



HAL
open science

Expérimentation d'une toiture terrasse végétalisée (TTV) à Mines Saint-Etienne

Eric Piatyszek

► **To cite this version:**

Eric Piatyszek. Expérimentation d'une toiture terrasse végétalisée (TTV) à Mines Saint-Etienne. Mines Saint-Etienne. 2023, 48p. emse-04314421

HAL Id: emse-04314421

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-04314421>

Submitted on 30 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



"Expérimentation d'une toiture terrasse végétalisée (TTV) à Mines Saint-Etienne"

Piatyszek E.

Juin 2023



Table des matières

1.	Contexte – thème traité	3
2.	Présentation du dispositif	4
2.1	Toiture terrasse végétalisée et Jardin de Pluie urbain	4
2.1.1	La Toiture Terrasse Végétalisée (TTV)	4
2.1.2	Le Jardin de Pluie urbain (JPU)	5
2.1.3	Difficultés rencontrées	6
2.2	Instrumentation.....	7
2.2.1	Présentation	7
2.2.2	Difficulté rencontrées.....	8
2.2.3	Solution envisagée.....	9
3.	Performance hydrique de la TTV sur une année	10
3.1	Analyses des relevés.....	10
3.1.1	Pluviométrie	10
3.1.2	Niveau d'eau dans les alvéoles.....	12
3.1.3	Humidité du substrat.....	14
3.2	Calcul de la performance hydrique	16
3.2.1	Méthode de calcul.....	16
3.2.2	Résultats.	16
4.	Premières tentatives de Modélisation de la TTV et du JPU	17
4.1	Etat de l'art succinct de la modélisation des TTV.....	17
4.2	Modèle Faveur du CEREMA (CEREMA, 2019).....	19
4.2.1	Présentation du modèle	19
4.2.2	Adaptation au cas du dispositif l'Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE)	21
4.2.3	Tentative de détermination du paramètre « K » du modèle Faveur.	25
4.2.4	Premier essai de comparaison Modèle et Mesure Piézo	26
5.	Conclusion	27
	Annexe 1 : Protocole de séchage ADEME (Réf. : 010367-16)	29
	Annexe 2 : Analyse de la variabilité spatiale sur la mesure d'humidité du substrat	31
	Annexe 3 : AGROVE : note Technique sur le retard d'instrumentation de la TTV EMSE 2022	40
	Annexe 4 : Exemple d'analyse de la réponse hydrique de la TTV de Saint-Etienne et estimation de Ksaison.....	41
	Bibliographie.....	46

1. Contexte – thème traité

Les grandes villes doivent faire face de plus en plus aux aléas du changement climatique.

D'une part, les vagues de chaleurs vont devenir de plus en plus fréquentes, longues et intenses, générant de plus en plus d'îlots de chaleur urbains.

D'autre part, l'augmentation de la fréquence, de l'intensité des pluies vont également accroître le risque inondation en ville.

Rendre les villes plus résilientes aux pics de chaleur et aux inondations implique notamment de faire évoluer les pratiques architecturales et nécessite de repenser le rôle de l'eau et de la végétation en ville. En effet, la végétation peut permettre de réduire le ruissellement urbain et son effet rafraîchissant est désormais recherché dans les villes où les îlots de chaleur sont de plus en plus présents.

Dans ce cadre, les toitures terrasses végétalisées (TTV), les Jardins de Pluies Urbains¹ (JPU) par leur capacité à stocker in situ une partie des eaux de pluie, et d'évapotranspirer par les plantes qui les composent permettent à la fois d'atténuer l'impact des pluies sur le ruissellement urbain mais aussi de contribuer au rafraîchissement local urbain.

L'École des Mines de Saint-Etienne profite de la construction d'une nouvelle chaufferie pour mettre en place une toiture terrasse végétalisée (TTV) avec stockage de 10 cm (surverse à 8 cm), substrat de 27 cm recouvert de végétation.

Cette solution innovante, a déjà été testée dans le cadre d'une étude du CEREMA financée par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB) sur une toiture d'école à Orléans (CEREMA, 2019). Les résultats sur deux ans accompagnés d'une simulation montrent un abattement annuel de 70% des eaux de pluie contrairement aux 50% d'une TTV traditionnelle. L'objectif du zéro rejet visé n'est donc pas atteint. Pour continuer cette étude et tendre au zéro rejet l'idée est d'adjoindre à la TTV, un Jardin de Pluie Urbain (JPU) qui va gérer l'excédent en évapotranspiration mais également en abattement de la pluie trentennale demandé par l'agglomération de Saint Étienne.

L'étude consiste à évaluer l'impact de ce type de dispositif sur la gestion des eaux pluviales et vérifier sa capacité à atteindre l'objectif de zéro rejet à la parcelle. Cette évaluation de performance fait l'objet d'un contrat financé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne – contrat qui regroupe Source Urbaine, Mines Saint-Etienne et la société Agrove.

Ce document regroupe trois parties :

- Présentation du dispositif,
- Suivi de la performance sur une année,
- Modélisation du dispositif.

¹ Le JPU est un stockage de grand volume surmonté d'un substrat planté qui permet de récupérer les eaux pluviales provenant par exemple d'une toiture, d'une chaussée. C'est une innovation brevetée de la société AS2C, il est aujourd'hui commercialisé par la start-up Source Urbaine



Figure 2 : Photo montrant la zone 1 de la TTV (photo prise début juin 2022)

Les zones 1 et 2 sont constituées d'un substrat d'épaisseur 27 cm, reposant sur un réservoir alvéolaire de hauteur 10 cm (

Figure 3 : Coupe de la TTV sur les zones 1 et 2 (source SUPER)

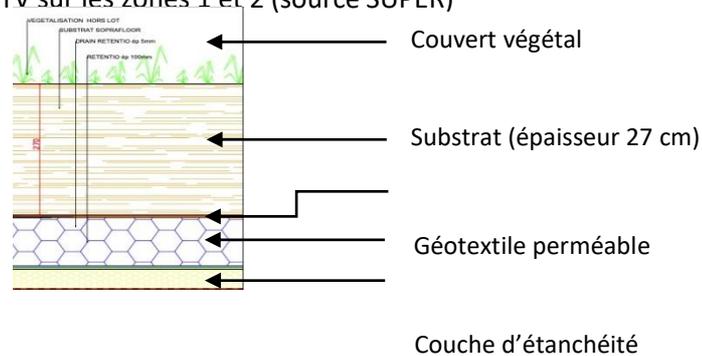


Figure 3 : Coupe de la TTV sur les zones 1 et 2 (source SUPER)

En outre, deux îlots centraux sont présents dans les zones 1 et 2 entourés d'une couche de gravillons posés sur le géotextile. L'eau peut donc s'infiltrer dans le réservoir à travers les graviers. Les zones 1 et 2 sont entourées de dalles posées sur des plots. Les pluies tombant sur ces dalles peuvent directement s'infiltrer entre les dalles vers le réservoir. L'eau en surplus dans le réservoir peut s'écouler par trop-plein vers le JPU par une surverse circulaire située à une hauteur de 8 cm de haut.

2.1.2 Le Jardin de Pluie urbain (JPU)

Le JPU (Figure 4 : Photo du JPU de l'EMSE) présente un fonctionnement très similaire mais est plus complexe dans sa constitution. Celui-ci collecte les eaux de pluies précipitant sur sa surface, ainsi que les eaux en provenance de la surverse de la TTV. Cette surverse alimente un diffuseur qui dirige ensuite l'eau dans le JPU par le biais de deux drains. Ce jardin de pluie est recouvert d'un substrat dont l'épaisseur varie entre 27 et 65 cm (Figure 5 : Vue en coupe et vue du dessus du JPU (Source : Source Urbaine)). Ce substrat recouvre deux compartiments :

- un bac étanche d'une surface de 1,54 m² de hauteur 26 cm d'alvéoles en nid d'abeilles. Ce bac est complètement étanche et peut se déverser par trop-plein vers le second compartiment. Ce bac se remplit à travers la pluie et par un des drains du diffuseur.
- un second compartiment couvrant l'ensemble du JPU excepté la partie occupée par le diffuseur. Ce compartiment est composé d'une structure alvéolaire de 55 cm de hauteur. Il se remplit grâce à la pluie, par un drain provenant du diffuseur et par trop plein du bac étanche.

Le JPU présente une surface totale de 3,6 m²



Figure 4 : Photo du JPU de l'EMSE

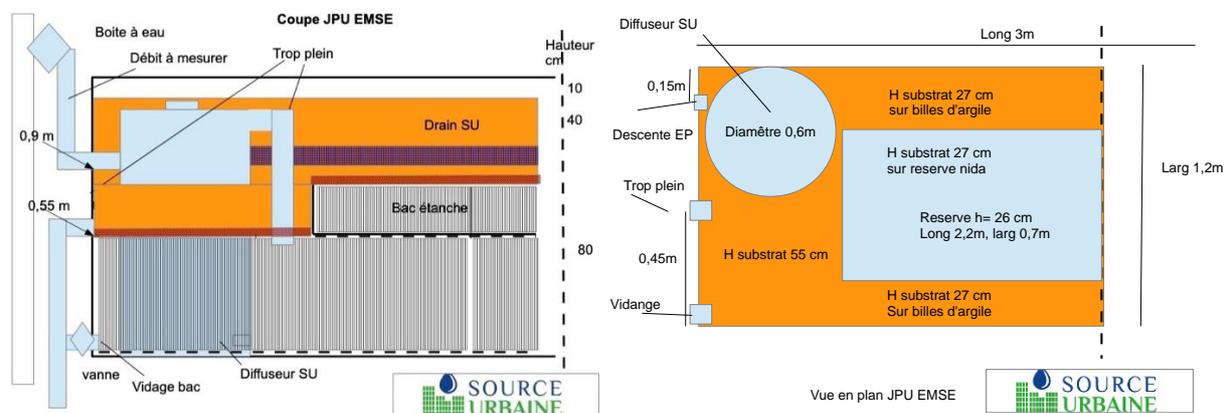


Figure 5 : Vue en coupe et vue du dessus du JPU (Source : Source Urbaine)

Un trop plein relie le JPU au réseau d'eaux pluviales. De plus, une sortie basse avec vanne permet également de vidanger si nécessaire le compartiment bas du JPU vers ce même réseau.

Ces deux dispositifs ont été réceptionnés en novembre 2021.

2.1.3 Difficultés rencontrées

Sur le JPU lors de la réception, il a été constaté que la vanne sur la vidange basse du bac n'était pas présente. Celle-ci n'a pas été installée qu'en avril 2022. Avant cette date, la sortie basse était donc ouverte ; le JPU était donc transparent aux écoulements (excepté un stockage dans le substrat et le bac étanche).

Début mai 2022, en réalisant le suivi hydrique du JPU, il a été constaté que ce dernier fuyait. En effet, lors de l'événement pluvieux du 5 mai 2022, le compartiment bas du JPU indiquait 28 cm d'eau dans les alvéoles à 9H45, cette hauteur n'était plus que de 18 cm le 6 mai à 15H, alors que la vanne était fermée et la hauteur de surverse du JPU vers le réseau non atteinte. Des essais ultérieurs ont permis de quantifier le débit de fuite moyen à environ une douzaine de litres/heure. Une analyse plus approfondie a permis de mettre en cause l'étanchéité du bac en béton du JPU au niveau de la sortie basse de ce dernier. Ce défaut a nécessité de démonter complètement le contenu du bac du JPU (Alvéoles et substrat) pour appliquer une couche d'étanchéité sur les parois intérieures du bac béton. Cette opération a été réalisée le 24/04/2023 (Figure 6).



Figure 6 : Etanchéification du JPU.

Il en résulte que l'essentiel de l'étude de performance hydrique s'est focalisée sur la TTV et non sur la globalité du dispositif.

2.2 Instrumentation

2.2.1 Présentation

La TTV et le JPU sont instrumentés par deux types de capteurs :

- Une station météo Davis Instruments installée sur la TTV (Figure 7 : Station Météo Davis) : assure le suivi météorologique (pluviométrie, anémométrie, humidité, pyranométrie, température et tensiométrie). La station communique par ondes radio avec un boîtier situé à environ 30 m dans un bâtiment de l'Ecole des Mines, ce qui permet d'avoir accès aux données en temps réel depuis le site de Weatherlink9.
- Des capteurs capacitifs fournis par la société Agrove (Figure 8 : Capteurs capacitifs (Source Agrove)) : mesure de l'humidité du substrat ainsi que de la hauteur d'eau dans les alvéoles. 2 couples de capteurs (humidité substrat et hauteur alvéoles) sont positionnés sur la TTV – 1 près de la surverse, le deuxième au centre de la zone 1 de la figure 1). 2 couples sont positionnés sur le JPU : un au-dessus du bac étanche, et le deuxième pour mesurer la hauteur dans le compartiment de 55 cm.

Les données sont stockées sur les serveurs WeatherLink pour la station météo et sur la plateforme Grafana pour les capteurs capacitifs. L'ensemble des données remontent avec un pas de temps de 15 minutes.



