

Projet Industriel 2022/2023

Suivi du fonctionnement hydrique de la Toiture Terrasse Végétalisée (TTV) de l'École des Mines de Saint-Étienne



Étudiante : Paula Vergara Garrido

Tuteur école : Eric Piatyszek

Sommaire

Problématique et contexte	3
Présentation de la TTV	4
Matériels et méthodes	5
Prise des mesures manuelles sur site	5
Estimation de la fuite dans le JPU	5
Estimation de l'ETR	5
Analyse de la cohérence des données Météo France/Davis	6
Estimation des performances de la TTV	6
Résultats obtenus	7
Prise des mesures manuelles sur site	7
Estimation de la fuite sur le JPU	8
Estimation de l'ETR	8
Analyse de la cohérence des données Météo France/Davis	9
Estimation des performances de la TTV	10
Conclusion	11
Bibliographie	12
Annexes	13
Annexe 1 : Protocole de séchage ADEME (Réf. : 010367-16).....	13
Annexe 2 : Estimation du débit de fuite du Jardin de Pluie Urbain	14
Introduction	14
Estimation du débit de fuite.....	15
Débit moyen sur la période.....	17
Conclusion	17
Annexe 3 : Analyse de la réponse hydrique de la TTV de l'Ecole des Mines de Saint- Etienne	18
Annexe 4 : Note sur la procédure à suivre pour obtenir les performances de la TTV	28
Obtention de la pluie par jour	28
Calcul de la performance de la TTV	29
Incertitude du calcul	29
Calcul de la performance de la TTV à partir des données pluviométriques de Météo France	30

Problématique et contexte

Compte tenu du contexte de changement climatique dans lequel nous vivons, couplé à la croissance démographique et à la densification urbaine, le phénomène des îlots de chaleur urbains (ICU) est de plus en plus fréquent. Ce phénomène consiste en une augmentation des températures de l'air et de la surface dans les centres-villes en raison des propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments et autres infrastructures (Cerema, 2019). En outre, l'imperméabilité du sol et la faible présence de végétation dans la ville perturbent le cycle de l'eau et empêchent son infiltration dans le sol, ce qui entraîne un ruissellement plus important dans le réseau d'assainissement lors de fortes pluies et cause un risque de saturation du système.

Face aux impacts du phénomène des ICU sur la santé, la biodiversité et le bien-être général de la population, ainsi qu'aux risques d'inondation que présentent les sols imperméables, il est nécessaire de traiter ce problème. À cette fin, les *Nature-Based Solutions* sont une option qui permettent de travailler avec la nature pour répondre aux défis sociétaux (*Nature-Based Solutions Initiative*, 2017). Une solution est la végétalisation, qui consiste à l'installation des végétaux afin d'utiliser la capacité d'absorption d'eau des plantes pour alléger la charge du réseau d'assainissement et de profiter de l'évapotranspiration qu'elles dégagent, réduisant ainsi la température.

Dans ce contexte, l'École des Mines de Saint-Étienne a profité de la construction d'une nouvelle chaufferie en 2021 pour installer une Toiture Terrasse Végétalisée (TTV) avec 10 cm de stockage débordant dans un Jardin de Pluie Urbain (JPU). Selon la littérature, ce type d'installation a une capacité de rétention des eaux de pluie d'environ 62% (Zheng et al., 2021). L'objectif de ce projet industriel est de connaître la performance réelle de la TTV, c'est-à-dire de quantifier la proportion d'eau de pluie qui tombe sur la toiture et n'atteint pas le réseau d'assainissement, limitant ainsi le ruissellement et contribuant à la lutte contre les inondations en milieu urbain.

À cette fin, le système a été instrumenté par la société AGROVE en installant des capteurs de niveau d'eau et d'humidité, et un modèle d'eau est en cours de développement pour surveiller et simuler son fonctionnement. Ce projet comporte donc deux tâches principales : le suivi de l'acquisition et de l'exactitude des données météo-hydrologiques de la TTV et l'analyse des événements pluvieux pour évaluer ses performances.

Présentation de la TTV

La TTV est constituée d'une couche d'alvéoles, une couche de substrat et une couverture végétale comme le montre la figure 1. Les alvéoles et le substrat sont séparés par un géotextile perméable et tous les deux permettent de stocker l'eau de pluie et servent de source d'eau pour les plantes.

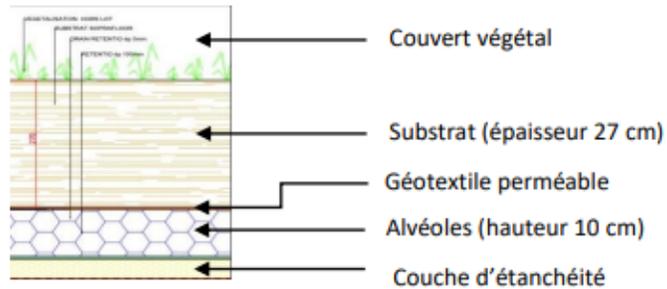


Figure 1 : Vue en coupe de la TTV

Lorsque le stockage de la TTV est plein, l'eau de pluie se déverse vers un JPU. Il est constitué de deux étages, le premier situé à 55 cm de profondeur et le second situé à 85 cm de profondeur comme le montre la figure 2.

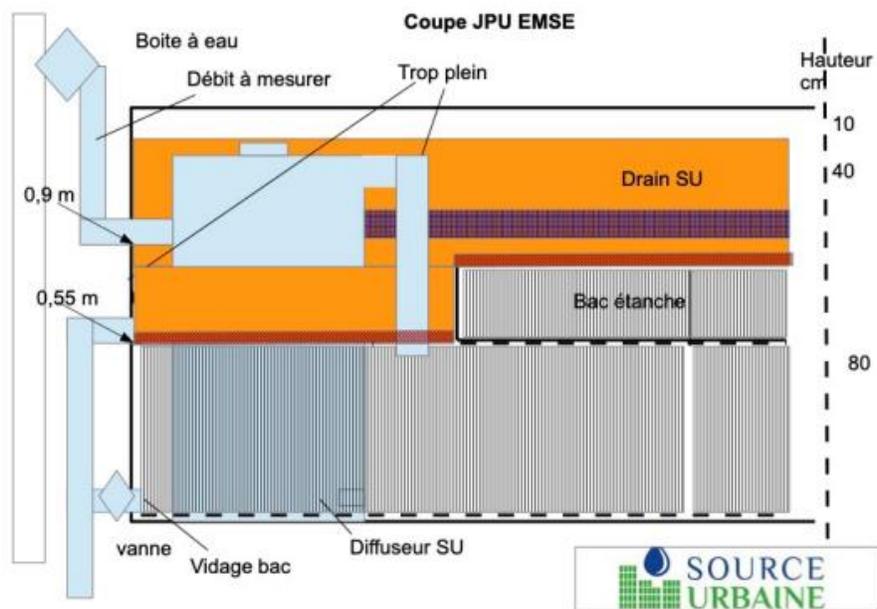


Figure 2 : Plan en coupe du JPU (élaboré par l'entreprise SOURCE URBAINE)

Une fuite a été constaté dans le JPU, ce qui empêche d'évaluer sa capacité de stockage des eaux de pluie. C'est pourquoi lors de ce projet industriel, l'analyse des performances s'est concentrée sur la TTV.

Matériels et méthodes

Prise des mesures manuelles sur site

Des mesures manuelles hebdomadaires ont été effectuées pour obtenir la hauteur d'eau stockée et l'humidité du substrat. Pour la hauteur d'eau un bâton de bois a été utilisé pour l'insérer dans les tuyaux du capteur maître et secondaire de la TTV. Ce dernier est près du tuyau de déversement vers le JPU, où une troisième mesure est prise.

De la même manière, des mesures ont été prises dans le JPU, pour suivre la hauteur d'eau dans les deux étages, chacun d'eux ayant un capteur associé.

Pour l'humidité du substrat, deux échantillons ont été pris chaque semaine et l'humidité a été calculé en suivant la méthode au four à micro-ondes (Annexe 1).

