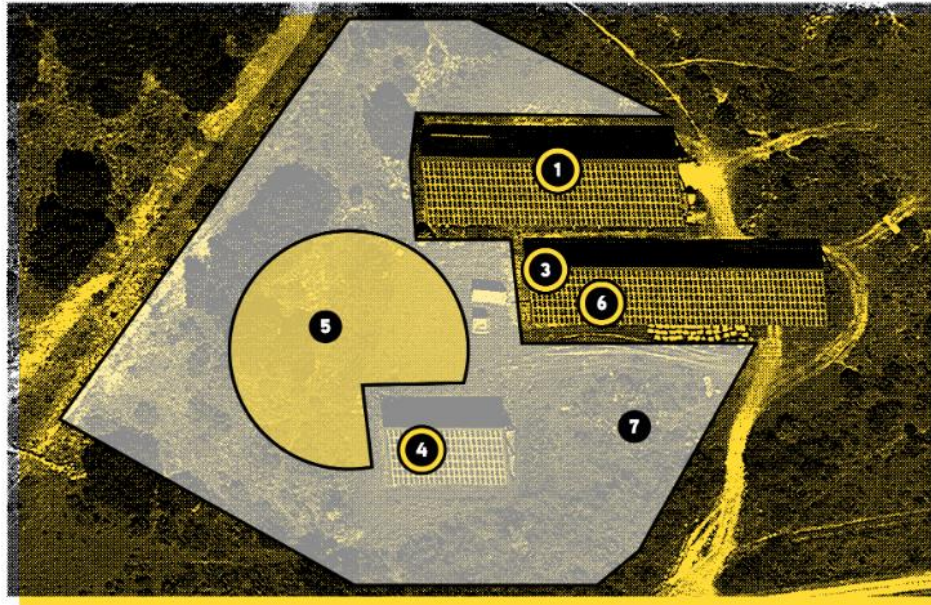
Ecosec a lancé le projet Cycloasis qui vise à promouvoir l'implantation de murs végétaux, afin notamment de lutter contre les îlots de chaleur en milieu urbain. Mais les avantages liés à ces systèmes sont nombreux et diverses, ces derniers seront exposés dans une partie suivante. Le projet se développe notamment dans le quartier de la Mosson à Montpellier, où un mur végétalisé a été installé sur un lieu associatif qui vise à être une recyclerie. Le but de mon stage était de déterminer l'impact du mur végétalisé sur le bâtiment ainsi que sur son environnement. Une première étude a été réalisée par le bureau d'études Surya consultants, sur le site de MACONDO. Un conteneur végétalisé test, a été étudié afin de mettre en place une solution de monitoring robuste pour pouvoir suivre de futur projet et mettre en avant les bénéfices de l'implantation de ce type de système. Dans la continuité de ce travail, une caractérisation d'un mur végétalisé en « état d'usage » a été réalisé sur le site de la Mosson afin d'analyser l'impact du système sur le bâtiment et son environnement.

Tout au long de ce rapport, j'essaierais de répondre à la question suivante : Quel est l'impact d'un mur végétalisé sur un bâtiment ainsi que sur son environnement ?

Dans un premier temps une présentation du tiers lieu Macondo et de l'entreprise Ecosec sera développée. Un détail particulier sera alloué au projet Cycloasis, en lien avec le développement des murs végétalisés. Par la suite, l'étude réalisée par le bureau d'études Surya consultants sera présentée, en se concentrant sur les phénomènes thermiques qui influencent l'ambiance du conteneur étudié. En complément, la campagne de mesure réalisée sur le site de la Mosson sera exposée et analysée. Enfin, une conclusion sera apportée sur le travail effectué qui rendra compte des différents résultats de mesures obtenues.

2. Le tiers lieu Macondo

Le tiers lieu Macondo situé à Montarnaud (34), véritable laboratoire de la transition énergétique, a pour but de promouvoir et d'accompagner les projets « low-tech ». La gouvernance de Macondo est coopérative et prend la forme d'une société coopérative d'intérêts collectifs (SCIC). Le lieu est réparti en différents espaces présentés dans la figure 1.



- | | | |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| 1 Ateliers individuels | 3 Bureaux | 5 Ateliers mutualisés |
| 2 Espaces de formations | 4 Espace convivial | 6 Low tech lab |
| | | 7 Espace agro-écologique |

Figure 1 : Répartitions des espaces sur le site de Macondo

2.1. Les différents acteurs

- Ecole de l'être

Cette école s'adresse aux jeunes de 18 à 25 ans, éloignés du monde de l'emploi, soutenu par la région Occitanie elle propose des formations sur le bois, l'éco-construction, les énergies renouvelables et les basses technologies. L'école de l'être fait partie du réseau des écoles de la transition écologique.

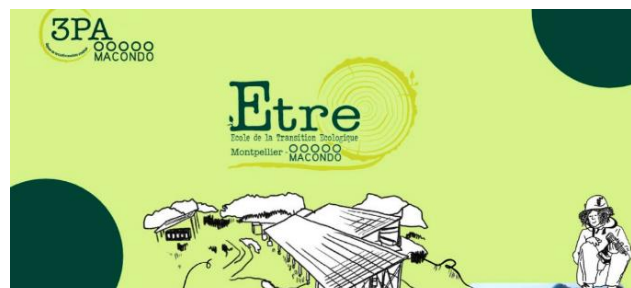


Figure 2 : Logo école de l'Etre

- **Les zuts**

La SCOP les Zuts développe et construit des Tiny House « low tech » sur le site de Macondo. Fortement inspiré du modèle d'habitat durable proposé par le low tech lab cette tiny house est un concentré de low tech permettant un fonctionnement de l'habitat autonome sans transiger sur le confort.



Figure 3 : Tiny House construite par les zuts

- **Ecosec**

Ecosec est une Scop spécialisée dans le développement de services et produits d'assainissement écologique. Ecosec propose des toilettes sèches permettant la séparation des effluents à la source pour ensuite les revaloriser. Ces méthodes permettent d'une part de réduire l'impact sur la ressource en eau mais également de mettre en place de la recherche sur la valorisation agronomique des urines.

De plus Ecosec développe des murs végétaux grâce au projet Cycloasis avec une attention particulière à la revalorisation des eaux grises.



Figure 4 : Modèle de la remorque PICA développé par Ecosec

- **Divesterram**

Divesterram développe et fabrique des composteurs à usages collectifs. Ces derniers permettent aux communes et métropoles de valoriser leurs déchets organiques.



Figure 5 : Composteur développé par Divesterram

3. L'entreprise Ecosec

3.1. Présentation générale

Ecosec est une SCOP (Société coopérative de production) fondée en 2015 par Benjamin Clouet et Bernard Caille. L'entreprise s'est d'abord concentrée sur la production et la location de cabines de toilettes sèches avant de se diversifier et de fabriquer des murs végétaux. Depuis le début de ses activités, une partie importante du budget et du temps de travail est consacré à la recherche et à l'innovation.

Aujourd'hui, Ecosec est un acteur important du secteur de l'assainissement écologique avec une offre de vente et de location de toilettes sèches de plus en plus variée : particuliers, collectivités, professionnels, espace public mais aussi événementiel. L'entreprise apporte aussi de nombreuses solutions dans les domaines de la réutilisation des eaux ménagères et la valorisation des urines grâce à des systèmes complets de gestion des déchets. Une partie grandissante des activités se porte sur la fabrication et l'installation de murs végétaux qui permettent de s'adapter en fonction de chaque projet afin de revaloriser un maximum de déchets et de favoriser la circularité.

3.2. L'organisation

L'entreprise est une SCOP, par conséquent les actionnaires sont majoritairement les employés de l'entreprise (50% des employés sont actionnaires) et quelques personnes extérieures (anciens employés, famille, ...)

Comme c'est une SCOP, chaque employé associé possède une partie de l'entreprise et a une voix au conseil d'administration. C'est une entreprise de 10 salariés qui fait partie du secteur géré par la convention des déchets. En plus d'un droit de vote pour les salariés associés dans chaque décision, l'entreprise a mis en place le salaire unique afin de créer plus d'égalité entre les salariés (sauf alternants et employés en insertion).

4. Le projet Cycloasis

4.1. Partie technique

Ce projet a pour but de promouvoir l'implantation, en milieu urbain, de murs végétalisés pour créer des îlots de fraîcheur. Ces murs végétaux ont la particularité d'avoir une gestion de la ressource en eau innovante grâce à la récupération d'eaux grises, jaunes et pluviales.



L'objectif de ce projet est de prouver qu'avec assez peu de technologie, un investissement raisonnable et peu de maintenance, la valorisation d'un ensemble de bio déchets et liquides est possible en contribuant à l'amélioration du confort de vie dans une région où les pics de chaleur sont un enjeu considérable à gérer. Les murs végétaux vont alors agir comme des climatiseurs afin de rafraichir l'environnement mais également augmenter le confort thermique au sein du bâtiment.

La séparation des flux (eaux grises / urines / Matières fécales) à la source est en soi particulièrement innovante. Au même titre que nos déchets ménagers, les flux issus de l'habitat peuvent être collectés gérés séparément et ainsi être revalorisés. C'est cette idée qui est mise en avant dans le projet Cycloasis, ou les eaux grises après filtration permettront l'irrigation des murs végétalisés et l'urine issue de toilettes à séparation permettra la fertilisation du substrat. De plus, le substrat de culture est constitué de composte de la métropole de Montpellier mélangé avec des déchets bois également issue de la métropole de Montpellier. Le principe de fonctionnement du projet Cycloasis est présenté dans la figure 6.

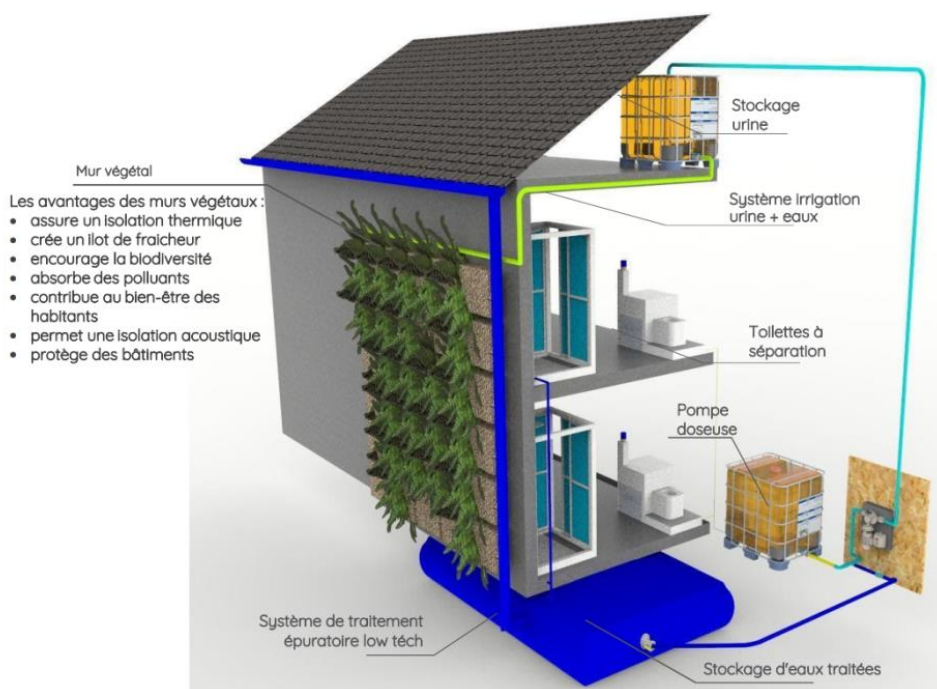
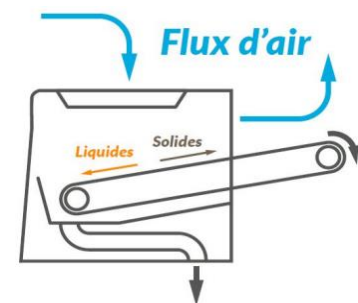


Figure 6 : Principe de fonctionnement du projet Cycloasis

4.2. Valeurs écologiques

Le constat qui a motivé la scop Ecosec à développer ce projet est premièrement basé sur notre gestion catastrophique de la ressource en eau. Est-il viable de déféquer dans l'eau potable ? Quand nous savons que les chasses d'eau représentent 30 % de notre consommation d'eau, environ 7 litres par chasse d'eau consommée. De plus, la mise en commun de tous les flux au tout à l'égout ne permet pas de revaloriser les nutriments. Sachant que l'assainissement représente 50 % de nos factures d'eau, n'est-il pas judicieux de trouver une alternative ? Les urines et les matières fécales sont les sources majeures de pollutions dans les eaux usées. Les matières fécales représentent la majorité de la pollution solide mais aussi des pathogènes alors que les urines représentent 90% de la pollution azotée et 60% de la pollution phosphorée [4]. De plus, dans les stations d'épuration, ces polluants ne sont pas entièrement traités et constituent une pollution majeure des milieux aquatiques et conduisent à leur eutrophisation [5]. Dans le département de l'Hérault par exemple, 10% des stations d'épuration ont un taux de saturation supérieur à 100%, ce qui conduit à des pollutions des cours d'eau dans un département où ils sont tous classés zones sensibles [6].

Ajouter à cela les un contexte climatique de plus en plus rude avec des nouveaux records de chaleur enregistrés, le développement de solutions durable pour rafraichir nos espaces de vie est primordiale.

C'est à partir de ce constat que le projet Cycloasis a vu le jour, il répond à un besoin vitale de rafraîchissement de nos espaces de vie urbain tout en revalorisant des bio-déchets et diminuant la pollution des cours d'eau. L'objectif est donc de créer un système de mur végétalisé, low-cost, robuste et durable.

4.3. Utilisation des urines

4.3.1. Intérêt agronomique et énergétique des urines

Grâce aux systèmes de trônes à séparation mis en place, les urines peuvent être collectées indépendamment, puis valorisées. Ces dernières contiennent une grande quantité de nutriments dont les plantes ont besoin et possèdent une composition similaire aux engrais (Kirchmann and Pettersson, 1994). L'azote est présent en grande quantité dans l'air sous forme gazeuse et peut être fixé pour en faire de l'engrais grâce au procédé d'Haber-Bosch qui est très couteux en énergie. Le phosphore quant à lui est extrait dans des mines au Maroc et en Chine mais ce n'est pas une ressource renouvelable, le pic de production commercial et abordable pourrait être atteint en 2030 selon certains chercheurs [7].

