Végétalisation des espaces descellés sensibles pour améliorer le confort thermique en ville

Doctorante : Cloé De Witte

Superviseures : Laure Vidal-Beaudet et Sophie Herpin

Année académique : 2026-2027

Contexte général

1950

20 % de la population mondiale en zone urbaine

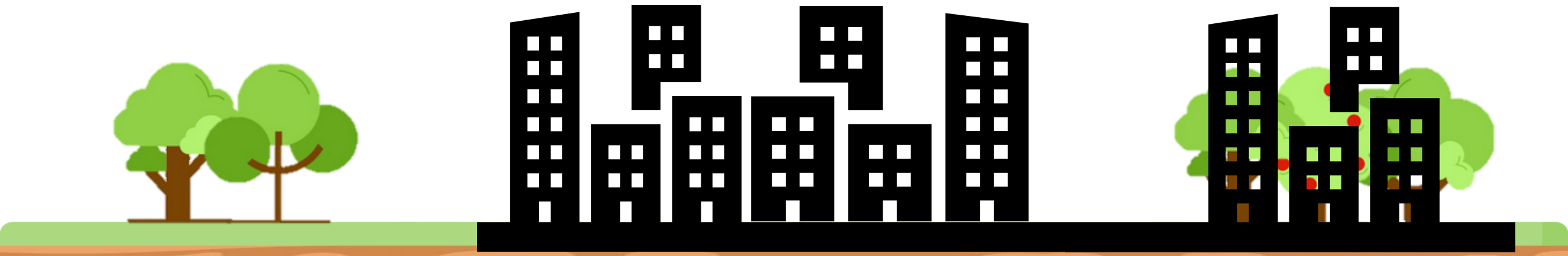
2025

50 % de la population mondiale en zone urbaine

2050

70 % de la population mondiale en zone urbaine

("World Urbanization Prospects 2025," 2025)



Exemple :

Entre 1950 et 2025, l'urbanisation s'est accélérée au détriment des espaces naturels, avec une surface bâtie par habitant qui a augmenté de 43 à 63 m² ("World Urbanization Prospects 2025," 2025)

Contexte général

La diminution de l'évapotranspiration, l'altération des propriétés des matériaux, le recul du couvert végétal et les transformations de la morphologie urbaine modifient le bilan énergétique des villes, contribuant ainsi à la formation d'un microclimat urbain (Oke, 1982).



Evapo-transpiration	40%
Ruissellement	10%
Infiltration profonde	25%
Infiltration de surface	25%

(US EPA, 2015)

Evapo-transpiration	30%	-
Ruissellement	**55%**	+
Infiltration profonde	5%	-
Infiltration de surface	10%	-

(US EPA, 2015)

Contexte général

La manifestation la plus courante de l'influence des villes sur le climat urbain est le phénomène d'**îlot de chaleur urbain (ICU)**.

Echelle de la ville → CLIMAT URBAIN

L'**ICU** est caractérisé par des températures de l'air nocturnes supérieures dans les zones urbaines par rapport aux zones non urbanisées (Oke, 1973).

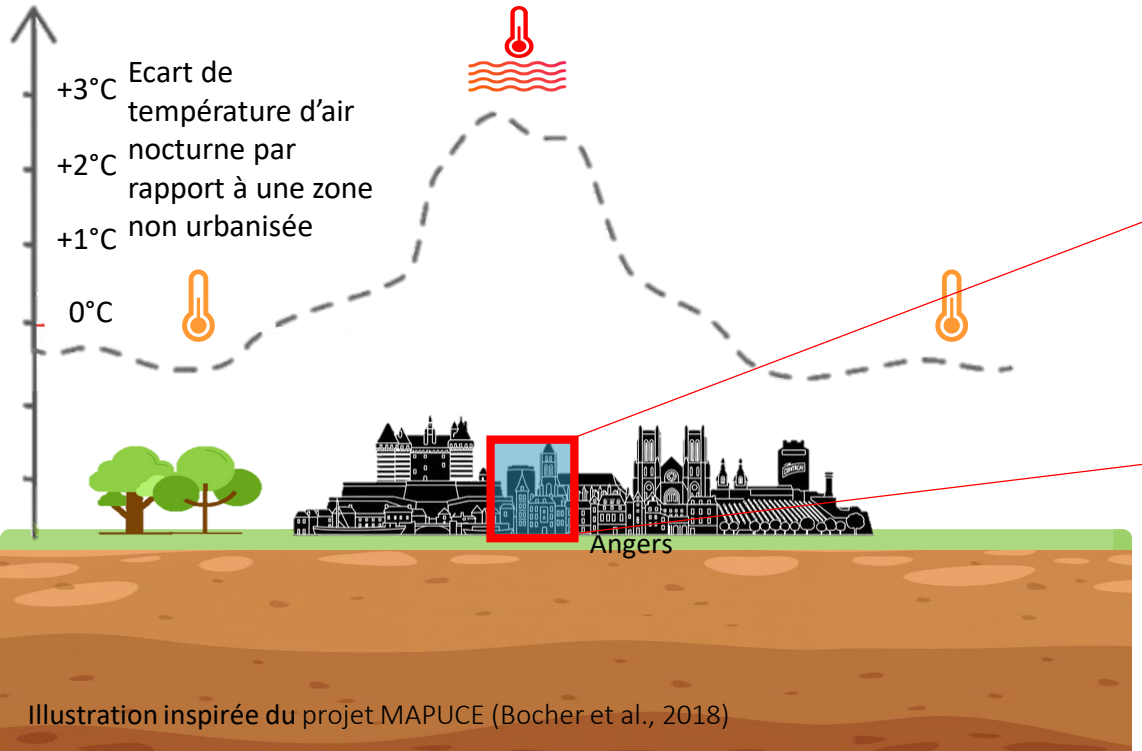
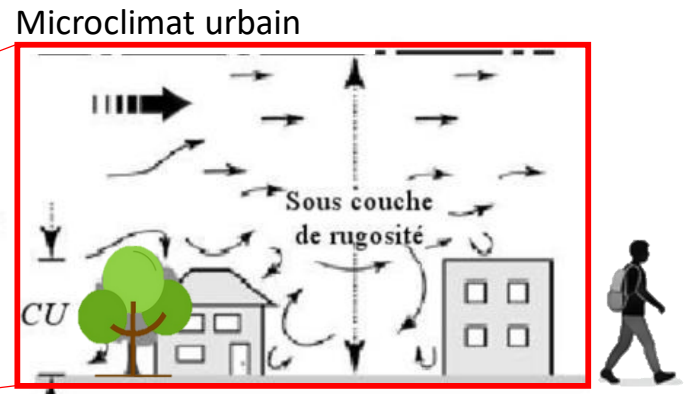


Illustration inspirée du projet MAPUCE (Bocher et al., 2018)

Echelle du piéton → MICROCLIMAT URBAIN

Dimensions comprises entre 1 et 100m. C'est à cette échelle que se définit la **surchauffe urbaine**



Imbrication des échelles spatiales de la climatologie urbaine (Bouyer, 2009) , adapté de (Oke and Canada, 2006)

La **surchauffe** impacte le confort thermique des usagers dans un environnement urbain minéral, influencé par des phénomènes très locaux tels que l'ombrage du bâti ou de la végétation.

Les différentes solutions de lutte contre la surchauffe urbaine

Solutions grises

Modification des propriétés physiques des surfaces construites pour ↘ l'absorption et la rétention de chaleur

Solutions vertes

↗ des surfaces végétalisées et des éléments naturels ↘ les effets des ICU par évapotranspiration, ombrage et conversion des radiations solaires en chaleur latente.