Figure 7 : Station Météo Davis

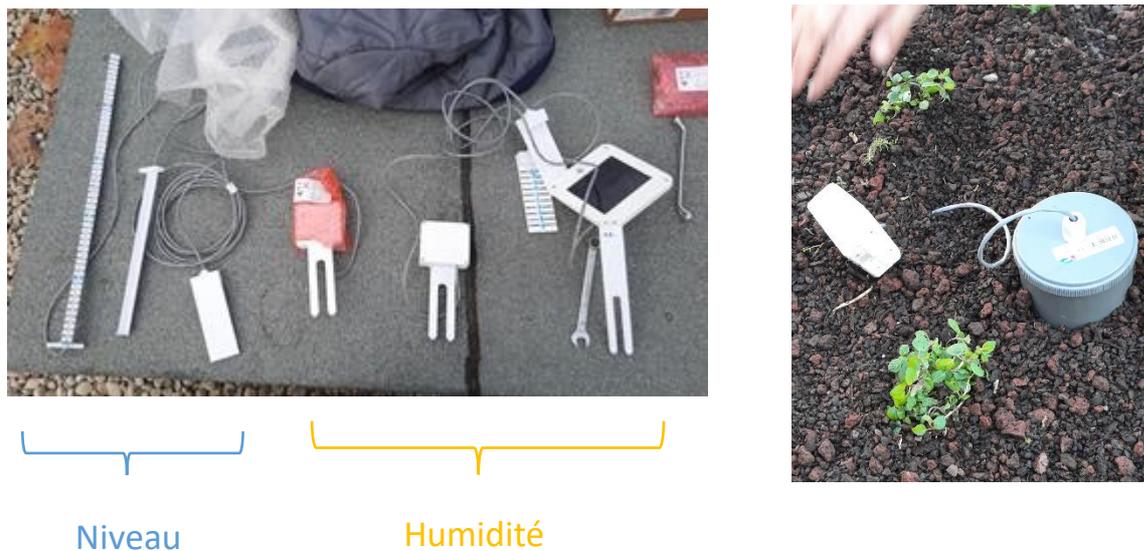


Figure 8 : Capteurs capacitifs (Source AgroVe)

Ces capteurs ont été positionnés en novembre/décembre 2021.

2.2.2 Difficulté rencontrées.

L'installation de la station Météo Davis ne posa pas de souci particulier. Par contre, la communication radio avec la gateway placée à l'intérieur des locaux de l'Ecole des Mines s'est révélée très instable jusqu'à ce que la gateway puisse être positionnée au plus près courant décembre 2021. A partir de début 2022, les données météo « remontent » bien et sont complètes.

Afin de valider les données de la station DAVIS nous avons pu récolter au pas de temps journalier, les données pluviométriques et d'ETP de la station Météo France de la Purinière (station n°42218011) située à 3.5 km de la TTV.

Concernant les mesures d'humidité de substrat et de hauteur dans les alvéoles, les problèmes se sont accumulés. Dans un premier temps, bien que les capteurs semblaient fournir des données en picofarad, aucune mesure ne remontait sur la plateforme GRAFANA d'acquisition. Le problème a perduré jusqu'à fin juin 2022, avant que la société AGROVE n'aie confirmation qu'il s'agissait d'un souci de logiciel de la carte électronique assurant la communication Lora des capteurs (Annexe 3 : AGROVE : note Technique sur le retard d'instrumentation de la TTV EMSE 2022).

Suite à cela, la force des signaux s'est révélée toujours trop faible, couplé au changement de génération des capteurs AGROVE. Il a également fallu installer une gateway pour faire le lien entre les capteurs et le réseau Internet afin de récupérer les mesures sur GRAFANA. Cette gateway a été opérationnelle en novembre 2022. Hélas en décembre 2022, la société AGROVE était en cessation de paiement mettant un terme à cette possibilité d'acquisition de mesure. **Il en résulte que sur toute la période d'étude, aucune mesure d'humidité du substrat et de hauteur d'eau fiable, continue n'a pu être délivrée par la technologie AGROVE.**

2.2.3 Solution envisagée.

Pour palier l'absence de données hydrologiques, il a été décidé à partir de mai 2022, de réaliser des relevés manuels réguliers à la fois de niveau d'eau dans les alvéoles mais aussi de mesure d'humidité du substrat.

Concernant les relevés de niveau. Ces derniers ont été réalisés près de la surverse de la TTV et dans le compartiment du fond du JPU. Généralement ils étaient effectués à une périodicité hebdomadaire, plus fine lors des événements pluvieux, avec baguette en bois et mètre (3 mesures réalisées à chaque fois).

A partir de janvier 2023, après la déclaration de cessation de paiement d'AGROVE, des collègues de l'Ecole des Mines, nous ont fourni un capteur Piézométrique qui a pu être installé près de la surverse de la TTV (Une sonde TD (Temperature, Depth) et une sonde barométrique de marque Diver). Nous possédons donc des mesures horaires de niveau à partir du 12 janvier 2023 près de la surverse de la TTV.

Concernant les relevés d'humidité du substrat. Le protocole mis en place est fortement inspiré d'un protocole de l'ADEME concernant la détermination de l'humidité de combustibles organiques (voir en annexe n°2). Une périodicité quasi hebdomadaire a pu être respectée pour la mesure de ce paramètre entre mars 2022 et mai 2023.

L'analyse et l'exploitation de ces mesures manuelles seront plus précisément détaillées dans la suite de ce rapport (partie 3)

3. Performance hydrique de la TTV sur une année

Malgré les difficultés évoquées au paragraphe précédent, le fonctionnement hydrique de la toiture terrasse végétalisée² a pu être suivi pendant une année entre début mai 2022 et mai 2023.

3.1 Analyses des relevés

3.1.1 Pluviométrie

Comme indiqué au paragraphe 2, la pluviométrie a été suivie par la station météo située sur la TTV avec un pas de temps d'acquisition de 15 minutes. La Figure 9 présente le hyétogramme enregistré pendant cette période. Parallèlement, des données météo France au pas de temps journalier ont été aussi employées.

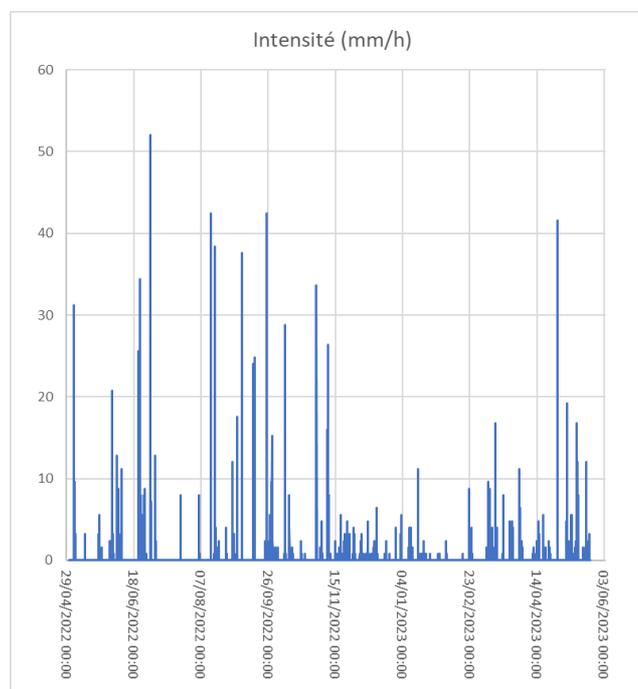


Figure 9 : Hyétogramme de la station Davis entre mai 2022 et mai 2023

Plusieurs « indicateurs » ont été analysés pour caractériser la pluviométrie sur la TTV.

Bilan annuel et mensuel

La Figure 10 présente les cumuls mensuels et totaux observés sur la station Davis positionnée sur la toiture et la station Météo France de la Purinière³. Les cumuls mesurés sur la toiture sont quasiment tous supérieurs à ceux de la station Météo France excepté en juin et août 2022. Sur la période, une différence de 17% (855 mm pour Davis et 731 pour Météo France) est observée. Ces écarts peuvent être imputés à l'hétérogénéité spatiale de la pluie, mais aussi peut-être à un effet de « site » : la toiture se trouve plus près des contreforts du Pilat que la station Météo France. Un tel phénomène a été mis

² Pour rappel, compte tenu de la fuite du Jardin de Pluie, le bilan hydrique de l'ensemble du dispositif (TTV+JPU) n'a pas pu être menée.

³ A noter que pour le mois de mai 2023, les données prises en compte s'arrêtent au 24/05.

en évidence par Pierre Voignier dans sa thèse où il montrait notamment des différences entre la station de la Dame blanche et celle de la Métare, toute deux situées à Saint-Etienne même, et distantes de 2 Km (Voignier, 1990). Dans la suite, notamment pour le calcul de la performance hydrique nous nous appuyerons sur ces deux sources de données, pour en évaluer l'influence sur le résultat final.

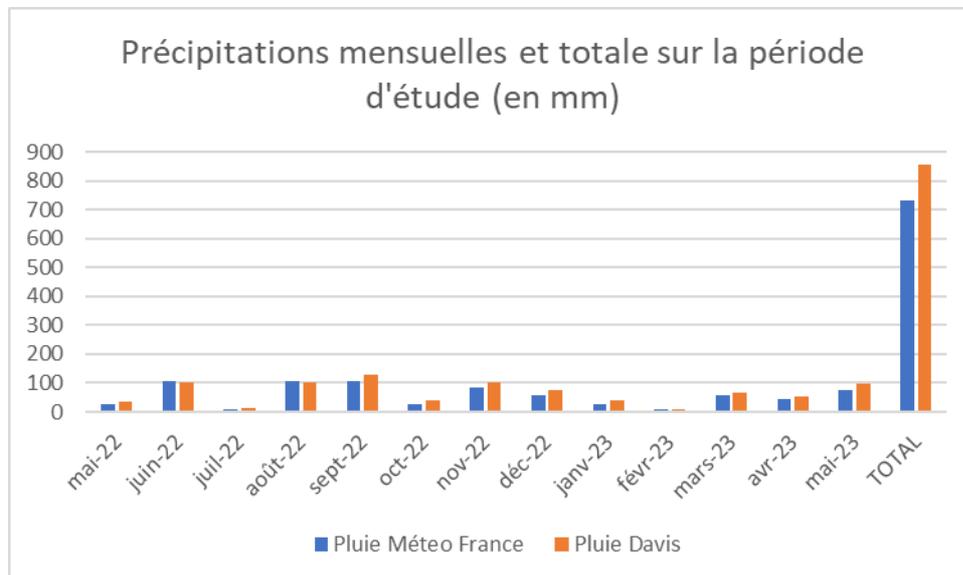


Figure 10 : Comparaison des précipitations mensuelles et totale entre la station Davis et la station Météo Le Purinière

Bilan évènementiel

Afin de réaliser cette analyse, il est dans un premier temps important de définir la notion d'évènement pluvieux caractérisé par le biais du paramètre IETD⁴. Ce paramètre a pour objectif de définir la durée minimale de temps sec (absence de précipitations) nécessaire pour séparer deux évènements pluvieux distincts. Cependant, fixer ce paramètre peut s'avérer difficile. En effet, la littérature à ce sujet ne semble pas s'accorder pour définir une valeur de la IETD standard.

Dans la thèse (D'Amato, 1998), les éléments suivants ont été pris en compte :

- 15 minutes pour différencier les précipitations convectives des précipitations stratiformes
- Valeur maximum de 45 min de temps sec pour décréter la fin d'un évènement

Finalement la thèse s'oriente vers une valeur située entre 30 et 60 minutes. Selon une autre étude (Molina-Sanchis et al., 2016), la durée minimale inter évènement s'élève à 1 heure. Dans (Savart et al., 1998) on retrouve la valeur de 30 minutes. C'est cette valeur qui a été finalement retenue.

En partant sur cette valeur, il a été possible d'isoler sur la période 413 évènements. En ne retenant que les évènements de plus de 15 minutes et de cumul supérieur à 1 mm, on comptabilise 156 évènements. Ces évènements sont positionnés par rapport aux courbes IDF de la station météo France Saint-Etienne Bouthéon située à une quinzaine de kilomètres du site (Figure 11) (nous n'avons pas la fiche climatologique de la station de la Purinière)

⁴ Inter Event Time Duration (Durée Inter Evènement)

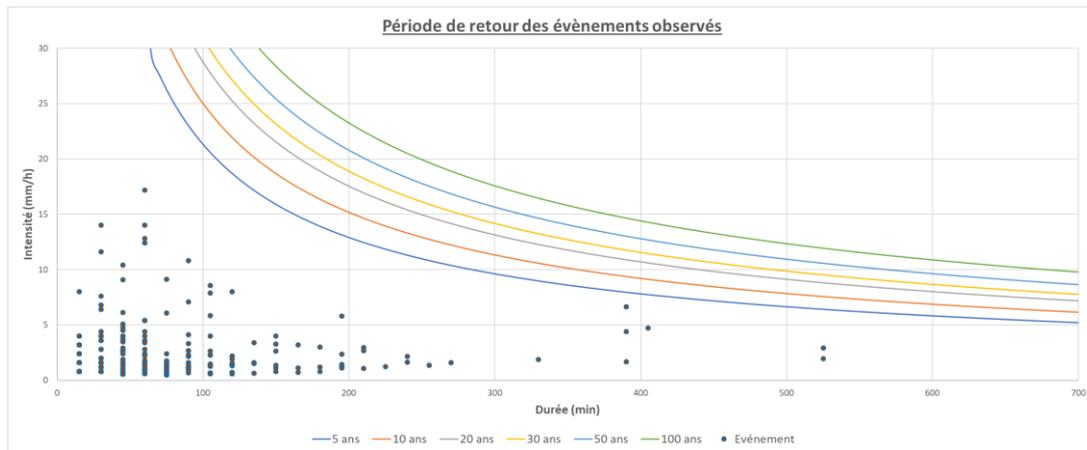


Figure 11 : Positionnement des événements pluvieux de la période par rapport aux courbes IDF d'Andrézieux Bouthéon.

On le constate la période n'a pas été marquée par des épisodes très intenses avec des pluies toutes inférieures à une période de retour de 5 ans.

Notons les pluies du :

- 30/06/2022 de durée 1 heure 30, de cumul 15 mm, mais 13 mm tombé en 15 minutes,
- 24/09/2022 de durée 1 heure et de cumul 17.2 mm,
- 14/08/2022 de durée 390 minutes et de cumul 43.2 mm (avec un cumul de 10.6 mm en 15 minutes) au plus fort de l'orage,
- 29/04/2023 de durée 1 heure 30, de cumul 13.8 mm, avec 10.4 mm tombé en 15 minutes.

3.1.2 Niveau d'eau dans les alvéoles

Comme précisé précédemment, deux sources de données : relevés manuels puis piezo à partir de janvier 2023 ont été employés. Pour des raisons d'accessibilité, les mesures manuelles et piezo ont été réalisées à environ 2 m de la surverse. Ce n'est qu'à partir de Mars 2023, qu'en parallèle, une mesure manuelle au niveau de la surverse a pu être effectuée. Il a alors été observé une différence moyenne de 0.6 cm entre ces deux mesures (rappel, la surverse est à 8 cm).

