

Bénéfices des arbres d'alignement en confort hydrique sur le microclimat urbain : quel effet des conditions météorologiques ?

S. Herpin^{1,2}, S. Mballo^{1,2}, J. Thierry^{1,2}, D. Lemesle^{1,2}, L. Brialix^{1,2}, F. Rodriguez^{1,2}, S. Demotes-Mainard⁴, P.E. Bournet^{1,2}

1 : Institut Agro, EPHOR
2 :IRSTV
3 : Univ Eiffel, LEE
4 : INRAE, IRHS

Co-financement : ADEME, Région Pays de la Loire, Ville de Paris, ANRT

35^{ème} colloque annuel de l'Association internationale de climatologie,
6-9 juillet 2022, Toulouse, France

Contexte

Réchauffement climatique et adaptation des villes

Réchauffement climatique global et augmentation de la fréquence des vagues de chaleurs (GIEC, 2021)

Taux d'urbanisation déjà important en Europe (80 %) et croissant dans le monde (68 % en 2050) (ONU, 2018)

Environnement urbain favorable au piégeage de la chaleur :

- matériaux urbains à faible albédo et forte inertie
- réduction des surfaces d'eau et de végétation : faible évapotranspiration

=> recherche de stratégies d'adaptation en ville, pour améliorer le confort thermique l'été

Contexte

Les arbres d'alignement de rue comme solution d'adaptation :

Implantation au plus proche des logements et des habitants

Peu d'espace nécessaire au sol
Mais accès à l'eau réduit



Végétation haute
=> rafraîchissement
par ombrage, en plus
de l'évapotranspiration

Co-bénéfices :
Cadre de vie,
stockage carbone...

Bd Guist'hau à Nantes (portail pédagogique ac. Nantes)

Etat de l'art

Etat de l'art sur les bénéfices climatiques des arbres d'alignement de rue

Des bénéfices sur la températures d'air, mais d'amplitude variable selon :

- L'environnement urbain
- Les conditions météorologiques
- Les caractéristiques des arbres (indice de surface foliaire, espèce, densité plantation)

Bowler et al (2010)

Etat de l'art

Etat de l'art sur les bénéfices climatiques des arbres d'alignement de rue

Des bénéfices sur la température d'air, mais d'amplitude variable selon :

- L'environnement urbain
- Les conditions météorologiques
- Les caractéristiques des arbres (indice de surface foliaire, espèce, densité plantation)

Bowler et al (2010)

Par journée ensoleillée à Tel-Aviv :

Réduction moyenne de 3°C sur la température d'air l'après-midi

Augmentation avec la température de l'air et fraction de sol ombragée de la rue

Sashua and Hoffman (2000)

Réduction maximale de l'UTCI de 7°C à la mi-journée mesurée à Melbourne

Le stress thermique dans les rues diminue avec le facteur de vue du ciel (ombrage bâtiment et arbres)

Coutts et al (2016)

Etat de l'art

Etat de l'art sur les bénéfices climatiques des arbres d'alignement de rue

Des bénéfices sur la température d'air, mais d'amplitude variable selon :

- L'environnement urbain
- Les conditions météorologiques
- Les caractéristiques des arbres (indice de surface foliaire, espèce, densité plantation)

Bowler et al (2010)

Par journée ensoleillée à Tel-Aviv :

Réduction moyenne de 3°C sur la température d'air l'après-midi

Augmentation avec la température de l'air et fraction de sol ombragée de la rue

Sashua and Hoffman (2000)

Réduction maximale de l'UTCI de 7°C à la mi-journée mesurée à Melbourne

Le stress thermique dans les rues diminue avec le facteur de vue du ciel (ombrage bâtiment et arbres)

Coutts et al (2016)

Etude d'une journée ensoleillée en confort hydrique dans maquette échelle 1/5ème :

- Réduction maximale de 2.7°C de la température d'air au midi solaire
- Réduction maximale de 8°C d'UTCI à la mi-journée

Mballo et al (2021)

Verrous et problématique scientifique

Verrous sur les bénéfices climatiques des arbres d'alignement de rue

Conclusions souvent basées sur l'étude de journées individuelles :

=> peu d'information sur la variabilité des bénéfices avec les facteurs météorologiques

Les mécanismes d'évapotranspiration et à plus long terme le développement de l'arbre (ombrage) peuvent être affectés par la disponibilité de l'eau

=> or l'état hydrique des arbres est souvent non connu, ou non maîtrisé dans études in-situ

Verrous et problématique scientifique

Verrous sur les bénéfices climatiques des arbres d'alignement de rue

Conclusions souvent basées sur l'étude de journées individuelles :

=> peu d'information sur la variabilité des bénéfices avec les facteurs météorologiques

Les mécanismes d'évapotranspiration et à plus long terme le développement de l'arbre (ombrage) peuvent être affectés par la disponibilité de l'eau

=> or l'état hydrique des arbres est souvent non connu, ou non maîtrisé dans études in-situ

Problématique scientifique :

En été, comment les bénéfices climatiques des arbres d'alignement de rue sont -ils affectés par les conditions météorologiques, en condition de confort hydrique ?