Effet de rafraichissement → ECHELLE DU PIÉTON

- Effet fort
- Effet moyen
- Effet faible
- Effet non significatif

Toits et revêtements réfléchissants

Augmentation de l'albédo



Revêtements perméables

Réduction de la température de surface



Toits verts

Conversion du rayonnement solaire en chaleur latente



Arbres et végétation

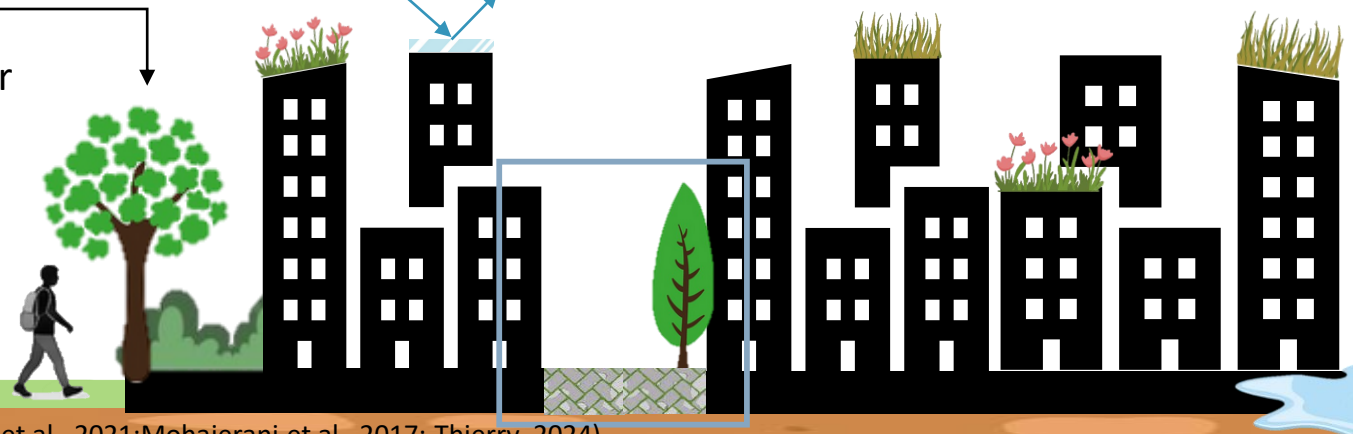
Ombrage et refroidissement par évapotranspiration



Points d'eau

Refroidissement par évaporation





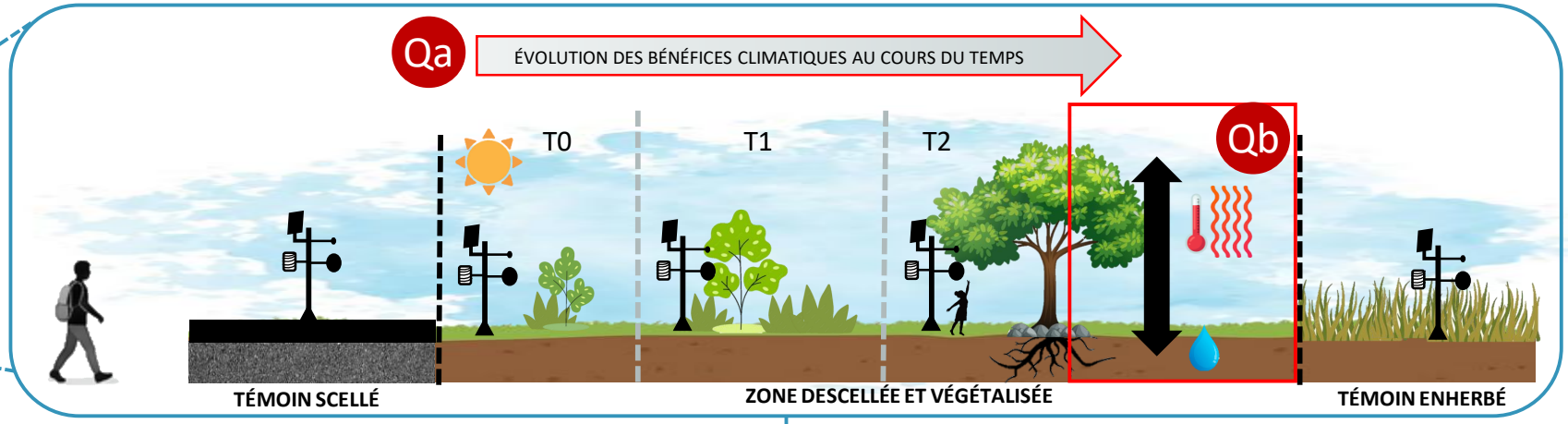
(Bahadori et al., 2025; Bai and Xing, 2025; LEROY et al., 2021;Mohajerani et al., 2017; Thierry, 2024)

Questions de recherche

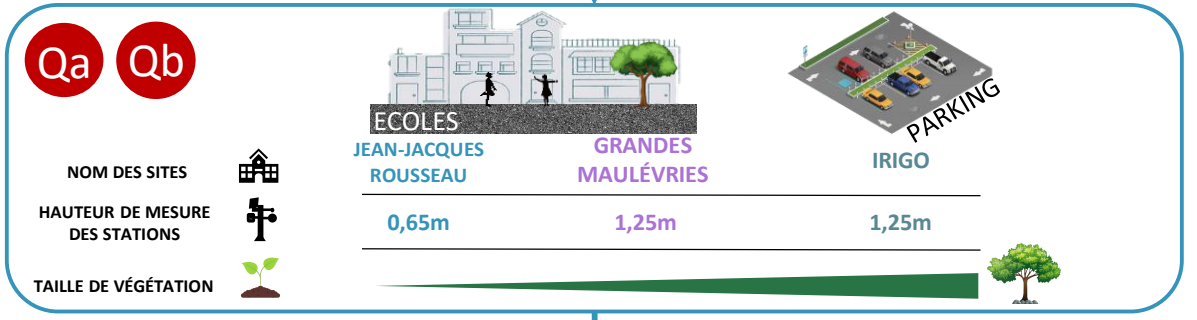
ECHELLE DE LA VILLE



ECHELLE DU PIÉTON



SITES D'ÉTUDES



MESURES



Qa Comment évoluent les bénéfices climatiques d'un espace descellé et végétalisé au cours du temps, avec le développement de la végétation ?

Qb Comment les transferts thermiques et hydriques au sein du continuum sol-plante-atmosphère influencent-ils le microclimat urbain et le confort thermique des usagers ?

