

nobatek

LMDC

Toulouse - Tarbes



ICEtool

Développements supplémentaires d'un outil SIG pour la caractérisation de la surchauffe urbaine



● Agenda

- 1 Contexte
- 2 ICEtool
- 3 Développements envisagés
- 4 Comparaisons à des cas d'étude



● Contexte

La majeure partie de la population mondiale est soumise aux îlots de chaleur urbains (ICU) et à la surchauffe urbaine dont les effets devraient s'intensifier dans le futur

81% De la population mondiale est urbaine

45% Des urbains vivent dans les grands centres urbains

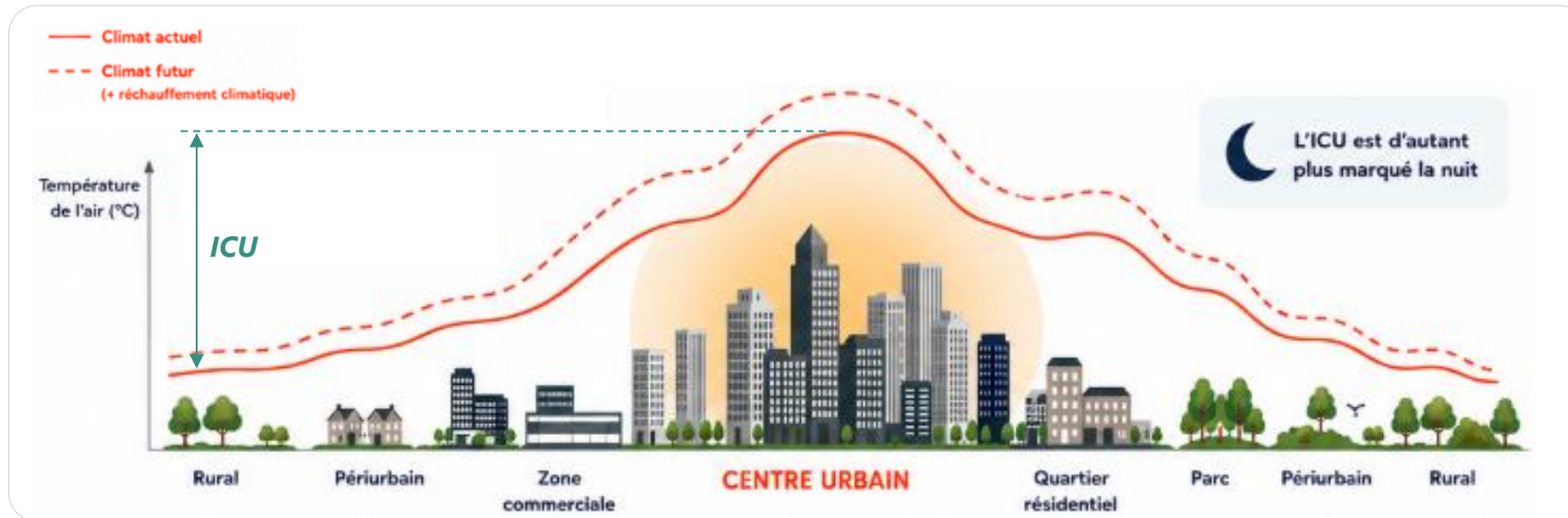
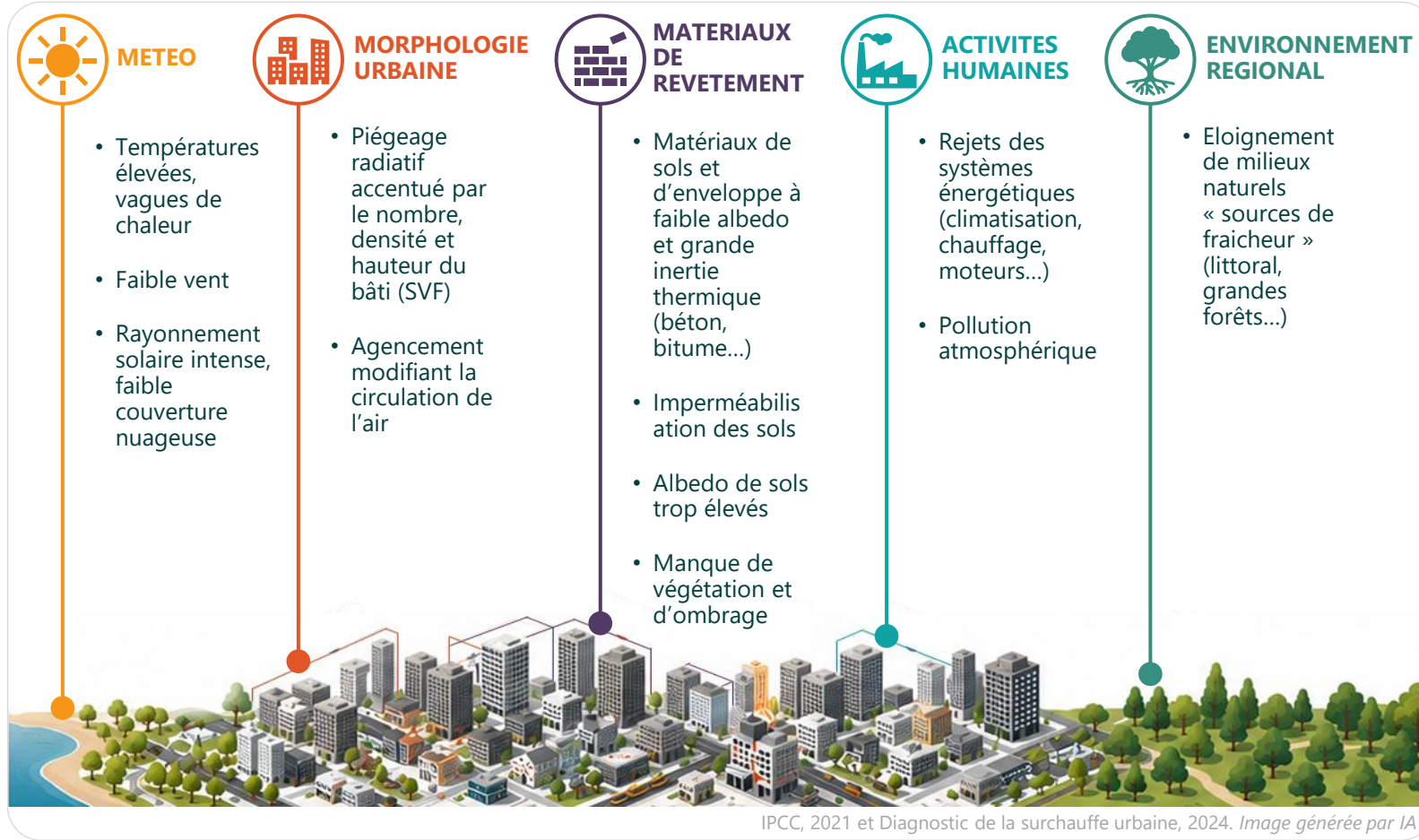


Image générée par IA

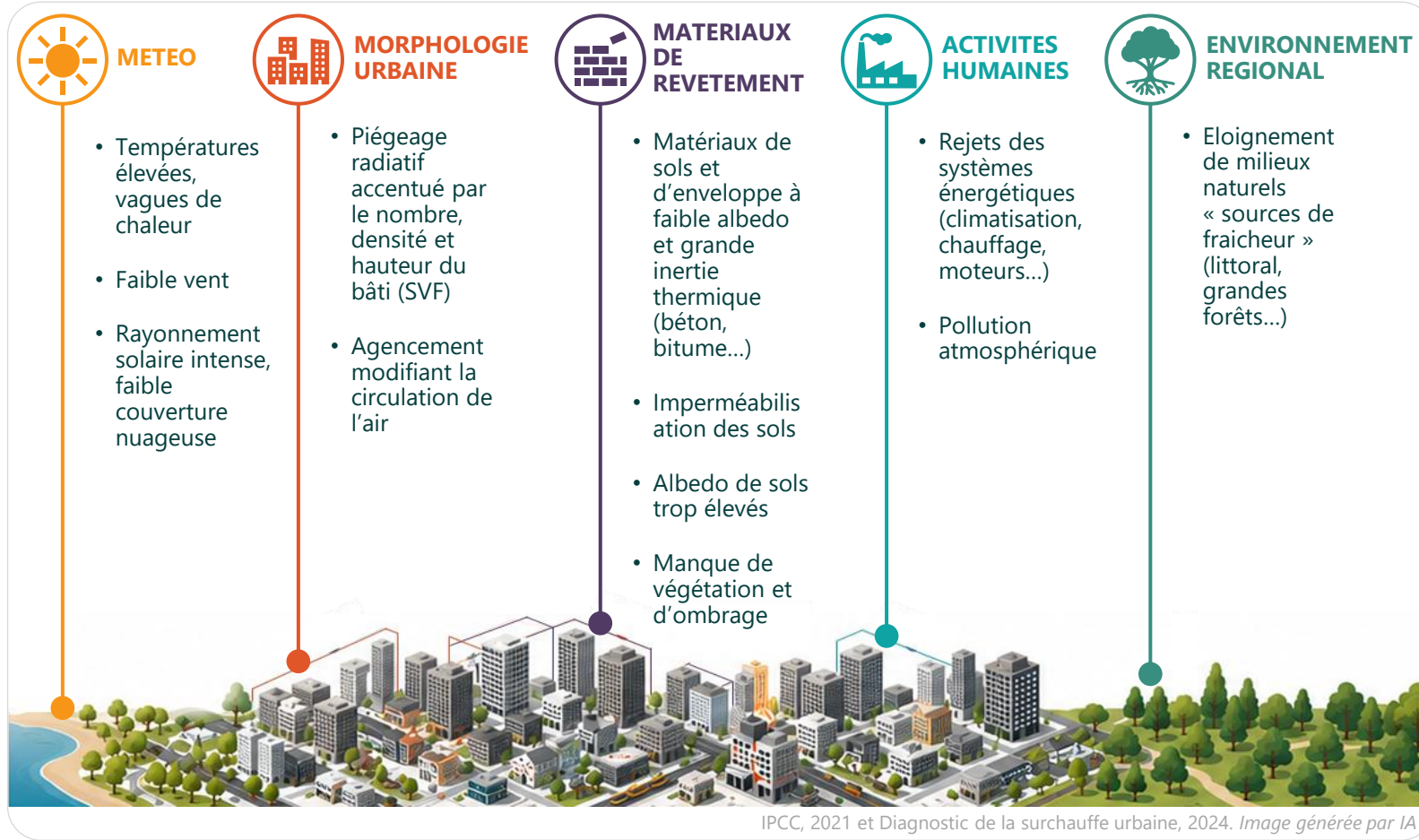
● Contexte

La surchauffe urbaine est influencée par 5 facteurs principaux et a des conséquences à la fois sur la santé humaine et sur les bâtiments