Estimation de la fuite dans le JPU

Afin d'estimer le débit de la fuite présent dans JPU, les mesures manuelles de la hauteur d'eau ont été utilisés pour calculer la différence de hauteur entre deux mesures consécutives et ainsi obtenir le volume d'eau perdue à cause de la fuite. Ensuite, la différence de temps entre la prise de chaque mesure a été utilisée pour estimer le débit. Cette procédure est présentée plus en détail dans l'annexe 2.

Estimation de l'ETR

L'évapotranspiration réelle (ETR) a été estimée à partir des mesures in situ d'humidité et de hauteur d'eau du 30 septembre au 7 octobre 2022. La différence d'humidité et de hauteur d'eau entre ces dates, additionné à la pluie qui s'est abattue, correspondent à l'ETR. La procédure complète est présente dans l'annexe 3.

Analyse de la cohérence des données Météo France/Davis

Comme les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont disponibles par jour auprès de Météo France, les données de la station de Davis (disponibles toutes les 15 min) ont également été utilisées pour obtenir les précipitations et l'ETP journalières. Ces données ont ensuite été agrégées pour obtenir des valeurs par mois afin de pouvoir les comparer.

Estimation des performances de la TTV

La capacité maximale de stockage du substrat est estimée à 22% d'humidité, tandis que la hauteur maximale des alvéoles correspond à 8 cm à côté du tuyau de débordement. La hauteur d'eau et l'humidité mesurées manuellement ont été soustraites de cette capacité maximale afin d'obtenir la capacité de stockage disponible dans le TTV. Ensuite, à partir des données météorologiques journalières, les périodes de pluie ont été identifiées et le débordement de la TTV a été calculé si les précipitations sont supérieures à la capacité totale de stockage, cette dernière étant :

Capacité totale de stockage = Capacité disponible alvéole + capacité disponible substrat

L'annexe 4 présente de manière plus détaillée la procédure suivie pour le calcul du rendement, qui suit la formule :

Rendement (%) = $1 - (\text{Rejet TTV en mm.}) / (\text{Pluie en mm.})$

Résultats obtenus

Prise des mesures manuelles sur site

Les mesures effectuées sur la hauteur d'eau sont présentées dans le tableau 1. La cellule en surbrillance correspond à une mesure prise de nuit où la visibilité était faible et n'est donc pas représentative. On peut voir qu'avant le 11 octobre, on n'a mesuré la hauteur d'eau que dans le capteur maître, car il n'était pas possible d'accéder aux autres points d'échantillonnage qui se trouvaient sous une dalle.

Compte tenu d'une apparente dénivelée, la hauteur d'eau maximale au niveau du capteur maître est de 9 cm, en contraste à la hauteur maximale au niveau du tuyau de débordement, qui est de 8 cm.

On constate que presque pendant toute la période les alvéoles de la TTV étions soit plein, soit proche de sa capacité maximale.

TTV maître			TTV Entrée du tuyau déversement			TTV secondaire		
Date et heure	Relevé (cm)	Mesure (pF)	Date et heure	Relevé (cm)	Mesure (pF)	Date et heure	Relevé (cm)	Mesure (pF)
16-09-2022 10:40	7,5	#N/A						
23-09-2022 14:21	7,5	#N/A						
29-09-2022 9:26	8,5	#N/A						
30-09-2022 9:00	9	#N/A						
03-10-22 17:09	9	#N/A						
04-10-22 9:58	8,5	#N/A						
05-10-22 9:45	8,5	#N/A						
06-10-22 10:16	8	#N/A						
07-10-22 9:46	8	#N/A						
11-10-22 11:40	8,5	#N/A	11-10-22 11:40	7,5		11-10-22 11:40	8,5	
12/102022 9:53:00	8,5	#N/A	12-10-22 9:53	7,5		12-10-22 9:53	8,5	
14-10-2022 10:42	9	#N/A	14-10-2022 10:42	8		14-10-2022 10:42	9	
19-10-2022 13:25	8	#N/A	19-10-2022 13:25	7		19-10-2022 13:25	8	
20-10-2022 11:40	8	#N/A	20-10-2022 11:40	7		20-10-2022 11:40	8	
21-10-2022 10:26	7,8	#N/A	21-10-2022 10:26	7		21-10-2022 10:26	8	
28-10-2022	6,8	#N/A	28-10-2022 8:30	6		28-10-2022 8:30	6,8	
04-11-2022 11:00			04-10-2022 11:00	7		04-11-2022 11:00	8,3	
09-11-2022	8,8		09-11-2022	8,2		09-11-2022	8,8	
10-11-2022 11:58	8,5		10-11-2022 11:58	8		10-11-2022 11:58	8,5	
			15-11-2022 14:00	8				
18-11-2022 17:47	8,7		18-11-2022 17:47	7,6		18-11-2022 17:47	8,6	
25-11-2022 12:35	8,5		25-11-2022 12:35	8		25-11-2022 12:35	8,5	
02-12-2022	8,5		02-12-2022	8		02-12-2022	8,5	
09-12-2022	8,8		09-12-2022	8		09-12-2022	9	
16-12-2022	8,5		16-12-2022	8		16-12-2022	9	

Tableau 1 : Hauteur d'eau dans les alvéoles de la TTV

La tableau 2 montre l'humidité moyenne obtenue à partir des deux échantillons de substrat mesurés chaque semaine. On constate qu'entre le 18 et le 25 novembre, ainsi qu'entre le 9 et le 16 décembre, le substrat avait une humidité proche de sa capacité maximale de stockage d'eau.

Date et heure	Teneur en eau	Hauteur d'eau (mm)
16-09-2022	0,184	49,674
23-09-2022	0,147	39,586
30-09-2022	0,175	47,308
07-10-2022	0,148	39,923
14-10-2022	0,181	48,938
21-10-2022	0,154	41,460
28-10-2022	0,128	34,425
10-11-2022	0,192	51,832
18-11-2022	0,214	57,705
25-11-2022	0,214	57,705
02-12-2022	0,186	50,287
09-12-2022	0,206	55,489
16-12-2022	0,214	57,857

Tableau 2 : Humidité du substrat de la TTV

Estimation de la fuite sur le JPU

Le débit de la fuite a été estimé entre le 30 septembre et le 7 octobre après un débordement de la TTV vers le JPU. Au début, le 30 septembre lorsque le JPU avait une hauteur d'eau élevé (37 cm) le débit de la fuite était de $0,51 \pm 0,11$ L/min. Ensuite, entre le 30 septembre et le 3 octobre le débit de la fuite était de $0,202 \pm 0,007$ L/min et finalement entre le 3 et le 7 octobre le débit était de $0,026 \pm 0,01$ L/min. Cette diminution du débit de la fuite s'explique par la diminution de la hauteur d'eau dans le JPU, en tenant compte du fait que la fuite est proche du fond, plus la hauteur d'eau est faible, par conséquent plus la pression exercée par la colonne d'eau est faible.

Estimation de l'ETR

L'ETR obtenu sur la période du 30 septembre au 7 octobre est de 2,44 mm/jour. Ce chiffre est supérieur à l'ETP estimée à partir des données de la station Davis et de Météo France, respectivement de 1,63 et 1,89 mm/jour. Normalement, l'ETR devrait être inférieure à l'ETP, puisque cette dernière correspond à l'évapotranspiration maximale possible dans des conditions optimales. Cette erreur peut être due au fait que l'estimation a été faite sur une

courte période de temps, il est donc nécessaire de ré-estimer sur une période de temps plus longue.

Une autre étude ETR a été réalisée dans la période du 19 octobre au 4 novembre étant donné l'absence de débordement de la TTV. Un ETR de 1,54 mm/jour a été obtenu, ce qui est inférieur à l'ETP estimé à partir de la station Davis et Météo France, respectivement de 1,71 et 2,5 mm/jour. Par conséquent, le choix d'une période plus longue a permis d'obtenir une estimation cohérente de l'ETR.