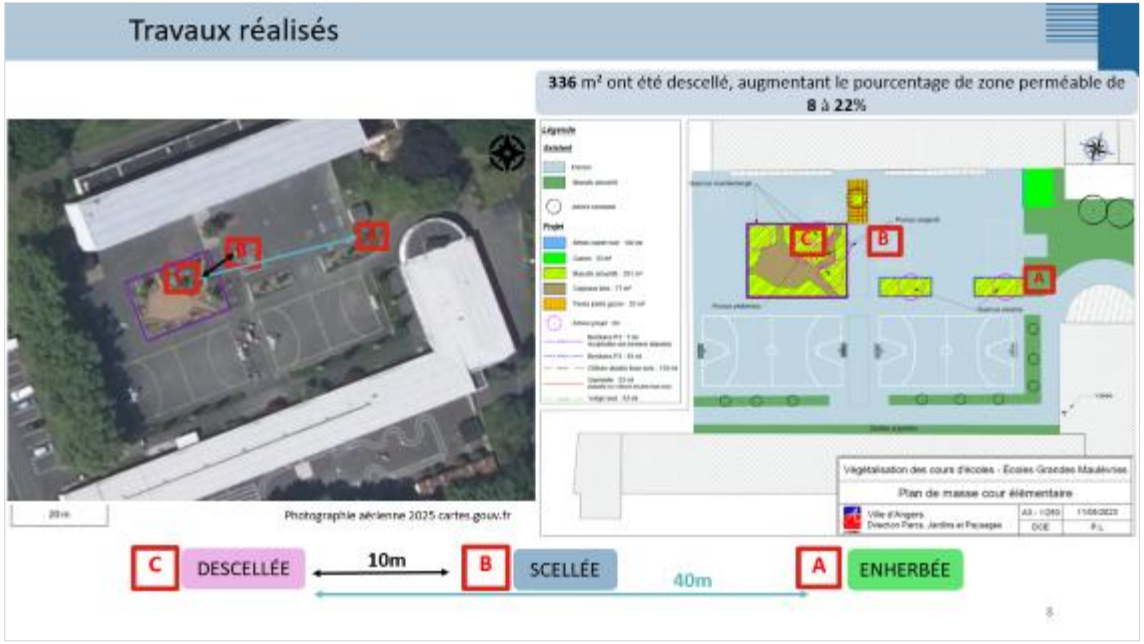
Site d’études

Cour d’école des Grandes Maulévries

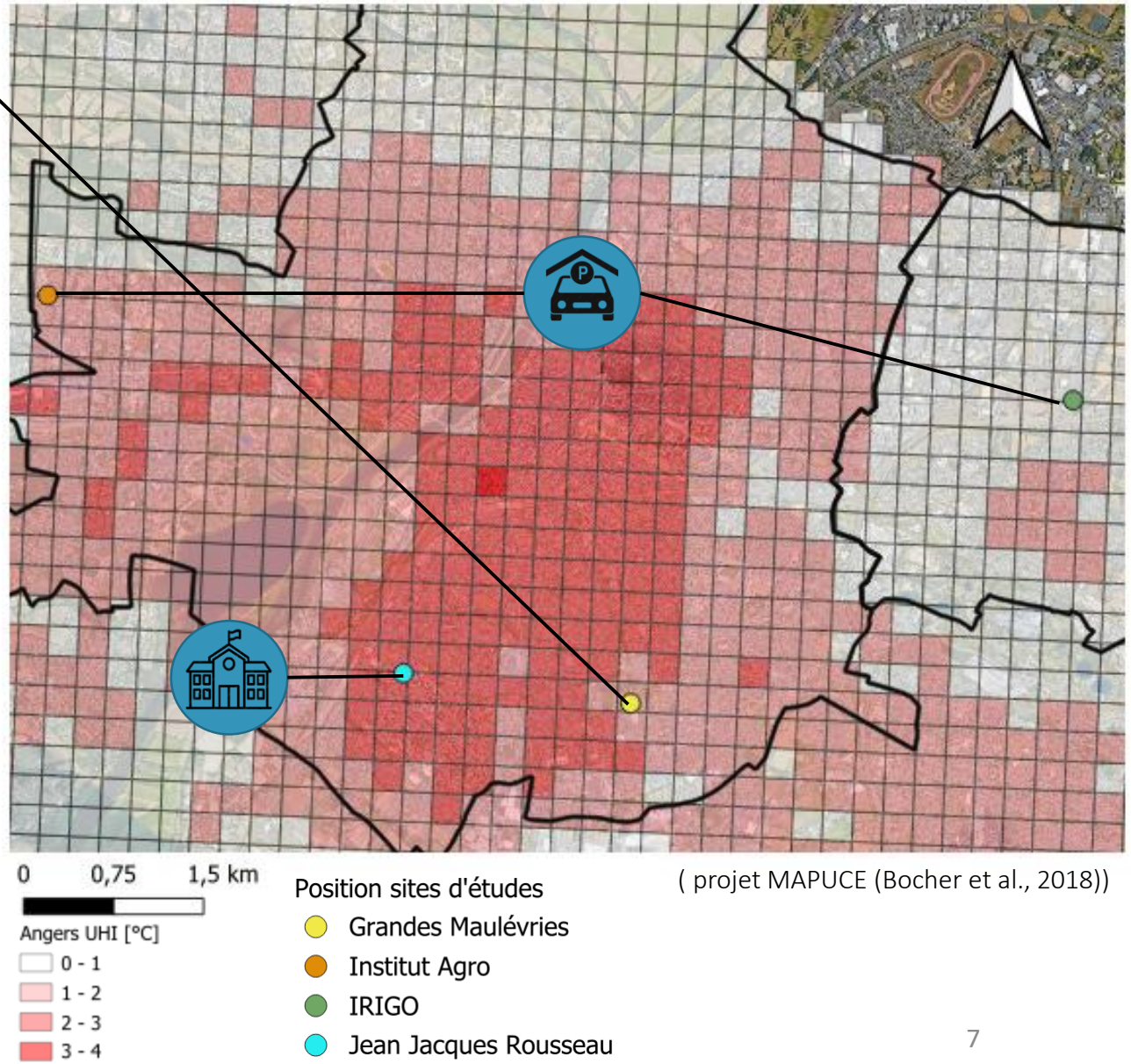
LES ENFANTS

- Plus vulnérables au stress thermique
- Système de régulation encore en développement
- Beaucoup d’activités en extérieur

(Huang et al., 2021; Lehnert et al., 2024)



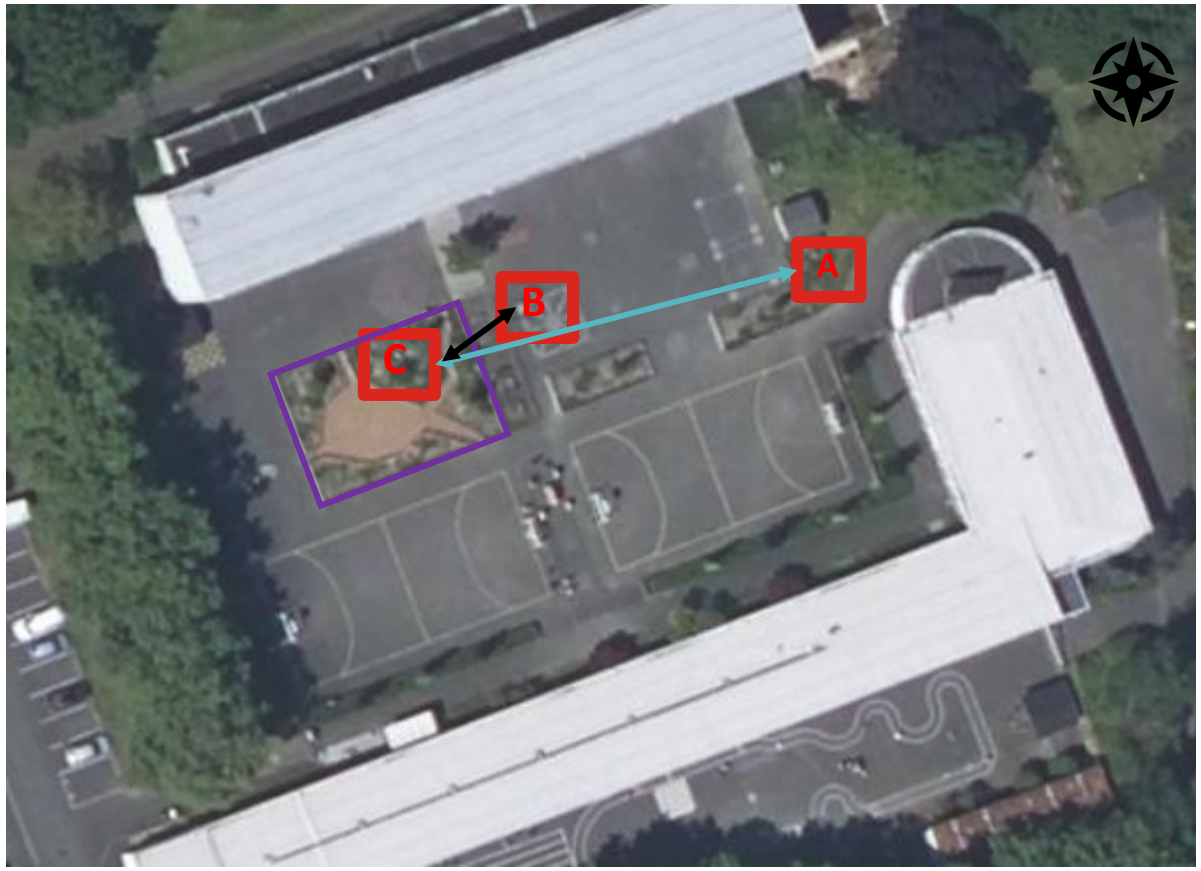
Carte d’ICU dans des conditions de vent faible du nord-est à Angers



(projet MAPUCE (Bocher et al., 2018))

Travaux réalisés

336 m² ont été descellé, augmentant le pourcentage de zone perméable de **8** à **22**%