Dispositif expérimental

Rue Canyon à l'échelle 1/5ème

- Longueur 15.6m
- largeur 2m
- hauteur 2m

Orientée Nord-Sud

Matériaux urbains :

- Enrobé foncé au sol
- Murs blancs en béton et isolés



Dispositif expérimental

Organisée en différentes zones :

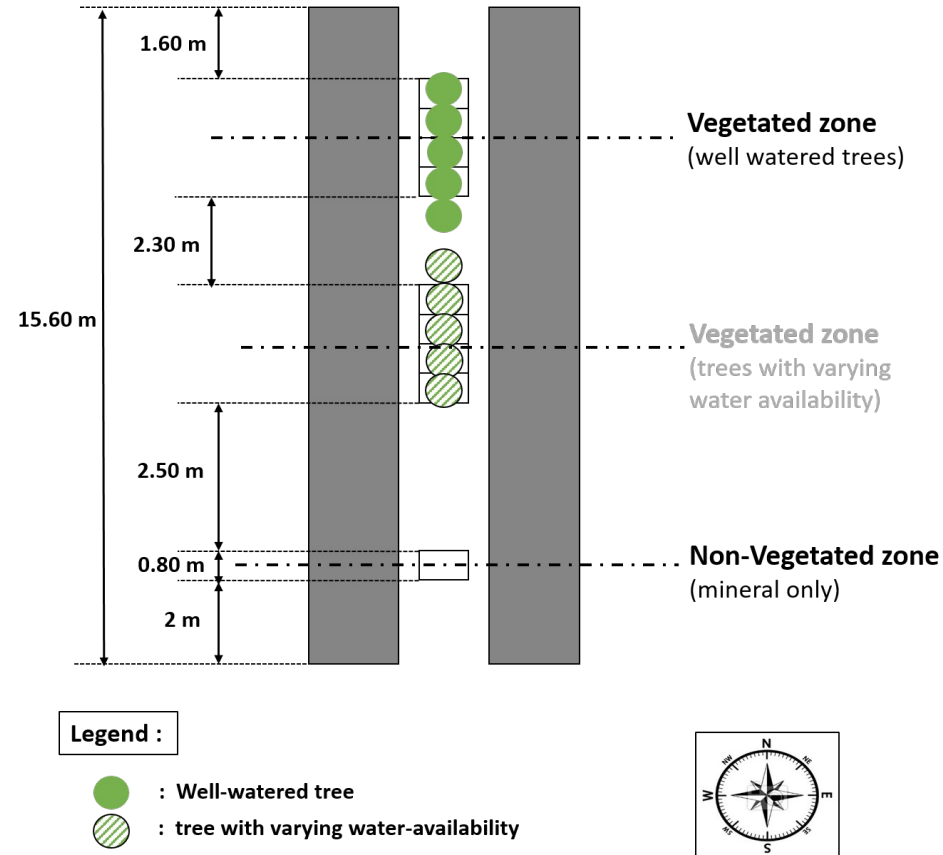
- 1 zone non-végétalisée
- 2 zones arborées (pommier d'ornement, LAI $\in [2,5 ; 3,3]$)
- 2 mats de mesures extérieurs

Apports en eau maîtrisés :

- Pas d'apport par pluviométrie
- Irrigation assurée par goutteurs

Statut hydrique du sol :

Mesure du potentiel hydrique
=> possibilité de rester proche de la capacité au champs (confort hydrique)



=> impact des arbres sur le microclimat = microclimat *(zone arborée – zone non végétalisée)

Instrumentation Microclimatique

Mesures du microclimat :

- Température d'air
- Humidité relative de l'air
- Vent (sonique)
- Rayonnement (T globe)

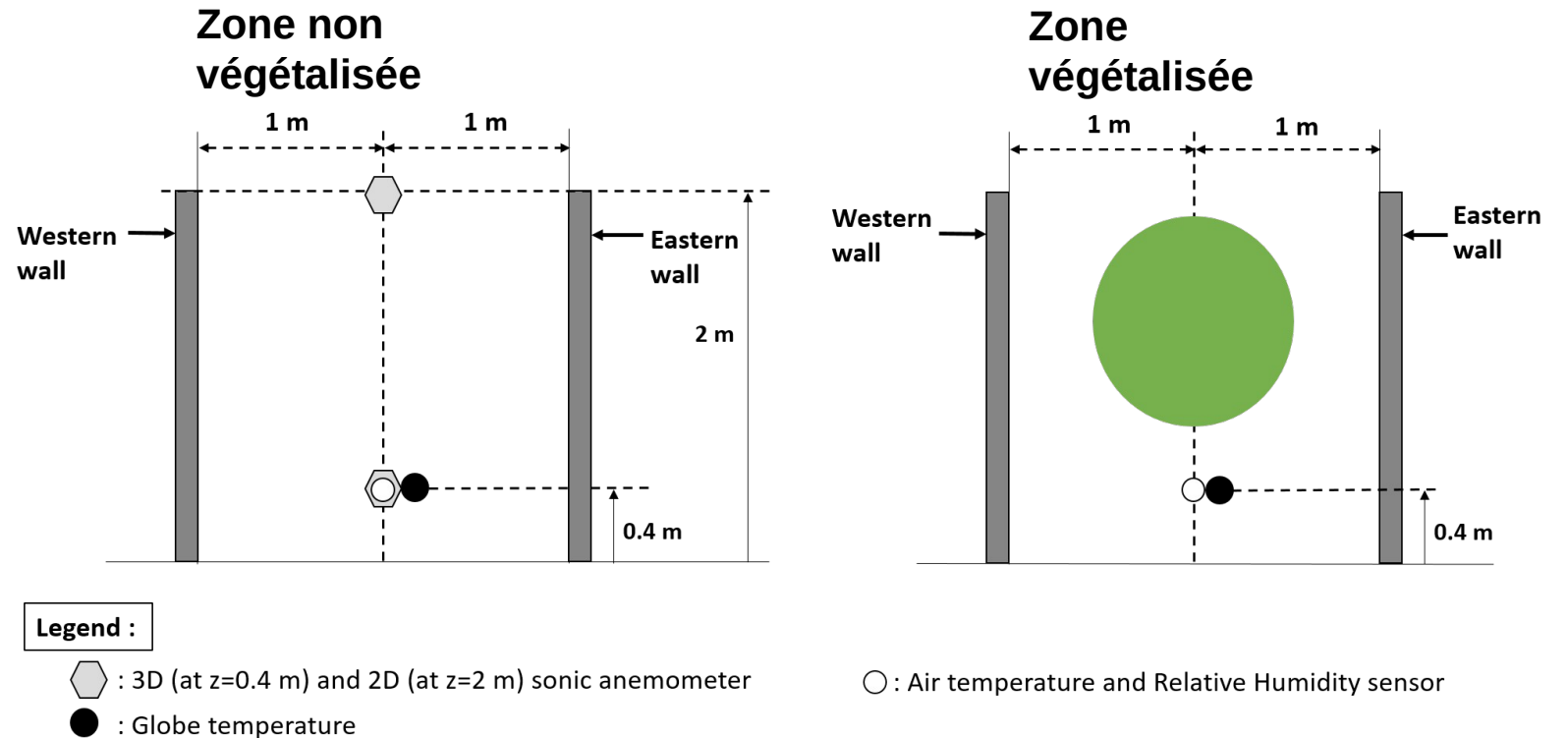
Indice de stress thermique :