Analyse de la cohérence des données Météo France/Davis

La figure 3 montre une comparaison des précipitations mesurées par la station de Davis et par Météo France. Au total, il est tombé 624,8 mm de pluie sur la période selon Météo France et 684,8 mm de pluie selon la station de Davis, ce qui correspond à une différence de 10% dans les mesures. Cette différence est due à des événements pluvieux ponctuels, où les précipitations ont probablement été de forte intensité et de courte durée, ce qui se traduit généralement par une faible extension territoriale survenant à un point de mesure et pas à l'autre.

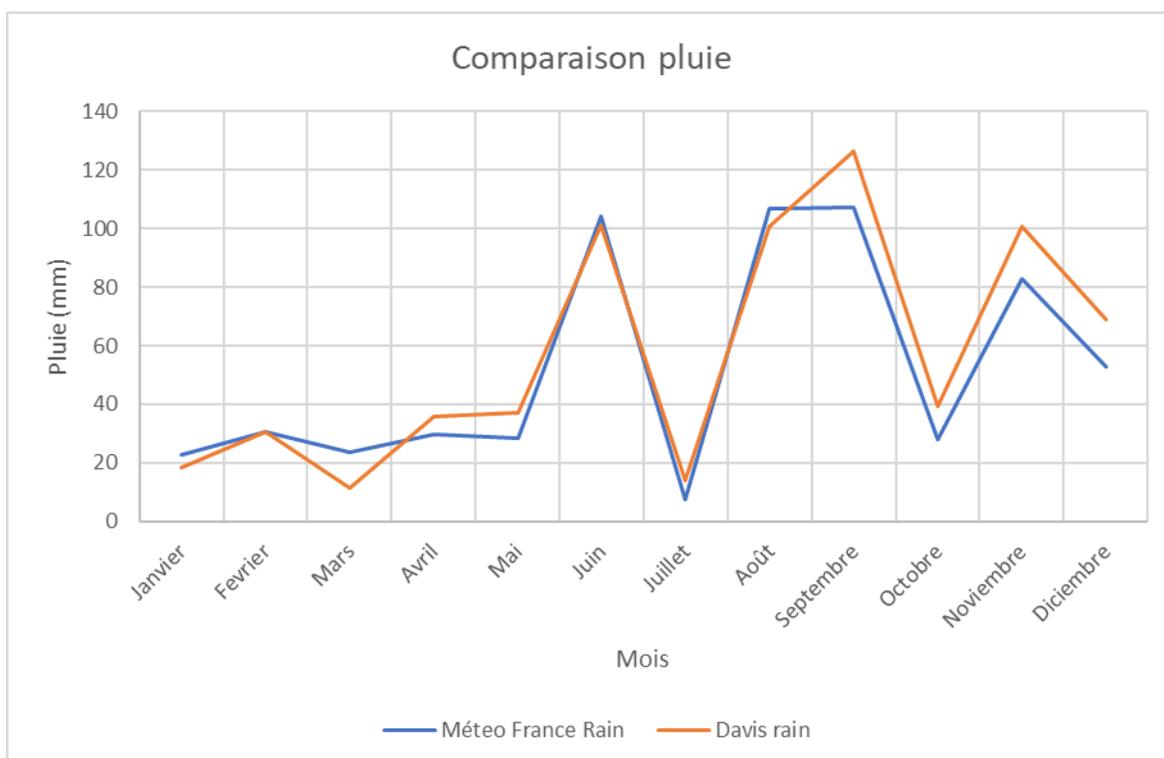


Figure 3 : Comparaison des précipitations mesurées par la station de Davis et par Météo France

La figure 4 montre la différence d'ETP mesurée par la station Devis et Météo France. Selon cette dernière, l'ETP totale de la période était de 1000,7 mm, alors que d'après la station Devis elle était de 810,1 mm, ce qui correspond à une différence de 19%.

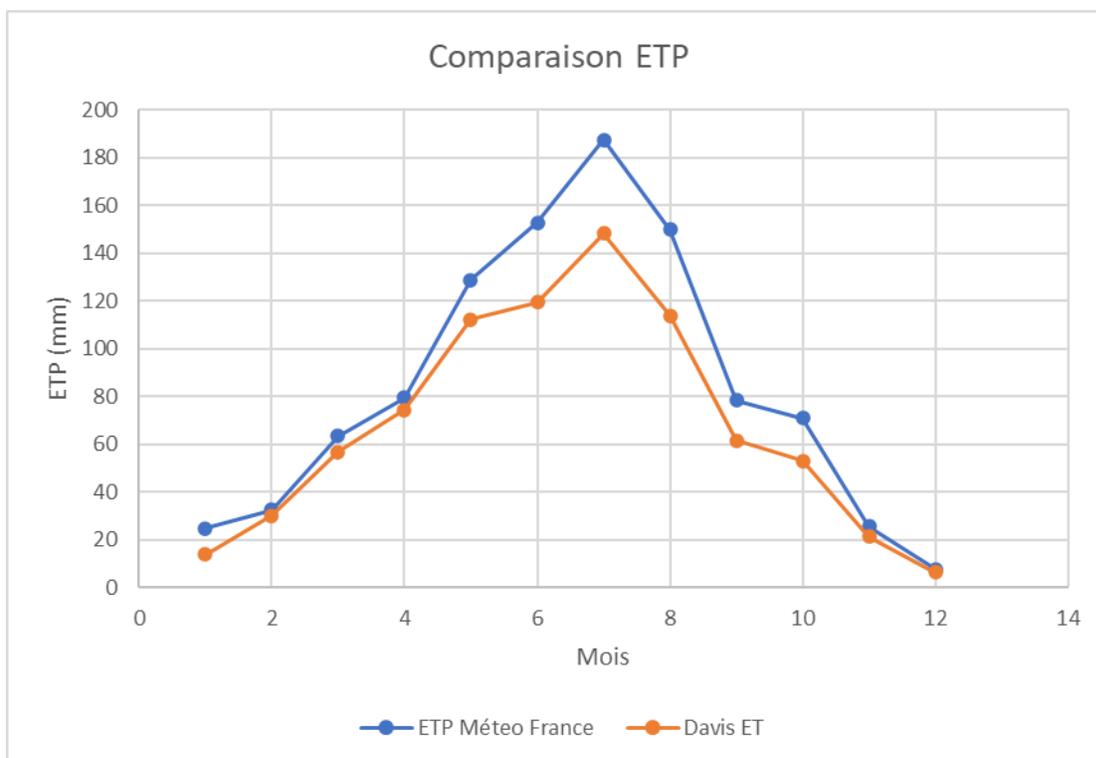


Figure 4 : Différence d'ETP mesurée par la station Devis et Météo France

Estimation des performances de la TTV

Comme le montre le tableau 3, le rendement estimé de la TTV est de 83%. Les résultats obtenus avec les précipitations mesurées par la station de Davis et par Météo France sont présentés. Les résultats obtenus à partir des calculs les plus défavorables et les plus favorables, qui tiennent compte de l'incertitude des mesures de la hauteur d'eau et de l'humidité, sont inclus, comme expliqué à l'annexe 4.

Bilan performance	(-) favorable	réel	(+) favorable
Pluie Davis	76%	83%	92%
Pluie Météo France	78%	83%	95%

Tableau 3 : Performances TTV

Conclusion

L'efficacité estimée de la TTV à partir des données de la station Davis est d'environ 83%, ce qui est supérieur à la valeur trouvée dans la littérature pour ce type d'installation, correspondant à environ 62%. Cela permet de conclure que la TTV se comporte efficacement par rapport aux autres installations de ce type.

En outre, il est important de noter que pendant la saison de qualité, à partir de mai, lorsque les pluies sont peu fréquentes, la TTV est efficace à 100%. Ce n'est qu'à partir du mois de septembre que ses performances commencent à baisser en raison de l'intensité et de la fréquence accrues des précipitations au cours de l'automne puis de l'hiver.