Photographie aérienne 2025 cartes.gouv.fr



C DESCELLÉE — 10m → B SCELLÉE — 40m → A ENHERBÉE

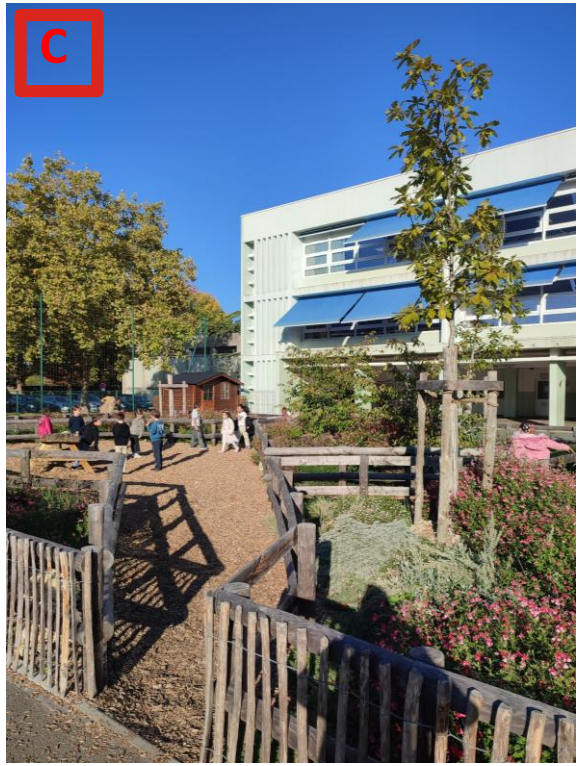
Matériels et méthodes

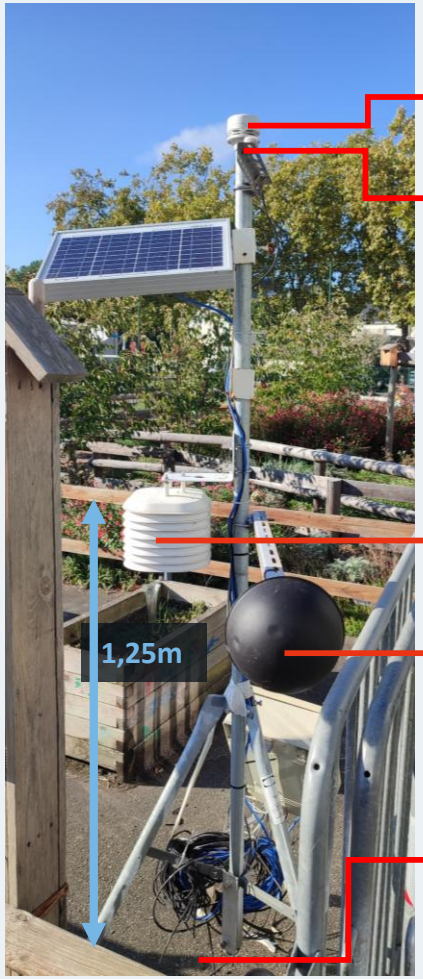
Cour d'école des Grandes Maulévries

Avant travaux (05/2023)



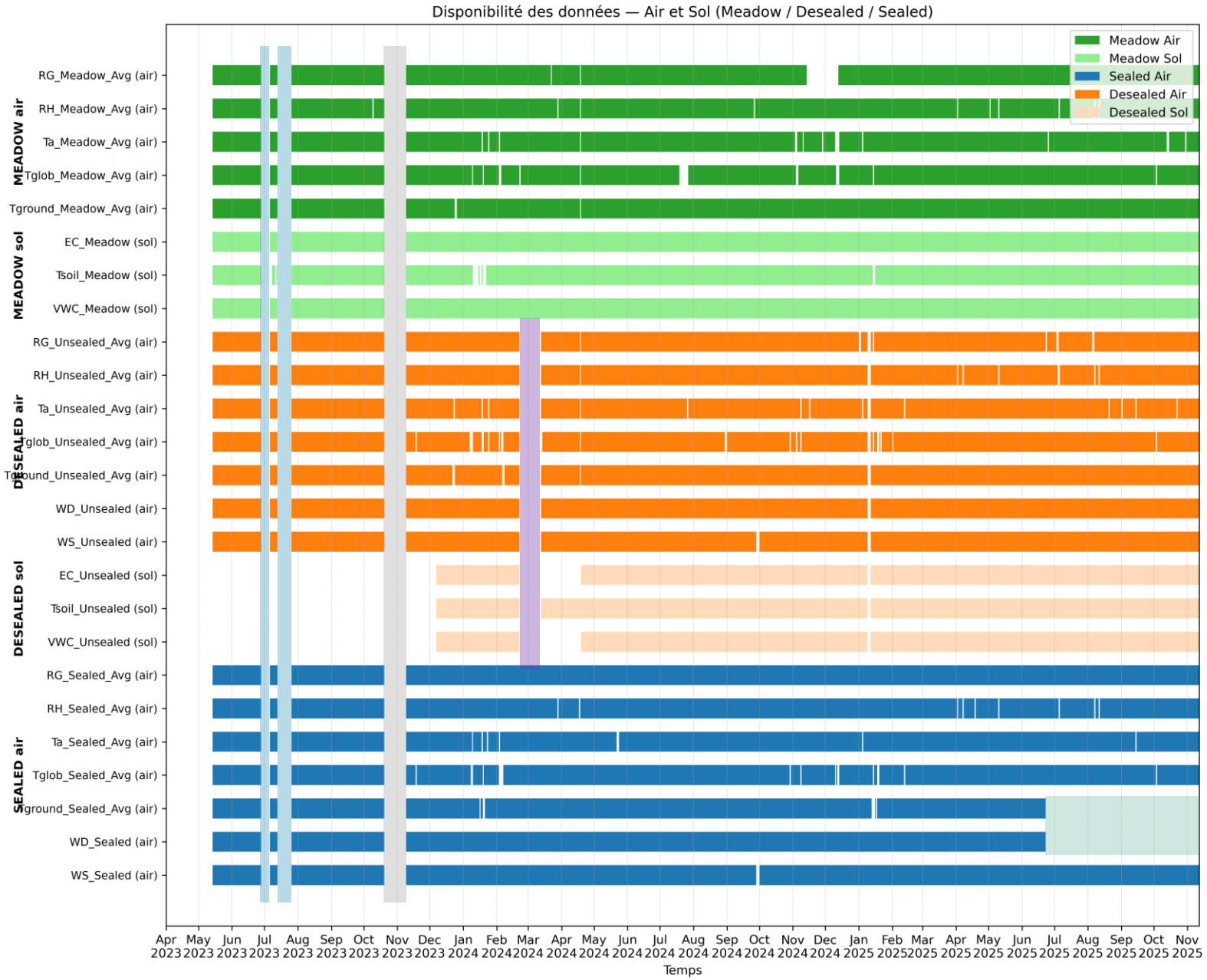
Après travaux (11/2025)





Appareils	Mesures
Anémomètre	Vitesse du vent Direction du vent
Pyranomètre	Rayonnement solaire
Thermomètre + Hygromètre	Température de l'air Humidité relative de l'air
Globe noir	Température de globe
Thermomètre +Capteur d'humidité	Température de surface du sol Teneur en eau du sol

Qualification des données des Grandes Maulévries



GRANDES MAULÉVRIES

Interruption des données :

- Fête de l'école
- Travaux de descellement
- Travaux de végétalisation
- Non ré-installation suite à la fête de l'école

- Préqualification
- Limites des sondes
- Limites physiques
- Test de persistance
- Test dynamique
- Test sur les médianes
- Interpolation de données
- Recalage des sondes de températures de l'air

(Herpin et al., 2024)