● Contexte

La surchauffe urbaine est influencée par 5 facteurs principaux et a des conséquences à la fois sur la santé humaine et sur les bâtiments



IMPACTS



SANTÉ¹

Santé physique



- Augmentation morbidité et mortalité
- Risques sanitaires accrus

Confort thermique



- Inconfort des individus, stress thermique
- Fatigue, baisse de productivité
- Abandon des espaces sujets à surchauffe

Santé mentale



- Altération du sommeil
- Dégradation de la santé mentale



BÂTIMENTS



Performances thermiques

- Surchauffe et inconfort accrus

Besoins et dépenses énergétiques



- Intensification de la climatisation, hausse des consommations d'énergie
- Risques de tensions sur le réseau

Vieillesse accélérée du bâti



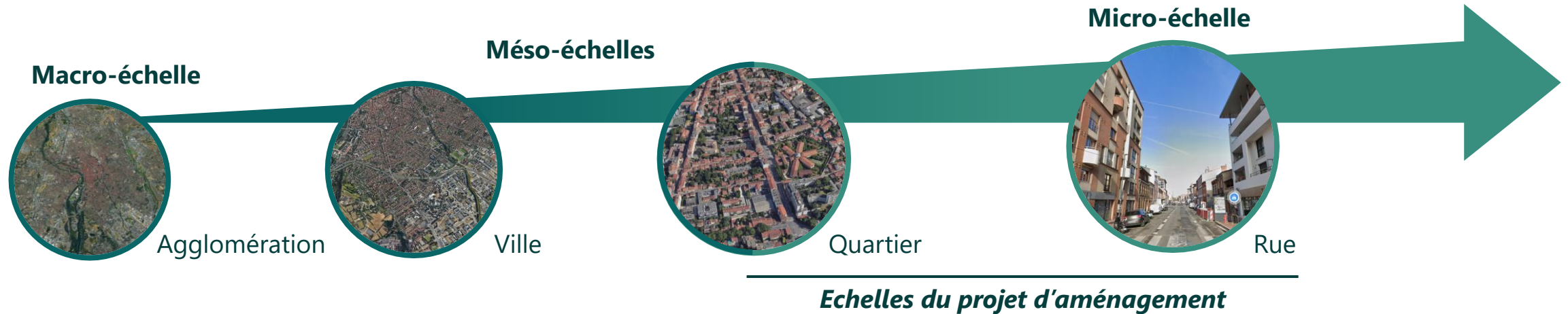
- Dilatation/compression intensifiée
- Usure accélérée de certains revêtements
- Augmentation des besoins et dépenses de maintenance

¹ Au sens de l'OMS (santé et confort)

Comment anticiper la contribution à la surchauffe ou au rafraîchissement urbain de projets d'aménagements avant leur construction dans un climat en réchauffement ?

● Contexte

Modéliser et simuler le microclimat urbain pour guider les stratégies d'aménagement



Modèles méso-échelle

- Résolution ~ 100m à plusieurs km
- Vision d'ensemble de la ville
- Identification des quartiers sensibles
- Evaluation des politiques territoriales
- Ex : WRF

Modèles micro-échelle

- Résolution ~ 1m à 100m
- Analyse fine du microclimat local
- Evaluation de scénarios d'aménagements
- Accès à des indicateurs de confort thermique détaillés
- Ex : ENVI-Met, SOLENE Microclimat, CFD + Rayonnement...

● Contexte

2 types de modèles micro-échelle pour guider les choix d'aménagement



- Bilans énergétiques entre les différents éléments de la scène urbaine
- Modélisation microclimat local



Indicateurs localisés, meilleure granularité



Ressources et temps de calcul élevés

Deux grandes catégories de modèles microclimatiques

Modèles d'équilibre d'énergie (UCM)

- Bilan d'énergie et d'eau dans la canopée urbaine
- Moins coûteux en calcul
- Physique moins détaillé (pas d'interaction vent/température)

Modèles CFD

- Résolution des équations de dynamique des fluides
- Couplage vent – température – rayonnement
- Haut niveau de détails mais coûteux en ressources

● Contexte

2 types de modèles micro-échelle pour guider les choix d'aménagement



- Bilans énergétiques entre les différents éléments de la scène urbaine
- Modélisation microclimat local



Indicateurs localisés, meilleure granularité



Ressources et temps de calcul élevés

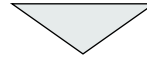
Deux grandes catégories de modèles microclimatiques

Modèles d'équilibre d'énergie (UCM)

- Bilan d'énergie et d'eau dans la canopée urbaine
- Moins coûteux en calcul
- Physique moins détaillé (pas d'interaction vent/température)

Modèles CFD

- Résolution des équations de dynamique des fluides
- Couplage vent – température – rayonnement
- Haut niveau de détails mais coûteux en ressources



Comparaison de modèles micro-échelle

ICE Tool	UMEP	Envi-met	SOLENE Microclimat	UWG	RayMan Pro	Solweig	Modèle TEB	LASER/F	SUEWS / Uheat	COMSOL Multiphysics	Ansys Fluent	DesignBuilder	IMOTEP	...	
		<ul style="list-style-type: none"> • Open access • Echelle spatiale d'étude • Temps de calcul • Expertise utilisateur requise 					<ul style="list-style-type: none"> • Energy Balance Scheme vs CFD • Traitement température de l'air • Traitement humidité • Traitement vent • Traitement rayonnement solaire 				<ul style="list-style-type: none"> • Données d'entrée • Sorties / Résultats • Forces / Faiblesses 				

● ICEtool

Un outil SIG open source et simplifié pour caractériser l'ICU et la surchauffe urbaine

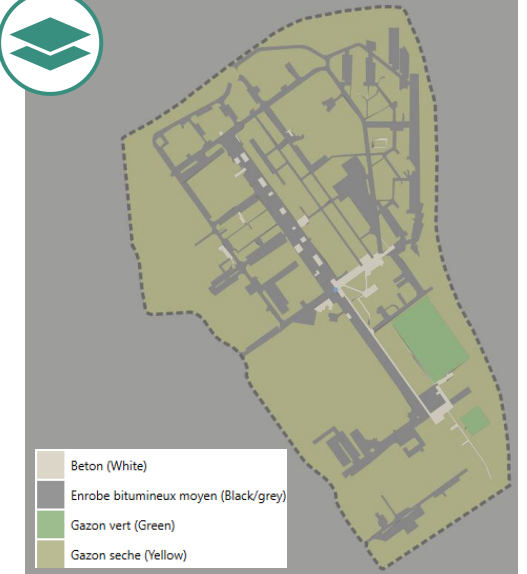
1

Préparation des données SIG

- Génération DEMs pour les arbres et les bâtiments
- Attribution des matériaux de sol

ICEtool

INSA Toulouse, FR



● ICEtool

Un outil SIG open source et simplifié pour caractériser l'ICU et la surchauffe urbaine

ICEtool

INSA Toulouse, FR



1

Préparation des données SIG

- Génération DEMs pour les arbres et les bâtiments
- Attribution des matériaux de sol

2

Calcul des ombres portées

- Plugin ShadowGenerator UMEP – Méthodologie de *Ratti and Richens, 2004* et *Lindberg and Grimmond, 2010*
- Opacité végétation fixe : défaut à 20%



Masques à 09h



Masques à 18h



Shadow fraction cumulée

● ICEtool

Un outil SIG open source et simplifié pour caractériser l'ICU et la surchauffe urbaine

ICEtool

INSA Toulouse, FR



1

Préparation des données SIG

- Génération DEMs pour les arbres et les bâtiments
- Attribution des matériaux de sol

2

Calcul des ombres portées

- Plugin ShadowGenerator UMEP – Méthodologie de *Ratti and Richens, 2004* et *Lindberg and Grimmond, 2010*
- Opacité végétation fixe : défaut à 20%