UTCI (Bröde et al 2013)

Comparaison :

- Zone arborée vs non végétalisée
=> impact des arbres
- Zone non-végétalisée vs ext rue
=> impact du milieu urbain

Données complémentaires à la station Météo-France de Beaucouzé (à 400m du site)



TRH : Abri mécaniquement ventilé

Instrumentation Microclimatique

Mesures du microclimat :

- Température d'air
- Humidité relative de l'air
- Vent (sonique)
- Rayonnement (T globe)

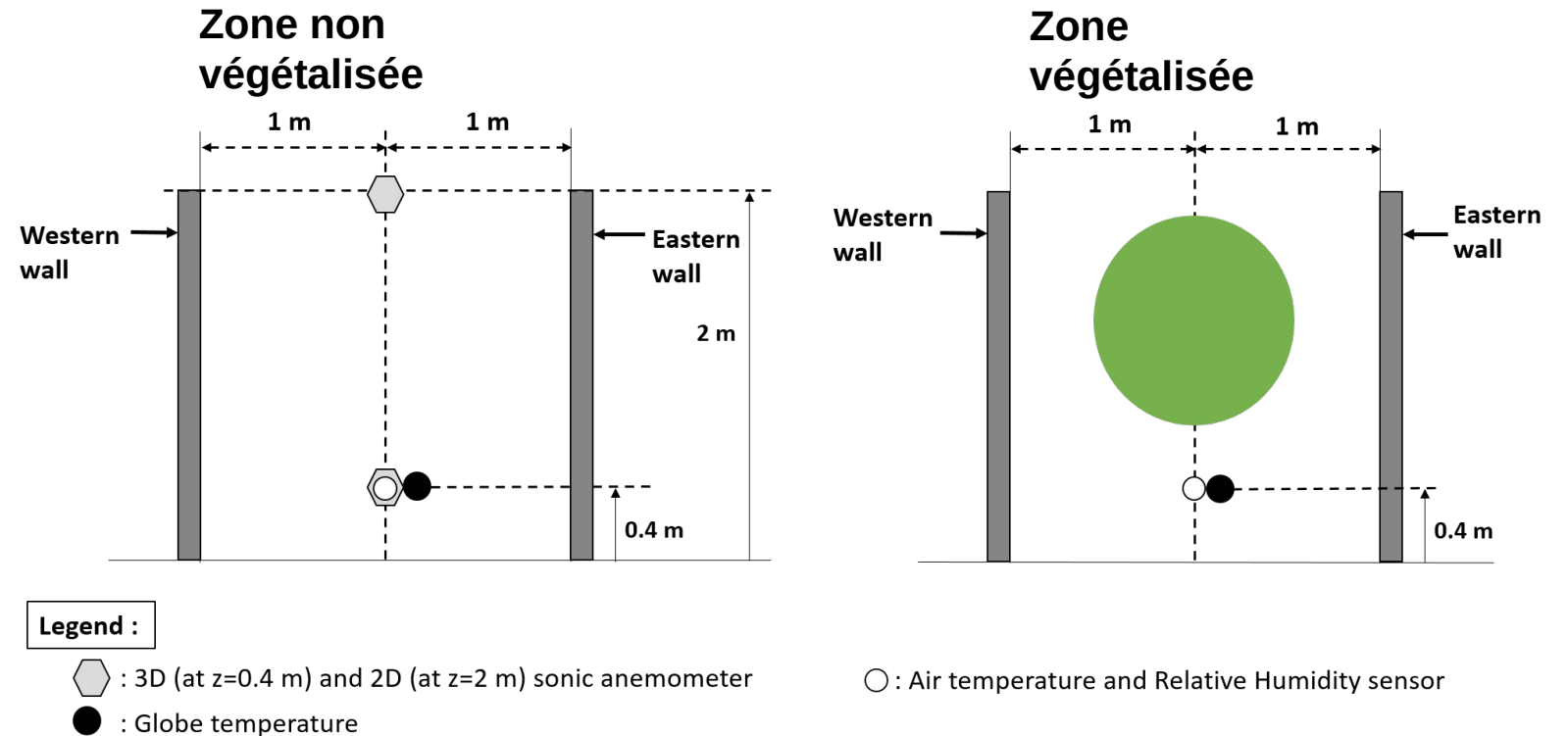
Indice de stress thermique :