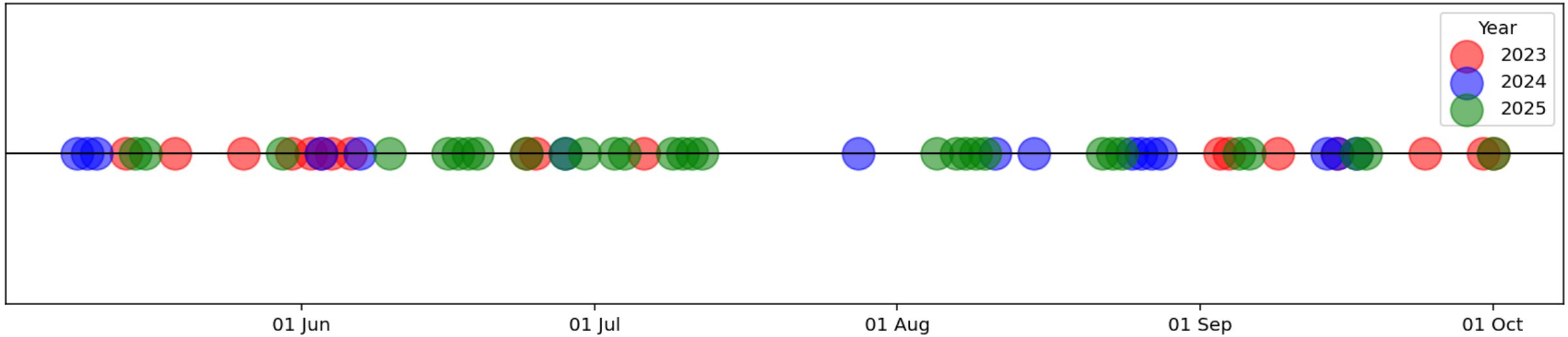
Journées radiatives

Pas de pluie

Vitesse vent < 3,5 m/s

Ratio d'ensoleillement > 0,65

Graphe des belles journées sélectionnées sur une période de mai à octobre

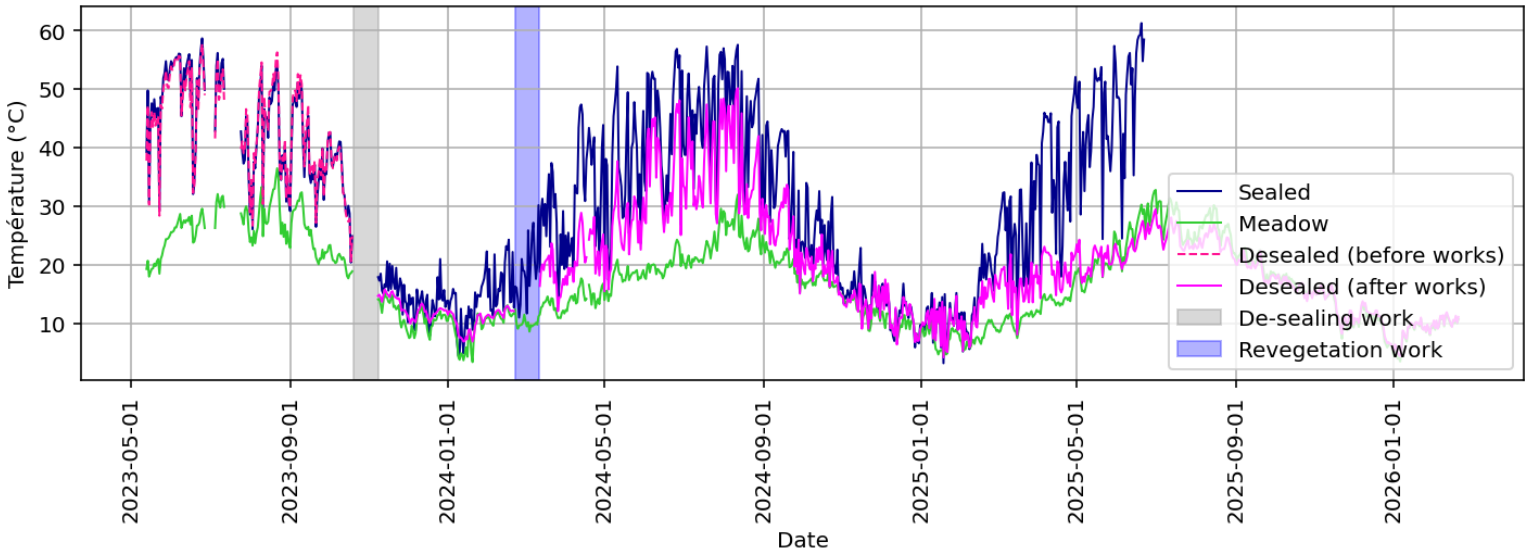


Année	2023	2024	2025
Nbre de belles journées	18	16	29

Journées de références pour pouvoir comparer les différentes années.

Température de surface du sol

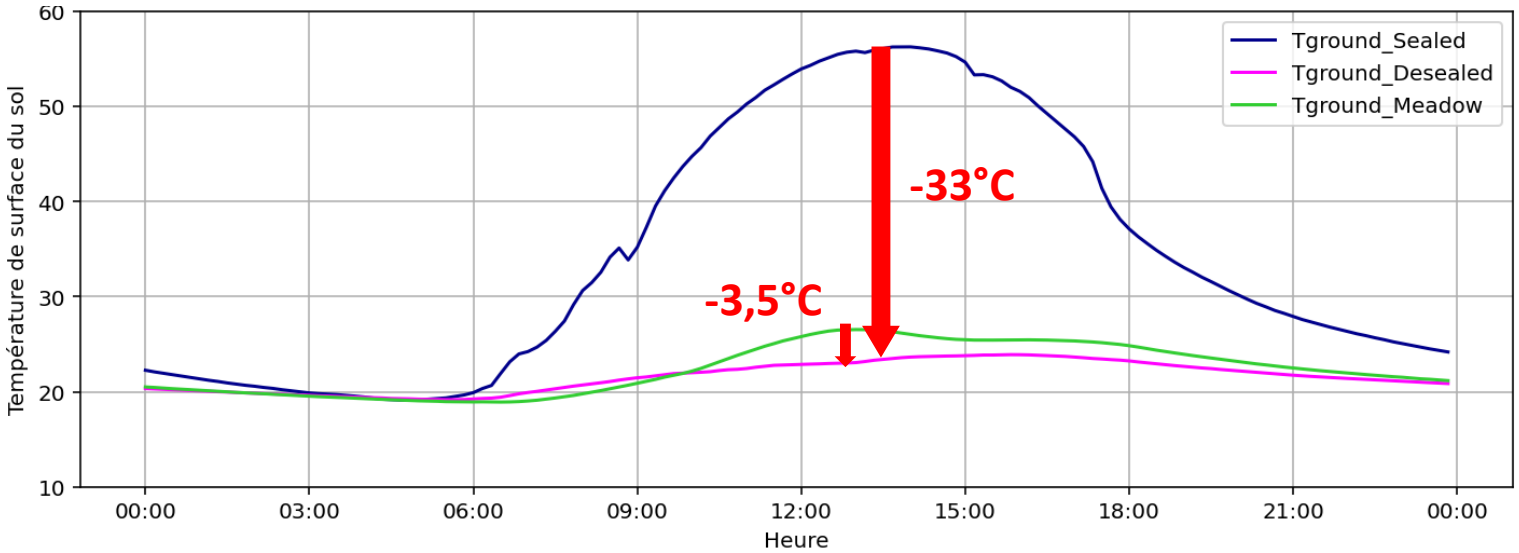
Graphe de la température maximale journalière de surface du sol



ENTRE MAI-OCT. 2024:
Desealed = +11,3°C VS **Meadow;**
Sealed = +19,7°C VS **Meadow**

ENTRE MAI-JUIN 2025 :
Desealed = -1,3°C VS **Meadow**

Graphe des températures moyenne de surface du sol pour les journées radiatives 2025*



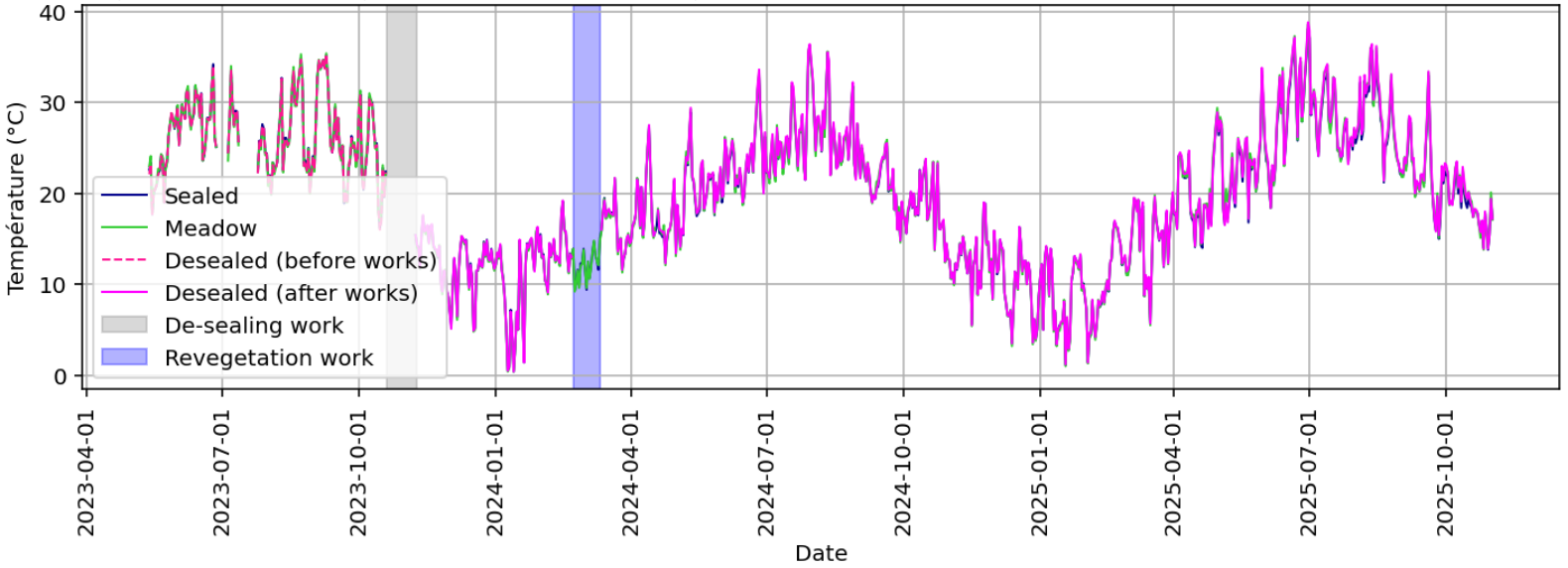
Pour sealed 2025, les journées radiatives sélectionnées pour la moyenne sont comprises entre 05/2025 et 06/2025