Bien que les urines semblent être une solution aux problèmes de raréfaction des ressources et de disponibilité en énergie, il ne faut pas oublier que bien que celles-ci soient stériles au moment où elles sont excrétées, elles ont tendance à subir des contaminations croisées (contaminations au contact de matières fécales). Elles doivent donc être traitées pour être exemptes de pathogènes et que l'application de celles-ci en temps qu'engrais n'entraînent aucun risque sanitaire.

4.3.2. Hygiénisation des urines

Différentes méthodes sont possibles pour l'hygiénisation des urines, comme le stockage des urines. En effet l'OMS recommande un stockage de 6 mois avant d'utiliser les urines en agriculture. Ecosec a donc testé cette méthode, mais avec les conditions de stockage (extérieur en France métropolitaine) il n'a pas été possible de montrer que les urines avaient été hygiénisées. Différents paramètres influent sur la croissance des bactéries (*E. coli*) au sein des urines, ces paramètres sont présentés dans la figure 7.

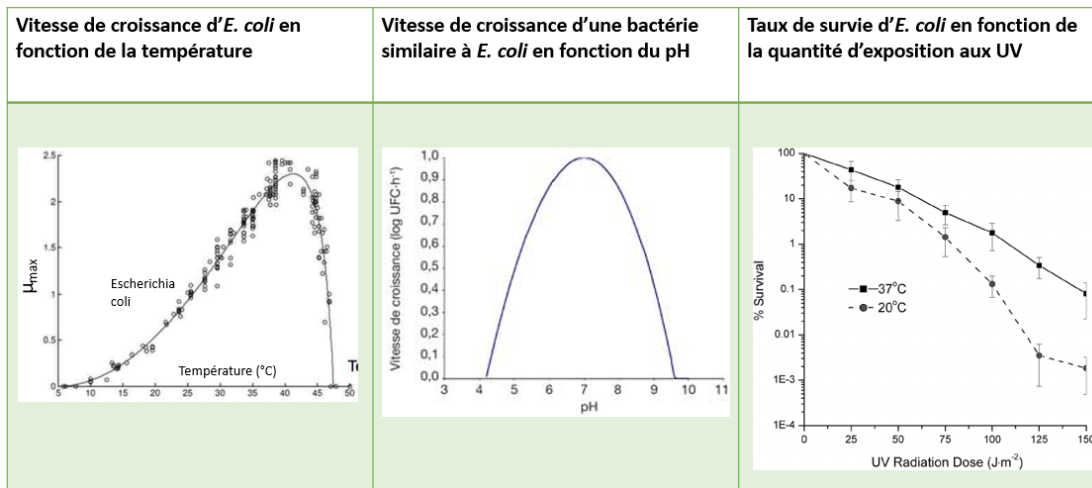


Figure 7 : Paramètres influant sur la croissance d'*E. coli*

Pour l'hygiénisation des urines, Ecosec c'est concentré sur la modification du PH des urines afin de diminuer la concentration d'*E. coli*. Un PH supérieure à 10 permet d'éliminer la totalité des bactéries présent dans la solution.

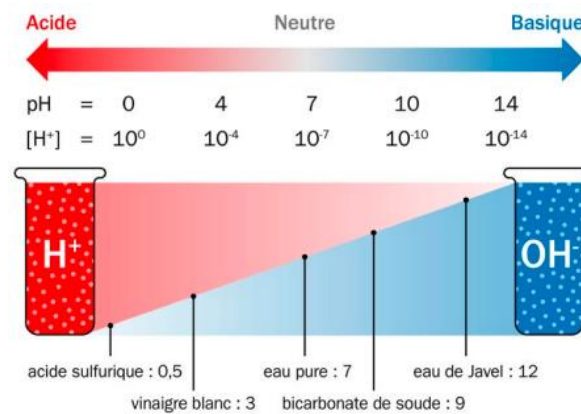


Figure 8 : Schéma de variation du PH

Premièrement lors de son stockage l'urée présent dans les urines se dégrade en ammoniac/ammonium, ce processus consomme des ions H^+ ce qui va avoir tendance à faire augmenter le PH. De plus, L'ajout de potasse (KOH) au sein des urines permet une augmentation du PH de la solution. En effet lorsque la potasse se dissout dans les urines elle est séparée en ions potassium K^+ et hydroxyde OH^- . L'élévation de la concentration en OH^- permet alors une élévation du pH de la solution et ainsi une hygiénisation des urines.

5. Les murs végétalisés

5.1. Etat de l'art

5.1.1. Typologie

La végétalisation des bâtiments peut prendre différentes formes, verticale, horizontale ou adjacente au bâtiment. Les surfaces verticales sont classées dans une grande famille nommée les murs végétalisés ou MV. Au sein de cette famille des MV la classification la plus courante établit une distinction entre les façades végétales (FV) et les murs végétaux (MuV).

Les façades végétales (FV) sont faites de plantes poussant sur un mur sans infrastructures supplémentaires (système direct), ou avec l'utilisation de treillis ou grillage comme support (système indirect) [1].



Figure 9 : Système direct



Figure 10 : Système indirect

Les murs végétaux (MuV) sont caractérisés par une végétation qui n'est pas reliée à la façade, mais qui est plutôt intégrée à l'enveloppement du bâtiment. Les systèmes continus et modulaires sont les deux technologies possibles [1].



Figure 12 : Mur végétal continue



Figure 11 : Mur végétale modulaire

5.1.2. Impact des murs végétalisés sur le bâtiment

Les avantages de l'implantation liés à la végétalisation d'un bâtiment sont diverses et variés. Si l'on se place uniquement d'un point de vue énergétique, ces systèmes peuvent réduire la consommation énergétique d'un bâtiment en été et en hiver grâce aux mécanismes suivant :

- L'ombrage produit par la végétation permettant de réduire l'apport d'énergie solaire sur le bâtiment
- Le refroidissement par évaporation obtenu par évapotranspiration des plantes et du substrat de culture
- L'isolation fournie par la végétation et le substrat ainsi que l'impact sur le vecteur vent.

Il résulte également que la température de surface intérieure de la façade avec végétation est nettement plus stable que la température de surface intérieure d'une façade sans végétation. Néanmoins les études semblent démontrer que l'inertie thermique apportée par les murs végétaux reste peu significatives, cette dernière reste très fortement liée à la structure et la composition même du bâti.

Les bénéfices d'un mur végétal en période hivernales restent discutables à ce jour, l'isolation apportée par le substrat de culture tant à diminuer l'apport d'énergie solaire sous forme de rayonnement sur la paroi [2].

5.1.3. Impact des murs végétalisés sur l'environnement

D'autres avantages sont également liés à l'implantation d'un mur végétalisé, impactant le bâtiment ainsi que son environnement tel que [2] :

- L'assainissement de l'air et de l'eau
- L'augmentation de la biodiversité dans un environnement urbain
- Amélioration de l'isolation acoustique d'un bâtiment
- Le contrôle de la pollution atmosphérique
- La lutte contre les îlots de chaleur urbains
- La gestion des eaux pluviales

Ces impacts restent encore peu quantifiés et dépendent du système mis en place mais reste néanmoins des atouts potentiels non négligeables pour les murs végétaux [2].

5.1.4. Impact sur le confort thermique

Les avantages liés au confort thermique obtenu grâce aux murs végétalisés sont avérés mais reste dur à quantifier. Plusieurs études estiment que les murs végétaux réduisent significativement la charge de refroidissement d'un bâtiment durant l'été [3]. Les variations de température entre un bâtiment équipé d'un mur végétalisé et un bâtiment sans murs végétalisés varient suivant l'orientation, le type de végétaux mis en place et leurs étapes de croissance, le type de mur végétalisé et le climat. Les variations observées dans les différents articles scientifiques varient de 1°C à 7°C en été.

Une étude expérimentale a été menée à l'Université de la Rochelle pour évaluer l'impact des façades de bâtiments végétalisées à travers une comparaison avec un bâtiment de référence sans végétation. L'étude a été menée sur un modèle à échelle réduite similaire à une scène urbaine typique, caractérisée par cinq bâtiments, durant le mois d'août [3]. Dans cette étude la végétalisation a permis de réduire la température de la surface extérieure d'environ 5°C sur une paroi orientée Ouest partiellement recouverte de lianes. Les mesures ont également démontrées que la couverture végétale réduit les pics de températures. Le mur végétal est de type modulaire, fixé sur une grille métallique qui forme une couche d'air faiblement ventilée de 5 cm, comme pour le projet Cycloasis étudié dans ce rapport néanmoins les substrats de culture sont différents.



Figure 13 : Modèle du mur végétale de l'expérimentation

La Figure 14 est composée de deux graphiques : le premier compare les mesures de la température effectuées sur la surface intérieure des deux façades orientées vers l'ouest (la façade végétalisée et la façade de référence). Le deuxième graphique compare les mesures de la température de l'air intérieur effectuées à l'intérieur des deux blocs. Les blocs étudiés font 5 cm d'épaisseur, construit en béton sans aucune isolation.

Le premier graphique démontre que les murs végétalisés installés sur la façade ouest diminuent la température de paroi intérieure jusqu'à 10°C. De plus le deuxième graphique démontre que les températures de l'air intérieur sont abaissées d'environ 5°C [3].

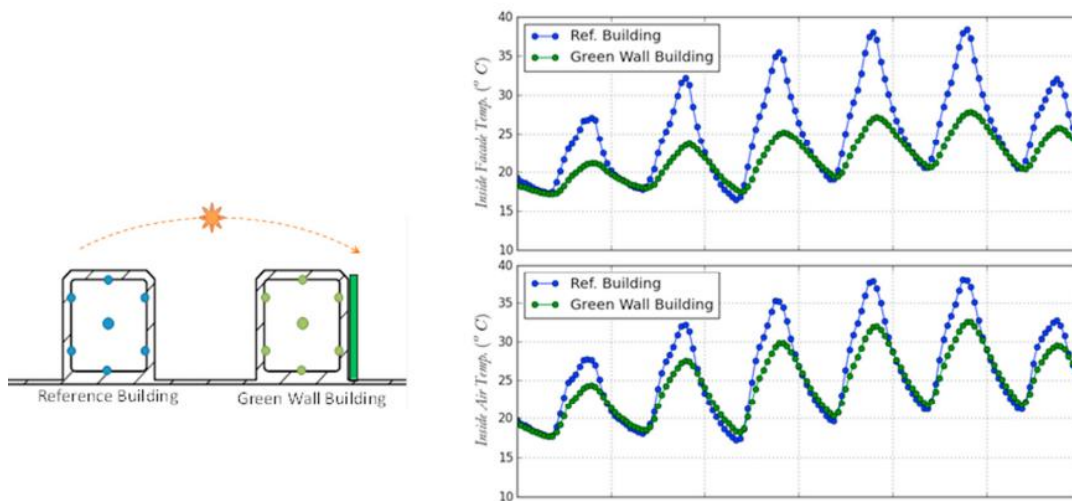


Figure 14 : Résultats de l'expérimentation

5.1.5. Le phénomène d'évapotranspiration

Ce phénomène mettant en jeu la combinaison du phénomène d'évaporation et de transpiration des plantes, représente un atout majeur pour les murs végétaux que ce soit en termes d'impact sur la température environnante du bâtiment ou sur la température de paroi.

L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide est convertie en vapeur d'eau, l'énergie apporté sous forme de rayonnement solaire permet alors de changer l'état des molécules d'eau de l'état liquide à gazeux (vapeur d'eau). Ce processus met en jeu une grande quantité d'énergie sous la forme de chaleur latente.

La transpiration consiste à vaporiser l'eau liquide contenue dans les tissus végétaux et à évacuer la vapeur dans l'atmosphère. Les cultures perdent principalement leur eau par les stomates. Ce sont de petites ouvertures sur la feuille de la plante par lesquelles passent les gaz et la vapeur d'eau. De plus, chaque type de plantes possède des taux de transpiration différents [2].

Ces deux phénomènes dépendent de multiples paramètres climatiques et physiques comme la teneur en eau du substrat, la température de l'air, la quantité de rayonnement, l'humidité relative de l'air, les conditions de vent ainsi que la capacité du substrat à conduire l'eau vers les racines. Tous ces paramètres font de ce processus un phénomène complexe à quantifier [2].

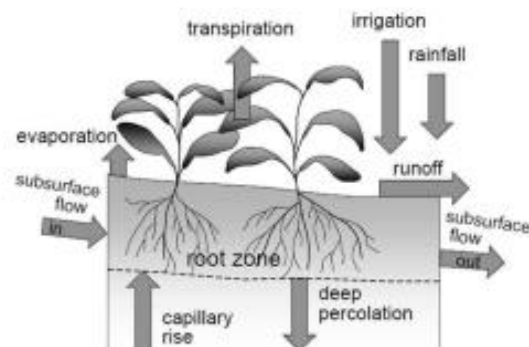


Figure 15 : Bilan hydrique du sol de la zone racinaire

5.1.6. Axes d'améliorations de la technologie

La première faiblesse de ces systèmes est le manque de connaissances, de retours d'expériences et de données techniques fiables sur chaque type de système. Ces systèmes mettant en jeu divers phénomènes, hydriques et thermiques ils restent compliqués à modéliser numériquement. Néanmoins certains modèles mathématiques sont disponibles, mais ceux-ci ne sont pas tous mis en œuvre dans les logiciels commerciaux traditionnels et ne sont pas facilement adaptables pour étudier les performances thermiques et énergétiques des murs végétalisés.