Le tableau suivant liste les relevés manuels effectués à 2 m de la surverse (Tableau 1).

Date et heure	Relevé (cm)	Surverse observée	Date et heure	Relevé (cm)	Surverse observée
25/04/2022 15:47	8		25/11/2022 12:35	8,5	Oui
02/05/2022 15:45	7,3		02/12/2022 09:00	8,5	Goutte à goutte
05/05/2022 09:45	9	Oui	09/12/2022 12:50	8,8	Oui
10/05/2022 15:30	8		16/12/2022 08:36	8,5	Oui
16/05/2022 14:45	6		06/01/2023 10:15	8,2	Goutte à goutte
20/05/2022 09:15	4,5		13/01/2023 08:40	8,2	Goutte à goutte
23/05/2022 11:15	3,9		20/01/2023 13:50	8,7	Goutte à goutte
31/05/2022 15:30	2,5		16/02/2023 11:20	8,4	
01/06/2022 11:10	2,5		24/02/2023 17:00	8,5	
02/06/2022 10:45	3,5		27/02/2023 14:00	8,5	
07/06/2022 10:30	2,7		02/03/2023 16:30	8,4	
08/06/2022 11:15	2,7		07/03/2023 14:10	8,3	
09/06/2022 11:10	2,5		07/03/2023 15:10	8,3	
14/06/2022 16:25	1,7		07/03/2023 16:40	8,6	Goutte à goutte
16/06/2022 11:00	1,2		07/03/2023 17:20	8,6	Goutte à goutte
22/06/2022 09:50	0,2		09/03/2023 09:45	8,7	Goutte à goutte
24/06/2022 11:10	1,2		09/03/2023 12:50	8,7	Goutte à goutte
28/06/2022 16:55	1,5		09/03/2023 15:50	8,7	Goutte à goutte
29/06/2022 15:40	2		10/03/2023 14:30	8,6	
01/07/2022 11:00	3		22/03/2023 10:10	8,5	
05/07/2022 11:00	2,6		23/03/2023 10:27	8,2	
08/07/2022 08:45	1,9		24/03/2023 14:50	8,8	
11/07/2022 11:15	1		27/03/2023 14:10	9,1	Goutte à goutte
09/08/2022 14:00	0		28/03/2023 13:20	8,7	
16/08/2022 09:51	1,5		31/03/2023 15:03	8,3	
23/08/2022 11:30	3		03/04/2023 15:17	8,8	Goutte à goutte
05/09/2022 16:00	5		07/04/2023 14:16	7,9	
16/09/2022 10:40	7,5		11/07/2023 11:45	7,7	
23/09/2022 14:21	7,5		14/04/2023 14:55	7,9	
29/09/2022 09:26	8,5	Oui	18/04/2023 15:35	7,7	
30/09/2022 09:00	9	Oui	20/04/2023 11:11	8,1	
03/10/2022 17:09	9		24/04/2023 16:10	8,3	
04/10/2022 09:58	8,5		26/04/2023 15:30	7,8	
05/10/2022 09:45	8,5		03/05/2023 15:55	8,6	
06/10/2022 10:16	8		04/05/2023 14:20	8,1	
07/10/2022 09:46	8		05/05/2023 15:45	7,9	
11/10/2022 11:40	8,5		09/05/2023 15:30	8,5	Goutte à goutte
12/10/2022 09:53	8,5	Goutte à goutte	10/05/2023 15:55	8,3	Goutte à goutte
14/10/2022 10:42	9	Goutte à goutte	11/05/2023 15:40	7,9	
19/10/2022 13:25	8		12/05/2023 15:55	7,8	
20/10/2022 11:40	8		16/05/2023 15:05	9,4	Oui
21/10/2022 10:26	7,8		17/05/2023 15:50	9,1	Goutte à goutte
28/10/2022 08:30	6,8		22/05/2023 15:35	7,8	
09/11/2022 17:10	8,8	Oui	23/05/2023 13:15	9,4	Oui
10/11/2022 11:58	8,5	Oui	24/05/2023 14:50	9,2	Oui
18/11/2022 17:47	8,7		25/05/2023 15:25	8,8	Goutte à goutte

Tableau 1 : Relevés manuels de niveau dans le réservoir alvéolaire de la TTV.

On constate que le niveau du réservoir n'a cessé de baisser de début mai à début Août (réservoir vide au 9 août). Excepté sur quelques jours fin juin/début juillet où il est tombé environ 80 mm de précipitation. Le réservoir s'est ensuite rempli à la faveur notamment des précipitations du 14/18 août (environ 80 mm précipités) jusqu'à fin septembre. Le niveau a légèrement baissé sur octobre,

période de très faibles précipitations (27 mm). Puis, il s'est maintenu proche de la surverse jusqu'à la fin de la période d'étude.

A partir du 12 janvier 2023, une sonde piezo a été installée proche de la surverse comme précisé précédemment, avec un pas de temps d'acquisition d'une heure. Il a été possible d'étalonner cette sonde avec les relevés manuels réalisés en parallèle.

De plus, en observant les surverses, il a été possible d'identifier à partir de quelle hauteur mesurée sur cette sonde le rejet de la TTV se produit. Il a été observé que des hauteurs Piezo supérieures à 69 mm +/- 3 mm amènent un rejet. Cette information sera utile pour le calcul de la performance (3.2).

3.1.3 Humidité du substrat

L'humidité du substrat a été exclusivement mesurée par des relevés manuels comme précisé dans la partie 2. Ces relevés ont été effectués à une périodicité quasi hebdomadaire.

En amont de ces relevés il a été nécessaire d'évaluer la variabilité de ces mesures notamment en fonction de la zone de prélèvement, de définir un protocole adapté permettant de réduire cette variabilité et d'estimer la Capacité Maximale en Eau (CME) du substrat qui nous servira pour étudier le fonctionnement hydrique de la toiture (3.2) et qui sera un des paramètres du modèle permettant de représenter ce fonctionnement (4).

Estimation de la Capacité Maximale en Eau du substrat (CME)

Cette estimation est menée en humidifiant le substrat jusqu'à observer une percolation de l'eau dans sa partie inférieure. On arrête alors l'humidification, et on attend que la percolation cesse. Le substrat est alors desséché suivant la méthode de l'ADEME (annexe 1).

Plusieurs expérimentations ont été menées. Celles-ci ont permis d'obtenir une CME de 22% pour le substrat de la TTV.

Variabilité spatiale des mesures d'humidité.

Après quelques mesures d'humidité de substrat, il a été rapidement constaté une différence relativement élevée entre deux mesures effectuées sur deux échantillons prélevés le même jour sur la TTV (Tableau 2). Il y a donc une forte variabilité due à l'échantillon (zone de prélèvement, consistance, profondeur...)

Mesure échantillon n°1	Mesure échantillon n°2
17,5 %	19,4%

Tableau 2 : Mesures d'humidité sur deux échantillons de la TTV, lors du prélèvement du 9 mai 2022

Une analyse a été menée pour tenter de quantifier cette variabilité. Les résultats de cette analyse sont reportés en annexe 2.

Le bilan de l'analyse de la variabilité est le suivant :

- Pour la variabilité dite en profondeur, celle-ci est d'environ 1,5% (en erreur absolue). La prise d'un échantillon à mi-hauteur soit à 15 cm est représentatif de l'humidité moyenne de la colonne de substrat.
- Pour la variabilité dite spatiale, le moyenne des incertitudes s'élève à environ 2% (en erreur absolue)

Nous retiendrons donc une incertitude absolue de 2% (de l'ordre de 10% en relatif, puisque les humidités sont d'environ 15/20%) sur les mesures d'humidités réalisées manuellement

Tableau des relevés d'humidité du substrat de la TTV.

Chaque prélèvement a été réalisé à mi profondeur du substrat, dans la même zone de la TTV, et en prélevant toujours la même quantité (pour s'affranchir de l'hétérogénéité de composition du substrat). Les échantillons étaient ensuite asséchés dans la foulée du prélèvement en employant la méthode de l'ADEME présentée en annexe 1.

Le tableau (Tableau 3) liste l'ensemble des relevés d'humidité réalisés sur la TTV pendant la période d'étude.

Date	Teneur en eau %	Date	Teneur en eau %
28/04/2022	0,20	02/12/2022	0,19
04/05/2022	0,21	09/12/2022	0,21
05/05/2022	0,24	16/12/2022	0,21
09/05/2022	0,18	06/01/2023	0,19
17/05/2022	0,17	13/01/2023	0,19
20/05/2022	0,15	20/01/2023	0,19
23/05/2022	0,13	07/02/2023	0,18
30/05/2022	0,15	16/02/2023	0,17
07/06/2022	0,15	24/02/2023	0,20
16/06/2022	0,10	07/03/2023	0,17
21/06/2022	0,10	22/03/2023	0,18
30/06/2022	0,16	24/03/2023	0,18
07/07/2022	0,16	29/03/2023	0,24
16/08/2022	0,17	31/03/2023	0,21
23/08/2022	0,13	07/04/2023	0,20
05/09/2022	0,16	14/04/2023	0,19
16/09/2022	0,18	26/04/2022	0,20
23/09/2022	0,15	03/05/2023	0,22
30/09/2022	0,18	05/05/2023	0,19
07/10/2022	0,15	09/05/2023	0,22
14/10/2022	0,18	10/05/2023	0,20
21/10/2022	0,15	16/05/2023	0,21
28/10/2022	0,13	22/05/2023	0,21
10/11/2022	0,19	23/05/2023	0,22
18/11/2022	0,21	25/05/2023	0,22
25/11/2022	0,21		

Tableau 3 : Mesures manuelles d'humidité du substrat de la TTV réalisées sur la période d'étude

On observe un assèchement progressif du substrat de la TTV sur Mai/Juin 2022, avant qu'une série de pluies fin juin mettent un terme à cette séquence. Sur août, de fortes pluies en milieu de mois stabilise le niveau d'humidité, qui ensuite diminue jusqu'à début septembre.

Puis, la faible pluviométrie d'octobre maintient le substrat à un taux d'humidité proche de 15%. Ce taux se rapproche de la saturation sur les mois de novembre/décembre 2022, avant de marquer une petite baisse sur février 2023 (mois sec) et remonter sur avril et Mai, où compte tenu de la pluviométrie de ce mois le substrat est à nouveau proche de la saturation.

Notons que sur la période de mai à août 2022, marquée notamment par de fortes chaleurs, le substrat n'a jamais été complètement sec. Le réservoir alvéolaire a joué son rôle de « fournisseur » d'humidité au substrat et aux plantes puisque comme on l'a vu le niveau n'a cessé de diminuer de mai à début août, où il était complètement vide (excepté fin juin/début juillet avec une légère remontée du niveau suite aux pluies). Ceci a permis à la végétation de la toiture de passer cette période stressante hydriquement parlant.

3.2 Calcul de la performance hydrique

3.2.1 Méthode de calcul

Le calcul de la performance de la TTV a nécessité la mise en place d'une méthode adaptée compte tenu de l'absence d'instrumentation sur la surverse et de la carence des capteurs notamment de niveau et d'humidité avant la mise en place d'un capteur piézo en janvier 2023. Cette estimation s'est donc appuyée sur les relevés manuels d'humidité et de niveau.

Ces relevés permettent de connaître au moment où ils sont réalisés la capacité de stockage en eau de la TTV à la fois dans le substrat et le réservoir alvéolaire connaissant la CME (estimée en 3.1.3) et la hauteur de surverse à 8 cm.

Entre deux relevés consécutifs, la procédure de calcul, va actualiser cette capacité de stockage en fonction de la pluie tombée (relevé par la station Davis ou Météo France). Dès que la capacité de stockage est dépassée, toute pluie survenant sur la TTV est considérée comme complètement rejetée au réseau (volume surversé). Lors du prochain relevé, les capacités de stockages dans le substrat et les alvéoles sont réactualisées à leurs valeurs basées sur la mesure. Cela permet de réajuster « le modèle » à des valeurs réelles.

Ainsi il est possible d'estimer le volume surversé sur la période d'analyse, puis l'efficacité de la TTV grâce au volume de pluie précipité pendant cette même période.

A partir de janvier 2023 et la présence de la sonde piézométrique, le calcul a été mené en s'appuyant sur cette information et en considérant comme cela a été mis en évidence au 3.1.2 qu'une surverse survient lorsque la hauteur Piézo dépasse 69 mm.

En l'état ce calcul sous-estime l'efficacité, puisqu'entre deux relevés on ne prend pas en compte l'évapotranspiration de la TTV (qui aurait tendance à augmenter la capacité de stockage entre deux relevés).

3.2.2 Résultats.

Tout d'abord, rappelons que (Zheng et al., 2021) qui ont menés une revue bibliographique systématique sur le sujet de l'efficacité des TTV entre 2005 et 2020, sont arrivés à une moyenne de rétention de 62%. Mais les disparités entre expérimentations sont importantes, comme le souligne de nombreux auteurs. Par exemple, (Palla et al., 2012) montrent des rétention d'eau variant entre 40 et 80%, (Kolb, 2004) entre 45 et 70%... De plus, pour une même toiture, ce pourcentage peut fortement varier en fonction de la saison (Liptan, 2003), mais aussi en fonction de l'intensité des pluies comme le montre (Stovin et al., 2012) qui illustre que pour une même toiture de rétention moyenne à 50.2%, sur les 21 événements significatifs (période de retour supérieure à 1 an), la moyenne des rétentions est de 43%.

Le tableau suivant (Tableau 4) présente l'estimation de la performance de la toiture sur 1 an à partir de Mai 2022, estimations obtenues en employant la méthode présentée précédemment. Ces estimations sont encadrées de manière à intégrer l'incertitude sur les mesures. Deux estimations sont fournies une obtenue avec les données DAVIS l'autre avec les données Météo France.