UTCI (Bröde et al 2013)

Comparaison :

- Zone arborée vs non végétalisée
=> impact des arbres
- Zone non-végétalisée vs ext rue
=> impact du milieu urbain

Données complémentaires à la station Météo-France de Beaucouzé (à 400m du site)



120 journées de données microclimatiques sur 2020 et 2021

Microclimat journalier moyen (N=120) : effet arbres et rue

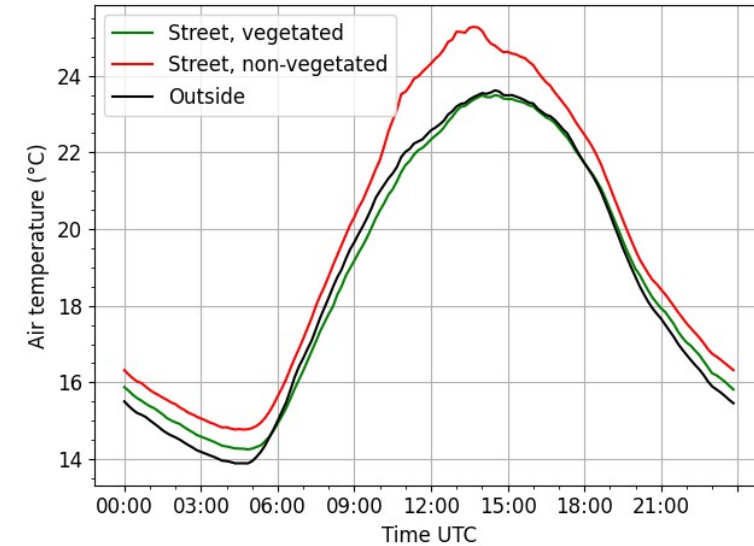
Température d'air :

La nuit :

effet de surchauffe de la rue non-végétalisée (+0,9°C)
surchauffe moindre pour la rue arborée

La journée :

Effet de surchauffe important de la rue non-végétalisée
(+1,8°C entre 11h et 13h UTC)
Effet bénéfique des arbres (-2°C=>annulation surchauffe)



Microclimat journalier moyen (N=120) : effet arbres et rue

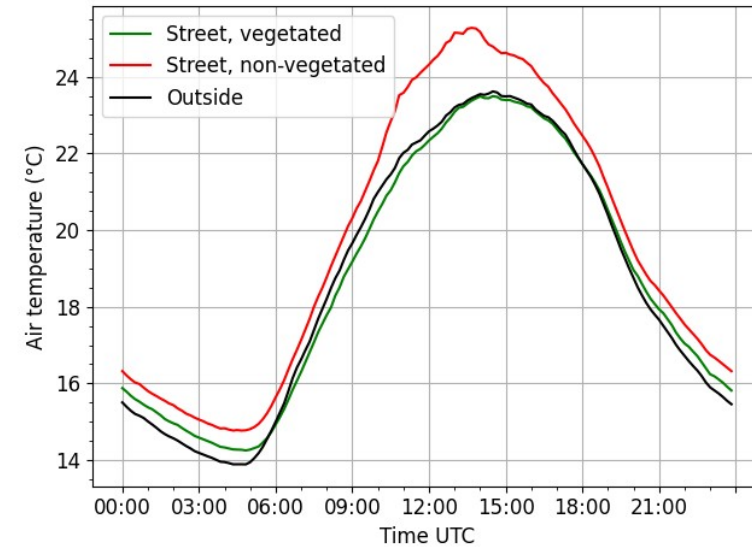
Température d'air :

La nuit :

effet de surchauffe de la rue non-végétalisée (+0,9°C)
surchauffe moindre pour la rue arborée

La journée :

Effet de surchauffe important de la rue non-végétalisée
(+1,8°C entre 11h et 13h UTC)
Effet bénéfique des arbres (-2°C=>annulation surchauffe)



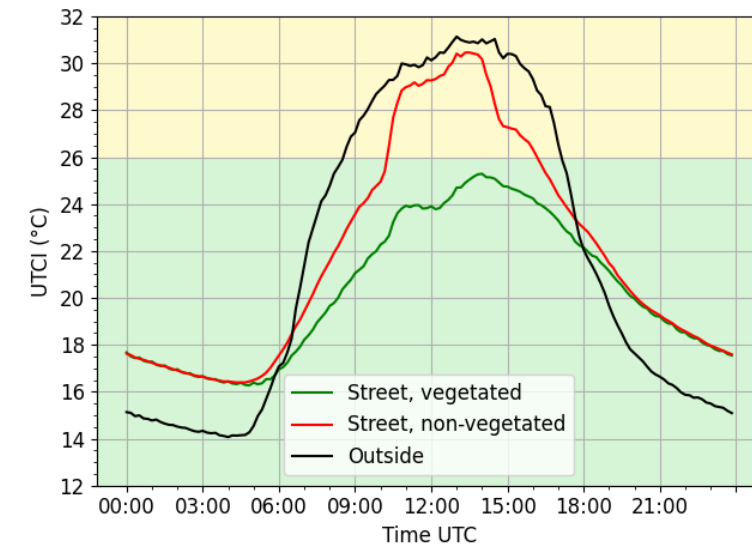
UTCI (stress thermique) :