Pour améliorer le rendement, il faudrait augmenter la capacité de stockage des alvéoles et/ou du substrat. On a observé que la TTV débordait dans le JPU à des moments où l'humidité du substrat n'était pas saturée, mais où les alvéoles étaient pleines. Cela indique que la capacité de stockage des alvéoles est plus limitante que le substrat, il convient donc de modifier sa taille, c'est-à-dire d'augmenter la capacité des alvéoles dans les installations futures si possible.

Bibliographie

Cerema. (2019, junio 28). Ilots de chaleur: Agir dans les territoires pour adapter les villes

au changement climatique. *Climat et territoire de demain*.

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/ilots-chaleur-agir-territoires-adapter-villes-au-changement>

naturebasedsolutionsinitiative. (2017). *WHAT ARE NBS?*

<https://www.naturebasedsolutionsinitiative.org/what-are-nature-based-solutions/>

Zheng, X., Zou, Y., Lounsbury, A. W., Wang, C., & 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>

Annexe 2 : Estimation du débit de fuite du Jardin de Pluie Urbain

Introduction

Ce rapport présente une estimation du débit de la fuite présente dans le Jardin de Pluie Urbain (JPU). Celui-ci a une surface de 3,6 m² (3 m de long par 1,2 m de large) et contient un diffuseur de 0,6 m de diamètre, soit 0,28 m² de surface.

En outre, le JPU est composé de deux réservoirs, le premier étant un réservoir étanche qui peut se déverser par trop-plein vers le second compartiment. Ce dernier couvre la totalité du JPU à l'exception de la zone occupée par le diffuseur.

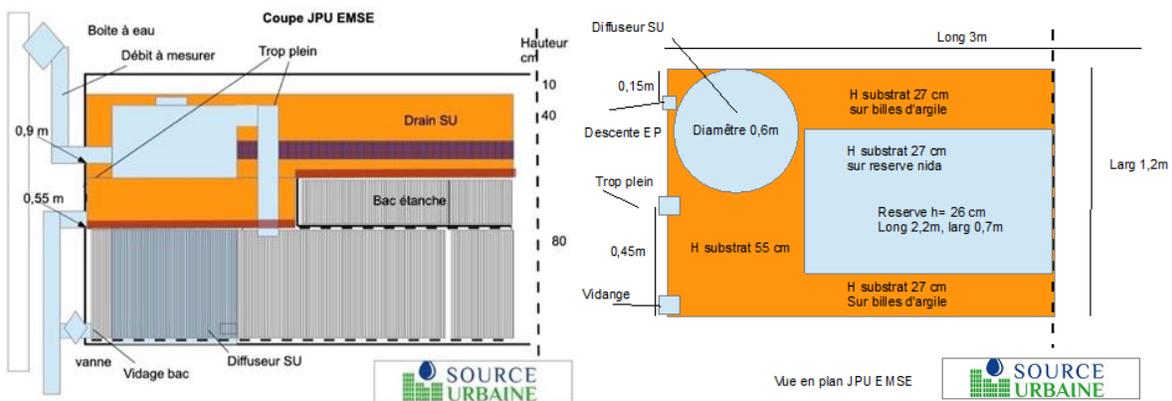


Figure 1 : Vue en coupe et vue du dessus du JPU

Le JPU reçoit le débordement des eaux de la Toiture Terrasse Végétalisée (TTV) lorsque celle-ci atteint sa capacité maximale. La figure 2 montre un plan de l'installation où le JPU est situé en rouge à gauche du TTV (en vert).

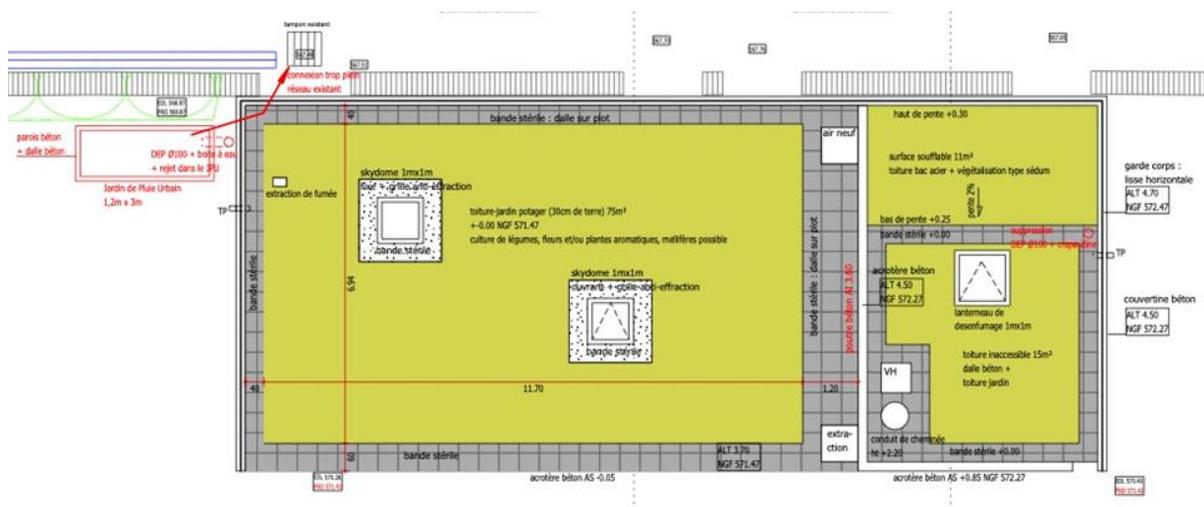


Figure 2 : Vue du dessus du système TTV + JPU

Estimation du débit de fuite

Lors d'un événement pluvieux le 29 septembre, la TTV a débordé, générant un flux d'eau dans le JPU. Les jours suivants, la hauteur d'eau a été mesurée à la fois dans le bac étanche et dans le second compartiment. Ce dernier étant d'un intérêt particulier puisque la fuite se situe à la base de celui-ci.

Tableau 1 : Hauteur d'eau JPU.

Hauteur d'eau JPU (cm)				
Date	Heure	Second Compartiment	Heure	Bac étanche
30/09/2022	10:11	37	9:03	19,5
30/09/2022	15:04	32,5	15:05	18
03/10/2022	17:03	8,5	17:05	15
04/10/2022	9:55	7,5	9:56	15
05/10/2022	9:45	6,6	9:45	14,5
06/10/2022	10:15	6,3	10:12	14,5
07/10/2022	9:44	6	9:43	14,5

Il est important de noter que les mesures ont une marge d'erreur de $\pm 0,5$ cm.

Avec les données de hauteur du bac étanche et sa surface correspondant à la surface du JPU moins la surface du diffuseur, le débit de fuite peut être obtenu :

$$\text{Surface bac étanche} \rightarrow 3,6 - 0,28 \text{ m}^2 = 3,32 \text{ m}^2$$

Étant donné que la variation de hauteur entre le 3 et le 7 octobre était faible, un débit entre ces deux dates est calculé.

Tableau 2 : Débit de la fuite.

Débit de la fuite.					
Date	Δt (min)	Δh (cm)	Volume (m ³)	Débit (m ³ /min)	Débit (L/min)
30 sept.	293	4,5	0,1494	0,0005	0,51
30 sept- 3 octobre	4439	27	0,8964	0,0002	0,202
3 - 7 oct.	3161	2,5	0,083	0,000026	0,026

Pour la différence de hauteur, la marge d'erreur correspond à 1 cm, ce qui implique une erreur de $\pm 0,0332 \text{ m}^3$ dans le volume calculé pour chaque intervalle. Le tableau 3 montre le calcul du débit incluant la marge d'erreur.

Tableau 2 : Débit de la fuite avec la marge d'erreur.

Débit de la fuite.			
Date	Δt (min)	Volume (m ³)	Débit (L/min)
30 sept.	293	$0,1494 \pm 0,0332$	$0,51 \pm 0,11$
30 sept- 3 octobre	4439	$0,8964 \pm 0,0332$	$0,202 \pm 0,007$
3 - 7 oct.	3161	$0,083 \pm 0,0332$	$0,026 \pm 0,01$

Débit moyen sur la période

En moyenne, entre le 30 septembre et le 3 octobre, le débit de fuite était de $0,356 \pm 0,058$ L/min. Si l'on considère dans le calcul le débit le plus faible, c'est-à-dire toute la période de mesure du 30 septembre au 7 octobre, la moyenne est de $0,246 \pm 0,021$ L/min.