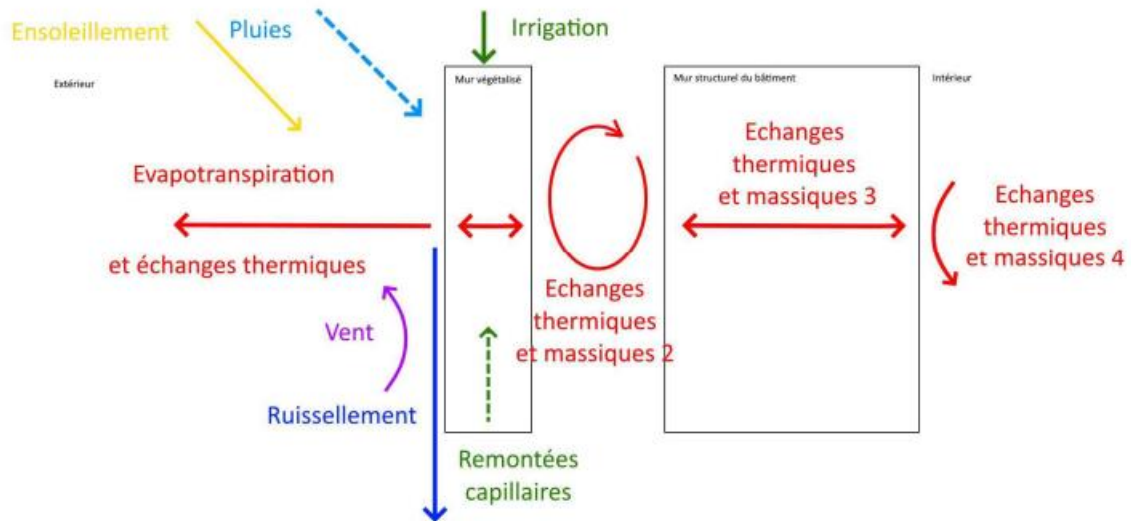


Figure 16 : Schéma simplifié des échanges dans le cadre du projet Cycloasis [2].

Un mur végétalisé peut ajouter une grande valeur environnementale mais cependant la quantification de son impact environnementale lors de la réalisation de projet reste souvent peu aboutie. Il doit respecter certaines contraintes pendant son cycle de vie pour être une solution durable, mettre en œuvre peu d'énergie lors de sa conception, utiliser un substrat local ainsi qu'adopter une bonne gestion de l'eau.

6. Etude témoin

Dans le cadre du projet Cycloasis, le bureau d'étude Surya Consultants a mis en œuvre une campagne de mesure afin de déterminer l'impact thermique du mur végétalisé réalisé par Ecosec. Le but de cette campagne de mesure était de caractériser l'impact du mur végétalisé sur l'environnement intérieur et extérieur d'un conteneur test. Pour ce faire Surya Consultants a mis en œuvre une solution de monitoring pour l'acquisition de données permettant par la suite la mesure sur des projets réels.



Figure 17 : Expérimentation mise en place sur le site de Macondo

6.1. Protocole de Surya consultants

Pour caractériser le comportement du conteneur végétalisé, il faut le comparer à une référence. Pour ce faire, un second conteneur possédant les mêmes caractéristiques mais dépourvu de mur végétalisé a été installé sur site. Les deux conteneurs ont été placés à une distance permettant de ne pas se perturber mutuellement (7,4 m en diagonale). Chaque conteneur est monitoré de la même façon et une station météo a été installée sur le site.

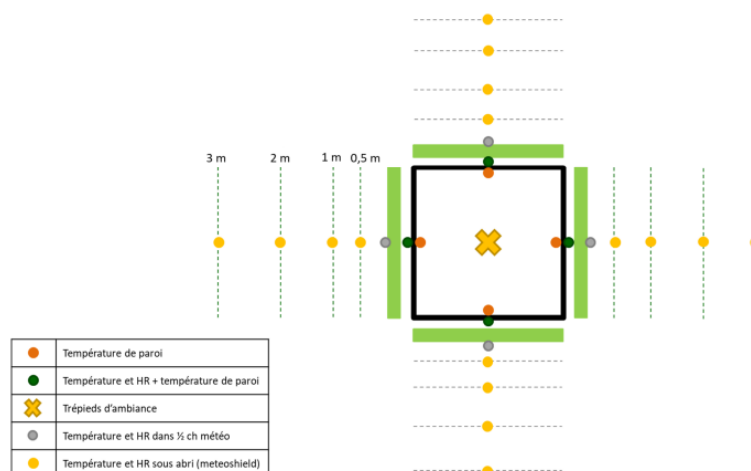


Figure 18 : Schéma de principe du conteneur avec végétalisation

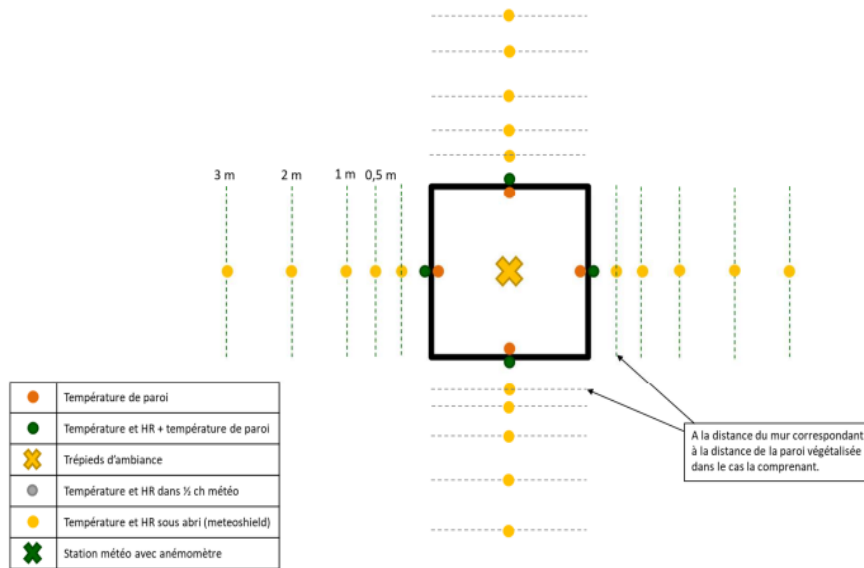


Figure 19 : Schéma de principe du conteneur sans végétalisation

L'enregistrement des données s'est étendu sur une période de 2 mois.

6.2. Points de mesure

6.2.1. Mesure sur les parois extérieures (points verts)

Variables mesurées :

- Température de paroi
- Température et humidité de l'air

Nombre :

- 5 pour chaque conteneur, 4 sur les parois verticales et un sur la toiture



a. capteur de surface côté face en contact



b. capteur de surface mise en place

Figure 20 : Capteurs sur parois extérieures

6.2.2. Mesure à l'extérieur (points jaunes)

Variables mesurées :

- Température de l'air
- Humidité de l'air

Nombre :

- 16 pour le conteneur végétalisé et 20 pour le conteneur non-végétalisé

Détails :

- Les capteurs sont installés à 0.5, 1, 2 et 3m de la paroi végétalisée et non végétalisée pour observer un champ de données.
- Pour le conteneur non végétalisé, un capteur est placé à la distance de la lame d'air situé derrière les cages du mur végétalisés.



Figure 21 : Capteurs pour l'environnement du conteneur

6.2.3. Mesure au niveau de la paroi végétalisée (points gris)

Variables mesurées :

- Température et humidité de l'air

Nombre :

- 3 pour le conteneur végétalisée

Détails :

- Capteurs situés à mi-hauteur du conteneur végétalisé



Figure 22 : Capteurs pour la paroi végétalisée

6.2.4. Mesure de l'ambiance intérieur (croix jaunes et points oranges)

Variables mesurées :

- Température et humidité de l'air ambiant
- Température du globe noir
- Température de paroi intérieure

Nombre :

- 2 (1 trépied par conteneur)
- 5 capteurs (les 4 parois verticales et 1 pour le plafond)

Détails :

- Positionnement du capteur d'ambiance sur trépied au centre du caisson

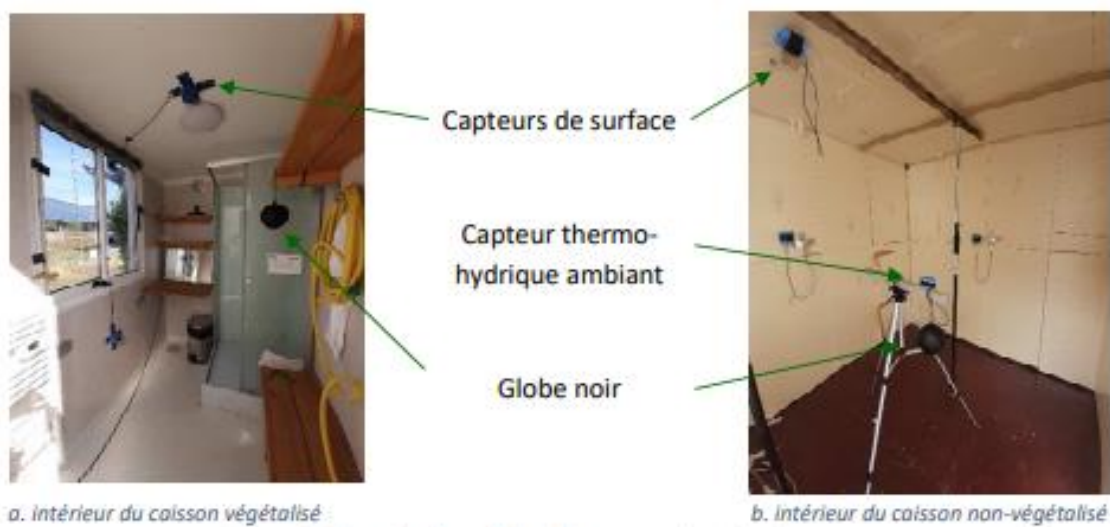


Figure 23 : Capteurs d'ambiance

6.3. Analyse des conditions thermo-hygro-métriques

Dans cette partie l'entièreté de la campagne de mesures expérimentales réalisées par Surya Consultants ne sera pas présentée. Seuls les éléments permettant de discuter de l'impact thermique de la paroi végétalisée sur l'ambiance intérieure du bâtiment seront mis en avant.

Remarque-t-on une différence de transmission de chaleur au travers de la paroi ?

La paroi étudiée sera la paroi orientée Est du conteneur car c'est cette dernière qui est la plus végétalisée.

- $T_{ext_Végé} / T_{ext_nonVégé}$: correspondent aux températures mesurées sur la paroi végétalisée et à une distance équivalente pour le caisson non-végétalisé.
- $T_{paroi_ext_Végé} / T_{paroi_ext_nonVégé}$: correspondent aux températures de surface des caissons (surface métallique).
- $T_{paroi_int_Végé} / T_{paroi_int_nonVégé}$: correspondent aux températures de surface intérieure des caissons
- $T_{amb_int_Végé} / T_{amb_int_nonVégé}$: correspondent aux températures de l'air intérieur des caissons.

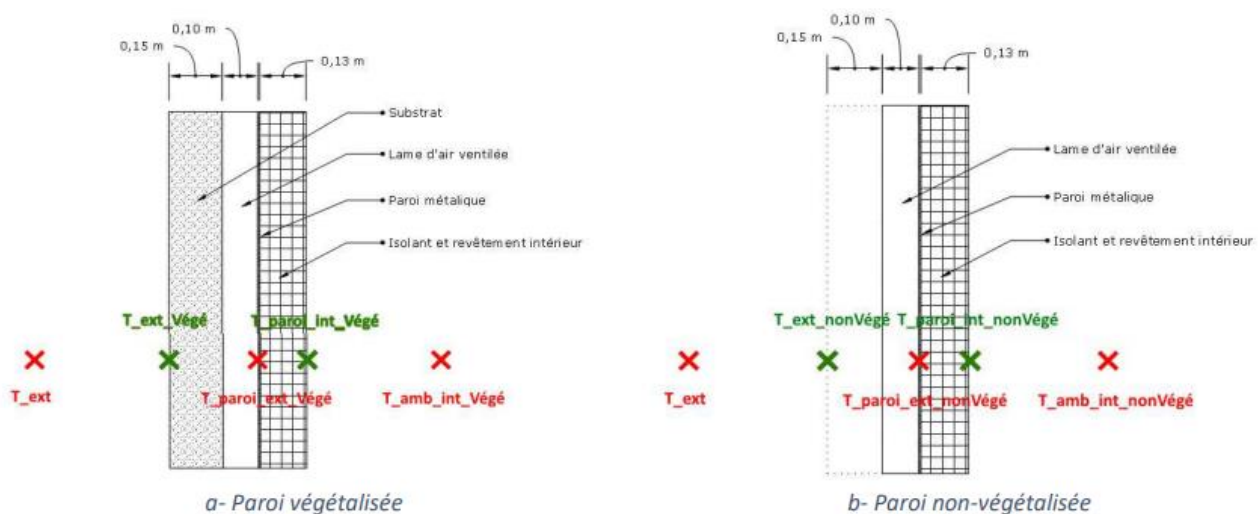


Figure 24 : Schéma comparatifs des parois des deux conteneurs

La figure 25 représente les températures de la paroi végétalisée pendant la journée la plus chaude de la campagne de mesures.

La température de la paroi extérieure du caisson végétalisé est proche de la température extérieure mesurée au niveau de la station météorologique. Le substrat permet de diminuer la température puisque la température extérieure de la paroi métallique est plus faible de 5°C en moyenne pendant la journée

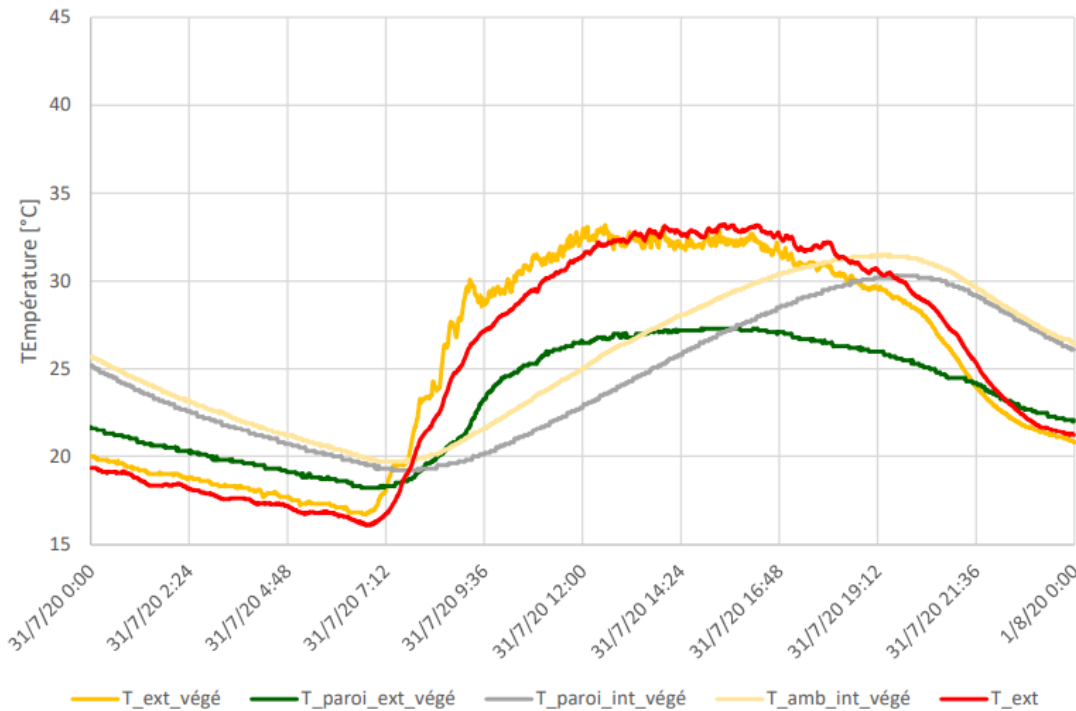


Figure 25 : Mesures des températures de paroi

La Figure 26 compare les températures au travers des parois orientées Est des conteneurs végétalisés et non-végétalisés pendant la journée la plus chaude.