La nuit :

Pas d'effet des arbres sur le confort thermique

La journée :

Le matin et l'après-midi, effet d'ombrage des murs de la rue
Autour du midi solaire : gain ++ des arbres (-5,3°C UTCI)
=> passage de la zone de stress thermique modéré au neutre
=> Période de transpiration et d'ombrage maximale des arbres



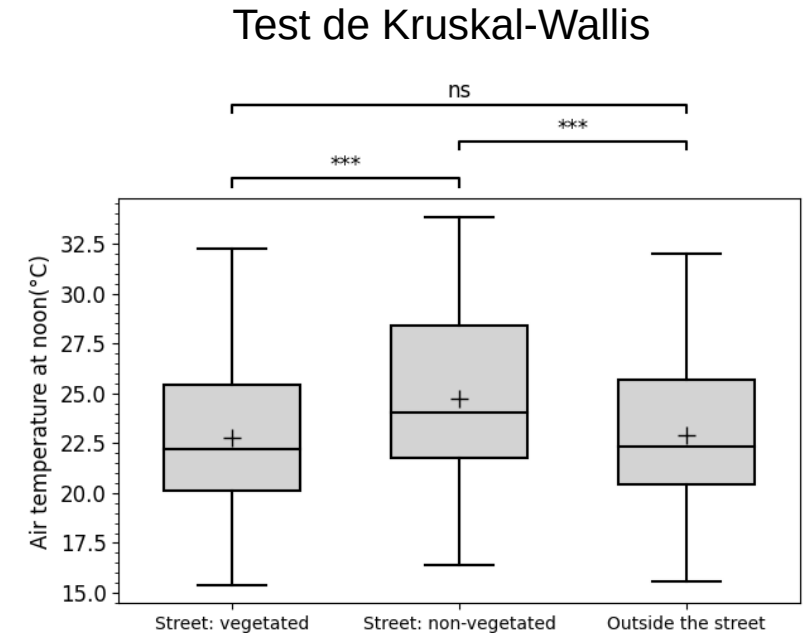
Variabilité du microclimat en journée (N=120)

Température d'air en journée (11h-13h)

Effet significatif des arbres et du milieu urbain sur le microclimat :

- Rue non-végétalisée et zone extérieure : $\Delta T_a \in [0.6; 3.9]$
- Rue arborée et rue non-végétalisée $\Delta T_a \in [-3.6; -0.7]$

Pas de différence significative entre la rue arborée et la zone ext.



Variabilité du microclimat en journée (N=120)

Température d'air en journée (11h-13h)

Effet significatif des arbres et du milieu urbain sur le microclimat :

- Rue non-végétalisée et zone extérieure : $\Delta T_a \in [0.6; 3.9]$
- Rue arborée et rue non-végétalisée $\Delta T_a \in [-3.6; -0.7]$

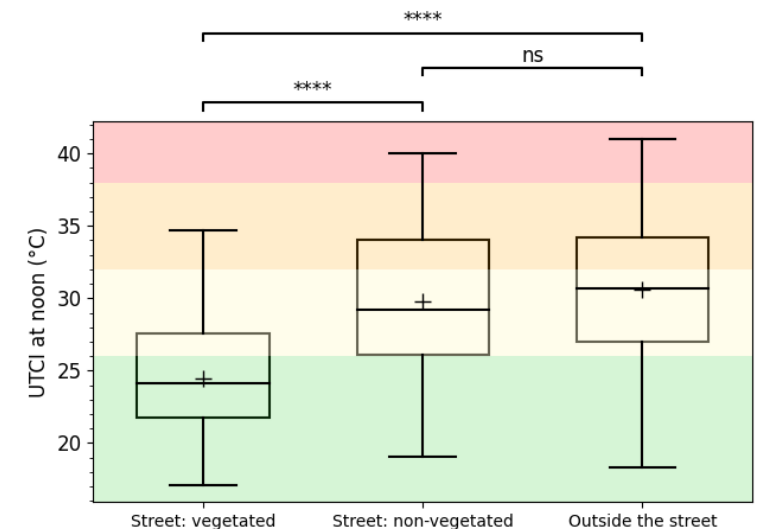
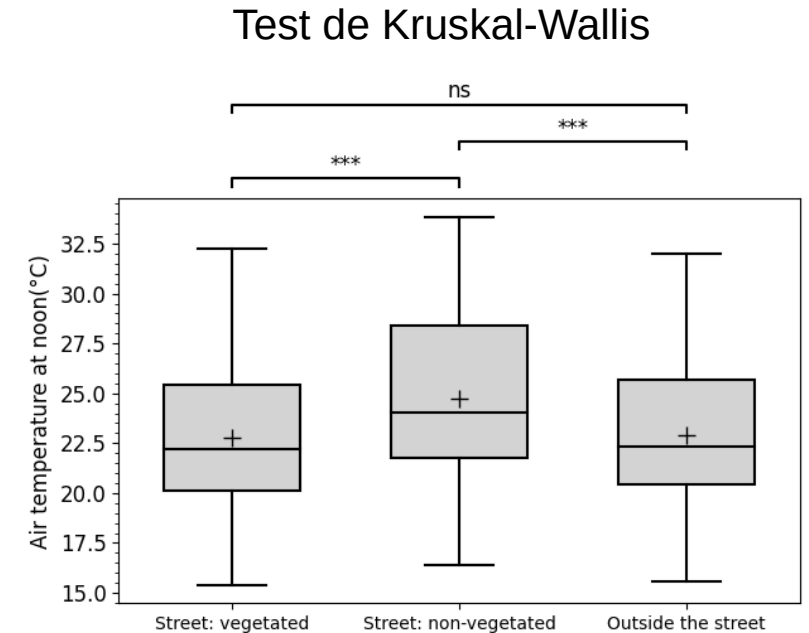
Pas de différence significative entre la rue arborée et la zone ext.