Conclusion

On peut observer que le débit diminue lorsque la hauteur d'eau diminue. C'est logique puisque plus la hauteur d'eau est faible, plus la pression exercée par la colonne d'eau est faible et donc la vitesse à laquelle l'eau sort de la fuite est également inférieure.

30 septembre au 7 octobre

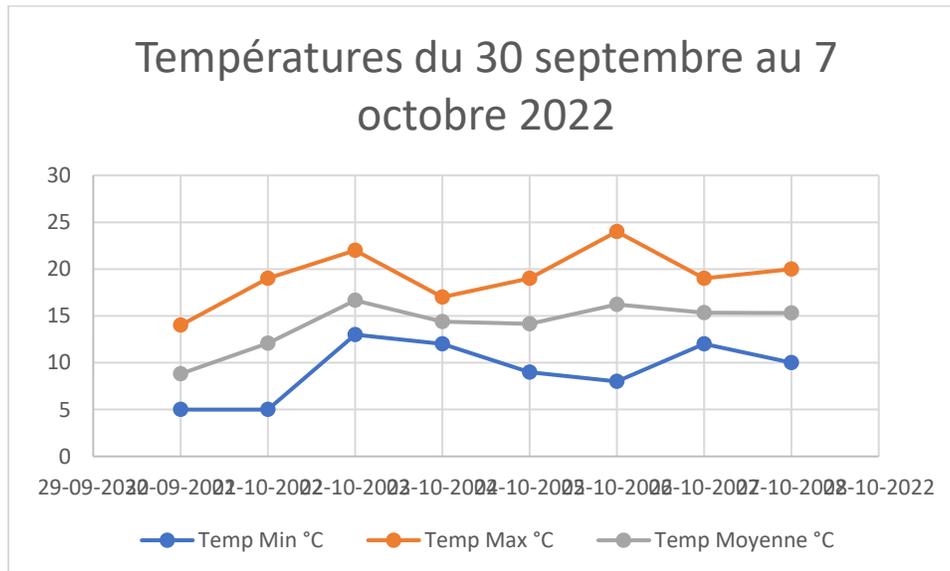
La période qui s'étend entre le 30 septembre et le 7 octobre s'est démarqué par l'absence de fortes pluies et donc de débordement du TTV. Une diminution dans les niveaux d'eau et d'humidité de la TTV a été observé, signe de la présence d'évapotranspiration de cette dernière. Ce rapport a pour objectif 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

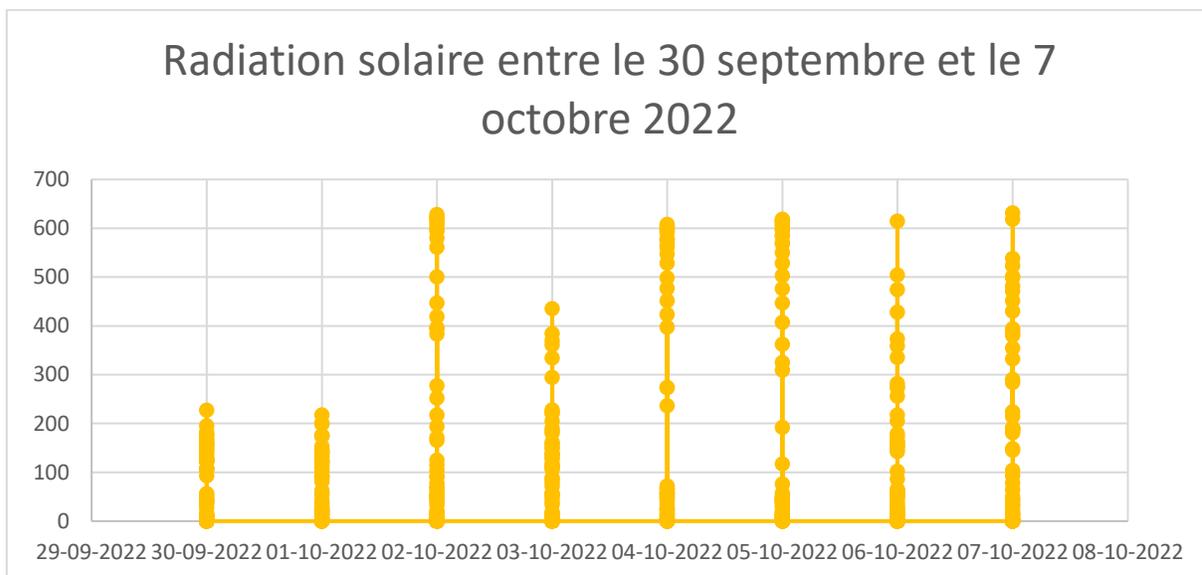
Cette période a été relativement hétérogène avec une température moyenne de 14°C (nuits comprises). La journée la moins chaude présente une moyenne de 9°C (30 septembre) tandis que la plus chaude s'élève à 17°C avec un pic à 22°C.

Au total, 2,2 mm se sont abattus sur le complexe durant la période.

a) Températures



b) Radiation solaire



c) Pluie

Debut de l'evenement	Fin de l'evenement	Duree de l'evenement (min)	Hauteur d'eau (mm)
10-01-2022 6:45	01-10-2022 7:15	30	0,4
10-01-2022 9:00	01-10-2022 9:45	45	1,2
10-03-2022 6:15	03-10-2022 6:45	30	0,6

d) Vent

Il y a eu relativement peu de vent avec une moyenne de 0,3 m/s. Cela a pour impact de diminuer l'évapotranspiration réelle de l'installation

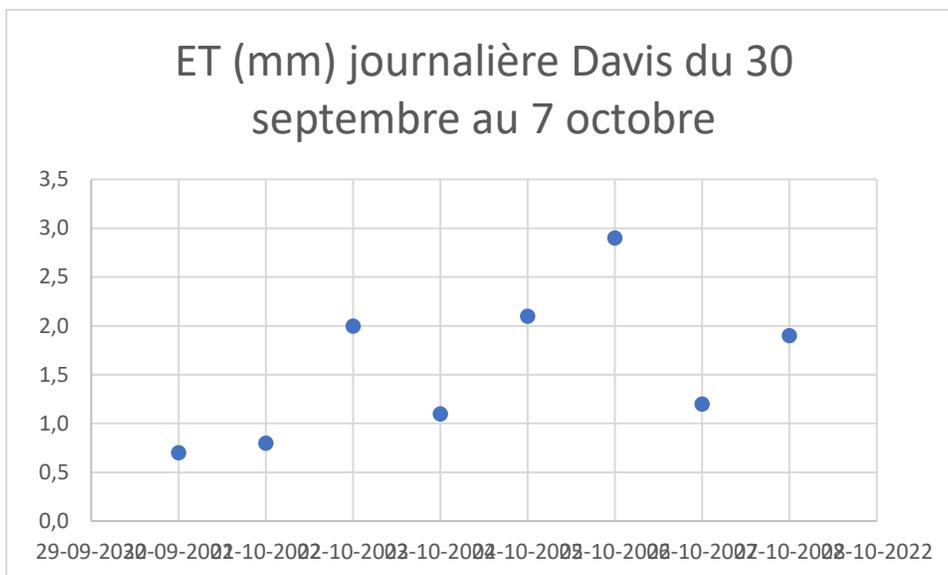
2. Estimation de l'évapotranspiration

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.