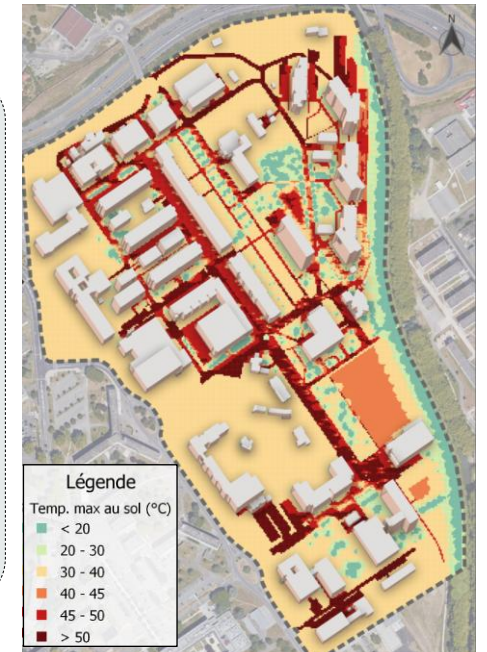
3

Bilan énergie sol pour estimer T_{surf} du sol

$$Q_R = Q_H + Q_L + Q_C + \delta Q_S$$

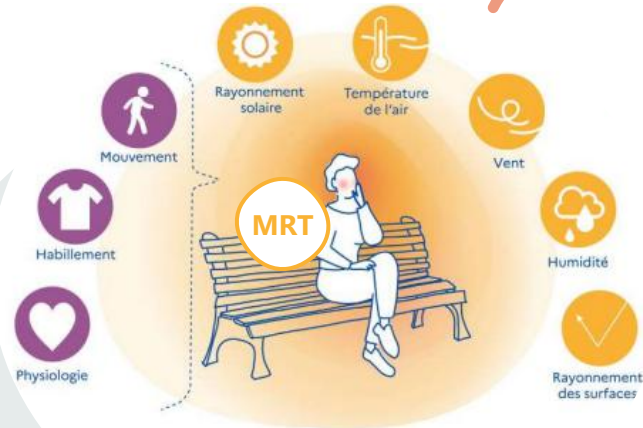
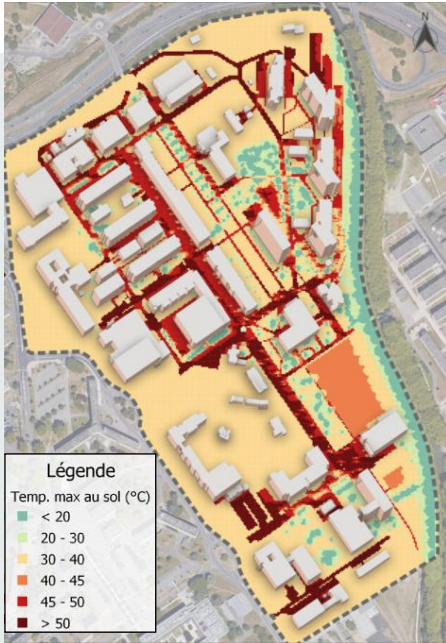
- Q_R : Flux de chaleur par rayonnement – CLO direct (fonction des ombres portées) et diffus, GLO voûte céleste et sol
- Q_H : Flux de chaleur convectif (h_c fixe à $5 \text{ W/m}^2/\text{K}$)
- Q_L : Flux de chaleur latent et sensible de l'eau (Evapotranspiration par la méthode Penman-Monteith : $ET = k_c \cdot ET_0$)
- Q_C : Flux de chaleur par conduction (équation de diffusion 1D)
- δQ_S : Flux de chaleur relatif au stockage thermique – Négligé

Résolution numérique du système de la forme $A + B \cdot T_{surf} + C \cdot T_{surf}^4 = 0$

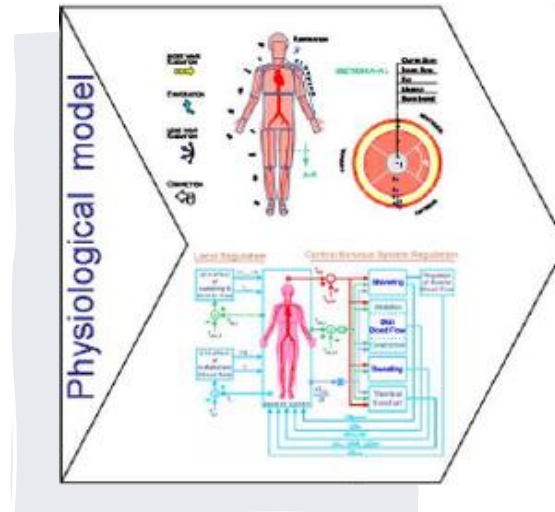


● Premiers développements envisagés

Résultats : de la température de surface de sol à un indicateur de confort piéton

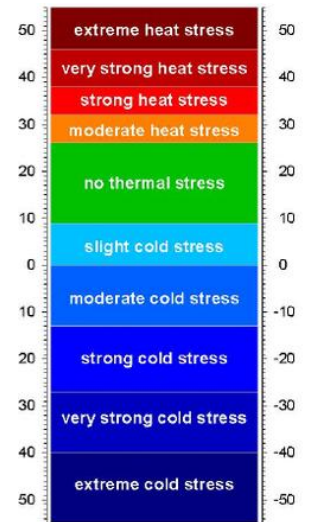


Adapté de ADEME, *Diagnostic de la surchauffe urbaine : Méthodes et retours d'expérience*



Issu de Fiala et al, 2001

- UTCI
- PET
- SET / OUT_SET*
- ...

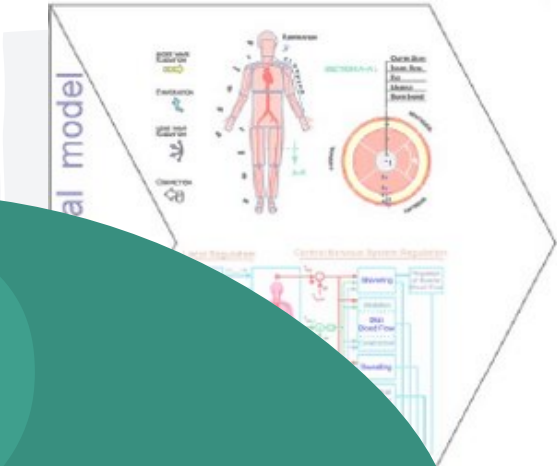


● Premiers développements envisagés

Résultats : de la température de surface de sol à un indicateur de confort piéton



Ces informations seraient-elles utiles à des aménageurs ?



- UTCI
- PET
- SET / OUT_SET*
- ...



ADEME, Diagnostic de la surchauffe urbaine : Méthodes et retours d'expérience

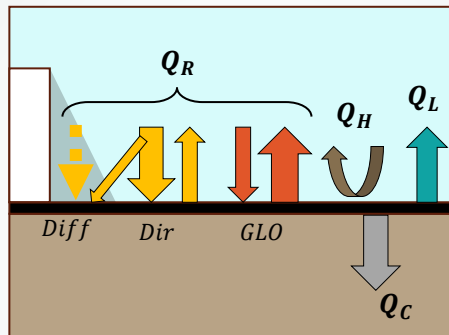
● Premiers développements envisagés

Amélioration des modèles physiques existant : modèle de sol

La température de sol est une composante importante dans le calcul de la MRT et donc l'évaluation du confort piéton. Améliorer et fiabiliser sa modélisation semble donc présenter un intérêt.

Modèle hydrique simplifié

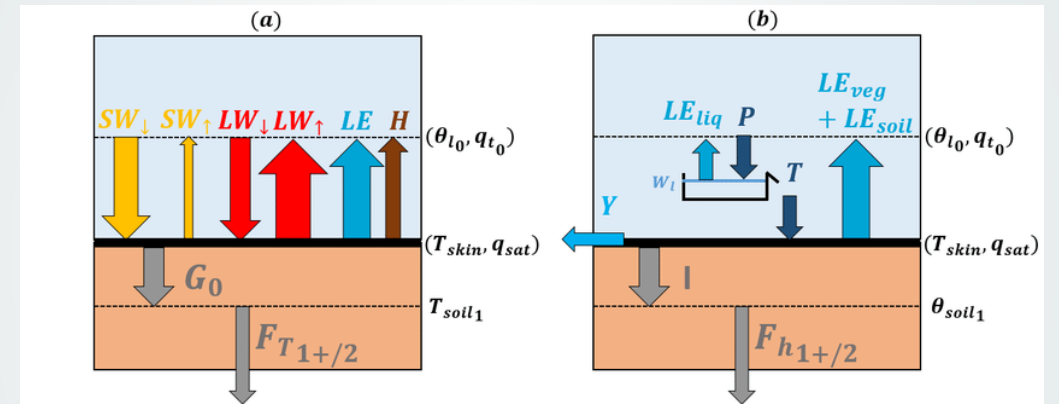
- 1 seul phénomène hydrique : évapotranspiration à partir d'un modèle simplifié



- Arbres et arbustes uniquement modélisés pour leur comportement d'ombrières

Modèle hydrique détaillé

- Ajout du bilan hydrique au bilan d'énergie



From Maurice Van Tiggelen, 2018

- Ajout du phénomène d'évapotranspiration de la canopée végétale

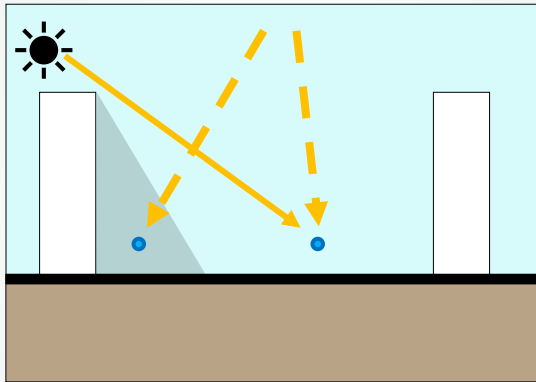
● Premiers développements envisagés

Amélioration de la modélisation des effets des façades sur le confort piéton

Les façades des bâtiments ont un effet important sur l'environnement radiatif dans lequel évoluent les individus en réfléchissant partiellement le rayonnement direct sur le piéton. Elles peuvent aussi être considérées comme une source anthropique de chaleur.

Modèle bâtiment simplifié

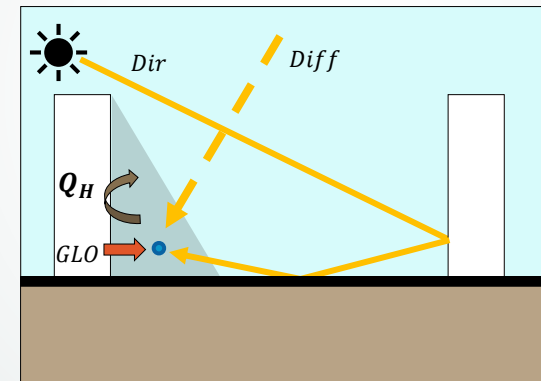
- Les bâtiments sont modélisés comme des filtres de rayonnement uniquement.



- Modélisation 2,5D simple.

Modèle bâtiment détaillé

- Prise en compte des réflexions sur les façades et potentiellement de la diversité de conception au sein d'une même façade.
- Modélisation de l'inertie thermique du bâtiment et ses échanges de chaleur avec le milieu urbain extérieur (conduction et ponts thermiques, climatisation...)



- Besoin de passer par une modélisation 3D intermédiaire ?

● Autres pistes de développement

Des nombreux axes de développement peuvent être envisagés selon la sensibilité du confort thermique vis-à-vis de ces éléments



Amélioration des conditions initiales / conditions aux limites

Modification des données d'input pour prendre en compte l'ICU



Modélisation du vent

Coefficient de convection dynamique, impacts directs sur le confort thermique



Ajout d'autres phénomènes anthropiques

Effets de trafic automobile, de la pollution de l'air...