	Performance de la TTV	Encadrement
Estimation avec données Davis	67%	[58-76]
Estimation avec données Météo France	75%	[65-83]

Tableau 4 : Estimation de la performance de la TTV sur 1 an

Les résultats sont proches de ceux observés lors du suivi de la toiture terrasse étudiée par le CEREMA (CEREMA, 2019), toiture composée de substrat de 6 cm et d'un réservoir alvéolaire de 15 cm. Pour rappel, cette toiture a abattu 69% des précipitations (79% si on enlève un épisode de période de retour centennale survenu pendant les deux années d'observation).

4. Premières tentatives de Modélisation de la TTV et du JPU

4.1 Etat de l'art succinct de la modélisation des TTV.

Succinctement, il existe en hydrologie deux grandes familles de modèle (par exemple dans (Chkir, 1994), les modèles conceptuels et les modèles physiques.

Les modèles conceptuels représentent les principaux processus sans utiliser les lois physiques, mais en s'appuyant sur un concept simple (par exemple un réservoir). Les modèles physiques vont eux représenter les principaux processus le plus fidèlement, en s'appuyant sur les lois physiques régissant ces processus (Equation de Richard, de Barré de Saint Venant...). La spécificité des modèles conceptuels est leur simplicité des paramètres hydriques utilisés et le faible nombre de paramètres à caler (Bouzouidja, 2014).

Ces deux familles de modèles ont été largement employées pour représenter le comportement hydrique des TTV. Les tableaux suivants (Tableau 5, Tableau 6) présentent quelques références afférant à ces deux types de modélisation.

Approche de modélisation	Variables d'entrée/paramètres	Publications associées
Modèle à plusieurs réservoirs (linéaires/non linéaires)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 ou 2 variables d'entrée (Pluie, ETP) 	Locatelli, et al.. Journal of Hydrology 519, 3237–3248 (2014) Berthier et al. Congrès ASTE-SHF (2014) Kasmin et al. Water Science and Technology 62, 898–905. (2010) Versini et al. Journal of hydrology 524, 562-575 (2015) Palla, et al. Hydrol. Process. 26, 73–84. (2012)
Modèle à 1 réservoir	<ul style="list-style-type: none"> • 3 ou 4 Paramètres (capacité des réservoirs, facteur d'ETP.) 	Sherrard, J.A., Jacobs, J.M., J. Hydrol. Eng. 17, 858–868. (2012) Prowell, E. S., MSc Thesis, University of Georgia, (2006) Stovin et al., Journal of environmental Management, 131, 206-215 (2013)

Tableau 5 : Quelques publications portant sur des modèles conceptuels de TTV (Berthier et al., 2011, 2014; Kasmin et al., 2010; Locatelli et al., 2014; Palla et al., 2012; Prowell, s. d.; Sherrard et Jacobs, 2012; Versini et al., 2015)

Modèles	Dimension	Application principale	Variables d'entrée/paramètres	Publications associées
HYDRUS	1D,2D et 3D	Transport d'eau, de solutés et de chaleur dans des sols insaturés/saturés	<ul style="list-style-type: none"> > 2 variables d'entrée (Pluie, ETP, température...) >5 Paramètres (notamment paramètre pour l'infiltration par exemple $K_s, \alpha, \theta_s, \theta_r$ et n...) 	Hakimdavar, R et al. Ecological Engineering 73, 494–508 (2014) Bouzouidja R., Thèse de l'université de Lorraine (2014) Hilten, R.N., et al. Journal of Hydrology 358, 288–293 (2008)
SMWS	2D	Transport d'eau et de soluté dans des sols insaturés/saturés		Palla, A et al. Journal of Hydrology 379, 193–204. (2009)
SWAP	1D et 2D	Transport d'eau, de solutés et de chaleur dans des sols insaturés/saturés		Klaas Metselaar, Resources, Conservation and Recycling, 64, 49-55, (2012)
SWMM	1D	Simulation du ruissellement et précipitation		Burszta-Adamiak E., Mrowiec M. Water Science & Technology, 68.1, 36-42 (2013)

Tableau 6 : Quelques publications portant sur des modèles physiques de TTV (Bouzouidja, 2014; Burszta-Adamiak et Mrowiec, 2013; Hakimdavar et al., 2014; Hilten et al., 2008; Metselaar, 2012; Palla et al., 2009)

Citons pour compléter ces 2 tableaux, une étude réalisée par I. Broekhuizen et al. ((Broekhuizen et al., 2021) qui portaient sur la comparaison de différents modèles. Cette étude est basée sur les modèles suivants :

- Urbis : une simulation de scénario créée par l'école INSA de Lyon. Il s'agit d'un modèle conceptuel qui représente le système avec une série de réservoirs connectés – en lien avec le modèle de (Berthier et al., s. d.) cité déjà ci dessus. L'étude a choisi ce modèle en raison de sa simplicité.
- SWMM : modèle conceptuel qui s'appuie sur certains paramètres et descriptions de processus basés sur la physique. Ce modèle est très répandu dans la recherche et la pratique, d'où son intérêt.
- HYDRUS-1D : simulation unidimensionnelle du mouvement de l'eau basée sur la physique et l'équation de Richards.
- Mike SHE : modèle mécaniste utilisant les équations de Saint-Venant

L'étude a conclu que le modèle Urbis fournissait les résultats les moins précis. Cependant, il a tout de même atteint une précision de 90 % lors de l'étalonnage et de 70 % lors des essais. Sur les 4 modèles, c'est Hydrus qui a obtenu les meilleures performances en matière de prévisions de débit. SHE et SWMM ont été les plus précis en ce qui concerne le volume du ruissellement total.

Finalement, quel type de modèle choisir pour obtenir un compromis acceptable entre « ce qui est simple est faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable » (Paul Valéry) ? Pour cela appuyons nous aussi sur Palla et al. (Palla et al., 2012) qui indique les éléments suivants :

- les modèles physiques donnent des résultats meilleurs,
- Mais, les modèles conceptuels fournissent une évaluation des volumes et des formes de hydrogrammes avec une précision acceptable.

- Les modèles physiques requièrent de caler un plus grand nombre de paramètres. Surtout intéressant si on veut avoir une estimation précise des eaux stockées dans le substrat et dans le cas d'études détaillées des flux d'eau et d'énergie dans la TTV.

Dans notre cas, c'est la performance hydrique générale de la toiture qui nous intéresse. De plus, compte tenu des déboires en terme de métrologie, il paraît utopique de vouloir construire et caler un modèle physique dans ces conditions. C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers un modèle conceptuel et parmi ceux sus cités, celui construit par le CEREMA et amélioré par l'INSA de Lyon (Berthier et al., 2014; Broekhuizen et al., 2021; CEREMA, 2019; Ramier et al., 2013) nous semble le plus adapté. Ce modèle a été employé sur des toitures assez similaires et dans un environnement notamment climatique assez comparable.

4.2 Modèle Faveur du CEREMA (CEREMA, 2019)

4.2.1 Présentation du modèle

Le modèle FAVEUR du CEREMA (CEREMA, 2019) est un modèle ayant fait ses preuves, qui a été élaboré et amélioré pendant de nombreuses années et qui permet de décrire le fonctionnement hydrique d'une toiture terrasse végétalisée.

Le principe de fonctionnement est relativement simple avec une description dite à « deux réservoirs » (Figure 12)

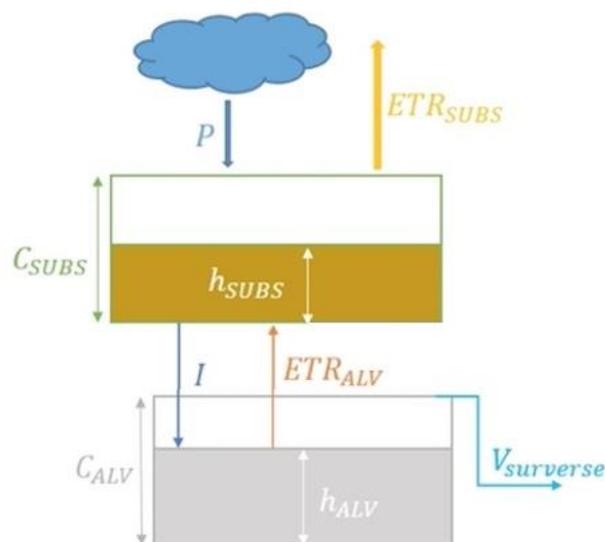


Figure 12 : Schéma du modèle FAVEUR (figure issue de (Sandron et al., 2020))

Un premier réservoir (en marron) représente la capacité de stockage en eau du substrat tandis qu'un second réservoir (en gris) représente le stockage dans les alvéoles en nid d'abeilles.

Les réservoirs sont caractérisés par la capacité maximale de stockage d'eau (C_{subs} et C_{alv}) et la hauteur d'eau stockée à l'instant t (h_{subs} et h_{alv}). Ces niveaux sont dépendants de deux flux principaux:

- La pluie P qui se précipite sur la TTV
- L'évapotranspiration réelle du dispositif vers l'atmosphère

Les réservoirs peuvent communiquer entre eux de deux façons différentes :

- Depuis les alvéoles vers le substrat : par évapotranspiration des alvéoles directement dépendante du niveau d'eau.
- Depuis le substrat vers les alvéoles : par percolation lorsque le substrat se trouve à saturation hydrique.

Enfin, si le niveau d'eau dans les alvéoles est trop important, celui-ci peut surverser de la même façon que le dispositif réel et ainsi contrôler la hauteur d'eau dans le réservoir.

Afin de pouvoir modéliser l'ensemble, un certain nombre de paramètres sont calculés. On retrouve la capacité de stockage maximale du substrat en mm :

$$C_{SUBS} = \frac{E_p \times (CME - \theta_r)}{100} \quad (1)^5$$

Dans ce cas, on suppose que le point de flétrissement du substrat est de 0 %.

On calcule la capacité de stockage maximale des alvéoles en mm :

$$C_{ALV} = H_{ALV} \times Vide \quad (2)^6$$

A partir des données d'évapotranspiration potentielle, il est possible de calculer l'évapotranspiration potentielle de la TTV en mm/h :

$$ETP_{ttv_i} = K_{saison} \times ETP_i \quad (3)^7$$

En fonction de la saison, les végétaux et le substrat n'évapotranspirent pas de la même façon d'où la nécessité d'un coefficient d'ajustement. Dans un premier temps, deux valeurs ont été retenues ($K_{été} = 1$ et $K_{hiver} = 0,5$ sur les recommandations du rapport FAVEUR (CEREMA, 2019). A partir de cela, l'évapotranspiration des alvéoles en mm/h s'obtient de la façon suivante :

$$ETR_{ALV_i} = \min \left(K_{ALV} \times ETP_{ttv_i}, h_{ALV_i} \times \frac{3600}{\Delta t} \right) \quad (4)^8$$

Le pas de temps de simulation est égal au pas de temps d'obtention des données qui est de 15 minutes dans notre cas. Un second coefficient K_{ALV} permet d'ajuster la valeur de l'évapotranspiration réelle des alvéoles en fonction de la hauteur d'eau dans les alvéoles.

⁵ E_p : épaisseur du substrat (mm)
 CME : capacité maximale en eau
 θ_r : point de flétrissement du substrat

⁶ H_{ALV} : hauteur des alvéoles (mm)
 $Vide$: indice de vide des alvéoles

⁷ ETP : donnée d'évapotranspiration potentielle (mm/h)
 K_{saison} : coefficient d'ajustement

⁸ h_{ALV} : hauteur d'eau dans les alvéoles (mm)
 Δt : pas de temps de simulation (s)

$$K_{ALV_i} = \left(\frac{h_{ALV_i}}{C_{ALV}} \right)^\alpha \quad (5)$$

Où α dépend de la situation géographique. Selon (CEREMA, 2019), la valeur optimum pour la France est de 1.

Une fois l'évapotranspiration des alvéoles obtenu, il faut calculer le flux d'évapotranspiration du substrat vers l'atmosphère. Celle-ci dépend de différentes conditions :

$$Si h_{ALV_i} > 0 \text{ et } h_{ALV_i} > h_{SUBS_i} \Rightarrow ETR_{SUBS_i} = ETR_{ALV_i} \quad (6)^9$$

$$Sinon ETR_{SUBS_i} = \min(ETP_{ttv_i}, h_{SUBS_i})$$

Une fois les flux d'évapotranspiration obtenus, un bilan global du flux du substrat vers les alvéoles peut être calculé (mm/h) :

$$I_i = \max \left(h_{SUBS_i} \times \frac{3600}{\Delta t} + I_{p_i} - ETR_{SUBS_i} + ETR_{ALV_i} - C_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t}, 0 \right) \quad (7)^{10}$$

A partir de ce résultat, on obtient la hauteur d'eau stockée dans le substrat (mm) et la hauteur d'eau stockée dans les alvéoles (mm) :

$$h_{SUBS_{i+1}} = \min \left(h_{SUBS_i} + I_{p_i} \times \frac{\Delta t}{3600} - (ETR_{SUBS_i} - ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{SUBS} \right) \quad (8)$$

$$h_{ALV_{i+1}} = \min \left(h_{ALV_i} - (ETR_{ALV_i} - I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{ALV} \right) \quad (9)$$

La notice technique proposée par l'INSA de Lyon (Sandron et al., 2020) indique l'équation suivante en ce qui concerne l'évacuation de l'eau par surverse :

$$V_{s_i} = \max \left(\left[h_{ALV_i} - (ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600} - C_{ALV} \right] \times S_{ouverture}, 0 \right) \quad (10)$$

4.2.2 Adaptation au cas du dispositif l'Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE)

L'idée de cette partie est de repartir du modèle conçu par le CEREMA (modèle FAVEUR) pour l'adapter au dispositif de l'EMSE couplant TTV et JPU. Plusieurs particularités de la TTV ont un impact non négligeable sur le fonctionnement hydrique. En effet ce dispositif diffère légèrement des toitures modélisées par le CEREMA :

- Présence de dalles et d'ilots sur la TTV,
- Modélisation du JPU,
- Modélisation de la surverse de la TTV vers le JPU et du dispositif complet.