Les températures extérieures sont plus élevées au niveau du conteneur non-végétalisé. Ceci est dû au rayonnement de la paroi. La paroi métallique du conteneur de référence possède une émissivité nettement supérieur au mur végétalisé. Cela a également un impact sur les températures intérieures du caisson non-végétalisé.

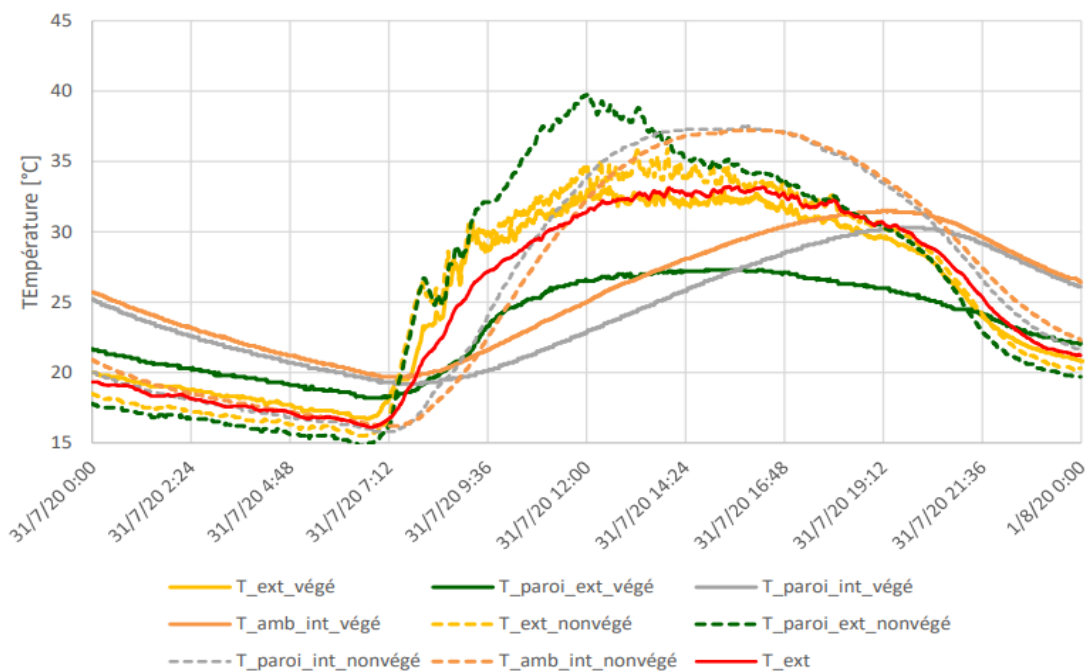


Figure 26 : Comparatifs des températures de paroi

Les Figures 25 et 26 font un focus sur l'évolution de la température respectivement de l'air intérieur et de la paroi extérieure sur la journée la plus chaude de la campagne de mesure.

On remarque un déphasage du pic de température de l'air intérieur entre le caisson végétalisé et le non végétalisé. La température maximale dans le conteneur non végétalisé est également supérieure de 8°C à celle du conteneur végétalisé.

Les températures de paroi du conteneur non végétalisé est nettement supérieure à celle du conteneur végétalisé jusqu'à 13°C de différence.

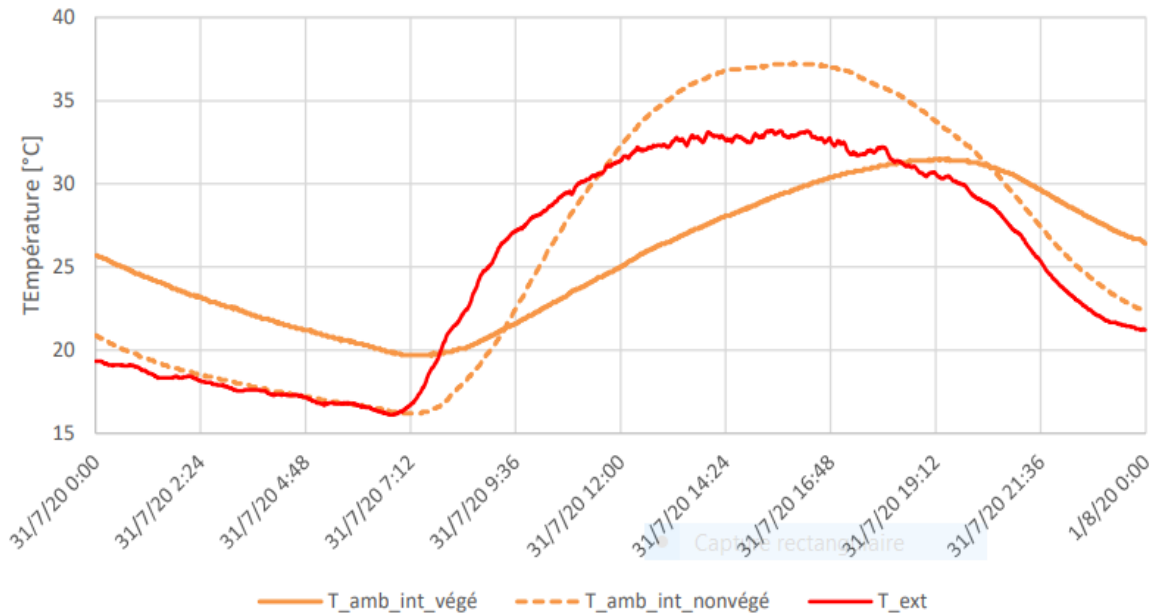


Figure 27 : Evolution de la température de l'air intérieur

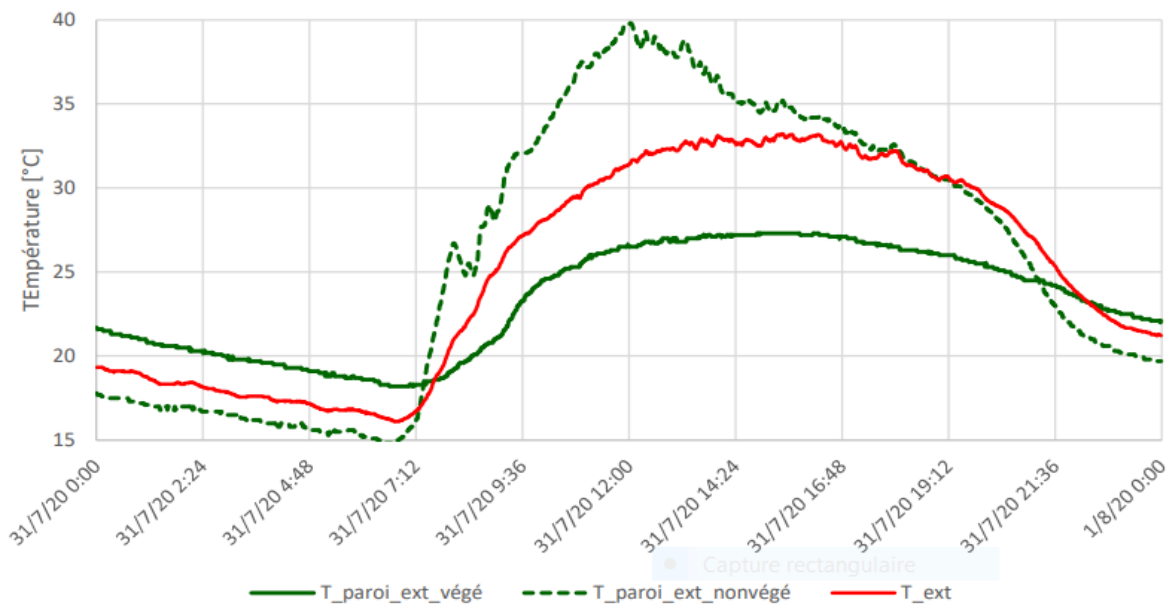


Figure 28 : Evolution de la température de paroi extérieure

Protocole de caractérisation du mur végétalisé en situation d'usage

L'analyse des températures nous montre que le substrat permet de diminuer la température de la paroi extérieure du conteneur, ceci est dû à la protection du rayonnement solaire et/ou à l'évaporation de l'eau du substrat

7. Protocole de caractérisation du mur végétalisé en situation d'usage

Le projet Cycloasis se développe actuellement dans le quartier de la Mosson, avec l'implantation d'un mur végétalisé au mois de mai sur un lieu hébergeant l'association les petits débrouillards. Ce lieu nommé l'Oasis a pour vocation d'être une recyclerie avec divers ateliers proposés sur le réemploi, la réparation de vélo ou même la sensibilisation à l'écologie.

Le bâtiment est constitué d'un bâti intégralement en bois, les montants principaux sont en Douglas, un bois des Cévennes. Le reste de la structure est constitué de bois de palettes de récupération, de plus le bâtiment n'est pas étanche et ne comporte aucune isolation. Le seul élément permettant de maintenir un confort thermique dans son enceinte est le mur végétalisé positionné sur les parois extérieures du bâtiment.

De plus afin d'assurer une circularité des flux, les eaux grises issues du bâtiment sont réutilisées pour l'irrigation du mur végétalisé. Aucun engrais n'est utilisé pour la fertilisation du substrat, ce sont des urines qui rempliront cette mission en apportant les nutriments nécessaires à la croissance des végétaux. Cela permet donc la revalorisation de deux flux, initialement traités comme des déchets.



Figure 29 : Mur végétalisé sur le site de la Mosson

Dans la continuité de l'étude réalisée par le bureau d'études Surya consultants, une campagne de mesure a été mise en place sur le site de la Mosson, afin de caractériser l'impact thermique de la paroi végétalisée sur l'ambiance du bâtiment ainsi que sur son environnement.

Ajouter à cela une étude de l'intégration du mur végétalisé dans son contexte sociale a été mis en place. Le principe était de recueillir l'avis sur cette technologie des usagers, grâce à un questionnaire afin d'établir une critique de l'intégration sociale du mur végétalisé dans son environnement. Cette étude est présentée plus en détail en annexe 2.

7.1. Protocole de mesure

7.1.1. Points de mesures

Afin de caractériser l'impact thermique des parois végétalisées sur le bâtiment différents capteurs de températures et un capteur hygrométrique ont été mis en place.

Variables mesurées :

- Température de paroi
- Humidité du substrat

Nombre :

- 4 capteurs de températures et 1 capteur d'hygrométrie

Détails :

- Les capteurs sont à positionner à mis hauteur du bâtiment

La Figure 30 présente l'emplacement des différents points de mesures :

- 1 sonde sur la face végétalisée exposée T1
- 1 sonde sur la face végétalisée non exposée T2
- 1 sonde sur la paroi bois extérieure T3
- 1 sonde sur la paroi bois intérieure T4

Une sonde supplémentaire permet également de mesurer l'humidité relative du substrat de culture.

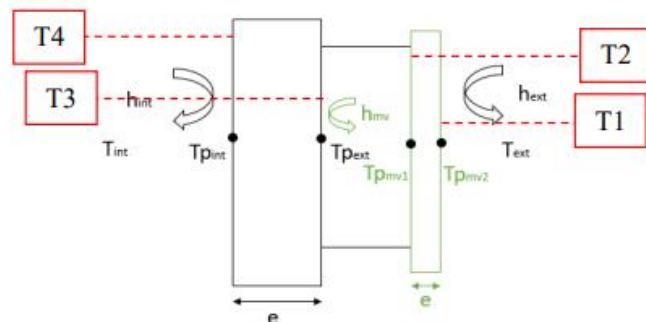


Figure 30 : Schéma des points de mesures

7.1.2. Matériel mis à disposition

1 capteur avec sondes thermocouples de type k :

- 4 entrées
- Stockage des données sur carte sd
- Taux d'échantillonnage programmable
- Résolution 0.1 °C

- Plage de mesure : -200 ~ 1370 ° C



Figure 31 : Sonde enregistreuse de données avec thermocouple de type k

1 capteur Elitech GSP-6 avec sonde de température et sonde hygrométrique :

- 1 entrée pour la température, 1 entrée pour l'hygrométrie
- Stockage de 16 000 données
- Taux d'échantillonnage programmable
- Résolution température 0.1 °C
- Résolution humidité 0.1 %
- Plage de mesure : -40 °C~85 °C



Figure 32 : Capteur Elitech

7.1.3. Limite de l'étude

Cette étude s'intéressera uniquement aux températures de surfaces. Les températures d'ambiances n'ont pas pu être relevées en simultanées avec le matériel mis à disposition. De plus aucune station météo n'a été implantée, les risques de vol ou de dégradation étaient trop important sur le lieu d'expérimentation. Cela implique qu'aucune information en temps réel n'est disponible sur la température et l'humidité de l'environnement.

De plus l'étude menée par Surya Consultants, en configuration test permet la mise en place d'un témoin. Alors que la caractérisation de l'impact du mur végétalisé menée sur le site de la Mosson est une étude où le mur végétalisé est en « situation d'usage » dans son environnement propre, ce qui ne permet pas la mise en place d'un témoin.

Il est également important de noter que la structure en palettes du bâtiment ne permet pas d'assurer une étanchéité de la structure et que le stade de développement des végétaux était très peu avancé.