+ Enrichissement de la base de données matériaux de revêtement

● Autres pistes de développement

Des nombreux axes de développement peuvent être envisagés selon la sensibilité du confort thermique vis-à-vis de ces éléments



Amélioration des conditions initiales / conditions aux limites

Modification des données d'input pour prendre en compte l'ICU



Modélisation du vent

Coefficient de convection dynamique, impacts directs sur le confort thermique



Ajout d'autres phénomènes anthropiques

Effets de trafic automobile, de la pollution de l'air...



+ Enrichissement de la base de données matériaux de revêtement

In fine, l'outil devra :



Rester **simple et rapide** d'utilisation et de calcul



Pouvoir être un vrai **outil d'aide à la prise de décision** pour les aménageurs en :

- Permettant l'évaluation et la **comparaison de scénarios** d'aménagement
- Fournissant des **résultats compréhensibles et actionnables**



Favoriser la collaboration et l'approche open source pour favoriser son évolution

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Un partenariat avec Egis donne accès à des mesures in-situ sur différentes scènes urbaines

- Egis est un troisième partenaire de la thèse et met à disposition des données de campagnes de mesures réalisées sur 3 cas d'étude



Des scènes urbaines variées

- Objectif : Tester des modèles d'analyse des données et mettre en place le workflow d'analyse
- Localisation : Centre urbain dense, divers



Une école

- Objectif : Evaluer l'influence de la hauteur, des revêtements de surface, mesurer les façades
- Localisation : Sud de la France, petite ville



Une place fortement instrumentée

- Objectif : Analyser la répartition spatiale de la surchauffe dans une même scène urbaine selon l'orientation, le type d'espace + monitorer le végétal
- Localisation : Nord de la France, centre urbain

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Un partenariat avec Egis donne accès à des mesures in-situ sur différentes scènes urbaines

- Egis est un troisième partenaire de la thèse et met à disposition des données de campagnes de mesures réalisées sur 3 cas d'étude



Des scènes urbaines variées

- Objectif : Tester des modèles d'analyse des données et mettre en place le workflow d'analyse
- Localisation : Centre urbain dense, divers



Une école

- Objectif : Evaluer l'influence de la hauteur, des revêtements de surface, mesurer les façades
- Localisation : Sud de la France, petite ville



Une place fortement instrumentée

- Objectif : Analyser la répartition spatiale de la surchauffe dans une même scène urbaine selon l'orientation, le type d'espace + monitorer le végétal
- Localisation : Nord de la France, centre urbain

- Les mesures sur ces cas d'étude :

Température de l'air

Humidité relative

Vitesse du vent

Température de globe

Rayonnement solaire

Température de surface

Température du sol

Tension hydrique sol

→ Pour la « place fortement instrumentée » seulement

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Cas d'étude Egis n°1 : Tester des modèles d'analyse des données et mettre en place le workflow d'analyse

 Familiarisation avec la notion de température moyenne de rayonnement et comparaison de modèles de calcul à partir de données mesurées.

La MRT est un paramètre clé du confort thermique extérieur et peut être évaluée par deux principaux types d'approche :

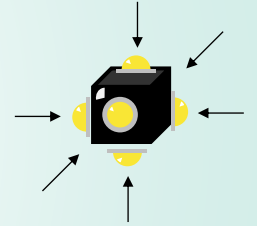
Méthode par mesure de globe noir

- La plus simple et économique
- Thermomètre à globe noir (ou gris)
- Plusieurs minutes avant équilibre, non directionnel, peu fiable sous ciel changeant




Méthode par intégration dans 6 directions (SDIM)

- Méthode de référence la plus robuste mais coûteuse (2x6 capteurs nécessaires)
- Pyranomètres et pyrgéomètres
- Acquisition « instantanée », directionnelle
- Dispositif encombrant, difficulté de multiplication des points de mesure



● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Cas d'étude Egis n°1 : Tester des modèles d'analyse des données et mettre en place le workflow d'analyse

 Familiarisation avec la notion de température moyenne de rayonnement et comparaison de modèles de calcul à partir de données mesurées.

La MRT est un paramètre clé du confort thermique extérieur et peut être évaluée par deux principaux types d'approche :

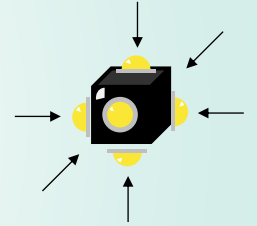
Méthode par mesure de globe noir

- La plus simple et économique
- Thermomètre à globe noir (ou gris)
- Plusieurs minutes avant équilibre, non directionnel, peu fiable sous ciel changeant



Méthode par intégration dans 6 directions (SDIM)

- Méthode de référence la plus robuste mais coûteuse (2x6 capteurs nécessaires)
- Pyranomètres et pyrgéomètres
- Acquisition « instantanée », directionnelle
- Dispositif encombrant, difficulté de multiplication des points de mesure



Modèle NF EN ISO 7726

$$MRT = \sqrt[4]{T_{globe}^4 + \frac{h_{cg}}{\epsilon_g \sigma} [T_{globe} - T_{air}]}$$

Avec h_c , coefficient de convection, tel que

- Convection naturelle, $V_a < 0,5$ m/s : $h_{cg} = 1,4 \left(\frac{\Delta t}{D} \right)^{0,25}$
- Convection forcée : $h_{cg} = 6,3 \left(\frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}} \right)$

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Cas d'étude Egis n°1 : Tester des modèles d'analyse des données et mettre en place le workflow d'analyse

 Familiarisation avec la notion de température moyenne de rayonnement et comparaison de modèles de calcul à partir de données mesurées.

La MRT est un paramètre clé du confort thermique extérieur et peut être évaluée par deux principaux types d'approche :

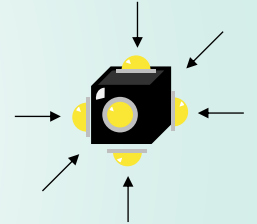
Méthode par mesure de globe noir

- La plus simple et économique
- Thermomètre à globe noir (ou gris)
- Plusieurs minutes avant équilibre, non directionnel, peu fiable sous ciel changeant



Méthode par intégration dans 6 directions (SDIM)

- Méthode de référence la plus robuste mais coûteuse (2x6 capteurs nécessaires)
- Pyranomètres et pyrgéomètres
- Acquisition « instantanée », directionnelle
- Dispositif encombrant, difficulté de multiplication des points de mesure



Modèle NF EN ISO 7726

$$MRT = \sqrt[4]{T_{globe}^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} [T_{globe} - T_{air}]}$$

Avec h_c , coefficient de convection, tel que

- Convection naturelle, $V_a < 0,5$ m/s : $h_{cg} = 1,4 \left(\frac{\Delta t}{D} \right)^{0,25}$
- Convection forcée : $h_{cg} = 6,3 \left(\frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}} \right)$

Comparaison de modèles basés sur un bilan d'énergie sur le globe

$$\alpha_g \sum_i (F_i \cdot K_i) + \varepsilon_g \sum_i (F_i \cdot \varepsilon_i \sigma T_i^4) - \varepsilon_g \sigma T_g^4 + Q_{cv} = 0 \quad \blacktriangleright \text{On identifie la formule de la MRT sur le globe une fois le calcul développé}$$

Hypothèses : environnement simplifié (sol et ciel uniquement) sans mesure pyrgéomètre (modèle corps noir + modèle température de ciel)

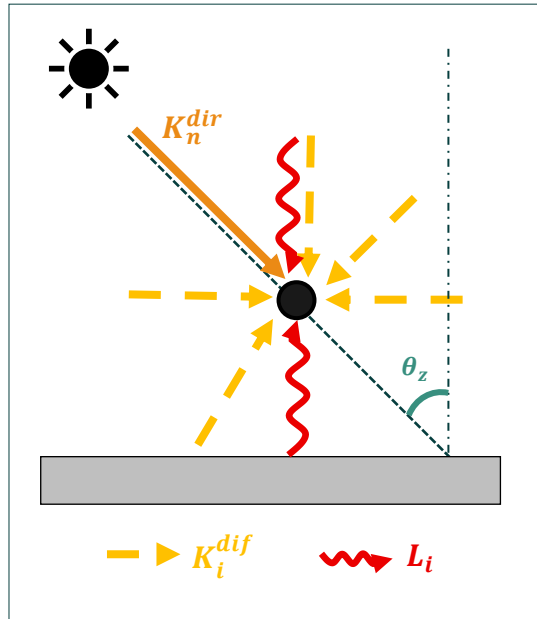
3 modèles testés : Di Napoli et al, 2020 – Banfi et al, 2022 – Intégration géométrique (sans facteur d'angle)

2 sources de données de rayonnement : station Météo France Bron – Données de réanalyses ERA5

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Exemple : Di Napoli et al, 2020, *Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis*

Dans ce modèle, la MRT est calculée à partir des mesures des rayonnements solaires (K) et thermiques (L) dans les directions verticales uniquement, de facteurs d'angle (Fi) et d'un facteur de projection (fp) :



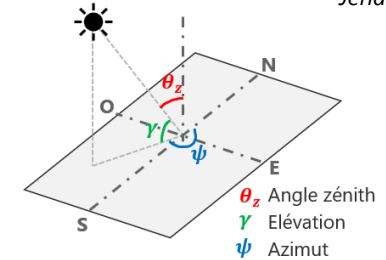
Composante descendante (atmosphère) + composante ascendante (sol)

= 0,7 pour un corps humain

Appliqué uniquement au terme de rayonnement solaire direct

$$f_p = 0,308 \cdot \cos(\gamma \left(0,998 - \frac{\gamma^2}{50000} \right))$$

Jendritzky, 1990



$$MRT = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \left[\sum_i F_i \left(L_i + \frac{\alpha_{IR}}{\epsilon_p} K_i^{dif} \right) + f_p \frac{\alpha_{IR}}{\epsilon_p} K_n^{dir} \right]}$$

Rayonnement solaire diffus (somme des flux isotropes du rayonnement solaire diffus) + Rayonnement solaire réfléchis (par le sol uniquement dans ce modèle)

= 0,97 pour un individu vêtu
L'émissivité dans les LWR est similaire à l'absorption dans les LWR d'après la loi de Kirchoff pour les corps gris