Entre le **01/05/ 2025** et le **23/06/2025** :

Entre **11h** et **13h** UTC : ↘ **33 °C** de desealed par rapport à sealed

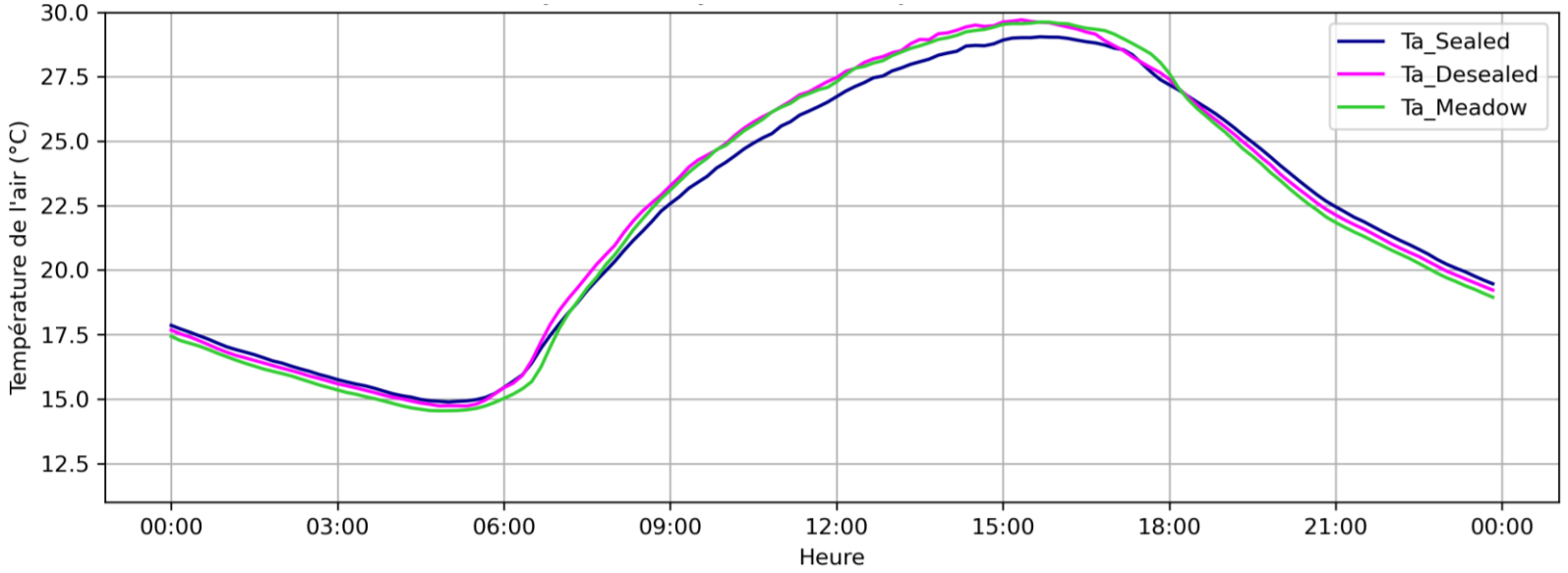
Température de l’air

Graphe de la température maximale journalière de l’air mesurée à 1,25 m de hauteur



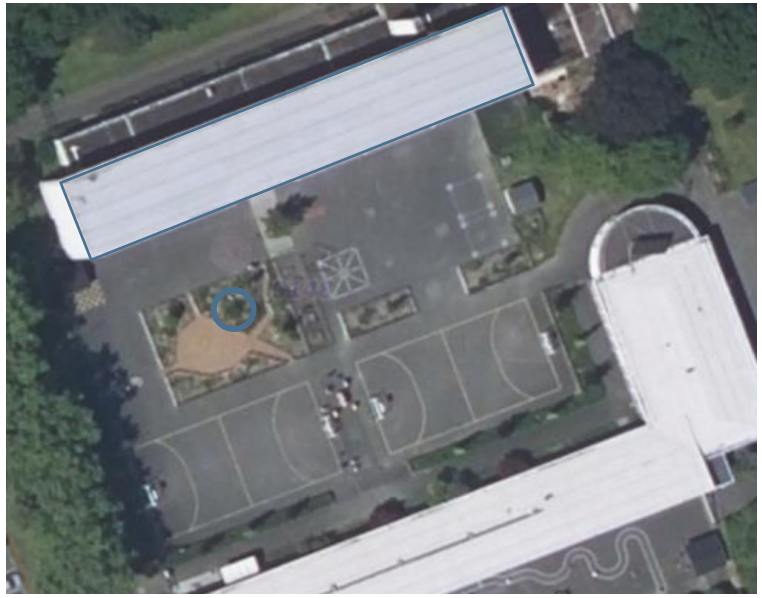
Pas d’impact des différents travaux sur la température maximale de l’air au long terme

Graphe des températures moyennes de l’air pour les journées radiatives 2025

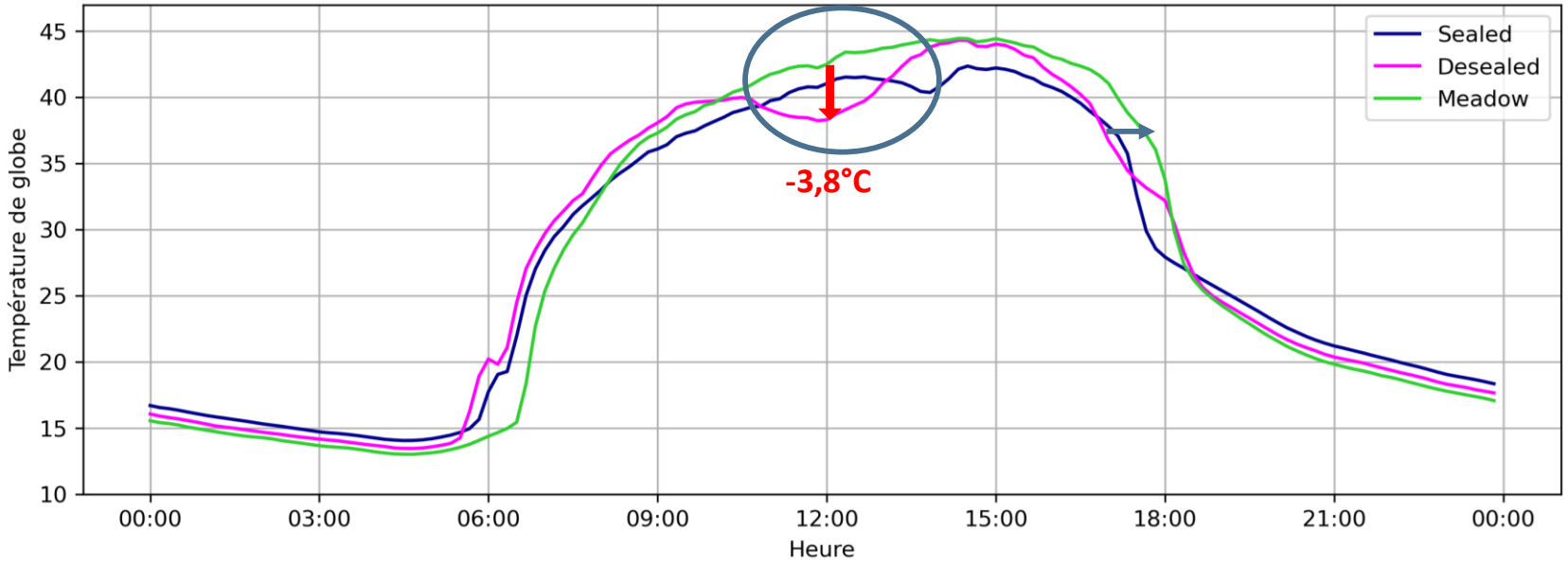


Modification de la dynamique temporelle de desealed

Température de globe



Graphe de la moyenne des températures de globe lors des journées radiatives 2025 (n=29)