4.2.2.1 Adaptation pour représenter la TTV

Les équations actuelles du modèle FAVEUR ne prennent pas en compte les surfaces des alvéoles, du substrat et des dalles présentes sur l'installation de l'EMSE. En réalité on a :

⁹ h_{SUBS} : hauteur d'eau dans le substrat (mm)

¹⁰ I_p : intensité de la pluie (mm/h)

- Surface de substrat et couvert végétal : 100 m²
- Surface des alvéoles : 150 m²
- Surface des dalles : 30 m²
- Surface des îlots : 11,6 m²

Cela va impacter les résultats puisqu'en prenant en compte ces surfaces, le transfert peut s'effectuer de différentes façons (Figure 13). A présent l'eau peut ruisseler sur les îlots vers le substrat et la pluie s'abattant sur les dalles se dirige directement dans les alvéoles. La structure de stockage du réservoir alvéolaire peut à présent se remplir même si le substrat n'est pas à saturation.

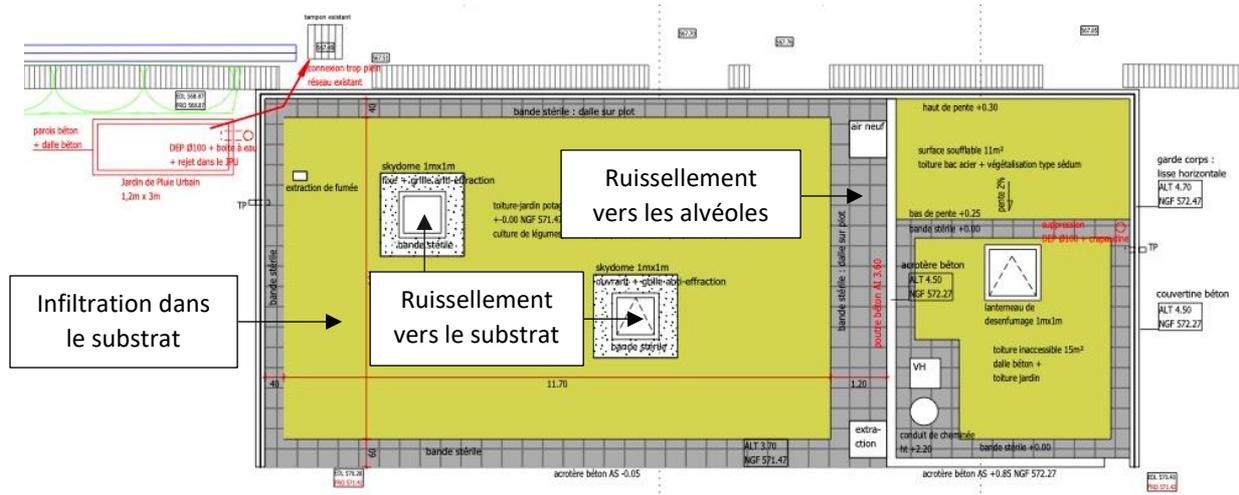


Figure 13 : Présentation des Cheminement de l'eau de pluie s'abattant sur la TTV de l'EMSE

Les modifications suivantes ont été faites :

$$h_{SUBS_{i+1}} = \min \left(h_{SUBS_i} + I_p \times \left(1 + \frac{S_{ilot}}{S_{subs}} \right) \times \frac{\Delta t}{3600} - (ETR_{SUBS_i} - ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{SUBS} \right) \quad (23)^{11}$$

Les équations de la surverse (équations 12, 13 et 14) sont toujours valables à l'exception d'un apport en plus considéré de la façon suivante :

$$h_{ALV_{i+1,0}} = h_{ALV_i} - \left(ETR_{ALV_i} - I_i \times \frac{S_{subs}}{S_{alv}} - I_{pi} \times \frac{S_{dal}}{S_{alv}} \right) \times \frac{\Delta t}{3600} \quad (24)^{12}$$

La surface des îlots a été fixée à la surface réelle de ces derniers, à savoir, 11,6 m².

Pour les surfaces de dalles, une étude de sensibilité a été menée afin de caler au mieux cette surface contributive, car une partie des écoulements sur ces dalles s'échappe vers la pelouse entourant la TTV. Des simulations de la hauteur d'eau dans les alvéoles de la TTV entre le 2 mai 2022 et le 28 juin 2022 ont été menées en faisant varier la surface des dalles entre 0 et 30 m² et en comparant ces valeurs simulées, aux relevés manuels réalisés pendant cette période (Figure 14, Tableau 7).

Version	30 m ²	20 m ²	15 m ²	7,5 m ²	0 m ²
Différence cumulée	8,8 %	7,4 %	3,67 %	8,8 %	11,3 %

¹¹ *Silot* : surface des îlots
Ssubs : surfaces du substrat

¹² *Sdal* : Surface des dalles
Salv : Surface des alvéoles

Différence absolue	16,6 %	12,03 %	11,32 %	16,6 %	14,87 %
Critère de Nash	0,85	0,93	0,94	0,92	0,89

Tableau 7 : résultats de l'analyse de sensibilité sur la surface contributives des dalles

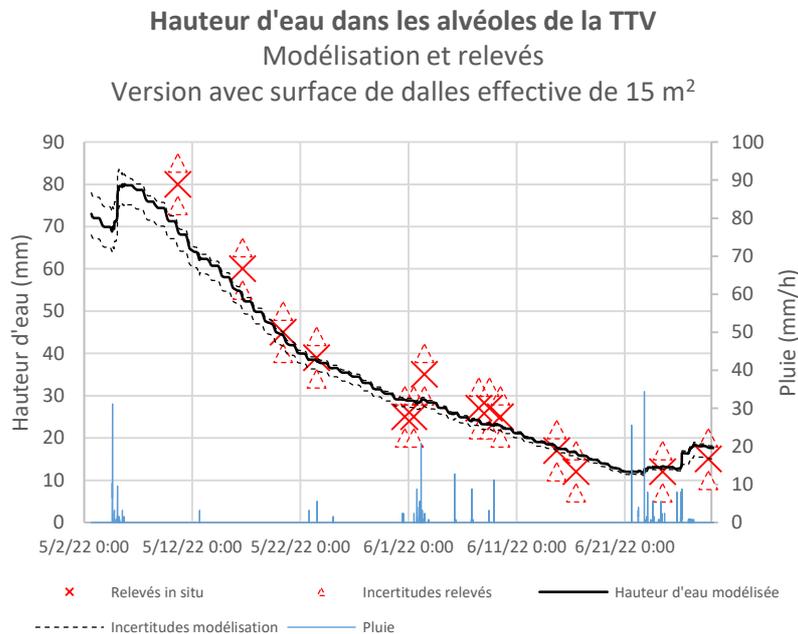


Figure 14 : Comparaison hauteur d'eau simulée et relevée manuellement

Il en est ressorti que le critère de Nash était le plus élevé pour une surface de dalles effective de 15 m². C'est cette valeur de surface qui est actuellement intégrée dans le modèle. Elle sera affinée lorsque nous aurons plus données en provenance de la sonde de niveau Piézo installée en janvier 2023.

4.2.2.2 Modélisation du JPU

Pour rappel (se référer au paragraphe 2.1, le jardin de pluie est recouvert d'un substrat dont l'épaisseur varie entre 27 et 65 cm (Figure 5 : Vue en coupe et vue du dessus du JPU (Source : Source Urbaine)). Ce substrat recouvre deux compartiments :

- un bac étanche d'une surface de 1,54 m² de hauteur 26 cm d'alvéoles en nid d'abeilles (compartiment 1). Ce bac est complètement étanche et peut se déverser par trop-plein vers le second compartiment. Ce bac se remplit à travers la pluie et par un des drains du diffuseur.
- un second compartiment (compartiment 2) couvrant l'ensemble du JPU excepté la partie occupée par le diffuseur. Ce compartiment est composé d'une structure alvéolaire de 55 cm de hauteur. Il se remplit grâce à la pluie, par un drain provenant du diffuseur et par trop plein du bac étanche.

Le JPU présente une surface totale de 3,6 m²

Ce comportement a été pris en compte dans le modèle. On suppose que le JPU peut se décrire comme deux TTV différentes avec leurs propres caractéristiques physiques. Le diffuseur a été simplifié en supposant que le surverse de la TTV se répartit équitablement entre les deux compartiments du JPU. Le compartiment 1 peut dans ce cas être représenté de la même façon qu'une toiture terrasse

végétalisée avec un intrant additionnel. Le compartiment 2 se diffère du restant des blocs puisque celui-ci est en parti couvert par le compartiment 1.

Compartiment 1 :

En ce qui concerne le fonctionnement hydrique du JPU, celui-ci diffère de la TTV. Le bac du JPU se déverse dans les alvéoles par trop plein mais ne présente pas de sortie. Celui-ci déborde directement, donc la surverse n'est en principe pas limitée comme dans le cas de la TTV. L'hypothèse faite est donc que la hauteur d'eau ne peut pas dépasser celle du bac et l'ensemble de l'eau en surplus est instantanément évacuée. L'équation utilisée par URBIS est donc introduite dans ce cas. La hauteur d'eau dans le substrat et dans le bac seront, quant à elles, affectées par le flux d'eau supplémentaire de la TTV. Les équations suivantes permettent de décrire cela :

$$h_{SUBS_{i+1}} = \min \left(h_{SUBS_i} + I_{p_i} \times \frac{\Delta t}{3600} - (ETR_{SUBS_i} - ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600} + \frac{V_{TTV_i}}{2 \times S_{bac}}, C_{SUBS} \right) \quad (15)^{13}$$

$$I_i = \max \left(h_{SUBS_i} \times \frac{3600}{\Delta t} + I_{p_i} - ETR_{SUBS_i} + ETR_{ALV_i} - \left(C_{SUBS} - \frac{V_{TTV_i}}{2 \times S_{bac}} \right) \times \frac{3600}{\Delta t}, 0 \right) \quad (16)$$

Le volume surversé par le bac s'obtient simplement en utilisant l'équation initiale de surverse proposée par l'INSA de Lyon :

$$V_{bac_i} = \max \left(\left[h_{ALV_i} - (ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600} - C_{ALV} \right] \times S_{bac}, 0 \right) \quad (17)$$

Compartiment 2 :

Les alvéoles du JPU vont se remplir de manière un peu différente puisqu'elles s'étendent sur la toute la surface cependant le substrat n'est pas présent au niveau du bac ce qui modifie le comportement. On a alors :

$$h_{SUBS_{i+1}} = \min \left(h_{SUBS_i} + I_p \times \frac{\Delta t}{3600} - (ETR_{SUBS_i} - ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600} + \frac{V_{bac_i} + \frac{V_{TTV_i}}{2}}{S_{reste}}, C_{SUBS} \right) \quad (18)^{14}$$

$$I_i = \max \left(h_{SUBS_i} \times \frac{3600}{\Delta t} + I_{p_i} - ETR_{SUBS_i} + ETR_{ALV_i} - \left(C_{SUBS} - \frac{V_{bac_i} + \frac{V_{TTV_i}}{2}}{S_{reste}} \right) \times \frac{3600}{\Delta t}, 0 \right) \quad (19)$$

$$h_{ALV_{i+1}} = \min \left(h_{ALV_i} - \left(ETR_{ALV_i} - I_i \times \frac{S_{reste}}{S_{bac} + S_{reste}} \right) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{ALV} \right) \quad (20)$$

$$\text{Où } S_{reste} = S_{JPU} - S_{bac} - S_{diffuseur} \quad (21)$$

Le volume surversé par le JPU s'obtient simplement en utilisant l'équation initiale de surverse proposée par l'INSA de Lyon :

$$V_{JPU_i} = \max \left(\left[h_{ALV_i} - (ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600} - C_{ALV} \right] \times S_{bac}, 0 \right) \quad (22)$$

Compte tenu des problèmes métrologiques ainsi que de la fuite du bac du JPU, ce modèle n'a pas pu être testé.

¹³ V_{TTV} : volume surversé par le la TTV (L)

S_{bac} : Surface du bac (m²)

¹⁴ V_{bac} : volume surversé par le bac (L)

S_{reste} : surface restante du JPU hors bac et diffuseur

4.2.2.3 Représentation de l'ensemble du dispositif (TTV + JPU)

En accord avec la description du dispositif réalisée au paragraphe 2.1, il a été décidé de représenter le dispositif par le biais de 3 blocs :

- La TTV (décrit en 4.2.2.1)
- Surverse TTV
- Bloc JPU (décrit en 4.2.2.2)

Ces 3 éléments distincts sont reliés de la façon suivante (Figure 15) :

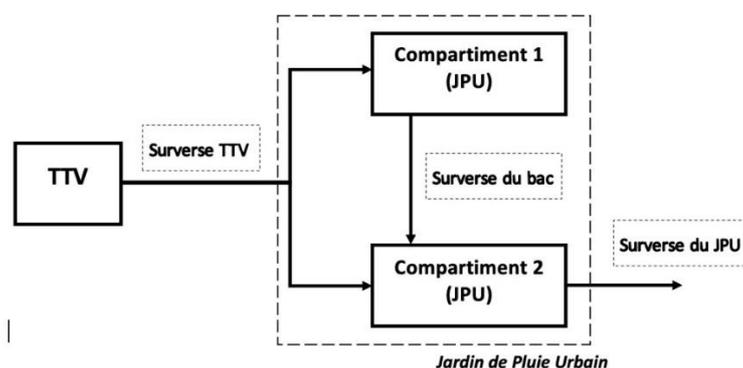


Figure 15 : Proposition de modélisation du dispositif TTV+JPU

Une des difficultés est de modéliser le plus précisément possible le débit surversé. Le modèle FAVEUR ne prend pas en compte les caractéristiques physiques et l'eau en surplus se surverse instantanément par trop-plein. Or dans le cas de la TTV et du JPU, ceux-ci se surversent par des seuils circulaires dénoyés qui jouent un rôle important en ce qui concerne la régulation du débit. Plusieurs méthodes ont alors été comparées :

- Surverse par trop plein basé sur un bilan hydrique simple,
- Discrétisation d'un seuil circulaire en plusieurs seuils rectangulaires,
- Équation d'Hégly-Ramponi.