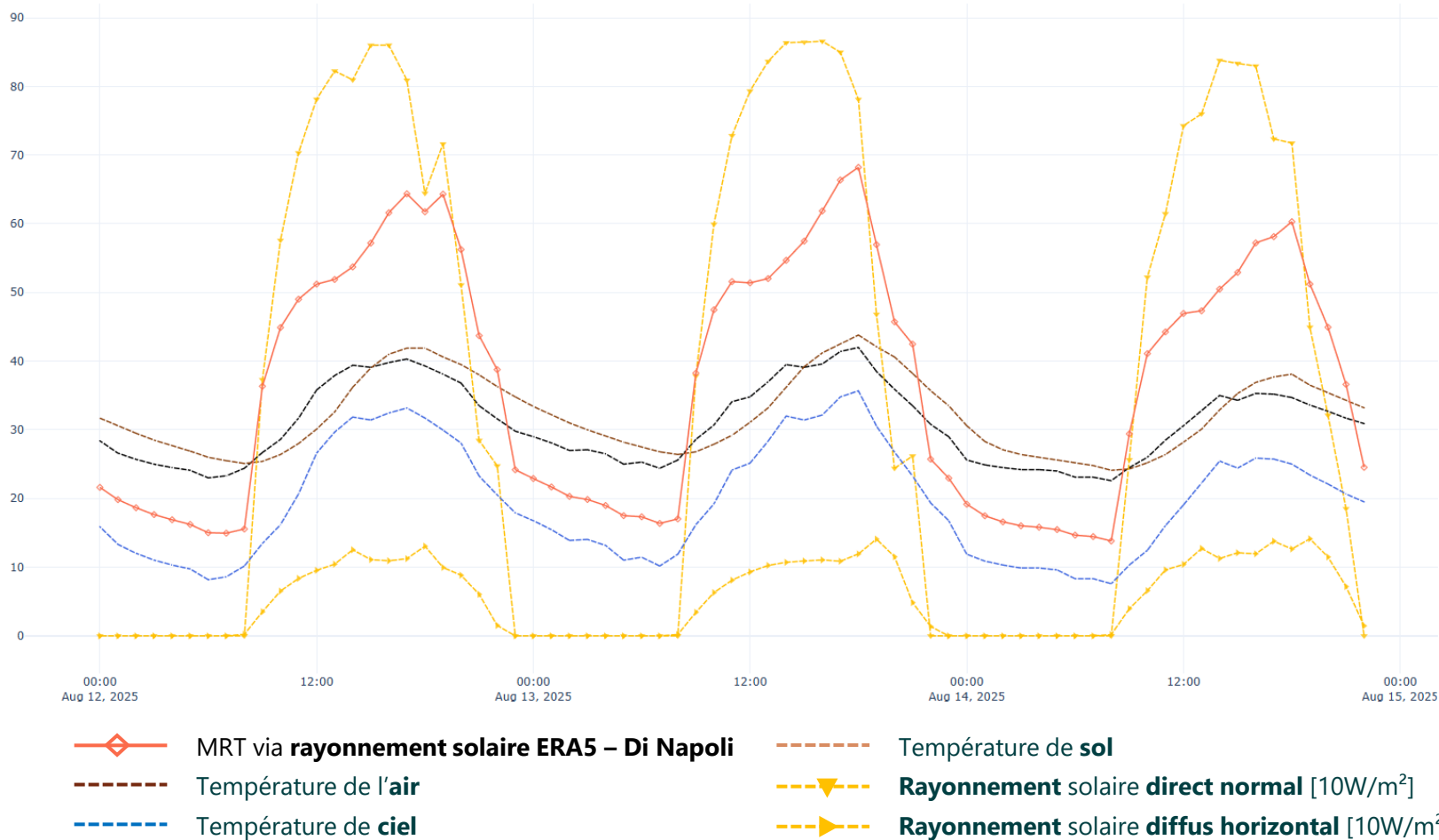
Rayonnement solaire direct

= 0,5 via l'hypothèse que l'environnement de l'individu est constitué d'un hémisphère haut et d'un hémisphère bas uniquement
→ valide à l'échelle macroscopique, pas dans la scène urbaine où les obstacles latéraux doivent être pris en compte

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Exemple : Di Napoli et al, 2020, *Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis*

Données mesurées par Egis [°C] – Site 1 (Lyon)



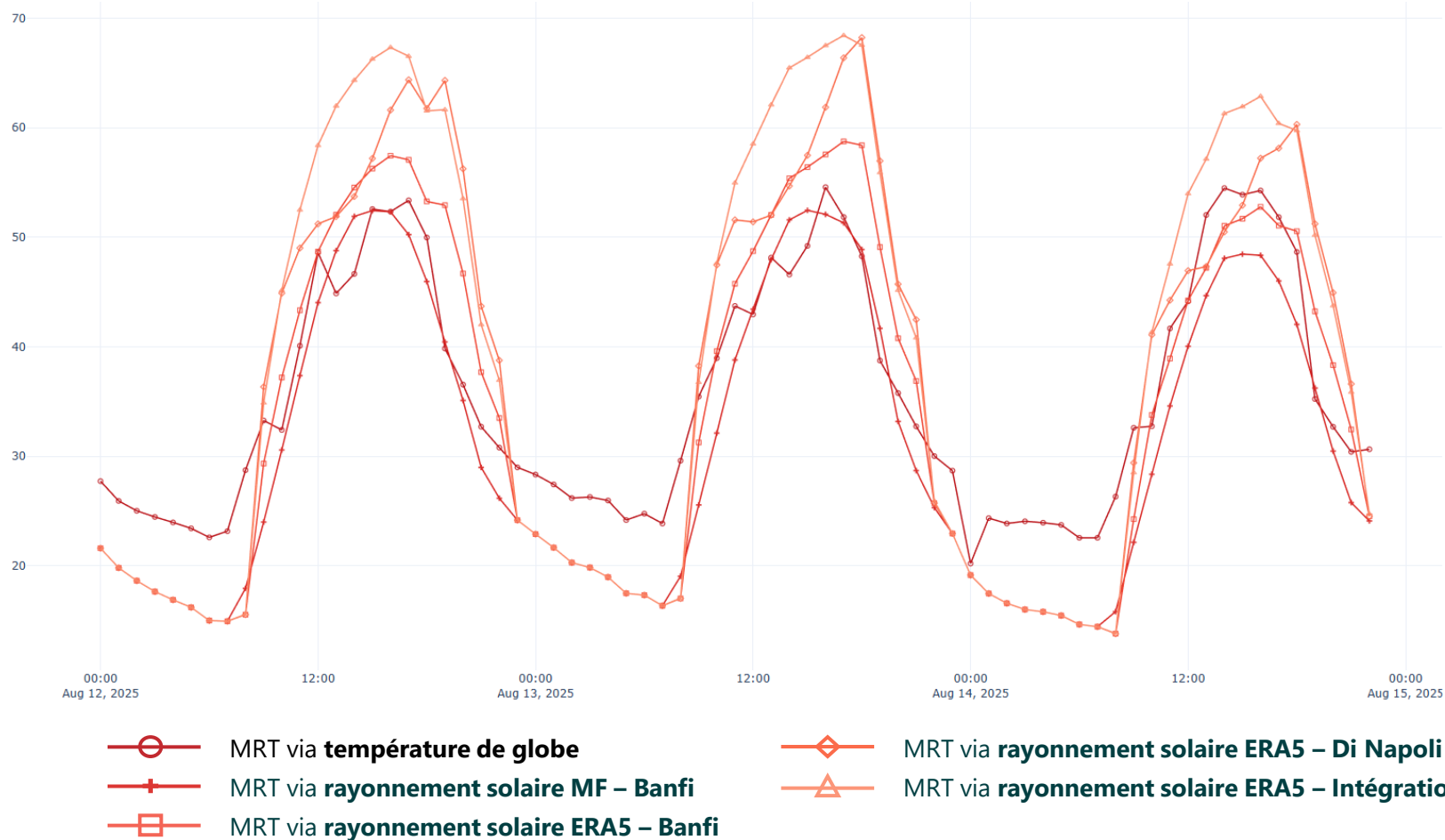
Observations

- **Comportement général cohérent** avec la littérature (Zhou et al, 2024):
 - MRT avec les mêmes variations que rayonnement solaire global, Tsky et Tair
 - MRT > Tsky tout le temps
 - MRT > Tair en journée
 - MRT < Tair le soir : dichotomie jour/nuit beaucoup plus marquée qu'avec le globe
- **Influence prépondérante du rayonnement solaire** (notamment K_n^{dir}) en journée où quand L_{sol} , et L_{sky} changent peu par rapport à K_n^{dir} (Zhou et al, 2024)
- **Limites :**
 - Facteur d'angle $F_a = 0.5$
 - Effet d'ICU non pris en compte en entrée
 - Scène urbaine non prise en compte
 - Utilisation de données de stations météo pas exactement sur le site (Zhou et al, 2024)

● Comparaison à des cas d'étude (Egis)

Comparaison entre les méthodes

Données mesurées par Egis [°C] – Site 1 (Lyon)



Observations

- Par rapport aux mesures de globe, la MRT « calculée » par SDIM :
 - A de plus grandes amplitudes journalières
 - Fluctue moins (pas d'influence du vent) (*Zhou et al, 2024*)
- Logiquement, les MRT calculées par SDIM se confondent la nuit
- La méthode SDIM donne les valeurs de MRT les plus élevées en journée
- Di Napoli plus proche du globe la matin (fp) et surestime en milieu d'après-midi (quand rejoint méthode par intégration)
- **Banfi se rapprochent le plus des calculs via le globe noir**
- **Principales différences la nuit remettent en cause le modèle de rayonnement thermique utilisé (scène urbaine)**

● Comparaison à des cas d'étude (Toulouse)