Deux approches ont été utilisées pour estimer la hauteur évapotranspirée réellement durant cette période. La première a été effectuée grâce à un bilan hydrique de la TTV à partir de mesures réalisées in situ. La seconde méthode se base sur le modèle du rapport FAVEUR de l'INSA de Lyon qui prend en entrée l'ETP estimée par la station Davis.

a) Évapotranspiration Potentielle

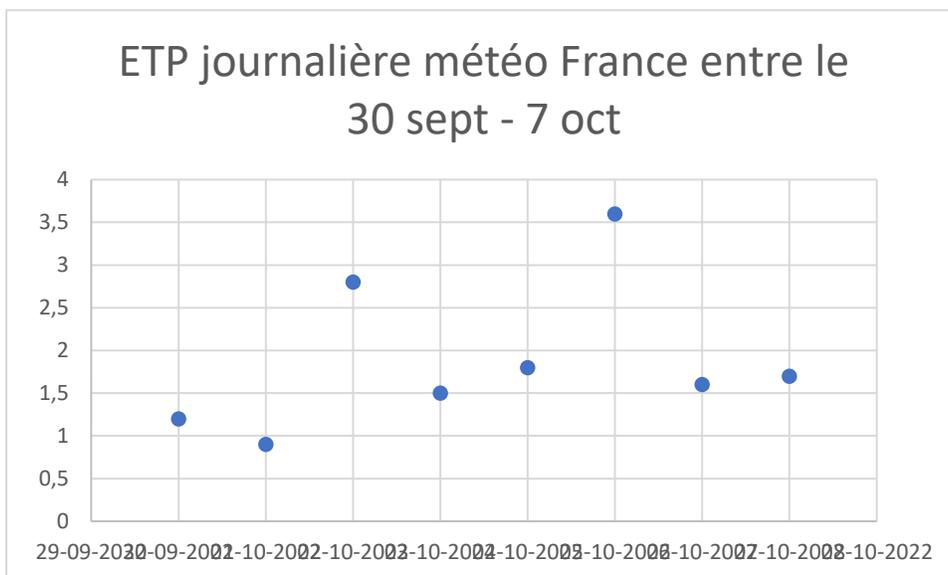
i. Estimation de l'ETP par la station météo Davis



La station météo Davis installée sur la TTV présente un module d'estimation de l'ETP qui se base sur la méthode de Penman-Monteith. Le graphique visible ci-dessus présente le profil de l'ETP durant la période 30 septembre – 7 octobre. Le cumul s'élève à une hauteur totale de 13 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 :



Le total s'élève à 15,1 mm évapotranspirés sur la période allant du 30 septembre au 7 octobre. On obtient des valeurs relativement proches de celles estimées par la station météo Davis (différence de 15,9%) ce qui permet de valider les estimations faites par in situ.

b) Evapotranspiration Réelle

i. Estimation à partir des mesures in situ

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	WSH TTV (cm)
		9/30/22 9:00	9
		10-03-22 17:09	9
		10-04-22 9:58	8,5
Date et heure	Humidité TTV (%)	10-05-22 9:45	8,5
30-09-2022	17,5	10-06-22 10:16	8
07-10-2022	14,8	10-07-22 9:46	8

La TTV présente une couche de substrat de 270 mm donc la perte d'eau s'élève à $(0.175 - 0.148) \times 270 = 7,29$ mm soit un volume évapotranspiré de $0,729 \text{ m}^3$ auquel il faut ajouter la pluie qui s'est abattue de 2,2 mm. Quant aux alvéoles, on a $9 - 8 = 1$ cm. On obtient alors une hauteur d'eau totale de $7,29 + 10 + 2,2 = 19,49$ mm.

iii. Bilan

Estimation de l'ETP sur la période du 30 septembre au 7 octobre (Davis)	Estimation de l'ETP sur la période du 30 septembre au 7 octobre (Météo France)
1,63 mm/jour	1,89 mm/jour

Estimation de l'ETR sur la période du 30 septembre au 7 octobre (mesures in situ)
2,44 mm/jour

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 30 septembre au 7 octobre présente donc l'incertitude suivante :

- Sur le volume stocké dans le substrat 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 $\frac{\sqrt{2 \times 5^2}}{2} = 3,54$ mm. On obtient alors une incertitude finale de 3,54 mm puisqu'initialement, la TTV se trouve à saturation

Finalement on obtient une incertitude sur l'estimation de l'ETR de : $\sqrt{7,6^2 + 3,54^2} = 8,39$ mm

L'estimation de l'ETR sur la période du 30 septembre au 7 octobre à partir des mesures in situ devient alors :

$$ETR_{in\ situ} = 2,44 \pm 1,05 \text{ mm/jour}$$

c) Intérêt 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 :

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

$$K = \frac{2,44}{\frac{1,63 + 1,89}{2}} = 1,39 \pm \Delta K$$

L'incertitude de ce résultat s'élevant à :

$$\Delta K = \frac{1,05}{\frac{1,63 + 1,89}{2}} = 0,6$$

Soit une estimation finale :

$$K = 1,39 \pm 0,6$$

19 octobre au 4 novembre

La période qui s'étend entre le 19 octobre et le 4 novembre s'est démarqué par l'absence de débordement de la TTV. Une diminution dans les niveaux d'eau et d'humidité de la TTV a été observé, signe de la présence d'évapotranspiration de cette dernière. Ce rapport a pour

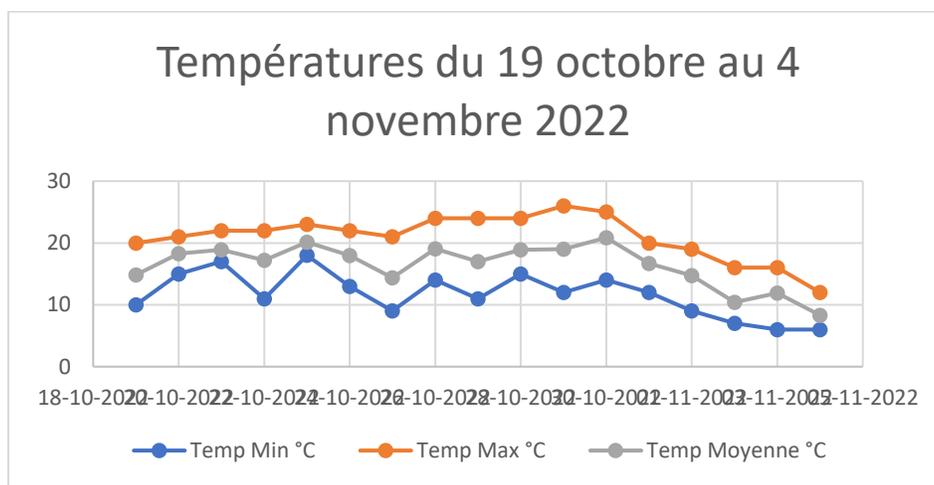
objectif d'estimer l'évapotranspiration à partir des données hydriques précédentes (humidité du substrat et hauteur d'eau des alvéoles) durant cette période au vu des conditions particulières et de comparer cette valeur à l'évapotranspiration potentielle fournie par la station Davis et météo France.

3. Caractéristiques de la période

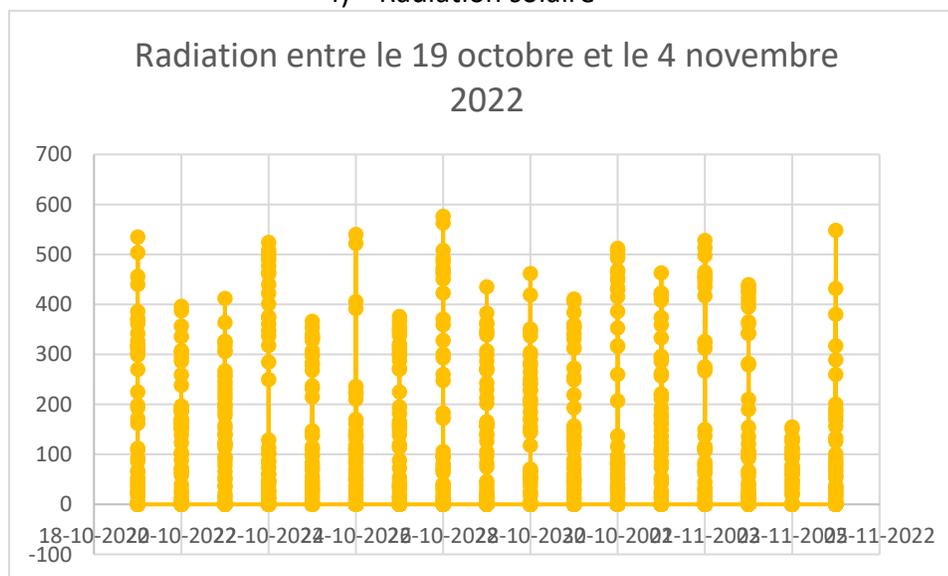
Cette période a été relativement hétérogène avec une température moyenne de 16°C (nuits comprises). La journée la moins chaude présente une moyenne de 8°C (4 novembre) tandis que la plus chaude s'élève à 21°C avec un pic à 25°C.