Indicateur de stress thermique (11h-13h)

La rue arborée est significativement plus confortable que les deux autres zones (rue non-végétalisée et zone extérieure) :

- Rue arborée et rue non-végétalisée : $\Delta \text{UTCI} \in [-9.2; -1.3]$
- grâce aux arbres : pas un seul jour dans la zone de stress thermique fort

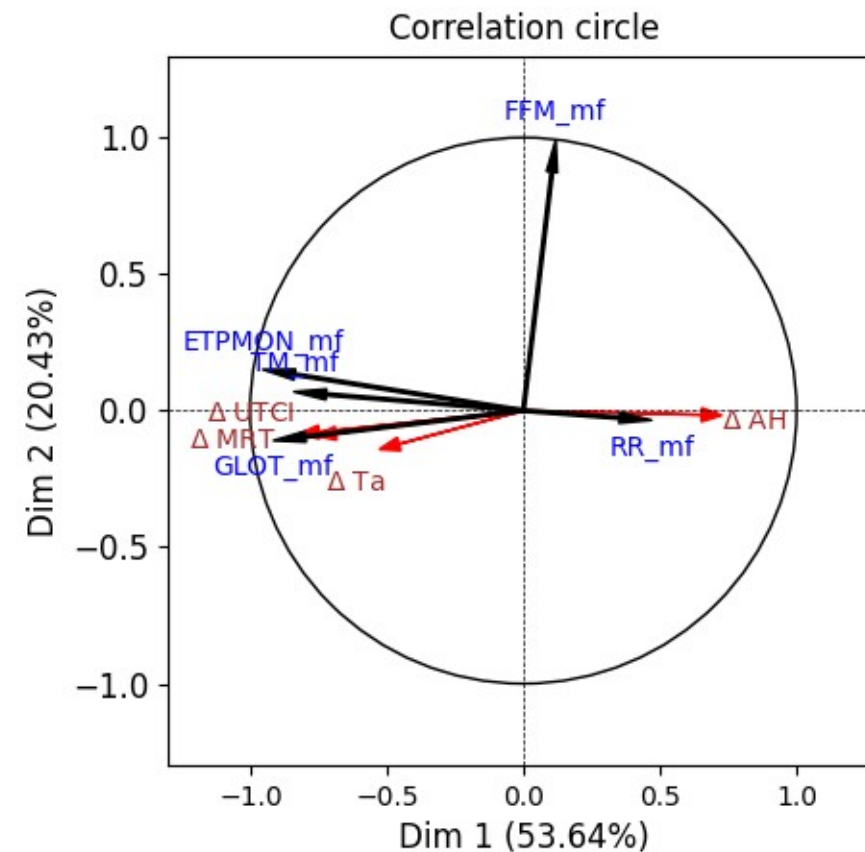
Pas de différence significative entre la rue non-végétalisée et zone ext.



Influence des conditions météorologiques sur les bénéfices (N=120)

Analyse par Composantes Principales (ACP) sur les variables météorologiques quotidiennes de la station Météo-France (« mf »)

- 1ère composante (53%) liée au rayonnement global (GLOT) et à l'ETP
- 2ème composante (20%) liée à la vitesse moyenne du vent (FFM)