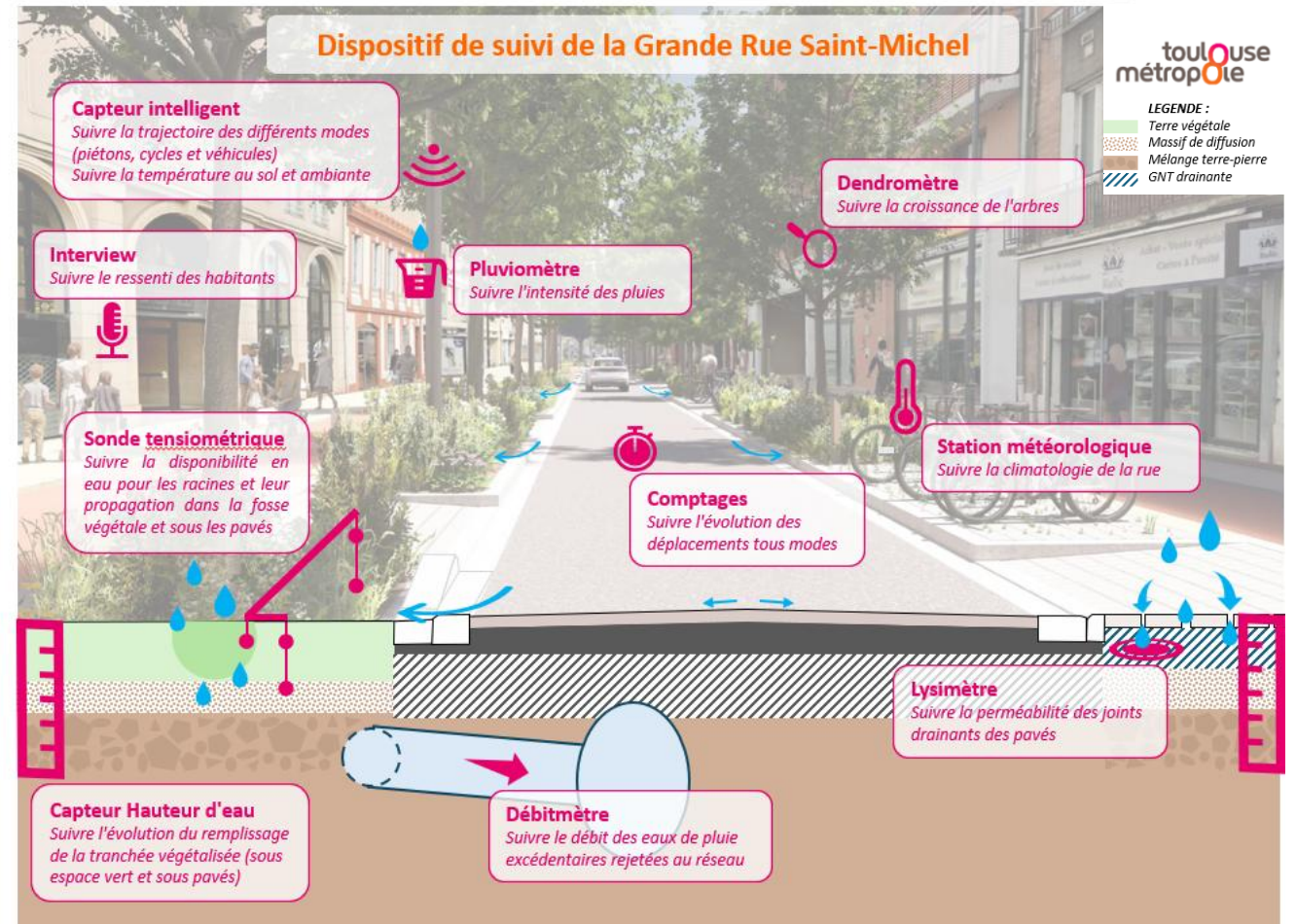
Le cas de la Grande rue Saint-Michel à Toulouse dans le cadre du PN ISSU pour répondre à 2 grandes problématiques

Peut-on prévoir la température en plein été dans une rue a priori ? Et avec quels outils ?

- Pour orienter le type de travaux de rénovation
- Pour mieux choisir les matériaux de surface
- Outils « Grand public », accessibles à la maîtrise d'ouvrage

De quelles mesures a-t-on besoin ?

- Pour calibrer les modèles
- Pour alimenter la base de données



Source : PN ISSU, Étude de performance des aménagements visant à limiter les effets de l'îlot de chaleur urbain sur la Grande Rue Saint-Michel à Toulouse (WIP)

Des questions ?

Des suggestions ?

Merci.

Johan **Druère**

Doctorant
LMDC / Nobatek

jdruere@nobatek.com
jdruere@insa-toulouse.fr



ANNEXE

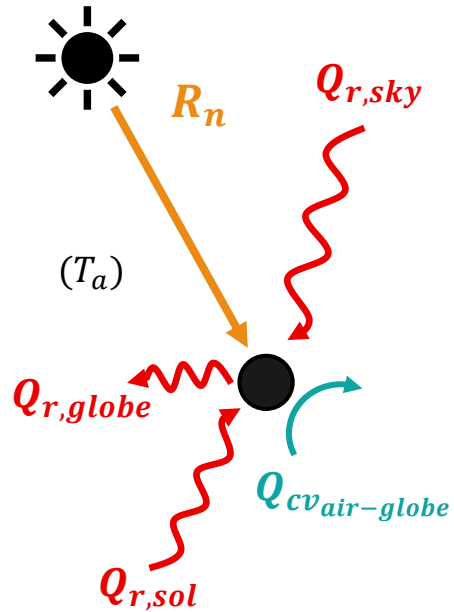


● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Via rayonnement solaire global Météo France – Méthode Banfi et al., 2022

Hypothèses

$R_{n,MF}$ est le rayonnement solaire global (direct vertical + diffus horizontal) par unité de surface, mesuré à la station météo par un pyranomètre horizontal



Bilan d'énergie

$$K^{dir+diff} + L + Q_{cv} = 0$$

$$\alpha_g \sum_i (F_i \cdot K_i) + \epsilon_g \sum_i (F_i \cdot L_i) - L_{globe} + Q_{cv} = 0$$

Absorption du corps gris dans les LW = Emissivité d'un corps gris dans les LW (Kirchhoff's law)

$$\alpha_g F_{\downarrow} \cdot K_{\downarrow} + \epsilon_g F_{sky} L_{sky} + \epsilon_g F_{sol} L_{sol} - L_{globe} + Q_{cv} = 0$$

$$\alpha_g S_g F_{\downarrow} R_{n,MF} + \epsilon_g \cdot \epsilon_{sky} \sigma S_g F_{sky} T_{sky}^4 + \epsilon_g \cdot \epsilon_{sol} \sigma S_g F_{sol} T_{sol}^4 - \epsilon_g \sigma S_g T_g^4 + h_{cv,g} S_g (T_a - T_g) = 0$$

$$T_g^4 + \frac{h_{cv,g}}{\epsilon_g \sigma} (T_g - T_a) = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\alpha_g}{\epsilon_g} F_{\downarrow} R_{n,MF} + \epsilon_{sky} F_{sky} \sigma T_{sky}^4 + \epsilon_{sol} \sigma F_{sol} T_{sol}^4 \right]$$

$$Q_{r,surf} = Q_{r,sky}$$

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \left[\frac{\alpha_g}{\epsilon_g} F_{\downarrow} R_{n,MF} + \epsilon_{sky} \sigma F_{sky} T_{sky}^4 + \epsilon_{sol} \sigma F_{sol} T_{sol}^4 \right]}$$

i correspond aux directions de rayonnement :

- Pour SW : on ne considère que le rayonnement solaire sur la surface du dessus (en raison du dispositif de mesures Météo France)
- Pour LW : on considère que 50% de la surface reçoit le rayonnement du ciel et 50% celui du sol (2 directions avec $F_i = 0,5$ chacune)

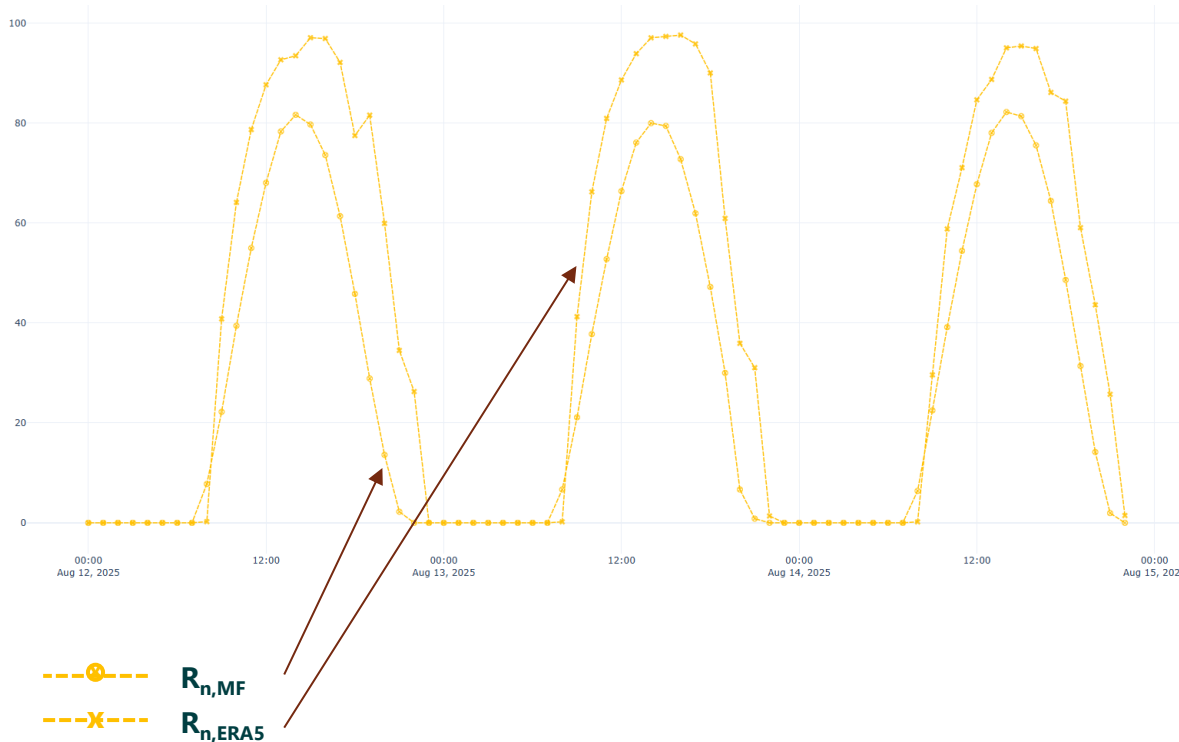
Avec :