Au total, 19,2 mm se sont abattus sur le complexe durant la période.

e) Températures



f) Radiation solaire



g) Pluie

Debut de l'évènement	Fin de l'évènement	Duree de l'évènement (min)	Hauteur d'eau (mm)
20/10/22 07:15	20-10-2022 7:30	15	0,6
21/10/22 00:15	21-10-2022 0:30	15	0,2
21/10/22 03:15	21-10-2022 3:30	15	0,2
23/10/22 16:30	23-10-2022 16:45	15	0,2
31/10/22 23:45	01-11-2022 1:30	105	10,2
03-11-2022 21:00	03-11-2022 21:30	30	0,8
04-11-2022 9:30	04-11-2022 9:45	15	0,2

h) Vent

Il y a eu relativement peu de vent avec une moyenne de 0,9 m/s. Cela a pour impact de diminuer l'évapotranspiration réelle de l'installation

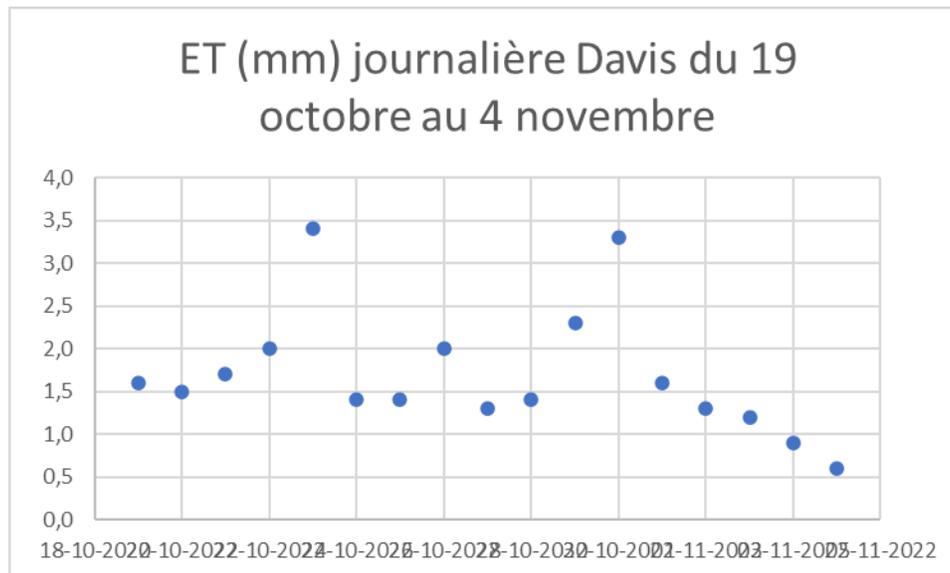
4. Estimation de l'évapotranspiration

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.

Deux approches ont été utilisées pour estimer la hauteur évapotranspirée réellement durant cette période. La première a été effectuée grâce à un bilan hydrique de la TTV à partir de mesures réalisées in situ. La seconde méthode se base sur le modèle du rapport FAVEUR de l'INSA de Lyon qui prend en entrée l'ETP estimée par la station Davis.

d) Évapotranspiration Potentielle

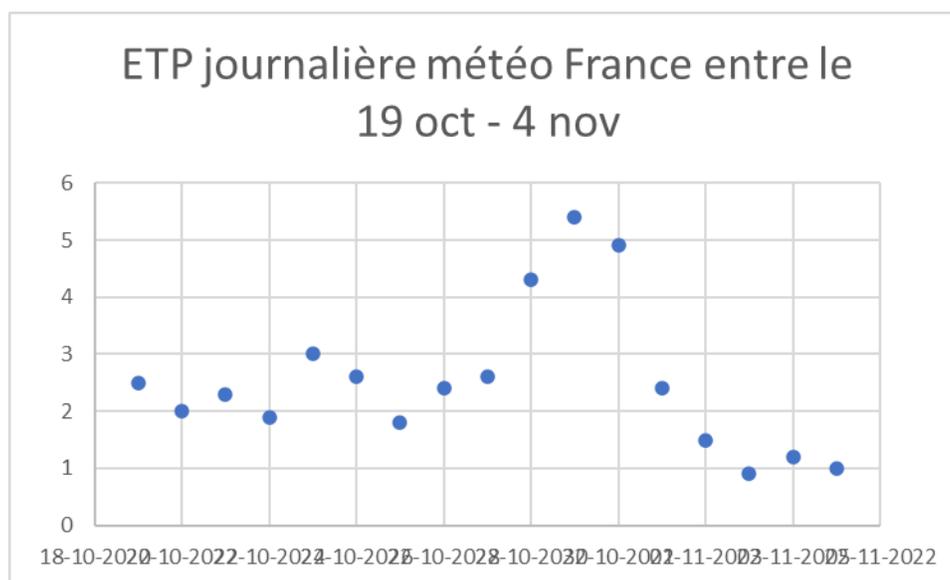
v. Estimation de l'ETP par la station météo Davis



La station météo Davis installée sur la TTV présente un module d'estimation de l'ETP qui se base sur la méthode de Penman-Monteith. Le graphique visible ci-dessus présente le profil de l'ETP durant la période 19 octobre – 4 novembre. Le cumul s'élève à une hauteur totale de 29 mm.

vi. *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 :



Le total s'élève à 42,7 mm évapotranspirés sur la période allant du 19 octobre au 4 novembre. On obtient des valeurs relativement proches de celles estimées par la station météo Davis (différence de 32%) ce qui permet de valider les estimations faites par in situ.

e) *Evapotranspiration Réelle*

ii. *Estimation à partir des mesures in situ*

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	Relevé (cm)
		19-10-2022 13:25	7
		20-10-2022 11:40	7
Date et heure	Teneur en eau	21-10-2022 10:26	7
21-10-2022	0,154	28-10-2022 8:30	6
28-10-2022	0,128	04-11-2022 11:00	7

La TTV présente une couche de substrat de 270 mm donc la perte d'eau s'élève à $(0.154 - 0.128) \times 270 = 7,02$ mm soit un volume évapotranspiré de $0,702 \text{ m}^3$ auquel il faut ajouter la pluie qui s'est abattue de 19,2 mm. Quant aux alvéoles, on a $7 - 7 = 0$ cm. On obtient alors une hauteur d'eau totale de $7,02 + 0 + 19,2 = 26,22$ mm.

vii. *Bilan*

Estimation de l'ETP sur la période du 30 septembre au 7 octobre (Davis)	Estimation de l'ETP sur la période du 30 septembre au 7 octobre (Météo France)
1,71 mm/jour	2,5 mm/jour

Estimation de l'ETR sur la période du 30 septembre au 7 octobre (mesures in situ)
1,54 mm/jour

viii. 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 19 octobre au 4 novembre présente donc l'incertitude suivante :

- Sur le volume stocké dans le substrat 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 $\frac{\sqrt{2 \times 5^2}}{2} = 3,54$ mm. On obtient alors une incertitude finale de 3,54 mm puisqu'initialement, la TTV se trouve à saturation

Finalement on obtient une incertitude sur l'estimation de l'ETR de : $\sqrt{7,6^2 + 3,54^2} = 8,39$ mm

L'estimation de l'ETR sur la période du 19 octobre au 4 novembre à partir des mesures in situ devient alors :

$$ETR_{in\ situ} = 1,54 \pm 0,49 \text{ mm/jour}$$

f) Intérêt 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 :

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

$$K = \frac{1,54}{\frac{1,71 + 2,5}{2}} = 0,73 \pm \Delta K$$

L'incertitude de ce résultat s'élevant à :

$$\Delta K = \frac{0,49}{\frac{1,71 + 2,5}{2}} = 0,23$$

Soit une estimation finale :

$$K = 0,73 \pm 0,23$$

5. Conclusion - Limites

L'ETP estimée par la station Davis se base sur la méthode de Penman-Monteith qui considère un gazon dans les conditions optimales ce qui n'est pas le cas de la TTV. C'est pourquoi l'ETP peut ne pas représenter l'ETR de la toiture qui comporte des espèces végétales différentes d'un gazon.