Effet de l'ombrage de l'arbre

Effet de l'ombrage des bâtiments

Ecart de la moyenne des températures de globe par rapport à Meadow en 2025 (n=29)

	Entre 11h et 13h UTC
Sealed - Meadow	-1,7°C
Desealed - Meadow	-3,8°C

×2

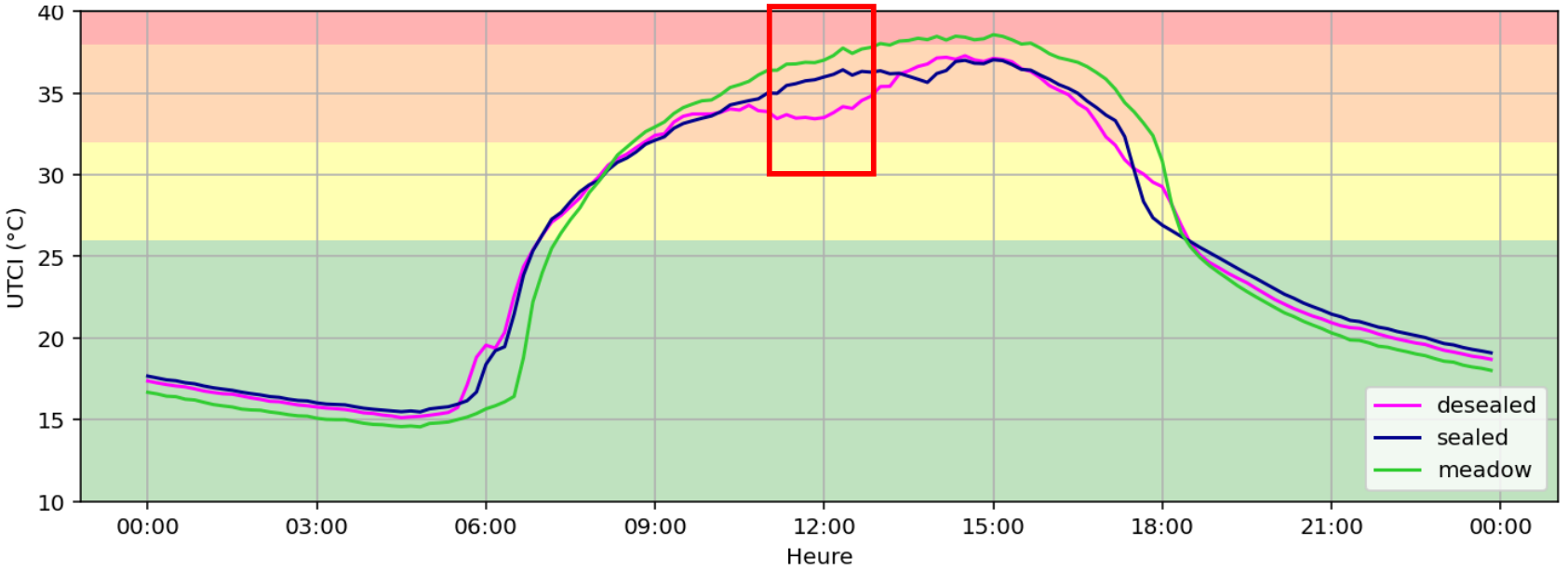
Entre **11h** et **13h** : Température de globe de desealed est **3,8°C** plus faible que meadow → soit 2 X plus que la station sealed.

Universal Thermal Climate Index

UTCI = Universal Thermal Climate Index

Indice de confort thermique qui correspond à la température ambiante équivalente correspond à la température d'un environnement de référence induisant la même réponse physiologique que l'environnement étudié.

Graphe de la moyenne des UTCI pour les journées radiatives 2025



Stress thermique très élevé

Stress thermique élevé

Stress thermique modéré

Pas de stress thermique

Ecart de la moyenne des UTCI par rapport à Meadow en 2025 (n=29)

	Entre 11h et 13h UTC	Entre 19h et 23h UTC
Sealed - Meadow	-1,5°C	1°C
Desealed - Meadow	-3°C	0,6°C

×2

Entre **11H** et **13h** UTC : ↘ **3°C** de **desealed** par rapport à meadow → **2X** supérieure à la diminution observée pour sealed.

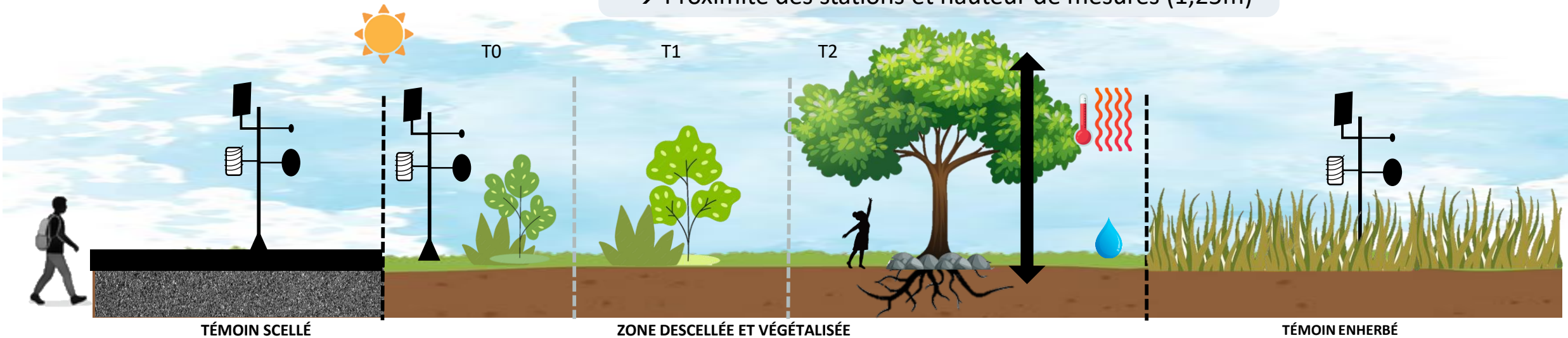
Que faut-il retenir des résultats aux Grandes Maulévries ?

ECHELLE DU PIÉTON ENTRE 11H ET 13H UTC

Qa ÉVOLUTION DES BÉNÉFICES CLIMATIQUES AU COURS DU TEMPS

T°air

Pas d'impact significatif des travaux
→ Proximité des stations et hauteur de mesures (1,25m)

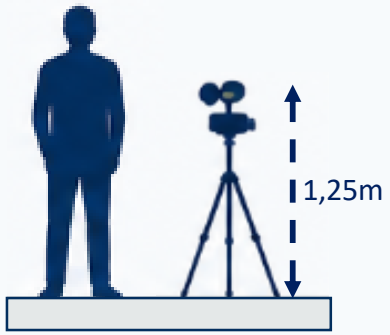


	2023	2024	2025
T°sol	Desealed-Sealed = -**0,2°C**	Desealed-Sealed = -13,5°C	Desealed-Sealed = -**33**°C
Tglobe	Desealed-Meadow = -**1,25°C**	Desealed-Meadow = -0,14°C	Desealed-Meadow = **-3,8°C**
UTCI	Desealed-Meadow = **-0,8°C**	Desealed-Meadow = -1°C	Desealed-Meadow = **-3°C**