- α_g , Absorption du globe dans les SW
- ϵ_g , Emissivité du globe dans les LW
- ϵ_{sky} , Emissivité du ciel dans les LW
- ϵ_{sol} , Emissivité du sol dans les LW
- F_i , Facteurs angulaires entre le globe et son environnement (Höppe, 1992)
- $F_{\downarrow} = 0,167$ for a sphere - $F_{sky} = F_{sol} = 0,5$
- σ Constante de Stefan-Boltzmann

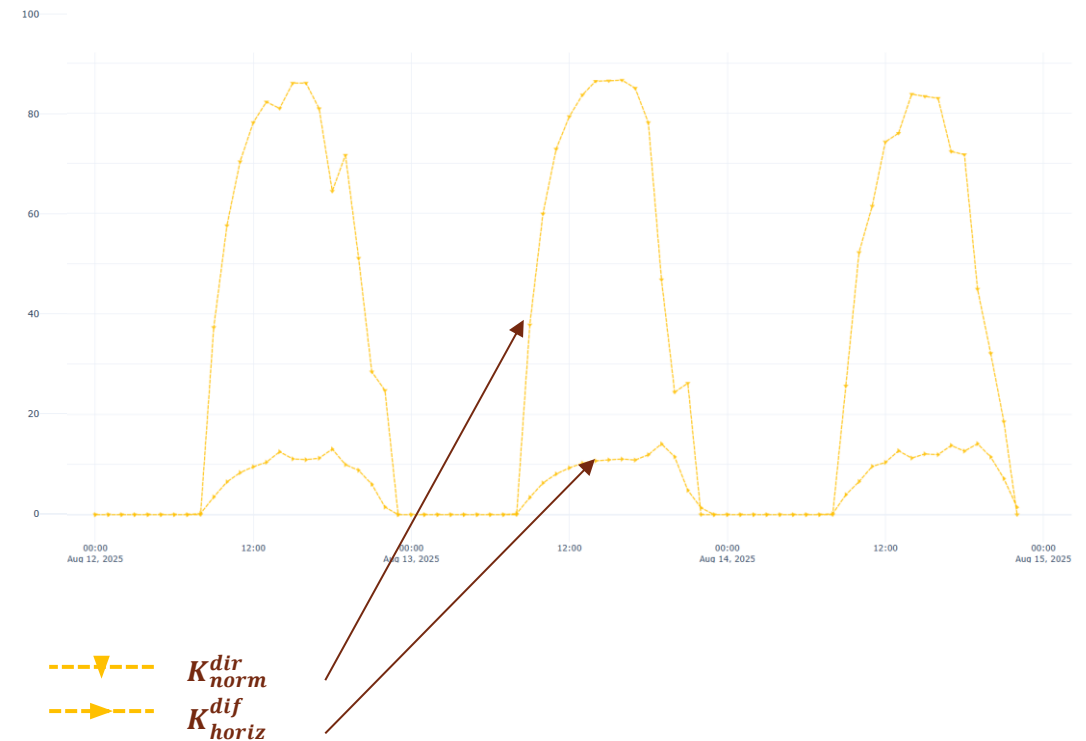
● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Via rayonnement solaire global : différences des données Météo France et ERA5

$R_{n,MF}$ et $R_{n,ERA5}$
[10 W/m²]



Rayonnements direct normal et diffus horizontal ERA5
[10 W/m²]

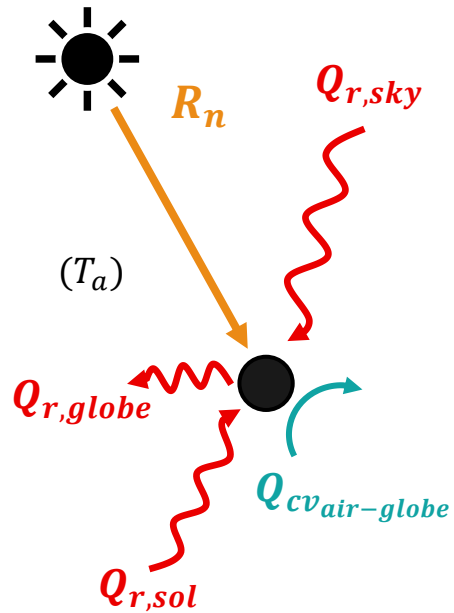


● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Via rayonnement solaire global et données ERA5 (via WeatherTool) – Méthode Banfi et al., 2022

Hypothèses

$R_{n,ERA5}$ est le rayonnement solaire global par m², calculé à partir des rayonnements direct normal et diffus horizontal des données ERA5



Bilan d'énergie

$$K^{dir} + K^{dif} + L + Q_{cv} = 0$$

$$\alpha_g \sum_i (F_i K_i^{dir}) + \alpha_g \sum_i (F_i K_i^{dif}) + \varepsilon_g \sum_i (F_i L_i) - L_{globe} + Q_{cv} = 0$$

$$\alpha_g F_{1/6} K_{norm}^{dir} + \alpha_g F_{\downarrow} K_{horiz}^{dif} + \varepsilon_g F_{sky} L_{sky} + \varepsilon_g F_{sol} L_{sol} - L_{globe} + Q_{cv} = 0$$

Dans le cas d'une sphère, la symétrie donne $F_{1/6} = F_{\downarrow} = F = 0,167$

$$\alpha_g F R_{n,ERA5} + \varepsilon_g \cdot \varepsilon_{sky} \sigma F_{sky} T_{sky}^4 + \varepsilon_g \cdot \varepsilon_{sol} \sigma F_{sol} T_{sol}^4 - \varepsilon_g \sigma T_g^4 + h_{cv,g} (T_a - T_g) = 0$$

$$T_g^4 + \frac{h_{cv,g}}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a) = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\alpha_g}{\varepsilon_g} F R_{n,ERA5} + \varepsilon_{sky} \sigma F_{sky} T_{sky}^4 + \varepsilon_{sol} \sigma F_{sol} T_{sol}^4 \right]$$

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \left[\frac{\alpha_g}{\varepsilon_g} F R_{n,ERA5} + \varepsilon_{sky} \sigma F_{sky} T_{sky}^4 + \varepsilon_{sol} \sigma F_{sol} T_{sol}^4 \right]}$$

Absorption du corps gris dans les LW = Emissivité d'un corps gris dans les LW (Kirchhoff's law)

- i* correspond aux directions de rayonnement :
- Pour SW : on considère une sphère divisée en 6 éléments de surface
 - Pour LW : idem précédent

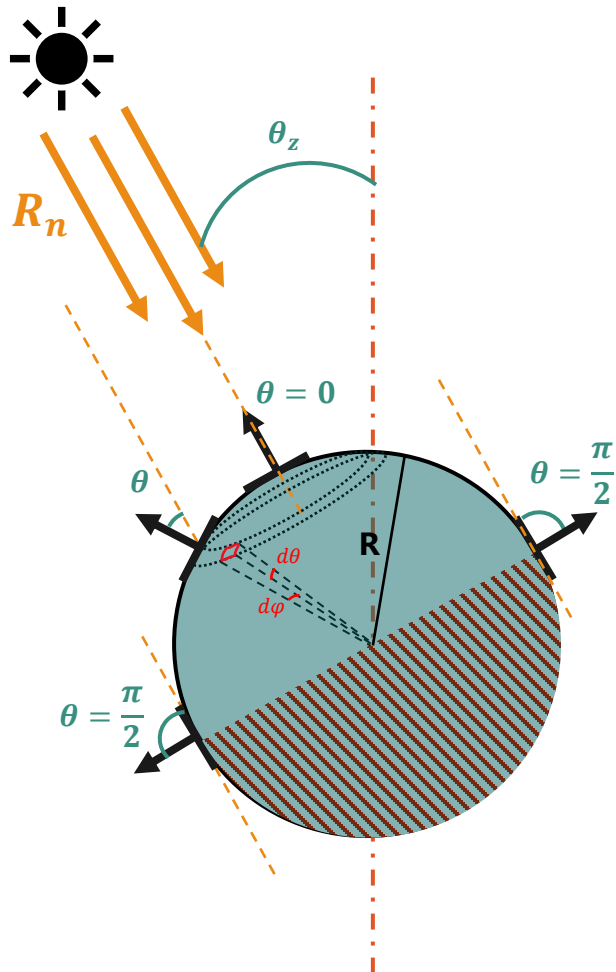
Avec :

- α_g , Absorption du globe dans les SW
- ε_g , Emissivité du globe dans les LW
- ε_{sky} , Emissivité du ciel dans les LW
- ε_{sol} , Emissivité du sol dans les LW
- F_i , Facteurs angulaires entre le globe et son environnement (Höppe, 1992)
 - $F = 0,167$ for a sphere
 - $F_{sky} = SVF = 0,5$
 - $F_{sol} = 1 - F_{sky} = 0,5$
- σ Constante de Stefan-Boltzmann

$$Q_{r,surf} = Q_{r,sky}$$

● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Rayonnement solaire reçu par une sphère dans un environnement ouvert



Hypothèses

R_n est le rayonnement solaire global (direct + diffus) par unité de surface et considéré uniforme et parallèle au rayon solaire

θ est l'angle entre la normale à la surface de la sphère et la direction du rayonnement incident (parallèle)

Puissance reçue par un élément de surface dS de la partie éclairée de la sphère si le rayonnement était perpendiculaire sur toute la surface

$$Q_{r,SW}^{dS} = \alpha_{dS} R_n \cdot dS$$

Puissance reçue par un élément de surface dS de la partie éclairée de la sphère

$$Q_{r,SW}^{dS} = \alpha_{dS} R_n \cdot dS \cdot \cos \theta$$

Puissance reçue par la partie éclairée de la sphère (soit la moitié de sa surface totale dans le cas d'un rayonnement parallèle)

$$Q_{r,SW} = \int_{dS} Q_{r,SW}^{dS} = \int_{dS} \alpha_{dS} R_n \cdot \cos \theta \cdot dS = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_{dS} R_n \cdot \cos \theta \cdot R d\theta \int_0^{2\pi} R \sin(\theta) d\varphi$$

$$Q_{r,SW} = \alpha_{dS} R_n \cdot R^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin(\theta) d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi$$

$$Q_{r,SW} = \alpha_{dS} R_n \cdot R^2 \int_0^1 u \cdot du \cdot [2\pi - 0] = \alpha_{dS} R_n \cdot R^2 \cdot 2\pi \left[\frac{1}{2} u^2 \right]_{0 \rightarrow 1} = \alpha_{dS} R_n \cdot R^2 \pi = \alpha_{dS} R_n \frac{S_g}{4}$$