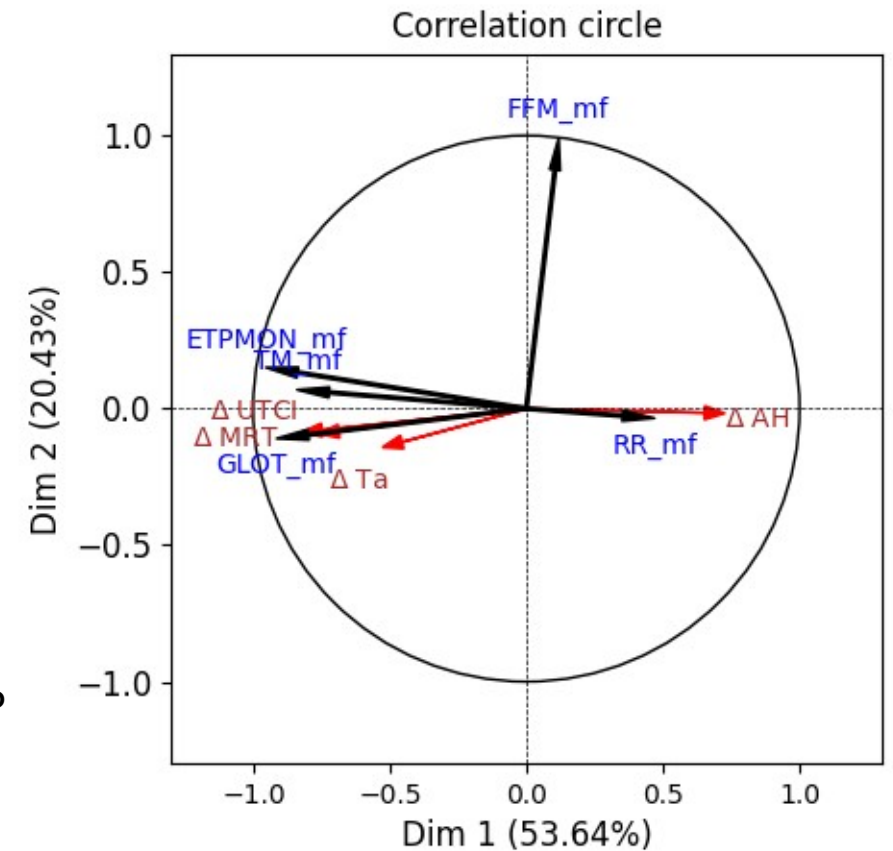
Influence des conditions météorologiques sur les bénéfices (N=120)

Analyse par Composantes Principales (ACP) sur les variables météorologiques quotidiennes de la station Météo-France (« mf »)

- 1ère composante (53%) liée au rayonnement global (GLOT) et à l'ETP
- 2ème composante (20%) liée à la vitesse moyenne du vent (FFM)

Variables supplémentaires : impact des arbres sur le microclimat :

- Différences de température moyenne radiante (ΔMRT) et de stress thermique ($\Delta UTCI$) très corrélées au rayonnement global
=> cohérent car MRT liée au échanges radiatifs, et UTCI très impacté par TMRT (Kantor et Unger 2011)
- Différence d'humidité absolue (ΔHA) corrélée avec le rayonnement et l'ETP
=> influence de la transpiration des arbres
- Niveau de corrélation faible pour la température de l'air (ΔTa) dans ce plan



Influence des conditions météorologiques sur les bénéfices (N=120)

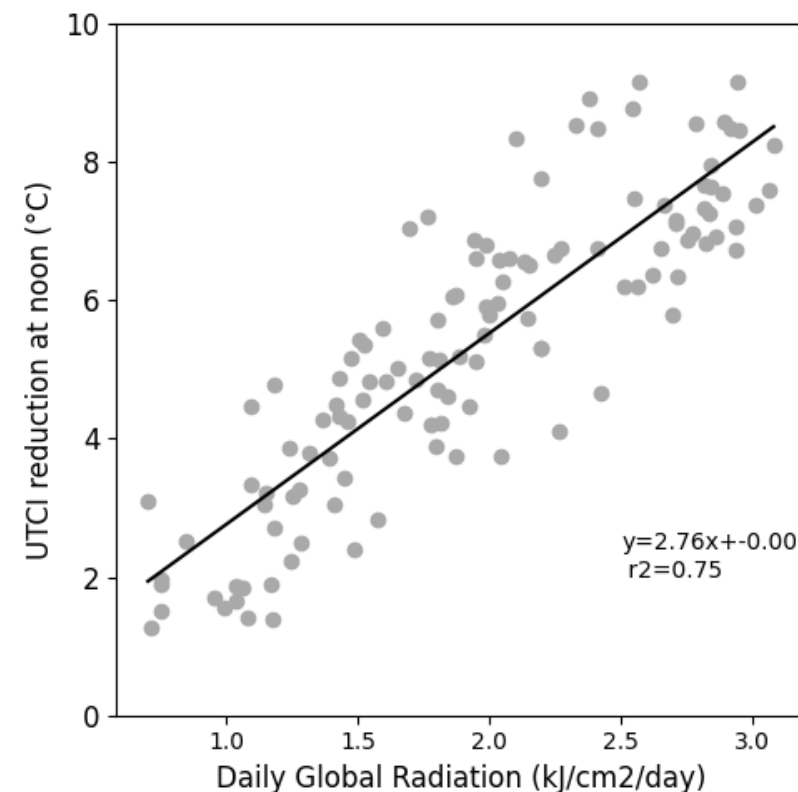
Bénéfice des arbres : lien entre Δ UTCI et rayonnement global quotidien

Gamme du gain en UTCI (°C) : [1,3 ; 9,2]

Régression linéaire :

- Niveau de corrélation assez élevé avec le rayonnement ($r^2=0,75$)
- Fonction linéaire :

$$\Delta\text{UTCI}=2.76 \text{ GLO} + 0.0$$



Influence de l'indice de surface foliaire (LAI) (N=39)