En l'état actuel, c'est l'équation d'Hégly-Ramponi qui a donné les meilleurs résultats comparé à des mesures de débit « au sceau » réalisé sur la surverse de la TTV (en fait au niveau du diffuseur du JPU).

4.2.3 Tentative de détermination du paramètre « K » du modèle Faveur.

Le modèle FAVEUR utilise deux paramètres : K_{saison} (qui permet de directement pondérer l'ETP de la TTV – équation 3) et α (qui joue un rôle dans le calcul de l'ETR – équation 5). Sur recommandation du CEREMA (CEREMA, 2019), K_{saison} est fixée à deux valeurs ($K_{été} = 1$ et $K_{hiver} = 0,5$).

Dans le cadre de cette étude, nous avons essayé d'estimer empiriquement K_{saison} .

Pour cela, les pertes en eau du substrat et des alvéoles de la TTV ont été évaluées sur des périodes sans surverses de la TTV (compte tenu que celle-ci n'est pas instrumentée) en utilisant les mesures

d'humidité du substrat, les relevés de hauteur d'eau dans les alvéoles réalisées régulièrement ainsi que la mesure de la pluviométrie. Il est ainsi possible de fournir une estimation de l'évapotranspiration réelle de la TTV. Cette évapotranspiration réelle est ensuite comparée à l'ETP fournie par météo France et la station Davis. Ceci permet finalement d'obtenir une estimation du paramètre Ksaison du modèle du CEREMA. Un exemple d'analyse d'une telle période est reporté en annexe 4.

Ceci a été réalisé à plusieurs reprises, ce qui a permis de fournir des estimations du paramètre Ksaison tout au long de l'année d'étude. Ces résultats sont synthétisés dans le tableau suivant (Tableau 8).

Période		ETR (estimée par mesures in situ)	ETP Davis	ETP Météo France	Estimation de Ksaison
9/05/22	au	44.4 mm	55.3 mm	62.2 mm	0,76 ± 0,14
20/05/22					
16/06/22	au	120.4 mm	266 mm	322,3 mm	0,41 ± 0,10
11/08/22					
19/10/22	au	26.2 mm	29 mm	42.7 mm	0,73 ± 0,23
04/11/22					

Tableau 8 : Estimation empirique de Ksaison

Excepté pour les relevés opérés pendant la période estivale de 2022, période où on l'a vu, le réservoir alvéolaire de la toiture s'est complètement vidé et le substrat a été très sec, le ratio entre ETR et ETP tourne autour de 0.75.

Cependant il faut ajouter à cela quelques remarques :

Dans un premier temps, il est difficile de réaliser un calibrage robuste en se basant sur l'humidité du substrat. Comme évoqué dans le rapport permettant de déterminer l'erreur sur la mesure d'humidité du substrat (Annexe 2), l'humidité n'est pas homogène dans la TTV. On compare alors d'une part une modélisation globale de l'humidité à des mesures locales. Cela est beaucoup plus simple avec la hauteur d'eau dans les alvéoles puisqu'en principe celle-ci est homogène sur toute la surface de la TTV

Cette méthode est donc intéressante dans la mesure où elle permet de confirmer l'ordre de grandeur de K donné par le CEREMA (rappel 0.5 ou 1 en fonction de la saison).

4.2.4 Premier essai de comparaison Modèle et Mesure Piézo

Suite à l'installation du capteur Piezo, et même si sur la période les variations de niveaux sur la TTV ont été de faibles amplitudes, le modèle de la TTV a été testé entre le 12 janvier et le 24/05/2023. Pour ce test, le paramètre Alpha du modèle a été fixé à 1 comme préconisé par le CEREMA, le Ksaison a quant à lui, pris la valeur 0.75 comme mentionné dans le paragraphe précédent.

La figure suivante (Figure 16) compare la hauteur mesurée en orange avec la hauteur modélisée en noir (la pluie est en bleu). La sonde employée, étant une sonde décimétrique, ne présente pas de bonne précision pour des variations millimétriques. Il peut donc y avoir des écarts entre plusieurs mesures qui ne correspondent pas forcément à une diminution ou augmentation du niveau d'eau. C'est pourquoi on observe des oscillations de la mesure. Ce premier test montre que le modèle suit les tendances de niveaux. Bien sûr, des travaux complémentaires sont nécessaires afin d'affiner le calage

des paramètres sur des périodes plus longues de mesure avec des variations plus importantes du niveau dans les alvéoles.

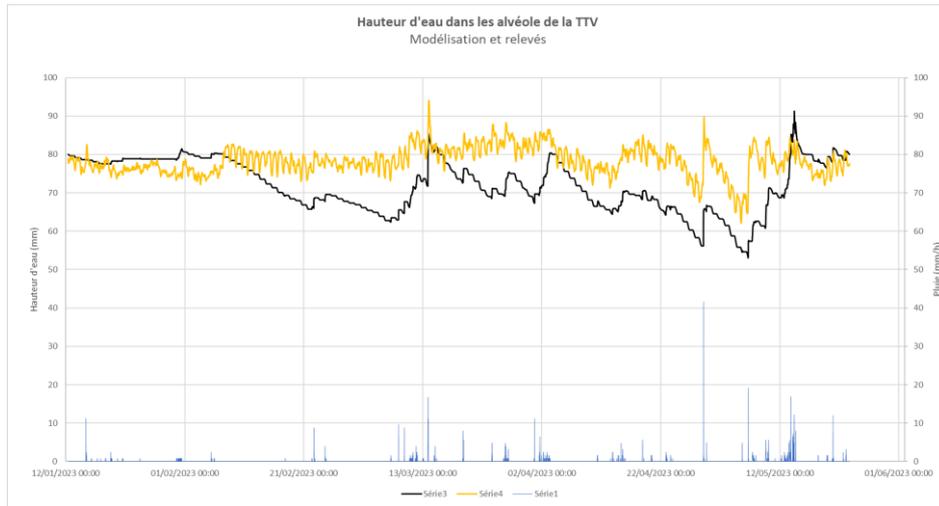


Figure 16 : Premier essai de modélisation : Hauteur modélisée et mesurée dans la TTV

5. Conclusion

Une toiture terrasse végétalisée, couplée à un Jardin de Pluie Urbain a été aménagée lors de la réalisation de la nouvelle chaufferie de L'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne fin 2021. Ce projet visait à suivre le comportement hydrique de ce dispositif. Hélas, deux problèmes majeurs ont perturbé ce suivi. Tout d'abord, un problème météorologique a perduré depuis l'instrumentation du site début 2022 et a atteint son apogée avec la cessation de paiement de la société fournissant le protocole de mesure fin 2022. D'autre part, il s'est révélé au printemps 2022 que le JPU fuyait. La mise en place d'un suivi manuel, complété début 2023 par l'ajout d'une sonde piézométrique sur la TTV a néanmoins permis de mettre en place un suivi « en mode dégradé » non pas du dispositif dans son entier, mais de la TTV.

Dans ces conditions, les résultats suivants peuvent être mis en avant.

Avec une efficacité autour de 66-75% (compte tenu de l'incertitude et des sources de données employées), l'abattement de la TTV de l'École des Mines est dans la fourchette de la bibliographie et proche de celle estimée par le CEREMA (pour rappel : Toiture avec 6 cm de substrat et 15 cm de réservoir alvéolaire donc assez proche en terme de structure – Efficacité de 69% et de 79% hors événement exceptionnel)

Le modèle Faveur développé par le CEREMA a servi de base à la modélisation du dispositif. Il a été nécessaire d'adapter ce modèle pour d'une part introduire les particularités de la TTV (notamment dalles + ilots) et également la structure assez particulière du JPU. Toutefois, le calage de ces adaptations n'a pu être pleinement réalisé du fait de l'absence de chronique de mesure disponible. (le calage a été mené sur des périodes courtes avec les données manuelles seulement sur la TTV).

Le modèle Faveur s'appuie notamment sur deux paramètres. Parmi ces deux paramètres, l'un permet d'approcher l'évapotranspiration réelle de la toiture à l'aide d'un facteur saisonnier multiplicatif de l'évapotranspiration potentielle. Dans son étude le CEREMA avait calé ce paramètre à 0.5 ou 1 en

fonction de la saison. Compte tenu de l'absence de chroniques longues de mesures, un calage purement « mathématique » de ce paramètre n'a pas pu être réalisé. Des estimations empiriques menées sur des bilans matières ont par contre été calculées. Ces estimations, hors estimations lors d'une période très sèche marquée notamment par l'absence total d'eau dans le réservoir et alors que la végétation bien que ne dépérissant pas souffrait de la chaleur – avec un K estimé à 0.41, donnent des valeurs de l'ordre de 0.75 donc du même ordre que celles obtenus mathématiquement.

En terme de perspectives. La mise en place de la sonde Piezo va permettre d'essayer de valider le modèle de la TTV de manière plus approfondie avec notamment le calage « mathématique » des paramètres Ksaison et alpha du modèle.

La nouvelle étanchéification du JPU, si elle s'avère efficace, permettra de mettre en place un suivi du fonctionnement également de ce dispositif et du couplage avec la TTV. Dans un premier temps ce suivi sera réalisé manuellement.

Annexe 1 : Protocole de séchage ADEME (Réf. : 010367-16)



MÉTHODE AU FOUR À MICRO-ONDES

Cette méthode d'analyse reste fiable à condition que l'opérateur réalise soigneusement la mesure.

- Variabilité de l'analyse : parfois importante
- Délai d'obtention des résultats : rapide (entre 15 et 40 minutes)

PROTOCOLE ANALYTIQUE DE MESURE DE L'HUMIDITÉ AU FOUR À MICRO-ONDES

MATÉRIELS	
	Plat en verre
	Balance à 0,1g
	Four à micro-ondes

MODE OPÉRATOIRE										
1	Peser le plat vide (m_1)									
2	Remplir avec au moins 300 g (2 à 5 cm d'épaisseur selon le plat)									
3	Peser avant le séchage (m_2)									
4	<p>Suivre le logigramme :</p> <pre> graph TD A[Mettre le plat dans le four] --> B[Chauffer pendant 2 min] B --> C{Y AVAIT-IL ENCORE DE LA BUÉE SUR LES PAROIS DU FOUR ?} C -- OUI --> B C -- NON --> D[Chauffer pendant 1 min] D --> E{Dès l'apparition de tâches brunâtres sur le bois ou des fumées : arrêter immédiatement le four et retirer le plat. Le séchage est terminé} </pre> <p>Ouvrir le four, laisser refroidir 30 secondes. Pendant ce temps, mélanger l'échantillon puis nettoyer la buée des parois du four</p> <p>Ouvrir le four, laisser refroidir 30 secondes. Pendant ce temps, mélanger l'échantillon.</p>									
	5	Peser le plat avec l'échantillon après le séchage (m_3)								
	6	<p>Mad est la teneur en humidité exprimée en pourcentage massique, qui doit être calculée selon la formule : $Mad = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>m_1</th> <th>m_2</th> <th>m_3</th> <th>Mad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>g</td> <td>g</td> <td>g</td> <td>%</td> </tr> </tbody> </table>	m_1	m_2	m_3	Mad	g	g	g	%
	m_1	m_2	m_3	Mad						
g	g	g	%							
7	Faire une moyenne de 3 résultats consécutifs de la teneur en humidité afin d'obtenir une moyenne									






Référence : Protocole RAGT Energie MON-ANA-21 & Norme ISO 18134

Annexe 2 : Analyse de la variabilité spatiale sur la mesure d'humidité du substrat

Cette annexe s'intéresse à l'estimation de la variabilité des mesures effectuées sur le substrat de la TTV. En effet, après quelques mesures d'humidité de substrat, il a été rapidement constaté une différence relativement élevée entre deux mesures effectuées sur deux échantillons prélevés le même jour sur la TTV (voir tableau ci-dessous). Il y a donc une forte variabilité due à l'échantillon (zone de prélèvement, consistance, profondeur...)

-

Mesure échantillon n°1	Mesure échantillon n°2
17,5 %	19,4%

Tableau n°1 : résultats des mesures obtenus lors du prélèvement du 9 mai 2022 sur la TTV

1. Procédure de l'analyse

L'analyse de la variabilité porte sur deux aspects :

- Variabilité due à l'hétérogénéité de l'humidité en fonction de la profondeur de prélèvement (variabilité dite verticale)
- Variabilité due à l'hétérogénéité de l'humidité en fonction du lieu de prélèvement sur la TTV (variabilité dite spatiale)

1.1. Variabilité verticale

Afin de quantifier la variabilité de l'humidité en fonction de la profondeur, il a été décidé de procéder de la façon suivante ; 6 échantillons ont été prélevés à deux endroits différents de la TTV sur 3 profondeurs différentes. Pour chacune des deux zones, on mesure l'humidité du substrat en surface, à mi-hauteur et au plus profond au niveau du géotextile séparant le substrat des alvéoles.