7.2. Analyse des résultats de mesure

La paroi étudiée sera la paroi sud, c'est cette dernière qui est la plus exposée au rayonnement solaire mais également la plus végétalisée.

Deux campagnes de mesures ont été réalisées une du 31.05.2022 au 07.06.2022 ainsi qu'une seconde du 15.06.2022 au 21.06.2022.

7.2.1. Avant-propos

Deux notions bien distinctes, permettent d'assurer un confort thermique au sein d'un bâtiment, l'isolation et l'inertie thermique.

L'isolation a pour fonction de limiter les déperditions de chaleur et ou les apports extérieurs au sein d'un bâtiment.

L'inertie d'un bâtiment se caractérise par la capacité de stockage de chaleur de ses murs et plancher. Elle amortit les écarts de températures intérieures face aux variations climatiques extérieures. Plus l'inertie des matériaux constituant une maison ou un immeuble sera forte, plus ils se réchaufferont et se refroidiront lentement face aux variations de températures extérieures. De plus l'inertie thermique permet de créer un déphasage entre le moment de montée en température des parois et la montée en température de l'habitat.

7.2.2. Déphasage de chauffe

Pour cette analyse la journée du 01.06.2022 a été sélectionnée car cette dernière possède un ensoleillement constant.

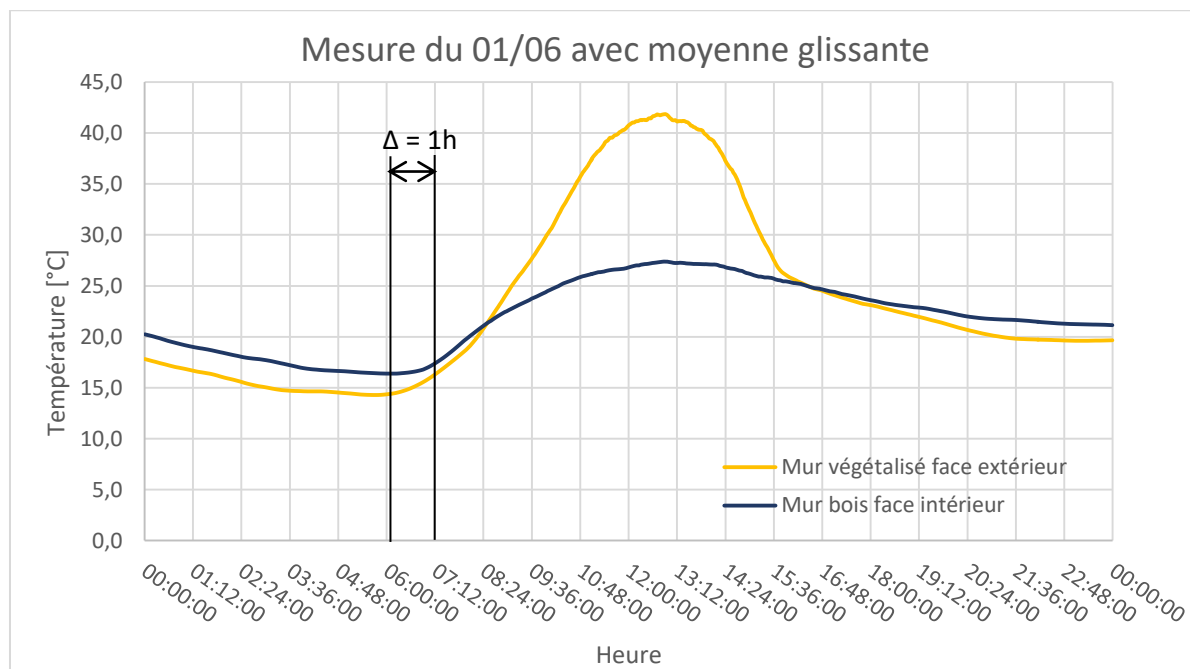


Figure 33 : Mesure des températures de parois

* Les résultats bruts sont disponibles en Annexe 1

Protocole de caractérisation du mur végétalisé en situation d'usage

Les températures au sein du bâtiment sont plus élevées que la température extérieure en début de journée et baisse moins rapidement en fin de journée. Ceci est symptomatique de la présence d'inertie.

On peut observer un léger déphasage de chauffe de 1h dans le bâtiment, l'apport d'énergie solaire sous forme de rayonnement sur les cages végétalisées est transmis au bâti environ 1h plus tard. Ce déphasage reste néanmoins assez faible dû à la discontinuité du mur végétalisé qui entraîne des ponts thermiques sur le bâtiment.

7.2.3. Isolation thermique du bâtiment

Pour argumenter l'effet d'isolation thermique du bâtiment on étudiera les températures de surface relevées grâce aux capteurs de températures. Cette analyse présente des limites car nous ne nous intéressons pas à la température d'ambiance intérieure du bâtiment.

Pour cette analyse la journée du 01.06.2022 a été sélectionnée car cette dernière possède un ensoleillement constant.

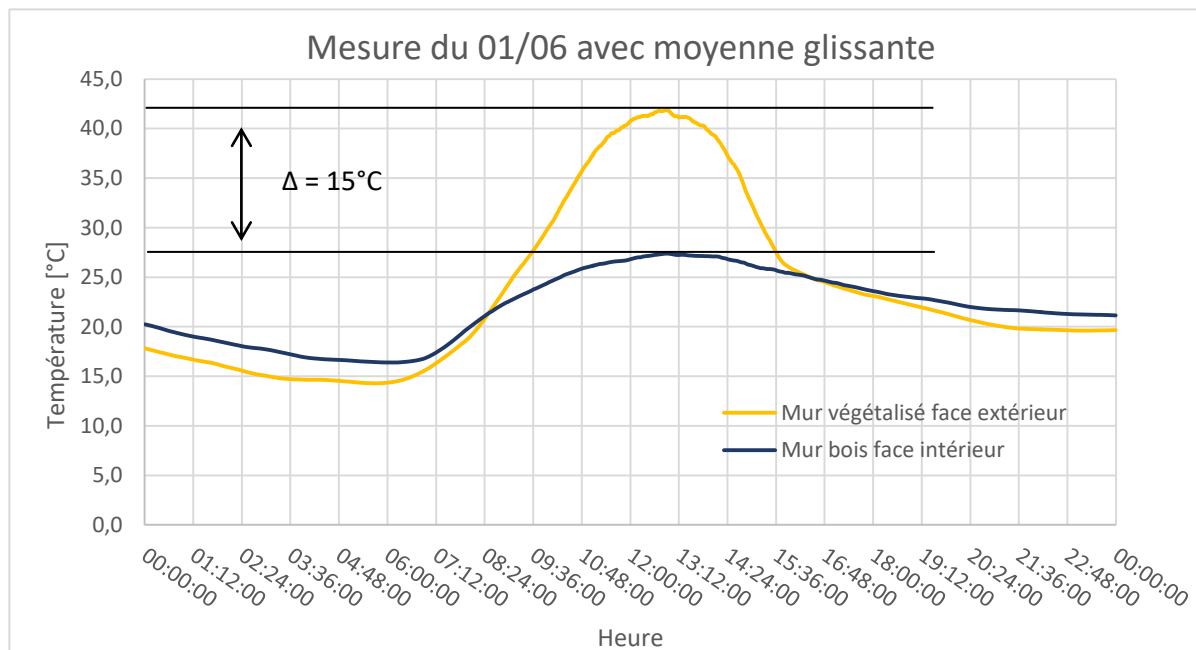


Figure 34 : Mesure des températures de parois

Les résultats bruts sont disponibles en Annexe 1.

Néanmoins on constate bien que les cages végétalisées contribuent à l'isolation du bâtiment en limitant des apports solaires. On observe sur la journée du 01/06/2022 une différence de température de 15°C entre la surface des cages végétalisées et la paroi intérieure du bâtiment.

L'effet d'isolation est dû au substrat présent dans les cages mais serait sûrement amplifié si la végétation était plus développée, permettant de diminuer la quantité de rayonnement qui atteint la paroi du bâtiment. De plus la lame d'air située entre le mur végétalisé et la paroi du bâtiment, implique un coefficient d'échange par convection. Cela contribue également au refroidissement des parois du bâtiment.

7.2.4. Inertie thermique du bâtiment

Si on analyse maintenant les données brutes, sans moyenne glissante, on peut constater une inertie thermique créée par le mur végétalisé qui va limiter les variations de températures de la paroi intérieure du bâtiment par rapport aux variations de températures extérieures. Cela va influencer sur la variabilité de courbe.

Pour cette analyse les variabilités des journées du 01.06 et 02.06 seront étudiés car elles sont représentatives de l'ensemble de la campagne de mesures du 31.05 au 07.06

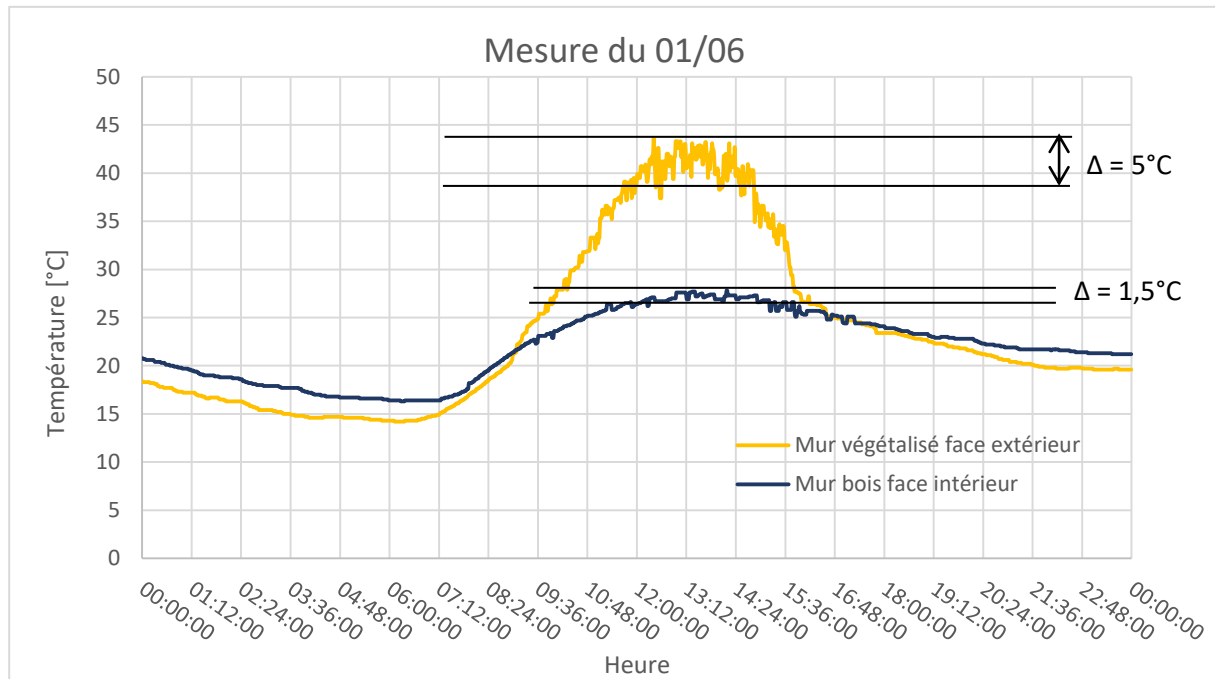


Figure 35 : Mesure des températures de parois (données brutes)

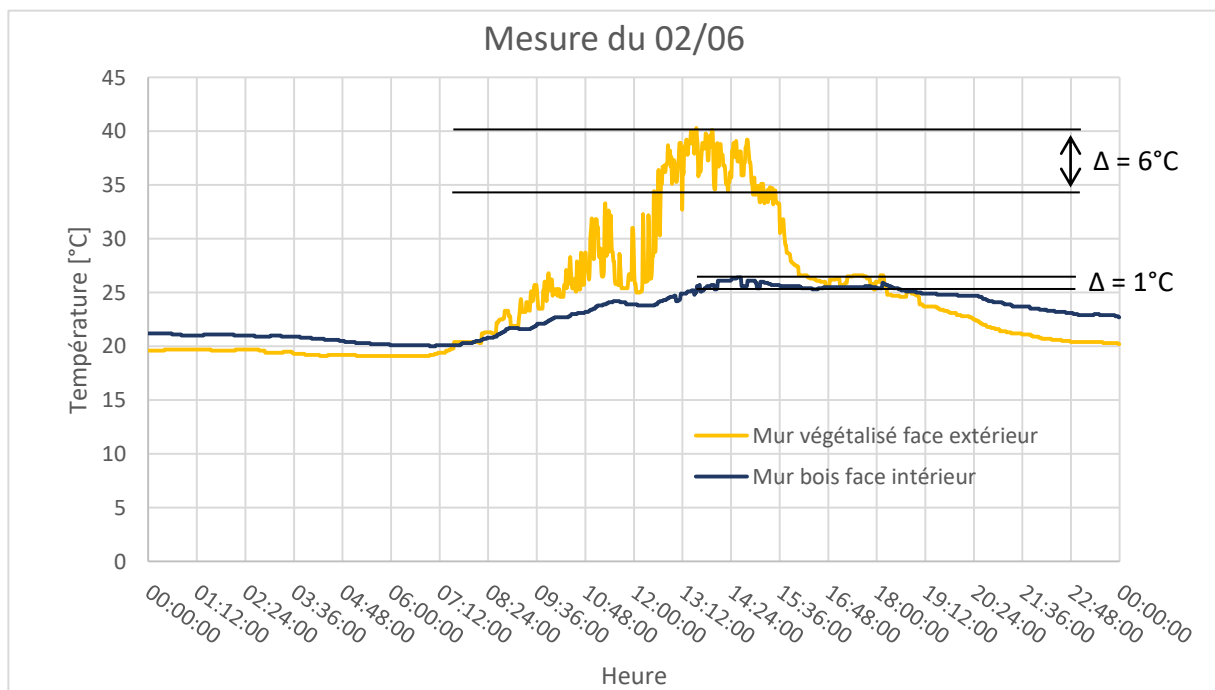


Figure 36 : Mesure des températures de parois (données brutes)

Protocole de caractérisation du mur végétalisé en situation d'usage

On observe sur ces deux journées, une différence de variabilité entre la courbe de température de la paroi végétalisée extérieure et la température de paroi intérieure, avec une amplitude de variabilité nettement inférieure pour la courbe de température de la paroi intérieure. Cet effet contribue à améliorer l'inertie thermique du bâtiment en amortissant les variations de températures intérieures par rapport aux variations climatiques extérieures.