Bénéfices des arbres : influence du LAI

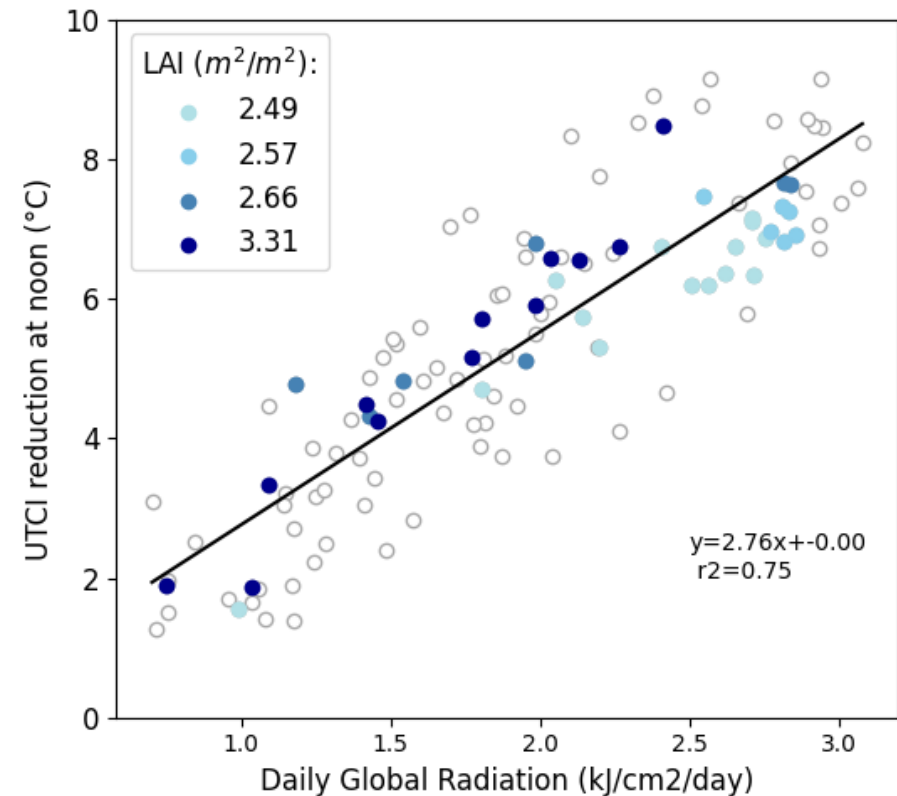
Pour expliquer le reste de la variance, on étudie l'influence du LAI (méthode de mesure allométrique).

Données partielles :

- Seulement 39 journées parmi les 120 étudiées
- 4 valeurs dans une gamme restreinte [2,5 ; 3,3]

Les valeurs de LAI plus élevées semblent induire une réduction d'UTCI plus importante.

Mais plus de valeurs de LAI dans une gamme plus large sont requises pour quantifier son influence



Conclusion

En été en climat tempéré océanique, sur 120 journées toutes conditions météorologiques confondues,

Pour une rue canyon orientée Nord-Sud, avec un alignement d'arbre central de LAI \approx 3 en confort hydrique :

- Impact significatif des arbres à la mi-journée sur la température d'air ($\Delta T_a \in [-3.6; -0.7]$) et l'UTCI ($\Delta UTCI \in [-9.2; -1.3]$)
- Baisse d'UTCI assez bien corrélée au rayonnement global de la journée ($r^2=0,75$)

=> proposition d'une régression linéaire $\Delta UTCI = f(GLO)$

Conclusion

En été en climat tempéré océanique, sur 120 journées toutes conditions météorologiques confondues,

Pour une rue canyon orientée Nord-Sud, avec un alignement d'arbre central de LAI \approx 3 en confort hydrique :

- Impact significatif des arbres à la mi-journée sur la température d'air ($\Delta T_a \in [-3.6; -0.7]$) et l'UTCI ($\Delta UTCI \in [-9.2; -1.3]$)
- Variabilité de la baisse d'UTCI assez bien expliquée par le rayonnement global de la journée ($r^2=0,75$)

=> proposition d'une régression linéaire $\Delta UTCI = f(GLO)$

Perspectives

Analyser l'impact des conditions météorologiques sur les mécanismes d'ombrage et d'évapotranspiration sous-jacents aux bénéfices

Introduire le LAI comme variable d'analyse (besoin d'une gamme de valeurs plus étendue)

Etudier l'impact de la disponibilité de l'eau du sol sur les bénéfices des arbres (Thierry, 2022)

Références

IPCC, 2021 : Summary for Policymakers (Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). IPCC.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, & Population Division. (2019). World urbanization prospects : The 2018 revision.

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. 15.

Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1-2), 55-68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>

Kántor, N., & Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment—The mean radiant temperature. *Open Geosciences*, 3(1). <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>

Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P. E. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, 37, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>

Thierry, J., Herpin, S., Maturana, L., Demotes-Mainard, S., Rodriguez, F., Cannavo, P., Bournet, P.E. (2022). Impact of a moderate water stress on the climatic services provided by street trees: an experimental study inside an outdoor canyon street scale model. 35ème colloque annuel de l'Association internationale de climatologie, 6-9 juillet 2022, Toulouse, France

Introduction

Matériel et Méthodes

Résultats

Conclusion et perspectives

Maîtrise des apports en eau et du statut hydrique du sol

Maîtrise des apports en eau :

- Pas d'apport par pluviométrie
- Irrigation assurée par goutteurs

Statut hydrique du sol :

- Mesure du potentiel hydrique
=> possibilité de rester proche de la capacité au champs (confort hydrique)
- Mesure de la teneur en eau volumique
=> suivi du stock d'eau dans le sol

Estimation de la transpiration par bilan hydrique sur l'arbre

Instrumentation dans les pots des arbres