1.2. Variabilité spatiale

Afin d'effectuer l'analyse de variabilité, il a été décidé de procéder de la façon suivante : 8 échantillons sont prélevés à des endroits différents de la TTV afin d'obtenir la palette d'échantillons la plus large possible dans la limite du raisonnable. A partir du 30 juin, les mesures sont associées aux lieux auxquels les échantillons appartiennent afin de pouvoir lier les résultats au contexte dans lequel l'échantillon est prélevé. L'ensemble des échantillons sont prélevés dans la mesure du possible à une profondeur de 15-20 cm (profondeur fixée à la suite d'une campagne faite sur la profondeur de prélèvement visible 4.1)

2. Résultats

2.1. Variabilité verticale

Profondeur	Zone 1	Zone 2
Surface	14,15 %	9,84 %
Mi-hauteur	16,04 %	11,8 %
Fond	15,80 %	12,9 %

Zone	Moyenne	Médiane	Écart-type	Incertitude à 95 %
1	15,33 %	15,80 %	1 %	1,15 %

2	11,51 %	11,80 %	1,5 %	1,73 %
---	---------	---------	-------	--------

Globalement, la prise d'un échantillon à mi-hauteur soit à 15 cm est représentatif de l'humidité moyenne de la colonne de substrat. Pour la campagne portant sur la variabilité spatiale, tous les prélèvements seront réalisés à mi-hauteur de substrat

2.2. Variabilité spatiale

Quatre campagnes de mesures ont été réalisées :

- Le 7 juin 2022
- Le 21 juin 2022
- Le 30 juin 2022
- Le 7 juillet 2022

a) 7 juin 2022

Voici un tableau récapitulatif des 8 mesures effectuées :

Numéro	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 3	Ech. 4	Ech. 5	Ech. 6	Ech. 7	Ech. 8
Masse (g)	512	278	327	422	464	296	315	382
Humidité	18,2 %	12,2 %	14,1 %	17,3 %	15,3 %	15,9 %	13,6 %	16,8 %

Moyenne	Médiane	Ecart-type
15,4 %	15,2 %	2 %

On peut alors calculer l'incertitude type grâce à la formule suivante pour un niveau de confiance de 68 % :

$$u(X) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}}$$

Où $s(X)$ représente l'écart-type et n le nombre d'échantillons testés. On obtient alors l'incertitude suivante :

$$u = \frac{2}{\sqrt{8}} = 0,7 \%$$

En supposant une distribution gaussienne, on obtient alors une incertitude de +/- 1,4% (intervalle de confiance à 95%).

Ce qui a pu être remarqué ici, est que la masse des échantillons joue un rôle non négligeable lors des mesures. De façon générale la tendance est que plus l'échantillon est lourd, plus celui-ci semble fournir des résultats aux valeurs plus élevées. Il peut y avoir de nombreuses raisons à cela (délai entre le prélèvement et la mesure qui peut être de plusieurs heures à plusieurs jours, échantillons plus compacts...).

b) 21 juin 2022

Voici un tableau récapitulatif des 8 mesures effectuées :

Numéro	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 3	Ech. 4	Ech. 5	Ech. 6	Ech. 7	Ech. 8
Masse (g)	296	288	365	306	297	340	241	307

Humidité	12,5 %	6,6 %	12,6 %	11,8 %	4,7 %	12,9 %	4,1 %	12,4 %
----------	--------	-------	--------	--------	-------	--------	-------	--------

Moyenne	Médiane	Ecart-type
9,7 %	9,5 %	4 %

L'incertitude type devient alors :

$$u = \frac{0,04}{\sqrt{8}} = 1,4 \%$$

En supposant une distribution gaussienne, on obtient alors une incertitude de +/- 2,8% (intervalle de confiance à 95%)

Cette dernière campagne qui s'est effectuée après une période de canicule et indique qu'on peut avoir des grandes différences de mesures par rapport à la localisation du prélèvement. Certains échantillons ont été prélevés dans des zones très dégagées tandis que d'autres étaient situés dans des zones fortement végétalisées. Cela amène donc une nouvelle fois à adapter le protocole afin de réaliser une estimation générale de l'humidité de la TTV. Les deux campagnes suivantes ont été menées de façon bien plus rigoureuse en travaillant avec des échantillons à masse constante et en liant les résultats aux conditions de prélèvement.

c) 30 juin 2022

De façon similaire aux campagnes précédentes, 8 échantillons ont été prélevés en choisissant cette fois-ci 4 zones fortement couvertes de végétaux et 4 zones très dégagées (voir plan et images en annexes)

On obtient le tableau récapitulatif suivant :

Numéro	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 3	Ech. 4	Ech. 5	Ech. 6	Ech. 7	Ech. 8
Masse	400	408	404	403	401	400	405	399
Humidité	15,75 %	16,18 %	15,35 %	19,11 %	18,20 %	14,00 %	13,33 %	17,29 %

En vert, les échantillons prélevés sous couvert végétal dense (1,2,3 et 4)

On remarque alors qu'il n'y a pas de tendance nette entre les échantillons à priori découverts d'un point de vue végétal et ceux qui se trouvaient dans des zones densément végétalisées. Quelques remarques doivent toutefois être prises en compte pour interpréter ces résultats.

Entre la campagne du 21 juin et celle du 30 juin, 45 mm se sont précipités sur la TTV ce qui indique que d'un point de vue hydrique le substrat a tout de même été alimenté en eau. Il faut également considérer le fait que l'évapotranspiration a été plus faible entre le 22 et le 30 juin (1,79 mm par jour en moyenne) qu'entre le 16 et le 21 juin (4,75 mm par jour en moyenne).

D'un autre côté, il faut considérer le fait que l'échantillonnage n'est pas aussi aisé sur une zone dégagée que sur une zone couverte. Il est beaucoup plus compliqué de prélever un échantillon à 15 cm de profondeur lorsqu'il y a une grande densité de végétaux sans perturber le milieu et sans prélever

trop de matière organique. Les échantillons sont probablement plus représentatifs de la situation en surface dans ces cas-là.

Moyenne	Médiane	Écart-type
16,15 %	15,96 %	2 %

L'incertitude type devient alors :

$$u = \frac{0,02}{\sqrt{8}} = 0,7 \%$$

En supposant une distribution gaussienne, on obtient alors une incertitude de +/- 1,4% (intervalle de confiance à 95%)

Une quatrième campagne a été réalisée dans le but de confirmer ou non les tendances observées durant cette campagne.

d) 7 juillet 2022

De la même façon, 8 échantillons ont été prélevés aux mêmes endroits que la campagne précédente.

On obtient le tableau récapitulatif suivant :

Numéro	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 3	Ech. 4	Ech. 5	Ech. 6	Ech. 7	Ech. 8
Masse	404	398	398	398	405	404	404	398
Humidité	15,35 %	17,59 %	14,57 %	19,84 %	19,75 %	11,88 %	12,38 %	13,57 %

On remarque alors une tendance nette qui se confirme par rapport à la mesure du 30 juin 2022. De façon générale, les zones 2, 4 et 5 semblent mieux retenir l'humidité dans les conditions actuelles. Il est à noter que sur les deux dernières semaines, il n'y a pas eu de fortes chaleurs avec de façon générale un temps relativement couvert ce qui expliquerait que l'humidité n'ait pas réellement diminué entre les deux mesures.

En ce qui concerne les données statistiques on obtient :

Moyenne	Médiane	Écart-type
15,62 %	14,96 %	3,1 %

Soit une incertitude de :

$$u = \frac{0,031}{\sqrt{8}} = 1,1 \%$$

En supposant une distribution gaussienne, on obtient alors une incertitude de +/- 2,2% (intervalle de confiance à 95%)

3. Discussion et conclusion

En conclusion, le bilan de l'analyse de la variabilité est le suivant :

- Pour la variabilité dite en profondeur, celle-ci est d'environ 1,5% (en erreur absolue). La prise d'un échantillon à mi-hauteur soit à 15 cm est représentatif de l'humidité moyenne de la colonne de substrat.
- Pour la variabilité dite spatiale, le moyenne des incertitudes s'élève à environ 2% (en erreur absolue)

Nous retiendrons donc une incertitude absolue de 2% (de l'ordre de 10% en relatif, puisque les humidités sont d'environ 15/20%) sur les mesures d'humidités réalisées manuellement

Notons toutefois qu'il est important de remettre en contexte les quatre campagnes réalisées puisqu'elles présentent des grandes différences météorologiques.

En ce qui concerne celle du 7 juin, 23 mm de pluie se sont précipités sur la TTV durant la semaine précédant les prélèvements, ce qui indique une humidification récente du site. Malgré cela, on remarque tout de même des différences avec une amplitude de 4% entre les valeurs extrêmes : les échantillons les plus découverts d'un point de vue végétal et granuleux semblent avoir perdu plus rapidement leur teneur en eau.

Afin de confirmer cela, deux nouvelles campagnes (30 juin et 7 juillet) ont été réalisées en prélevant 8 échantillons dans 8 zones différentes identiques (4 découvertes et 4 couvertes). Ces deux campagnes ont été faites durant une période aux températures et ensoleillement modérés avec des épisodes de pluie beaucoup plus fréquents que lors des mois de mai et juin.

Ces deux campagnes ont montré que le fait qu'une zone soit découverte ne signifie pas forcément que l'humidité sera plus faible. L'humidité du substrat et l'amplitude semblent alors fortement dépendre des conditions météorologiques précédant l'évènement.

Cependant, les résultats indiquent tout de même que les mesures semblent rester stables par localisation. Les mesures du 7 juillet et du 30 juin présentent des tendances similaires. Mais encore une fois, L'humidité du substrat et l'amplitude semble alors fortement dépendre des conditions météorologiques précédant le prélèvement. A noter que cela est pertinent en période estivale mais pas forcément en hiver étant donné les conditions locales.

Photos des conditions de prélèvement 30/06/2022





Annexe 3 : AGROVE : note Technique sur le retard d'instrumentation de la TTV EMSE 2022

NOTE TECHNIQUE SUR RETARD TOITURE VEGETALISEE « ZERO REJETS »

Objet : Cette note a pour objectif d'expliciter les problèmes techniques rencontrés par Agrove dans le cadre du projet de l'études hydrique de la TTV situé sur la chaufferie de Saint-Etienne.

Agrove est une jeune entreprise innovante créée en 2019 qui a développé des systèmes de mesure connectés tel que des capteurs d'humidité du sol capacitif, des capteurs de niveaux d'eau capacitifs et des capteurs climatiques.

Durant les premières phases du projet, Agrove a rencontré de nombreuses problématiques liées à la connectivité du produit.

Agrove utilise la technologie LORA pour transmettre ses données sur ses serveurs et ses applications réseaux.

Cette capacité est permise par un composant clé dans la conception des cartes électroniques Agrove développé par le fabricant de composants électroniques Murata. La référence de ce composant est CMWX1ZZABZ-093. Ce composant intègre un logiciel édité par le fabricant qui permet son bon fonctionnement (firmware).

Or ce logiciel comportait un défaut qui n'a été corrigé par le fabricant qu'en Février 2022. Ce défaut entraînait la déconnection systématique des objets connectés du réseau et empêchait de ce fait la bonne collecte des données.

Corrigé en Avril 2022 et disponible en Juin sur la nouvelle version des cartes électroniques Agrove, les produits sont maintenant fonctionnels mais ce dysfonctionnement externe à Agrove aura entraîné de nombreux mois de retards vis-à-vis de la collecte des données hydriques sur la Toiture Végétalisée et le Jardin de Pluie Urbain, objets de cette études.

AGROVE SAS
Technopole de l'Arbois,
Avenue Louis Philibert
13290 Aix-en-Provence
FRANCE
SIRET : 85303584800029



Quentin Rousselot
Agrove SAS

Annexe 4 : Exemple d'analyse de la réponse hydrique de la TTV de Saint-Etienne et estimation de Ksaison

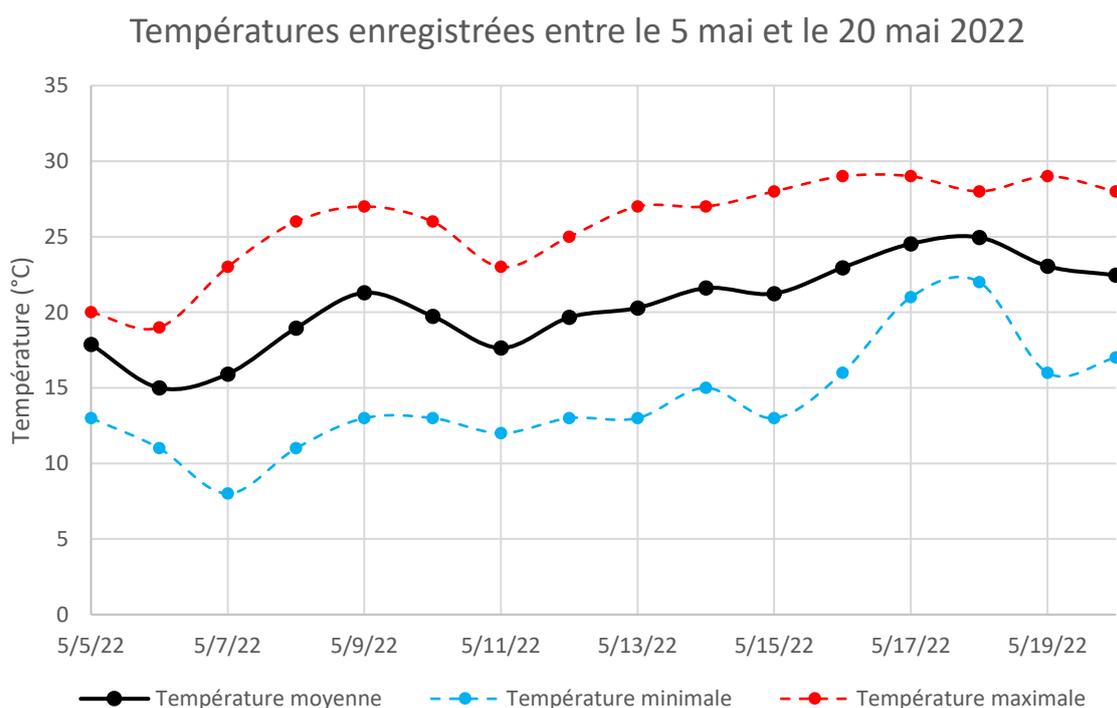
Période du 9 au 20 mai novembre 2022.

La période qui s'étend entre le 9 mai et le 20 mai s'est démarqué par ses fortes chaleurs et l'absence de pluie. Une forte décroissance dans les niveaux d'eau et d'humidité de la TTV a été observée, signe d'une forte évapotranspiration de cette dernière. Ce rapport a pour objectif d'estimer l'évapotranspiration à partir des données hydriques précédentes (humidité du substrat et hauteur d'eau des alvéoles) durant cette période au vu des conditions particulières et de comparer cette valeur à l'évapotranspiration potentielle fournie par la station Davis et météo France.