Qb

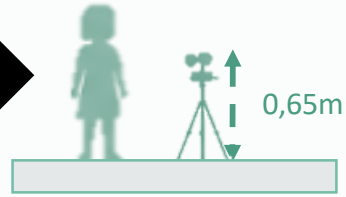
Limite de hauteur de mesures

Mesures à hauteur d'adulte

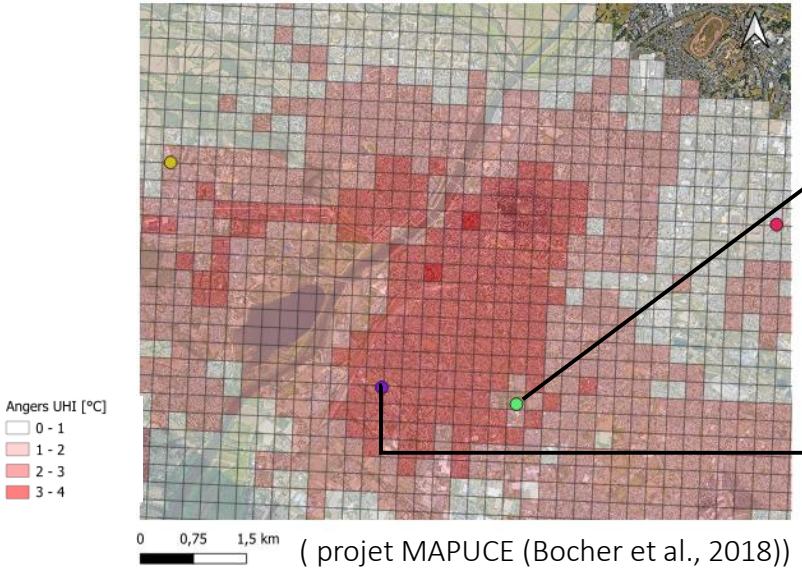


Mesures à **1,25 m** du sol, → hauteur de référence pour le calcul des **indices de confort thermique** d'un adulte de **1,80 m.**

Et pour le public sensible ?



Dans les cours d'école, ce sont le **enfants** dont le centre de masse évolue à environ **0,65 m**.
→ **sous-estimation** de leur **exposition** réelle.



(projet MAPUCE (Bocher et al., 2018))

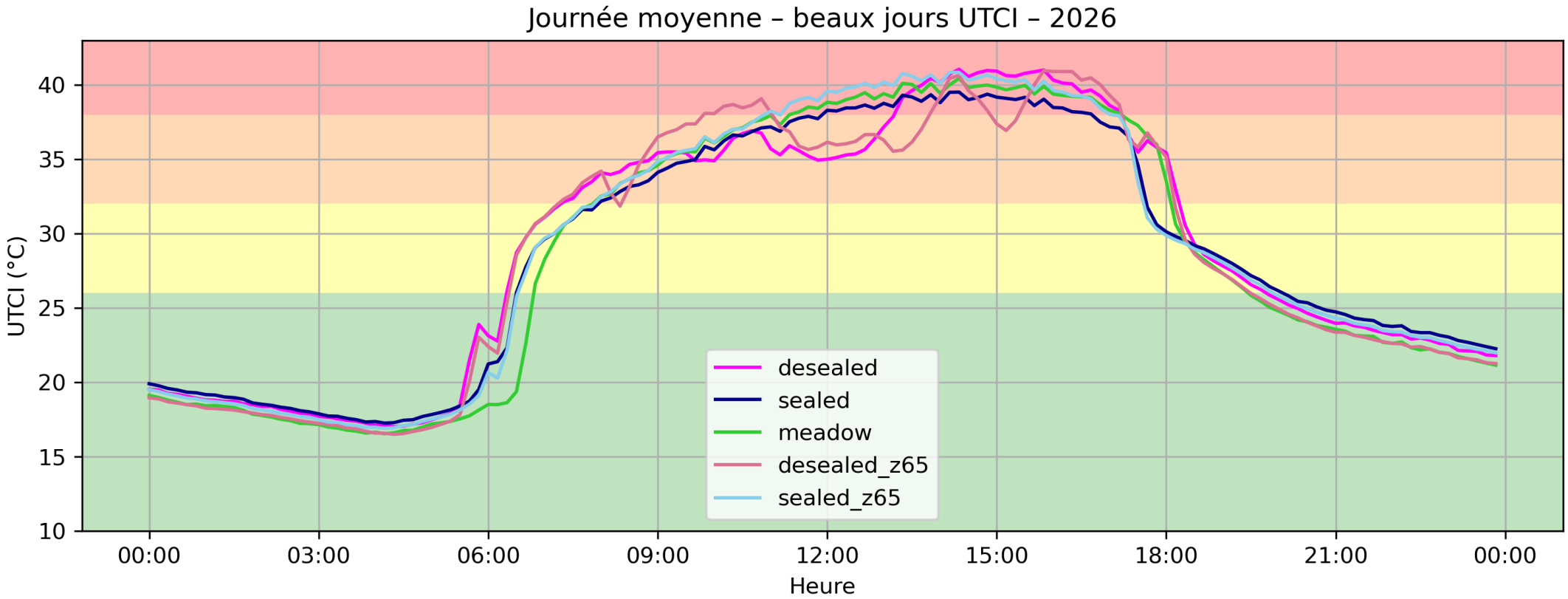
ÉCOLE DES GRANDES MAULÉVRIES
Hauteur de mesure : 1,25m & 0,65m depuis **2026**

ÉCOLE JEAN-JACQUES ROUSSEAU
Hauteur de mesure : 0,65m depuis **2026**

Sources

- Bahadori, E., Rezaei, F., He, B.-J., Heiranipour, M., Attia, S., 2025. Evaluating urban heat island mitigation strategies through coupled UHI and building energy modeling. Building and Environment 280, 113111. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113111
- Bai, Y., Xing, Y., 2025. Harnessing green infrastructure for urban heat island mitigation: Evidence-based strategies for sustainable and climate-resilient cities. Sustainable Cities and Society 133, 106843. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106843
- Bocher, E., Petit, G., Bernard, J., Palominos, S., 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. Urban Climate 24, 153–174. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.008
- Herpin, S., Mballo, S., Manteau, M., Lemesle, D., Boukouya, A., Dubuc, B., Ledroit, L., Cannavo, P., Demotes-Mainard, S., Bournet, P.-E., 2024. A reduced-scale canyon street to study tree climate benefits: summer 2020 data with well-watered apple trees. Sci Data 11, 1015. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03650-0
- Huang, B., Hong, B., Tian, Y., Yuan, T., Su, M., 2021. Outdoor thermal benchmarks and thermal safety for children: A study in China's cold region. Science of The Total Environment 787, 147603. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147603
- Lehnert, M., Jirmus, R., Květoňová, V., Geletič, J., Jurek, M., Středová, H., Frajer, J., 2024. Overheated children's playgrounds in Central European cities: The effects of surfaces and shading on thermal exposure during hot summer days. Urban Climate 55, 101873. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101873
- LEROY, M., MARIE, H., LAPRAY, K., MUSY, M., RODIER, A., GUERNOUTI, S., 2021. Rafraîchir les villes [WWW Document]. La librairie ADEME. URL https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/4649-rafraichir-les-villes-9791029717475.html (accessed 4.29.26).
- Mohajerani, A., Bakaric, J., Jeffrey-Bailey, T., 2017. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. Journal of Environmental Management 197, 522–538. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095
- Morel, A., Vidal-Beaudet, L., Brialix, L., Lemesle, D., Bulot, A., Herpin, S., 2025. Evolution of microclimate following small patch de-sealing and revegetation in urban context. Urban Climate 61, 102371. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102371
- Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967) 7, 769–779. https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6
- Oke, T., Canada, 2006. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites
- Parison, S., Chaumont, M., Kounkou-Arnaud, R., Long, F., Bernik, A., Da Silva, M., Hendel, M., 2023. The effects of greening a parking lot as a heat mitigation strategy on outdoor thermal stress using fixed and mobile measurements: case-study project "tertiary forest." Sustainable Cities and Society 98, 104818. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104818
- Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjiosif, A., Comby, J., 2019. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. Remote Sensing 11, 299. https://doi.org/10.3390/rs11030299
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 1879–1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- Thierry, J., 2024. Impact of street trees on urban microclimate and human thermal stress : effect of heatwaves and droughts (Theses). Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
- World Urbanization Prospects 2025: Summary of Results | DESA Publications [WWW Document], 2025. URL https://desapublications.un.org/publications/world-urbanization-prospects-2025-summary-results (accessed 2.16.26).

UTCI 2026


Journée moyenne – beaux jours UTCI – 2026
UTCI (°C)
40
35
30
25
20
15
10
00:00
03:00
06:00
09:00
12:00
15:00
18:00
21:00
00:00
Heure
desealed
sealed
meadow
desealed_z65
sealed_z65

Température de globe : 2025 VS 2026