7.2.5. Confort thermique dans le bâtiment

La RE 2020 introduit un nouvel indicateur, les degrés-heures d'inconfort (DH), pour mesurer le confort d'été dans un bâtiment. Cet indicateur vient remplacer le TIC (Température intérieure conventionnelle) de la RT2012.

Ce nouvel indicateur qui permet d'évaluer l'inconfort, le degrés-heures d'inconfort : DH qui s'exprime en °C.h. Il s'apparente à un compteur qui cumule, sur l'année, chaque degré ressenti inconfortable de chaque heure.

La RE2020 définit 2 seuils que la température intérieure au bâtiment ne doit pas dépasser pour éviter tout inconfort :

- La nuit, le seuil de température est de 26°C
- Le jour, un seuil de température adaptatif qui se situe entre 26°C et 28°C

Les DH sont la somme des degrés ressentis inconfortables de chaque heure pour chaque jour de l'année. Si ce compteur ne dépasse pas **350 °C.h**, la RE2020 juge le bâtiment confortable même en période caniculaire sans système de refroidissement complémentaire.

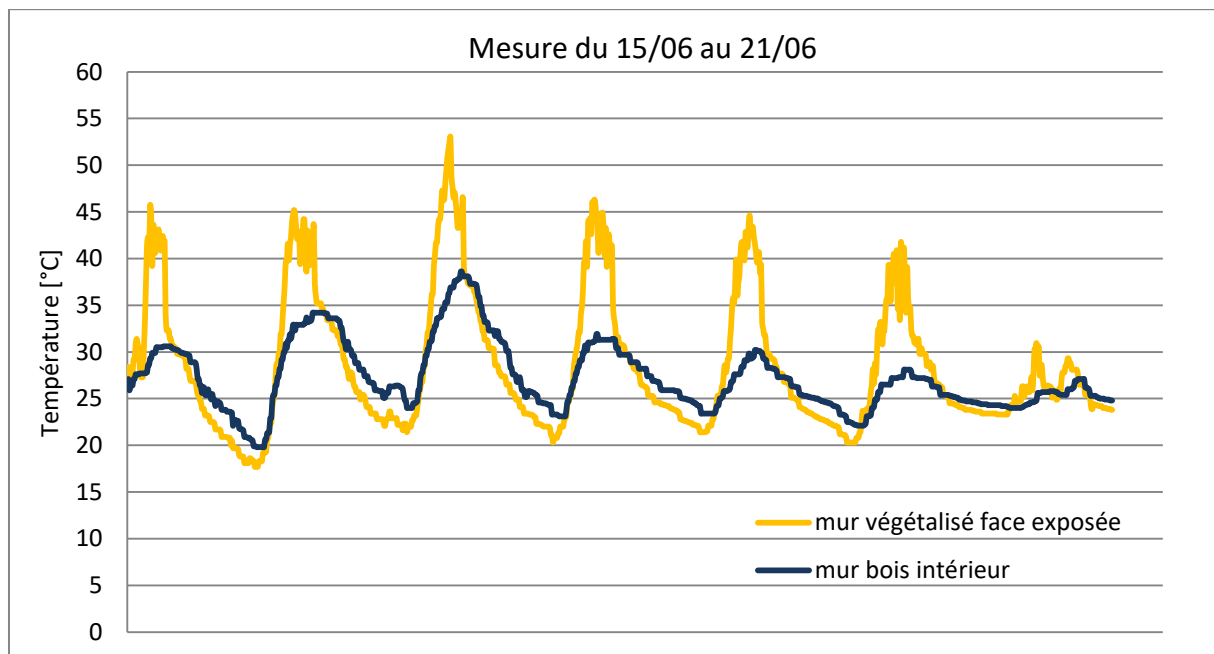


Figure 37 : Mesure sur une semaine de l'évolution des températures de parois

On constate que sur cette période la température de surface intérieure est supérieure ou égale à 30°C, 5 jours sur 6. Une projection de cette tendance sur l'intégralité du mois de juin, ajouté à cela les mois de juillet et d'août, le compteur des 350 °C.h imposé par la RE2020 sera largement dépassé.

Protocole de caractérisation du mur végétalisé en situation d'usage

Ce résultat ne remet pas en cause l'efficacité du mur végétalisé sur le confort thermique au sein du bâtiment. Toutes les conditions expérimentales optimales n'étaient pas réunies pour mettre en cause uniquement le mur végétalisé sur ces températures excessives :

- Bâtiment non étanche
- Végétalisation entre trop peu développée sur le mur végétalisé
- Aucune isolation thermique présente sur le bâtiment

7.2.6. Variation de température de la paroi végétalisé

Sur certaines journées de la campagne de mesures du 31.05 au 07.06 des variations significatives de la température de surface du mur végétalisé face exposée apparaissent en journée, notamment pour la journée du 02.06 et 03.06. Afin d'expliquer ces variations, il est judicieux d'étudier la variation de l'irradiance solaire sur le bâtiment.

A l'aide du site internet soda-pro.com un catalogue de data lié aux conditions atmosphériques est disponible. Le catalogue CAMS radiation répertorie suivant un point GPS, différentes radiations solaires comme le démontre le figure 38.

Output column content:

1. **Observation period:** beginning/end of the time period with the format "yyyy-mm-ddTHH:MM:SS.S/yyyy-mm-ddTHH:MM:SS.S"
2. **TOA:** Irradiation on horizontal plane at the top of atmosphere (Wh/m²) **computed from Solar Geometry 2**
3. **Clear sky GHI:** Clear sky global irradiation on horizontal plane at ground level (Wh/m²)
4. **Clear sky BHI:** Clear sky beam irradiation on horizontal plane at ground level (Wh/m²)
5. **Clear sky DHI:** Clear sky diffuse irradiation on horizontal plane at ground level (Wh/m²)
6. **Clear sky BNI:** Clear sky beam irradiation on mobile plane following the sun at normal incidence (Wh/m²)
7. **GHI:** Global irradiation on horizontal plane at ground level (Wh/m²)
8. **BHI:** Beam irradiation on horizontal plane at ground level (Wh/m²)
9. **DHI:** Diffuse irradiation on horizontal plane at ground level (Wh/m²)
10. **BNI:** Beam irradiation on mobile plane following the sun at normal incidence (Wh/m²)
11. **Reliability:** Proportion of reliable data in the summarization (0-1)

Figure 38 : Différentes données d'irradiance disponible sur le site soda-pro.com

L'indice GHI (Global irradiation on horizontal plan at ground level (wh/m²)) permet de relever l'irradiation solaire au niveau du sol corrigé de la couverture nuageuse. Les variations de température à la surface du mur végétalisé peuvent donc être expliquées par les conditions nuageuses diminuant le rayonnement solaire à un moment donné. Les figures 39 et 40 présentent respectivement les variations de température de la face exposée du mur végétalisé ainsi que la variation de l'irradiance solaire (GHI) pour les journées du 02/06 et 03/06.

On peut observer une corrélation entre l'allure des courbes de températures ainsi que celles d'irradiances solaires corrigées de la couverture nuageuse. Ces données d'irradiance solaire nous permettent de conclure que la couverture nuageuse est responsable de ces fortes variabilités de température au niveau de la paroi végétalisée face exposée.

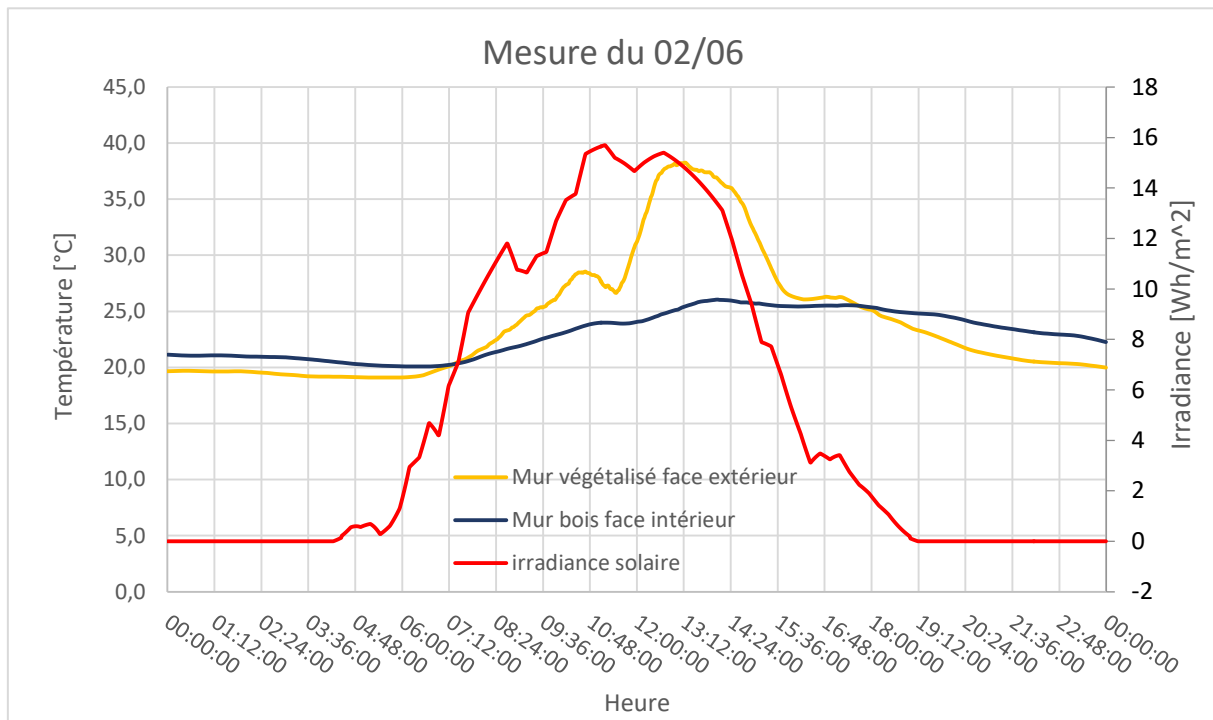


Figure 39 : Analyse de l'irradiance solaire journée du 02.06

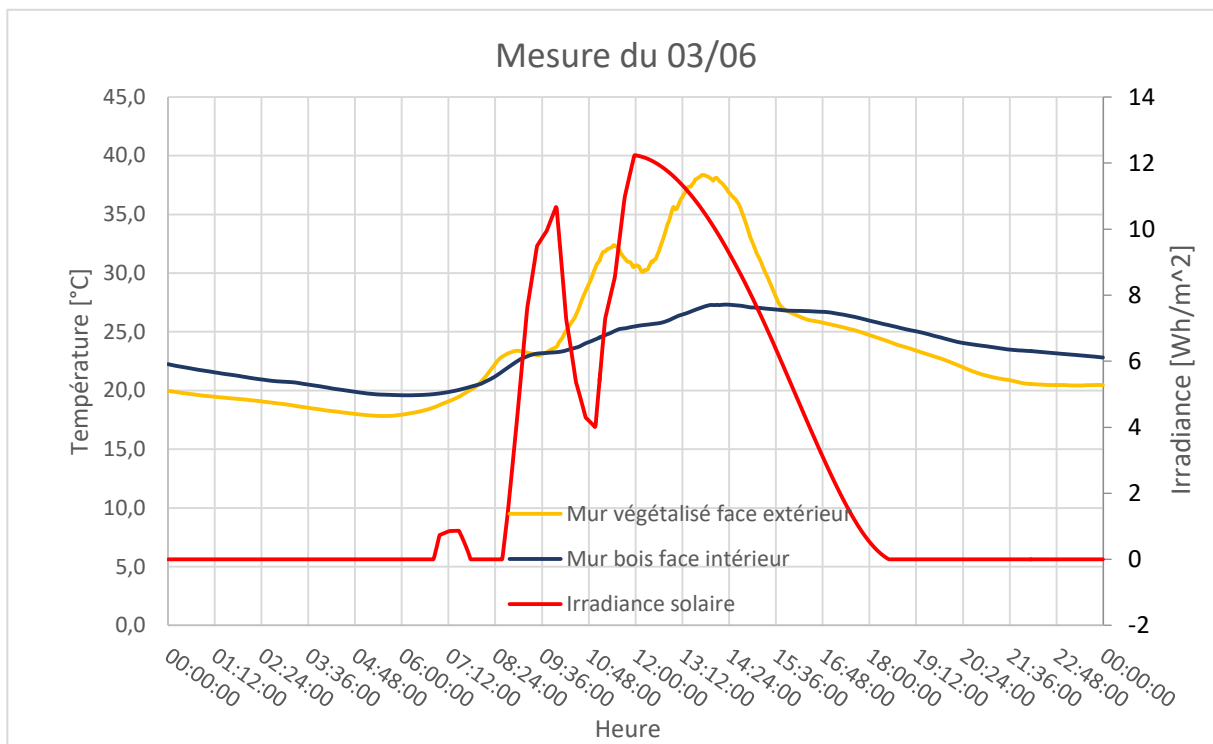


Figure 40 : Analyse de l'irradiance solaire journée du 03.06

8. Ilots de chaleur urbain

8.3. Définition

Le phénomène d'îlots de chaleur urbains est observé dans les villes densément peuplées. C'est une sorte d' " oasis inverse " où les températures de l'air sont plus élevées que dans les zones rurales environnantes. Ce phénomène fut mis en avant pour la première fois par Luke Howard lors de son étude sur le climat de Londres publié en 1818 [8].

Les villes sont caractérisées par des surfaces minérales (béton, asphalte...), qui ont une grande capacité de stockage de chaleur sans pouvoir la dissiper par évaporation comme les sols naturels composés de végétaux. Les températures de surfaces croissent alors pendant la journée, cette chaleur absorbée est alors restituée par convection à l'air environnant, entraînant le phénomène d'îlot de chaleur. Il en résulte alors que les températures urbaines de surfaces minérales dépassent couramment la température de l'air de 25 à 50 °C. De plus au cours de la nuit les surfaces urbaines continuent à restituer la chaleur emmagasinée durant la journée et réduisent le rafraîchissement nocturne [8].