1. Caractéristiques de la période

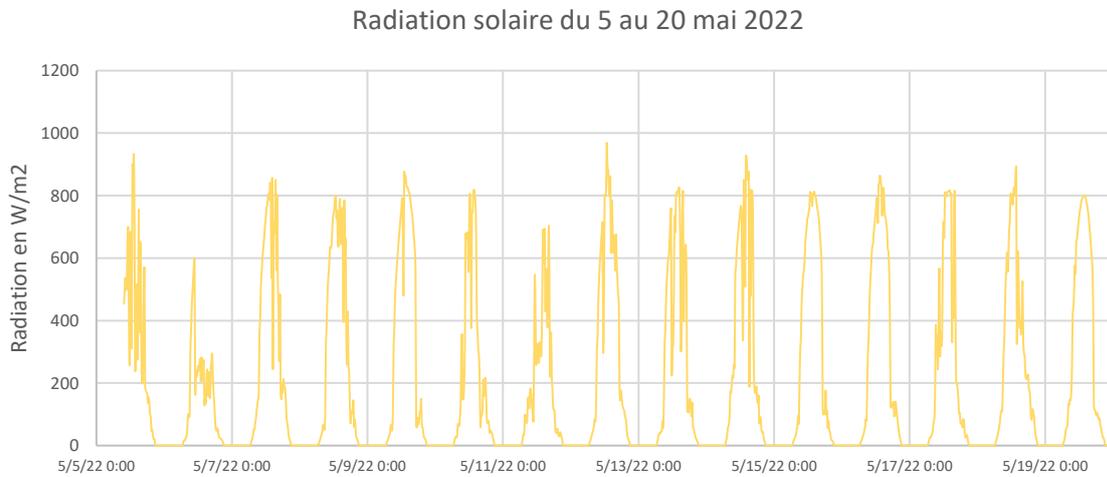
Cette période a été très chaude avec une moyenne de 20,3° C (nuits comprises) avec un niveau de précipitations très faible qui s'élève à 0,8 mm au total.

a) Températures



La plus haute température enregistrée est de 29 °C et la plus haute moyenne s'élève à 25 °C (nuit comprise)

b) Radiation solaire



Le rayonnement solaire durant cette période s'élève à une moyenne de 5,28 kWh/m²/jour. A titre de comparaison, l'annuaire mairie indique une valeur moyenne de 5,12 kWh/m²/j pour le mois de mai à Saint-Etienne.

c) Vent

Il a eu relativement peu de vent ce qui est moins propice en ce qui concerne le processus d'évapotranspiration.

d) État de la TTV

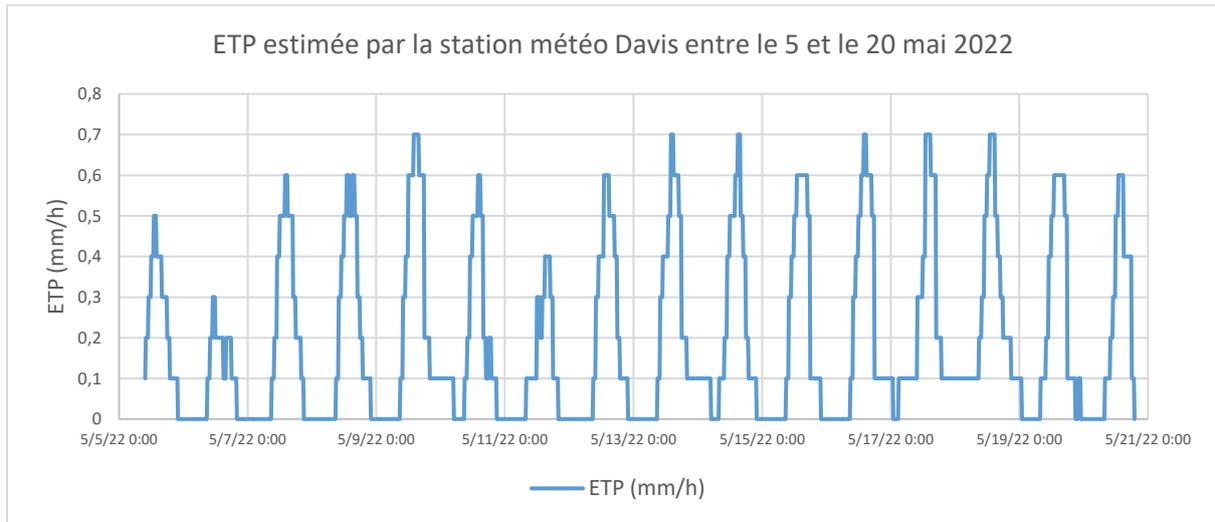


2. Estimation de l'évapotranspiration

Dans ce paragraphe seront comparées l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) fournie par la station météo Davis installée sur le site et par la station météo France de la Purinière N°42218011, et l'évapotranspiration réelle (ETR) grâce à un bilan hydrique de la TTV à partir des mesures réalisées in situ.

a) Evapotranspiration Potentielle

i. Estimation de l'ETP par la station météo Davis



La station météo Davis installée sur la TTV présente un module d'estimation de l'ETP qui se base sur la méthode de Penmann-Monteith (figure ci-dessus). Le cumul d'ETP du 09/05/22 – 20/05/22 s'élève à une hauteur totale de 55,3 mm.

ii. Comparaison aux données météo France

Grâce aux données fournies par la station météo France de la Purinière N°42218011, on obtient un profil de l'ETP suivant :

ETP journalière Météo France (05/05 - 20/05)



Le total s'élève donc à 62,2 mm évapotranspirés sur la période allant du 9 au 20 mai. On obtient des valeurs très proches de celles estimées par la station météo Davis (différence de 11%) ce qui permet de valider les estimations faites par in situ.

b) Evapotranspiration Réelle

L'ETR est obtenue par sommation des pertes en eau du substrat et des alvéoles. Pour cela, plusieurs mesures ont été réalisées en ce qui concerne l'humidité du sol (tableau de gauche) ainsi que le niveau dans l'eau dans les alvéoles de la TTV (tableau de droite).

Date et heure	Teneur en eau %	Date et heure	Hauteur alvéoles (cm)
9/5/2022	0,184	10/05/2022 15:30	8
17/5/2022	0,166	16/05/2022 14:45	6
20/5/2022	0,152	20/05/2022 09:15	4,5

La TTV présente une couche de substrat de 270 mm donc la perte d'eau s'élève à $(0.184-0.152)*270 = 8.6$ mm soit un volume évapotranspiré de 1,89 m³. Quant aux alvéoles, on considère que la hauteur évapotranspirée est de $8 - 4,5 = 3,5$ cm. Il faut également ajouter 0.8 mm de pluie précipitée sur la période.

On obtient alors une hauteur d'eau totale de $35 + 8.6 + 0.8 = 44,4$ mm

iii. Bilan

Estimation de l'ETP sur la période du 9 mai au 20 mai (Davis)	Estimation de l'ETP sur la période du 9 mai au 20 mai (Météo France)
55.3 mm	62.2 mm

Estimation de l'ETR sur la période du 9 mai au 20 mai (mesures in situ)
44.4 mm

iv. Incertitudes sur l'estimation de l'ETR par mesures manuelles

A partir de l'analyse d'incertitudes effectuée le 7 juin, l'incertitude sur la mesure d'humidité du substrat s'élève à 2%. Les relevés de hauteur d'eau dans le réservoir de stockage présentent quant à elles une incertitude estimée à 5 mm.

L'estimation du volume d'eau total évapotranspirée durant la période du 9 au 20 mai présente donc l'incertitude suivante :

- Sur le volume stocké par la TTV, l'incertitude s'élève à $\sqrt{2 \times 0,02^2} \times 270 = 7,6$ mm
- Sur le volume stocké dans les alvéoles, la hauteur d'eau finale est une moyenne de deux valeurs donc elle présente une incertitude de $\frac{\sqrt{2 \times 5^2}}{2} = 3,5$ mm.

Finalement on obtient une incertitude sur l'estimation de l'ETR de : $\sqrt{7,6^2 + 3,5^2} = 8,4$ mm

L'estimation de l'ETR sur la période du 9 au 20 mai à partir des mesures in situ devient alors :

$$\mathbf{ETR_{in\ situ} = 44.4 \pm 8.4\ mm}$$

c) Interêt pour la modélisation et calage du paramètre K du modèle FAVEUR

Le bon fonctionnement du modèle FAVEUR dépend en grande partie du calage du modèle notamment en ce qui concerne l'évapotranspiration réelle. Un paramètre K dépendant de la saison permet d'ajuster l'évapotranspiration pour mieux correspondre à la réalité cependant il faut pouvoir le calibrer. En réalisant des études sur l'évapotranspiration, il est possible d'ajuster la valeur de K grâce aux comparaisons entre les différents moyens d'estimation de la hauteur d'eau perdue. A partir des résultats précédemment présentés (ETP obtenue par station Davis et Météo France d'une part, et d'autre part l'ETR mesurée in situ) on obtient une estimation du facteur K :

$$K = \frac{ETR}{\frac{ETP_{davis} + ETP_{Météo\ France}}{2}}$$

$$K = \frac{44.4}{\frac{62.2 + 55.3}{2}} = 0,76 \pm \Delta K$$

L'incertitude de ce résultat s'élevant à :

$$\Delta K = \frac{8.4}{\frac{62.2 + 55.3}{2}} = 0,14$$

Soit une estimation finale :

$$\mathbf{K = 0,76 \pm 0,14}$$

Bibliographie

- Berthier, E., Ramier, D. et de Gouvello, B. (2011). Simulation of green roof hydrological behavior with a reservoir model, 9.
- Berthier, E., Ramier, D., Pinta, P. et Safitri, L. (2014). *FAVEUR : UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION DES TOITURES VÉGÉTALISÉES POUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES*. Congrès ASTEE-SHF, Bordeaux.
- Berthier, E., Ramier, D., Pinta, P. et Safitri, L. (s. d.). *FAVEUR : UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION DES TOITURES VÉGÉTALISÉES POUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES*, 8.
- Bouzouidja, R. (2014). Fonctionnement hydrique d'un Technosol superficiel - application à une toiture végétalisée, 190.
- Broekhuizen, I., Sandoval, S., Gao, H., Mendez-Rios, F., Leonhardt, G., Bertrand-Krajewski, J.-L. et Viklander, M. (2021). Performance comparison of green roof hydrological models for full-scale field sites. *Journal of Hydrology X*, 12, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2021.100093>
- Burszta-Adamiak, E. et Mrowiec, M. (2013). Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 68(1), 36-42. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.219>
- CEREMA. (2019). *Action-recherche du Cerema : évaluation d'une toiture terrasse végétalisée à zéro rejet*.
- Chkir, N. (1994, 23 mars). *Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit* [phdthesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00520737>
- D'Amato, N. (1998). *Etude climatologique et statistique des évènements pluvieux en zone sahélienne, analysée à partir des données pluviographiques de l'expérience EPSAT-Niger*. Université de Montpellier II.
- Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S. et Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*, 73, 494-508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>
- Hiltner, R. N., Lawrence, T. M. et Tollner, E. W. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*, 358(3-4), 288-293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.010>
- Kasmin, H., Stovin, V. R. et Hathway, E. A. (2010). Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. *Water Science and Technology*, 62(4), 898-905. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.352>
- Kolb, W. (2004). GOOD REASONS FOR ROOF PLANTING - GREEN ROOFS AND RAINWATER. *Acta Horticulturae*, (643), 295-300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.643.38>
- Liptan, T. (2003). *Planning, zoning and financial incentives for ecoroofs in Portland, Oregon*. Greening Rooftops for Sustainable Communities, Chicago (p. 113-120). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20398179>

- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Bergen Jensen, M. et Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology*, 519, 3237-3248. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.030>
- Metselaar, K. (2012). Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.009>
- Molina-Sanchis, I., Lázaro, R., Arnau-Rosalén, E. et Calvo-Cases, A. (2016). Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(3), 226-236. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0024>
- Palla, A., Gnecco, I. et Lanza, L. G. (2009). Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.008>
- Palla, A., Gnecco, I. et Lanza, L. G. (2012). Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrological Processes*, 26(1), 73-84. <https://doi.org/10.1002/hyp.8112>
- Prowell, E. S. (s. d.). AN ANALYSIS OF STORMWATER RETENTION AND DETENTION OF MODULAR GREEN ROOF BLOCKS, 98.
- Ramier, D., Berthier, E., Gallis, D., Dussuchale, A., Pinta, P. et Versini, P.-A. (2013). *ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE TOITURES VÉGÉTALISÉES: OBSERVATIONS ET MODELISATION*. Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain, Nantes (p. 12).
- Sandron, L., Szelényi, D., Sandoval, S., Villarreal, E. et Bertrand-Krajewski, J.-L. (2020). *URBIS : TECHNICAL MANUAL*.
- Savart, C., Herremans, L., Zobrist, C. et Merlier, C. (1998). Méthode d'analyse des pluies pour l'évaluation de l'impact de la pollution générée par le ruissellement urbain. *La Houille Blanche*, 84(7), 40-45. <https://doi.org/10.1051/lhb/1998079>
- Sherrard, J. A. et Jacobs, J. M. (2012). Vegetated Roof Water-Balance Model: Experimental and Model Results. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(8), 858-868. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000531](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000531)
- Stovin, V., Vesuviano, G. et Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- Versini, P.-A., Ramier, D., Berthier, E. et de Gouvello, B. (2015). Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale. *Journal of Hydrology*, 524, 562-575. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020>
- Voignier, P. (1990, 1 janvier). *Influence de la structure spatiale des pluies et du bassin versant sur les écoulements en réseau : approche à l'aide du logiciel EAUSER : Application à Saint-Etienne* [these de doctorat, Paris, ENMP]. <https://www.theses.fr/1990ENMP0234>
- Zheng, X., Zou, Y., Lounsbury, A. W., Wang, C. et Wang, R. (2021). Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105577. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105577>