D'un autre côté les mesures ne sont pas tout à fait fiables non plus car il y a une grande marge d'erreur. On remarque notamment qu'il peut y avoir plus de 5 mm de différences selon que la mesure soit faite au niveau du WSH (capteur maître) ou le WSE (capteur esclave). En ce qui concerne les mesures d'humidité du substrat, il peut également y avoir des différences qui dépendent de la consistance, la profondeur ainsi que l'endroit où l'échantillon est prélevé. L'estimation de cette dernière incertitude (sur l'humidité du substrat) fait l'objet d'une étude en cours.

Obtention de la pluie par jour

Vérifiez si les données météorologiques de la période souhaitée sont présentes dans les documents "Données Davis". S'il y a des données manquantes, accédez au site et récupérez les données correspondantes pour les ajouter (copier-coller à la fin) au document excel "Données Davis".

Dans l'onglet "Pluie" de ce document, étendez les équations (colonnes A à F) afin que les nouvelles données soient automatiquement ajoutées dans chaque colonne, sauf dans la colonne "Rain corrigé". Dans ce dernier, copiez les nouvelles données de la colonne "Rain - mm" et collez-les avec l'option spéciale de collage "Values (V)". Ensuite, sélectionnez les nouvelles données collées et cliquez sur l'icône d'erreur pour les convertir en nombre.

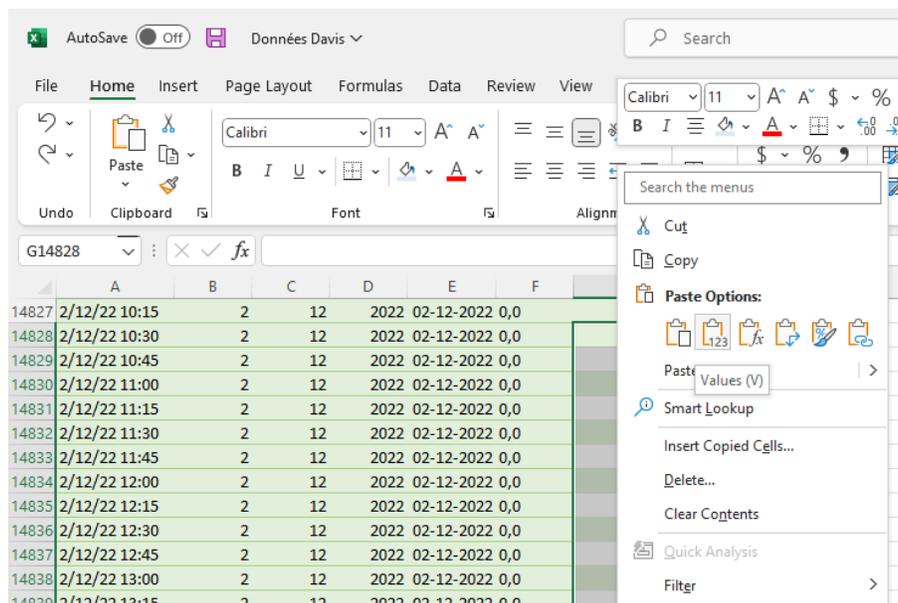


Figure 1 : Option spéciale de collage "Values (V)".

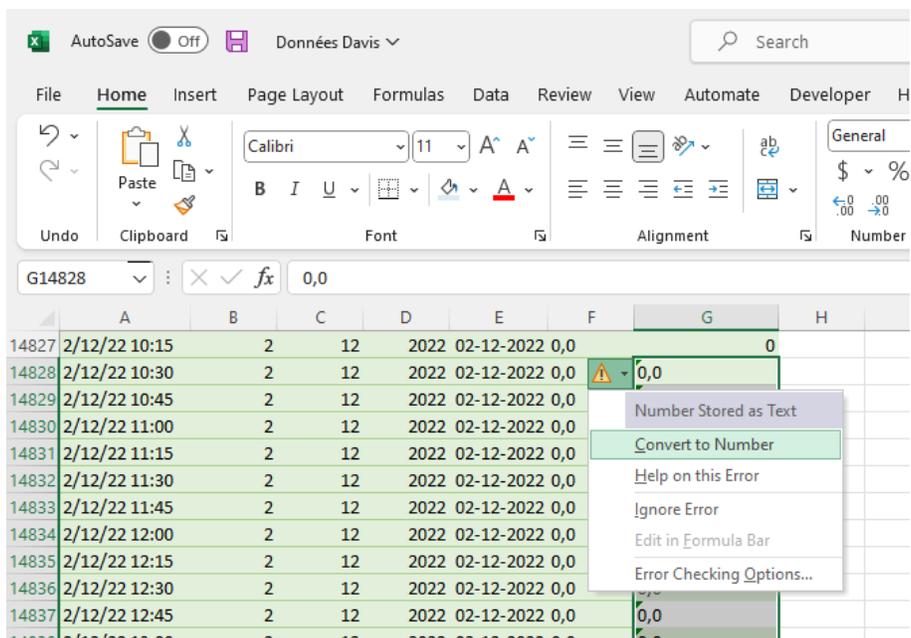


Figure 2 : Conversion des données en nombre.

Ensuite, prolongez les colonnes "Date" et "Pluie mm" (colonne I et J) pour obtenir les précipitations par jour.

Calcul de la performance de la TTV

Copiez et collez les nouvelles données de précipitations quotidiennes dans l'onglet "Pluie Davis" du document excel "Relevés et mesures 2022" (la date avec un collage normal et la pluie avec un collage spécial des valeurs uniquement).

Identifiez les événements pluvieux et marquez-les par période lorsque la date de début correspond à une mesure prise dans l'onglet "Relevés".

Dans l'onglet "Performance TTV", saisissez chaque période et ses données respectives de capacité initiale des alvéoles et du substrat (poursuivez les équations en soustrayant les mesures de "Relevés" et "Mesures substrats" de la capacité maximale). Dans la colonne "Pluie", ajoutez la somme des précipitations pour la période identifiée dans "Pluie Davis". Etendre les colonnes "Rejet TTV" et "Performance" pour obtenir automatiquement le calcul et écrire dans la colonne "Surverse notée" si un déversement est indiqué dans l'onglet "Relevé" pour comparer ces données observées avec celles obtenues dans le calcul "Rejet TTV".

Incertitude du calcul

Une incertitude de 5 mm est estimée dans les mesures prises pour la hauteur d'eau dans les alvéoles, tandis que pour l'humidité du substrat une incertitude de 2% d'humidité est estimée. Pour tenir compte de cette incertitude, deux onglets ont été ajoutés :

- Cas le plus favorable : On considère que la hauteur d'eau réelle est inférieure de 5 mm à la hauteur mesurée et que l'humidité du substrat est inférieure de 2% à l'humidité mesurée. Cela implique que la capacité de stockage de l'eau est plus élevée.
- Cas le plus défavorable : On considère que la hauteur d'eau réelle est supérieure de 5 mm à la hauteur mesurée et que l'humidité du substrat est supérieure de 2% à l'humidité mesurée. Cela implique que la capacité de stockage de l'eau est plus faible.

Calcul de la performance de la TTV à partir des données pluviométriques de Météo France

Trois onglets ont été ajoutés pour effectuer le même calcul mais cette fois-ci en prenant en compte les données pluviométriques de Météo France.