Figure 41 : Image thermique du centre-ville de Baton Rouge en Louisiane prise le 11/05/1998 à 13h00 heure local par un avion équipé par la NASA. La température estimée varie entre 25°C pour la végétation et 65°C pour les toitures (Gorsevski et al., 1998)

8.4. Impact des murs végétalisés sur les îlots de chaleur

Afin de lutter contre les îlots de chaleur urbains, remplacer les surfaces minérales par de la végétation dans les espaces urbains est la solution la plus durable. Le phénomène d'évapotranspiration des végétaux permet d'évacuer de la chaleur sous forme latente aux abords du mur végétalisé et donc d'abaisser la température dans l'environnement. De plus, la plus faible

émissivité des surfaces végétales par rapport aux surfaces minérales (béton, asphalt...) permet également de diminuer la quantité de chaleur émise sous forme de rayonnement.

Afin de mettre en avant cet impact, des photos ont été prises à l'aide d'une caméra thermique sur la recyclerie présente dans le quartier de la Mosson à Montpellier, sur laquelle le mur végétalisé du projet Cycloasis a été implanté. La Figure 41 présente les photos de caméra thermique, où l'on constate la différence de température entre les parois minérales de l'immeuble et le mur végétalisé. La différence de température mesurée est d'environ 20°C. La différence de température est encore plus notable avec le sol, on constate une température plus élevée d'environ 30°C par rapport au mur végétalisé. De plus on constate une différence de température très importante entre la paroi végétalisée (environ 22°C) et la paroi bois du bâtiment non végétalisée situé sous le toit ou entre les différentes cages du mur végétalisé (environ 40°C).

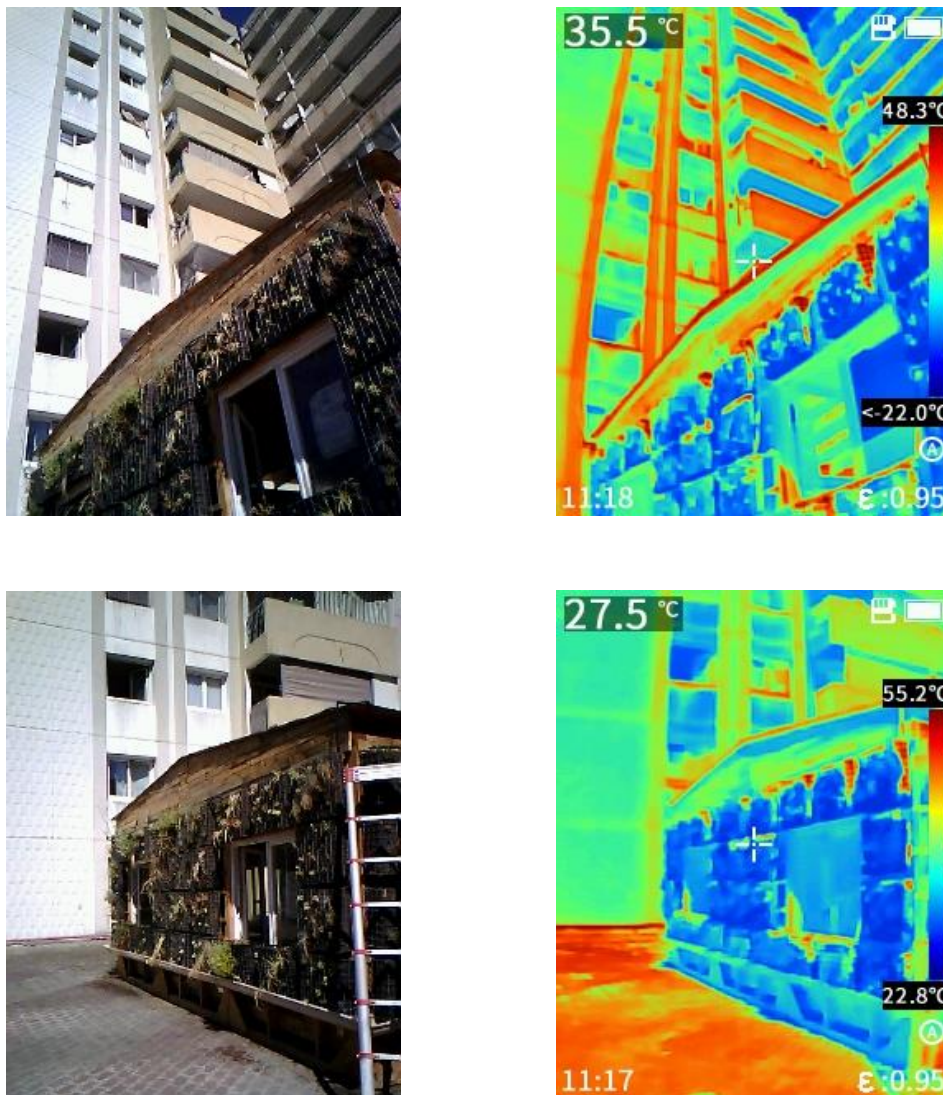


Figure 42 : Photos thermiques du mur végétalisé

En plus des avantages liés au confort thermique au sein d'un bâtiment, les murs végétalisés apparaissent comme une solution efficace et durable pour lutter contre ce phénomène d'îlot de chaleur urbain. De plus le potentiel de rafraîchissement de l'environnement du bâtiment reste encore énorme au vu de la faible densité de végétation présente sur le mur végétalisé.

9. Conclusion

L'entreprise Ecosec acteur de l'assainissement écologique, impliqué dans la construction et la location de toilettes sèches a diversifié ses activités pour développer des murs végétaux. Ce développement, autour du projet Cycloasis vise à favoriser l'implantation de murs végétaux en milieu urbain pour lutter contre les îlots de chaleur et agir comme « climatiseur naturel » pour le bâtiment. Ces murs végétaux présentent une gestion de la ressource en eau innovante et durable, les eaux grises des bâtiments sont récupérées afin d'irriguer les végétaux. De plus les urines collectées grâce aux trônes à séparation permettent la fertilisation du substrat, substrat composé de bio-déchets issus de la métropole de Montpellier. Cette technologie permet donc une revalorisation globale de multiples déchets de notre quotidien.

Le but de la mission de stage était de déterminer l'impact des murs végétalisés sur l'ambiance des bâtiments mais également sur son environnement. L'étude témoin menée par Surya Consultant a permis de mettre en avant l'efficacité de l'implantation d'un mur végétalisé sur un conteneur test. Des températures plus faible jusqu'à 8°C ont été mesurées dans le conteneur par rapport au conteneur témoin non végétalisé. En complément, l'étude menée sur la recyclerie, présente dans le quartier de la Mosson a permis de mettre en avant l'impact d'une paroi végétalisée sur un bâtiment en bois non isolé. Les mesures de températures ont permis de montrer l'isolation thermique amenée par le mur végétalisé grâce à la diminution d'apport solaire sous forme de rayonnement, sur la paroi du bâtiment. Les photos thermiques du bâtiment ont également pu mettre en valeur le potentiel des murs végétalisés pour lutter contre les îlots de chaleur urbains.

L'étude de Surya Consultants a mis en avant des températures d'ambiances intérieures plus faible jusqu'à 8°C grâce à l'implantation d'un mur végétalisé, ce qui corrèle avec la diminution de température induite par une paroi végétalisé présentée dans la littérature (1 à 7°C). Cette légère différence s'explique par la diversité de configuration possible pour chaque technologie de mur végétalisé. De plus de multiples paramètres environnementaux vont influencer sur les résultats obtenus, ne permettant pas toujours d'établir une corrélation précise avec les données présentes dans la littérature. Quant aux températures de parois intérieures du bâtiment, l'étude de Surya Consultants démontre des mesures supérieures à 30°C, alors que pour les mesures sur le site de la Mosson, les résultats sont toujours inférieurs à 30°C. Ceci est dû à la différence de matériaux des parois étudiées, une paroi métallique pour l'étude de Surya Consultants face à une paroi bois sur le site de la Mosson. Il est également important de préciser que le stade de développement de la végétation était nettement plus avancé lors de l'étude témoin de Surya Consultants. Avec une végétation plus développée, on pourrait alors voir les températures de paroi de la recyclerie diminuer et obtenir des résultats encore plus encourageants. Néanmoins il apparait nécessaire de coupler à un mur végétalisé un matériau isolant au sein d'une paroi afin de respecter le seuil de confort thermique imposé par la RE2020.

Sur le plan personnel, ce stage au sein de la SCOP Ecosec était une vraie expérience enrichissante. Son implantation sur le tiers-lieu Macondo m'a permis de découvrir de nombreux projets engagés écologiquement mais aussi de rencontrer les acteurs impliqués dans cette transition écologique. La diversité des missions entreprises mais surtout la proximité avec la réalisation des projets était pour moi les éléments qui ont permis cet épanouissement durant la période de stage.

Les enjeux actuels liés à l'utilisation de l'énergie, nous pousse à trouver des solutions durables dans le but d'optimiser son utilisation. Gros consommateur d'énergie et producteur de gaz à effet de serre, le secteur du bâtiment offre un énorme potentiel pour répondre aux objectifs de transition énergétique. Le secteur du bâtiment qui représente 40 % de la consommation d'énergie finale en France doit être moteur de cette transition énergétique. Les murs végétalisés apparaissent comme des solutions efficaces, innovantes et durables dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Ajouter à cela les multiples bénéfices sur l'environnement avec notamment la création d'îlots de fraîcheur en milieu urbain, les murs végétalisés devraient de plus en plus faire partie de notre paysage urbain.

10. Table des illustrations

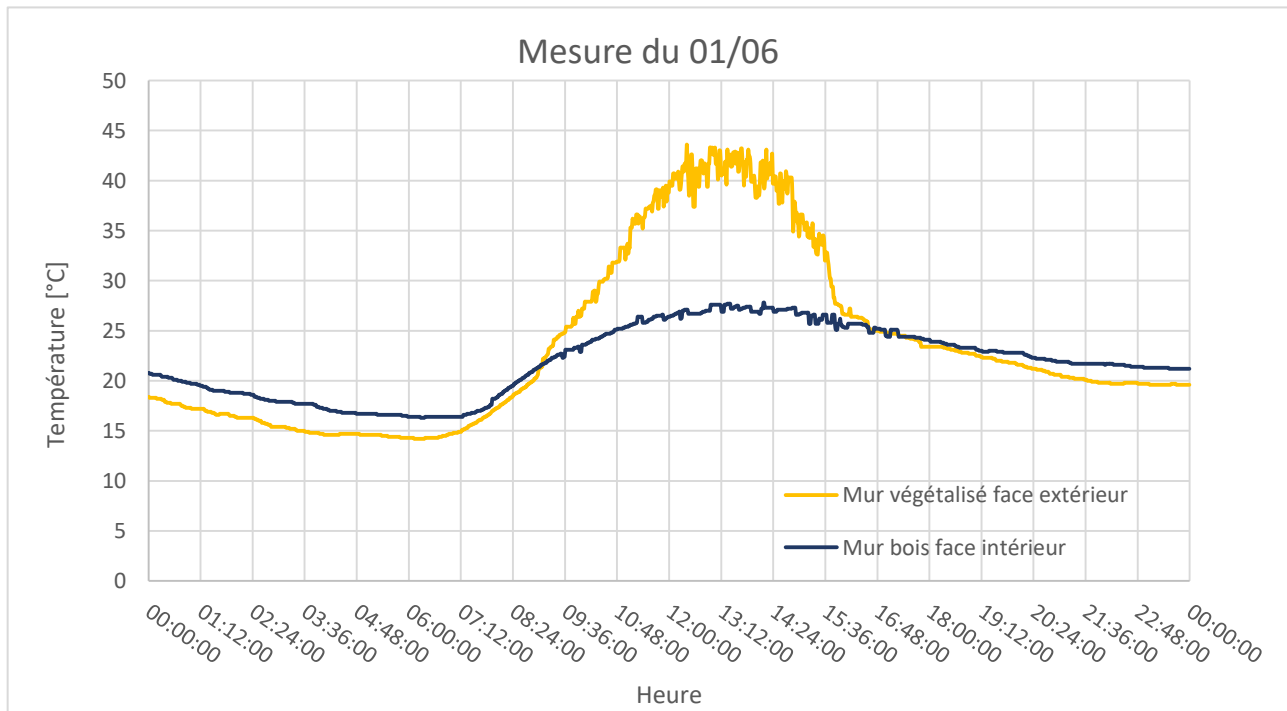
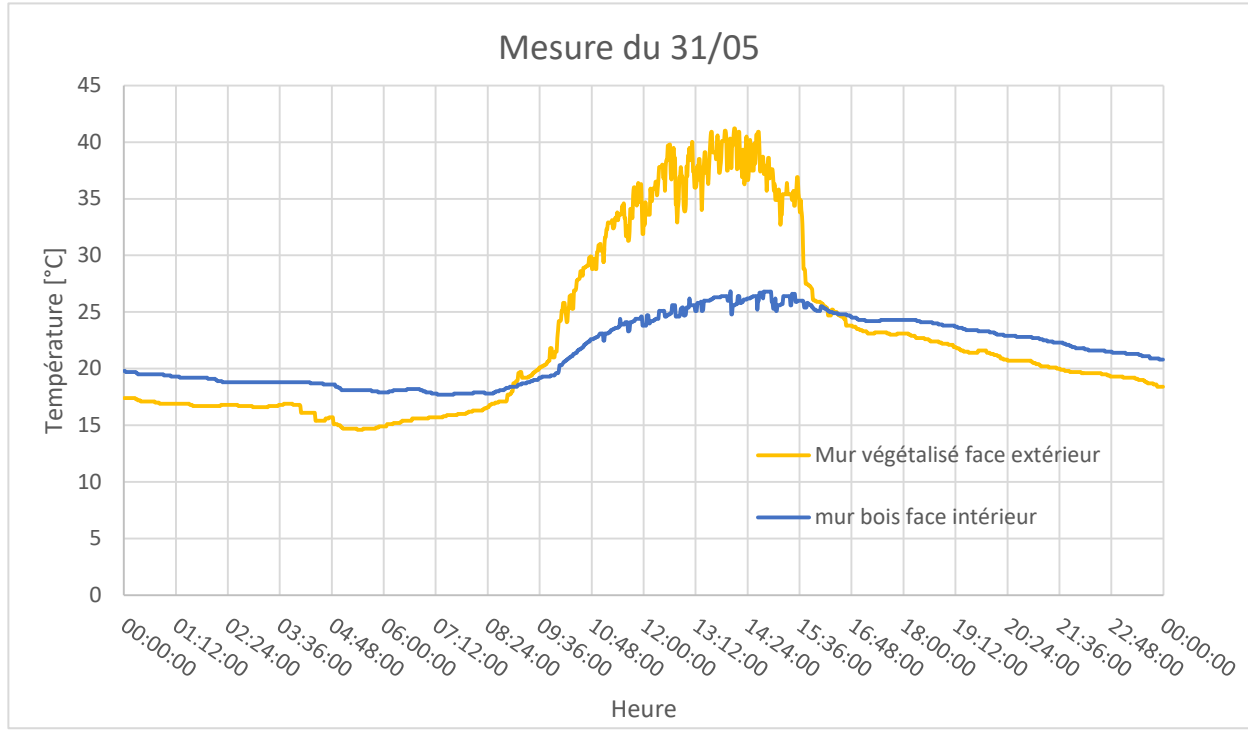
Figure 1 : Répartitions des espaces sur le site de Macondo	2
Figure 2 : Logo école de l'Etre	2
Figure 3 : Tiny House construite par les zuts.....	3
Figure 4 : Modèle de la remorque PICA développé par Ecosec	3
Figure 5 : Composteur développé par Divesterram	4
Figure 6 : Principe de fonctionnement du projet Cycloasis	5
Figure 7 : Paramètres influant sur la croissance d'E. coli	7
Figure 8 : Schéma de variation du PH.....	7
Figure 9 : Système direct	8
Figure 10 : Système indirect	8
Figure 11 : Mur végétale modulaire	8
Figure 12 : Mur végétal continue	8
Figure 13 : Modèle du mur végétale de l'expérimentation	10
Figure 14 : Résultats de l'expérimentation	10
Figure 15 : Bilan hydrique du sol de la zone racinaire.....	11
Figure 16 : Schéma simplifié des échanges dans le cadre du projet Cycloasis [2].	12
Figure 17 : Expérimentation mise en place sur le site de Macondo	13
Figure 18 : Schéma de principe du conteneur avec végétalisation.....	13
Figure 19 : Schéma de principe du conteneur sans végétalisation	14
Figure 20 : Capteurs sur parois extérieures	14
Figure 21 : Capteurs pour l'environnement du conteneur	15
Figure 22 : Capteurs pour la paroi végétalisée.....	16
Figure 23 : Capteurs d'ambiance	16
Figure 24 : Schéma comparatifs des parois des deux conteneurs	17
Figure 25 : Mesures des températures de paroi	18
Figure 26 : Comparatifs des températures de paroi	18
Figure 27 : Evolution de la température de l'air intérieur.....	19
Figure 28 : Evolution de la température de paroi extérieur	19
Figure 29 : Mur végétalisé sur le site de la Mosson	20
Figure 30 : Schéma des points de mesures	21
Figure 31 : Sonde enregistreuse de données avec thermocouple de type k	22
Figure 32 : Capteur Elitech	22
Figure 33 : Mesure des températures de parois	23
Figure 34 : Mesure des températures de parois	24
Figure 35 : Mesure des températures de parois (données brut)	25
Figure 36 : Mesure des températures de parois (données brut)	25
Figure 37 : Mesure sur une semaine de l'évolution des températures de parois	26
Figure 38 : Différentes données d'irradiance disponible sur le site soda-pro.com	27
Figure 39 : Analyse de l'irradiance solaire journée du 02.06	28
Figure 40 : Analyse de l'irradiance solaire journée du 03.06	28
Figure 42 : Image thermique du centre-ville de Baton Rouge en Louisiane prise le 11/05/1998 à 13h00 heure local par un avion équipé par la NASA. La température estimée varie entre 25°C pour la végétation et 65°C pour les toitures (Gorsevski et al., 1998)	29

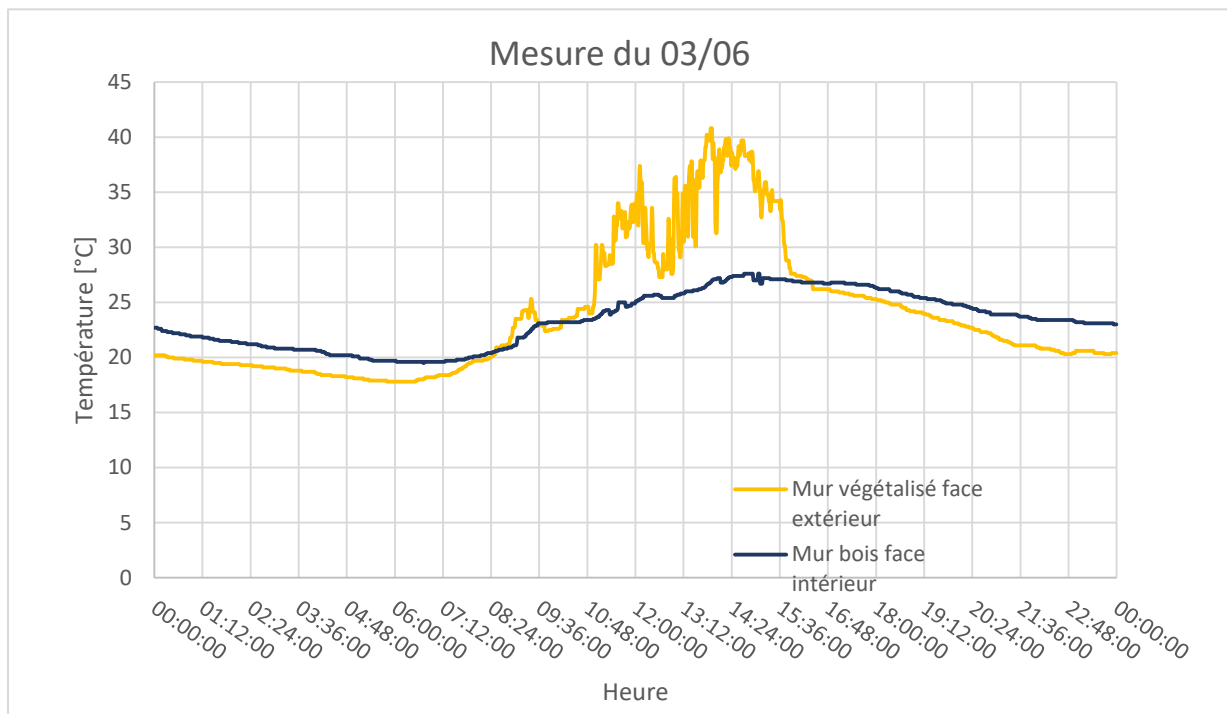
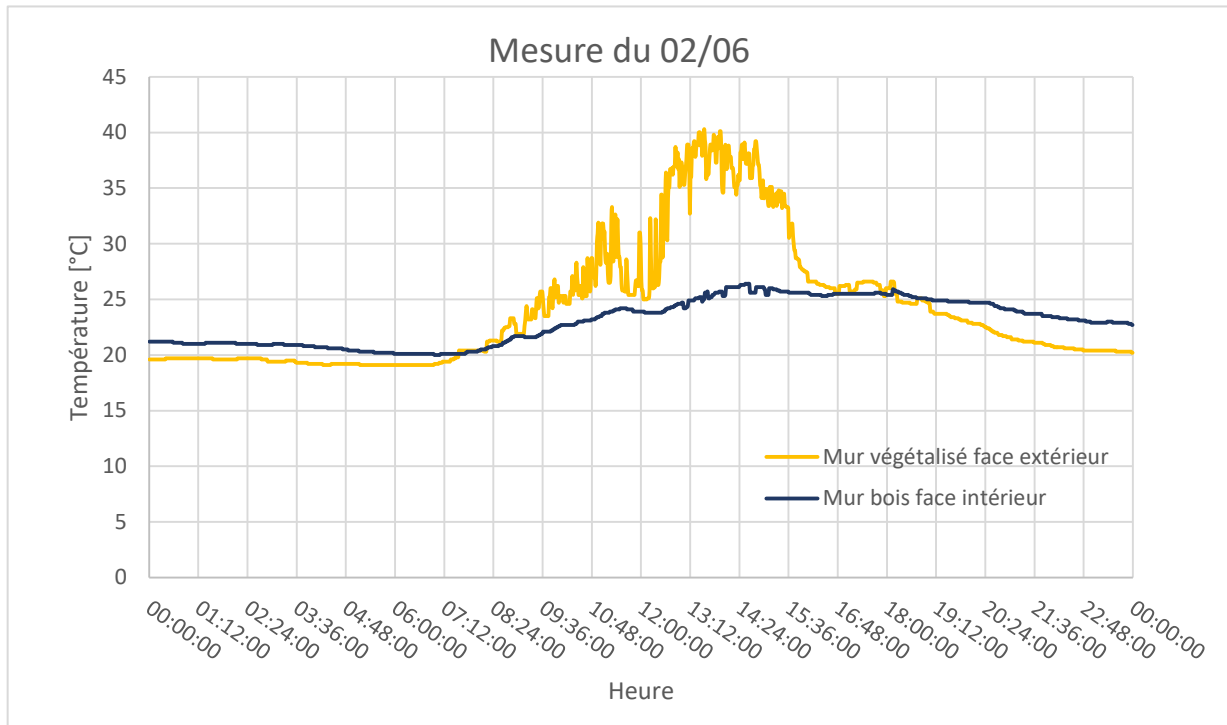
Figure 43 : Photos thermiques du mur végétalisé 30

11. Bibliographie

- [1] M. Manson et J. Castro-Gomes, « Green wall systems: A review of their characteristics »,
- [2] Rapport surya consultants, projet Cycloasis
- [3] Rabah Djedjig, Rafik Belarbi et Emmanuel Bozonnet, « Green wall impacts inside and outside buildings: experimental study » Mai 2015,
- [4] Martin, T. (2017). *Valorisation des urines humaines comme source d'azote pour les plantes : expérimentations en serre*. INRA, leesu.
- [5] Hampel, Andrea, Ralf Hetzel, et Georgios Maniatis. 2015. « Comment on “Stress and fault parameters affecting fault slip magnitude and activation time during a glacial cycle” by Steffen et al. » *TECTONICS* 34 (6): 1348-53. <https://doi.org/10.1002/2014TC003772>.
- [6] ocsolutionsassainissement. (2020, janvier 23). *Assainissement collectif et non collectif dans le 34*. Récupéré sur OC solutions assainissement: <https://www.oc-solutions-assainissement.com/assainissement-eau/assainissement-collectif-et-assainissement-non-collectif-dans-le-34/2020/01/1654/>
- [7] Dana Cordell, Jan-Olof Drangert, Stuart White. (2009). The story of phosphorus : Global food security and foof for thought. *Global Environmental Change*, vol.19, n°2, p 292-305.
- [8] Rabah Djedjig, “Impacts des enveloppes végétales à l’interface bâtiment microclimat urbain”, Récupéré sur: tel.archives-ouvertes.fr

Annexe 1 : Résultats des mesures de température de paroi sur le site de la Mosson





Annexe 2 : Etude techno-critique et sociologique du mur végétalisé

Sur demande de l'équipe pédagogique encadrante une étude techno-critique devait être menée sur le mur végétalisé en place sur le site de la Mosson. La techno-critique est un courant de pensée axé sur la critique du progrès technique. Une étude de la sorte permet d'évaluer comment une technologie s'intègre dans son environnement en réponse à un besoin précis.

Les technologies « low-tech », comme ce mur végétalisé résulte de réflexion sur le progrès technique, où le questionnement de l'utilisation de ressources pour mettre en place un système est central. Ces technologies utiles, durables et accessibles centralisent la remise en question du progrès technique afin de répondre à un besoin avec la plus grande sobriété possible.

Afin d'évaluer comment la technologie du mur végétalisé s'intègre dans son environnement de manière systémique un questionnaire a été rédigé permettant de recenser la perception des utilisateurs de lieu associatif au sujet de cette technologie. La démarche entreprise est alors de l'ordre sociologique dans le but d'établir la position de cette technologie dans son milieu d'utilisateur.

Confronté à des difficultés de communication, notamment lié à la barrière de la langue où dans un quartier populaire, comme celui de la Paillade situé à la Mosson, peu d'habitant sont doté d'un bon niveau de français l'étude n'a pas pu aboutir. Les quelques avis recueillis sont incomplets et ne permettent pas de ressortir une conclusion représentative de l'ensemble d'un groupe d'utilisateur.

Le questionnaire rédigé pour cette étude est présenté à la page suivante.

Dans le cadre de mon stage de master, au sein de l'entreprise Ecosec, constructeur de l'oasis et en charge de l'installation du mur végétalisé, je mène une étude sociologique pour obtenir votre avis sur le mur végétalisé en place dans le quartier de la Paillade.

Information générale *Ce questionnaire est anonyme*

Tranche d'âge : 15-25 25-35 35-45 45-55 55-65 65-75 (Entourez la bonne réponse)

Homme ou femme (Entourez la bonne réponse)

Dans quel quartier vivez-vous ? :

Etes-vous déjà venu à l'Oasis ? :

Question en lien avec les murs végétalisés (Entourez la bonne réponse)

Aviez-vous déjà vu des murs végétalisés ? Pas du tout / Plutôt non / neutre / plutôt oui / Tout à fait

Pensez-vous que les murs végétalisés peuvent apporter des bénéfices ? Oui / Non

Si oui, lesquels ?

Trouvez-vous que les murs végétaux sont esthétiques ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Pensez-vous qu'un mur végétal puisse rafraîchir l'environnement proche de votre habitation ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Pensez-vous qu'un mur végétal puisse rafraîchir l'intérieure de votre habitation ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Pensez-vous que les murs végétaux puissent augmenter la biodiversité en milieu urbain ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Pensez-vous que les murs végétaux puissent améliorer les liens sociaux entre les habitants d'un quartier ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Pensez-vous qu'un mur végétal est un système écologiquement durable ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Si non, pourquoi ?

Aimeriez-vous avoir des murs végétaux sur votre habitation ?

Pas du tout Plutôt non neutre plutôt oui Tout à fait

Si non, pourquoi ?

Est-ce qu'il y a des choses sur les murs végétalisés qui vous font hésiter / les choses qui pourraient être négatifs ? Lesquelles ?

Est-ce que vous avez des commentaires sur ce mur végétalisé (l'Oasis à la Paillade) ?