- Intégration de θ entre 0 et $\frac{\pi}{2}$ par définition de θ et car on considère uniquement la partie éclairée de la sphère
- Intégration de φ entre 0 et 2π pour couvrir l'ensemble de l'hémisphère éclairée

Note : Un pyranomètre placé horizontalement ne mesure que la composante verticale ($R_{n,v}$) du rayonnement solaire global incident R_n . Les deux valeurs sont liées par l'angle zénithal du Soleil et égales si le soleil est au zénith

$$R_{n,v} = R_n \cos(\theta_z)$$

● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Via rayonnement solaire global – Intégration sur les surfaces éclairées et utilisation du SVF

Hypothèses

K_n^{dir} est le rayonnement solaire direct normal par unité de surface et K_h^{dif} est le rayonnement diffus par unité de surface sur une surface horizontale

Bilan d'énergie

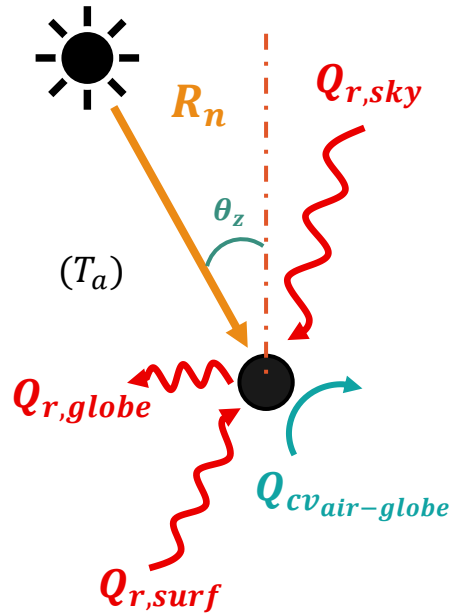
$$K + L + Q_{cv} = 0$$

$$K^{dir} + K^{dif} + L_{sky} + L_{sol} - L_{globe} + Q_{cv} = 0$$

$$\alpha_g K_n^{dir} \frac{S_g}{4} + \alpha_g K_h^{dif} \frac{S_g}{4} + \varepsilon_g \cdot SVF \cdot S_g \cdot \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 + \varepsilon_g \cdot (1 - SVF) \cdot S_g \cdot \varepsilon_{surf} \sigma T_{surf}^4 - \varepsilon_g \sigma S_g T_g^4 + h_{cv,g} S_g (T_a - T_g) = 0$$

↑ Absorption du corps gris dans les LW = Emissivité d'un corps gris dans les LW (Kirchhoff's law)

$$T_g^4 + \frac{h_{cv,g}}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a) = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\alpha_g}{4 \varepsilon_g} (K_n^{dir} + K_h^{dif}) + SVF \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 + (1 - SVF) \varepsilon_{surf} \sigma T_{surf}^4 \right]$$



$$Q_{r,surf} = Q_{r,sky}$$

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \left[\frac{\alpha_g}{4 \varepsilon_g} (K_n^{dir} + K_h^{dif}) + SVF \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 + (1 - SVF) \varepsilon_{surf} \sigma T_{surf}^4 \right]}$$

Avec :

- σ , Constante de Stefan-Boltzmann
- α_g , Absorption du globe dans les SW
- ε_g , Emissivité du globe dans les LW
- ε_{sky} , Emissivité du ciel dans les LW
- ε_{surf} , Emissivité des surfaces environnantes dans les LW
- SVF , Sky View Factor qui représente la part de ciel vu par l'objet parmi son environnement

● Définition

Facteur de projection f_p

Le facteur de projection est défini comme la portion de la surface du corps exposée au rayonnement solaire direct (Jendritzky, 1990)

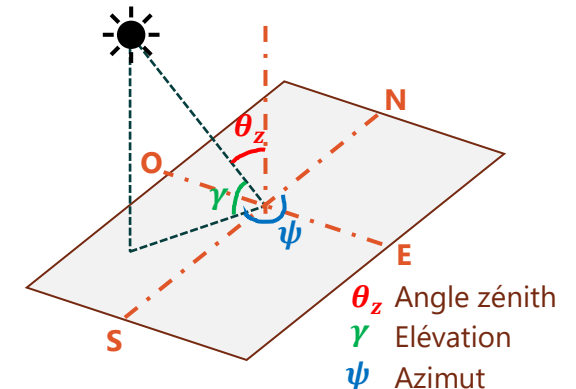
Il dépend de 3 principaux paramètres :

- La direction du rayonnement incident (altitude du soleil)
- La position/posture de l'individu (un corps debout et un corps assis auront des facteurs de projection différents)
- L'orientation du corps

Un individu est souvent représenté, par simplification, comme un corps cylindrique. Cela permet de s'affranchir de la notion d'orientation sans que cela soit incohérent. (Kantor and Unger, 2011)

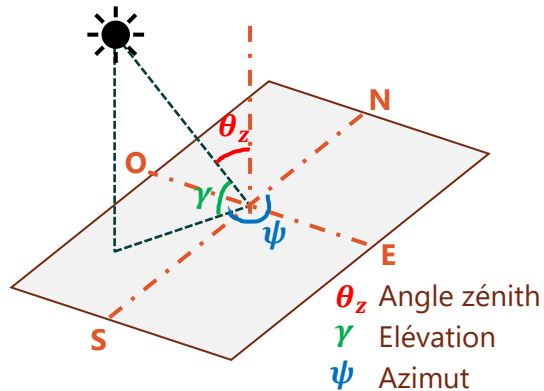
(Jendritzky, 1990) en donne l'expression suivante pour un corps cylindrique exposé directement au soleil dont l'altitude dans le ciel est donnée par l'angle γ :

$$f_p = 0,308 \cdot \cos\left(\gamma \left(0,998 - \frac{\gamma^2}{50000}\right)\right)$$



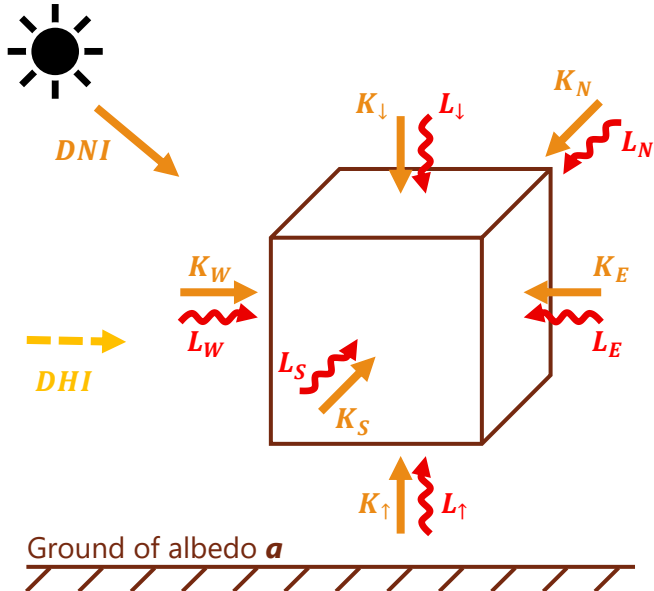
● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Via rayonnement solaire global et données XXX – Méthode Guzman-Echavarria et al., 2024 (détail en Annexe A) et Middel et al., 2023



Hypothèses

- On a accès aux données suivantes comme entrées du modèle :
- Température de l'air T_a [K]
 - Pression de vapeur d'eau P_v [kPa]
 - Coefficient de convection h_{cv} [W/K/m²]
 - Rayonnement global horizontal GHI [W]
 - Rayonnement direct normal DNI [W]
 - Rayonnement diffus horizontal DHI [W]
 - Albedo a et émissivité ϵ des surfaces
 - Rapport/coefficient de Bowen des surfaces $\beta = Q_h/Q_e$ (échanges sensibles sur échanges latents)
 - Informations de date (date + heure + tz)



Calcul de la MRT

$$MRT = \sqrt[4]{\frac{R}{\epsilon_g \cdot \sigma}} \quad \text{avec } R = \alpha_g \sum_i (K_i \cdot F_i) + \epsilon_g \sum_i (L_i \cdot F_i)$$

i correspond aux directions de rayonnement : on considère un corps représenté par un cube (6 faces)

Rayonnement solaire

$$K_{\downarrow} = GHI \text{ and } K_{\uparrow} = a \cdot K_{\downarrow}$$

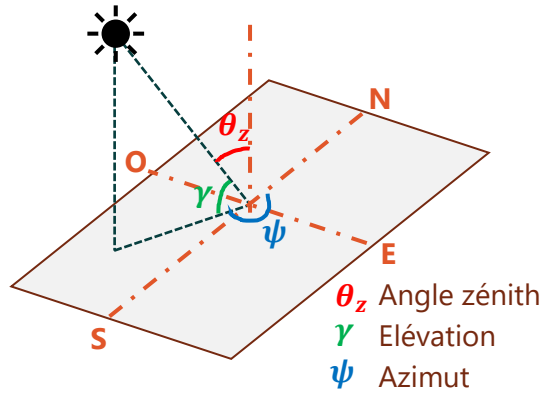
$$K_N = \begin{cases} \psi \geq 270^\circ : DNI \cdot \cos(\gamma) \sin\left(\psi - \frac{3\pi}{2}\right) + DHI + \frac{1}{2} a \cdot GHI \\ 90 \leq \psi < 270^\circ : DHI \\ \psi < 90^\circ : DNI \cdot \cos(\gamma) \sin\left(\psi + \frac{\pi}{2}\right) + DHI + \frac{1}{2} a \cdot GHI \end{cases}$$

Pour les faces latérales, le « facteur de vue du sol est pris à 0,5 »

Adapté de Lindberg et al, 2011

● Température moyenne de rayonnement (MRT)

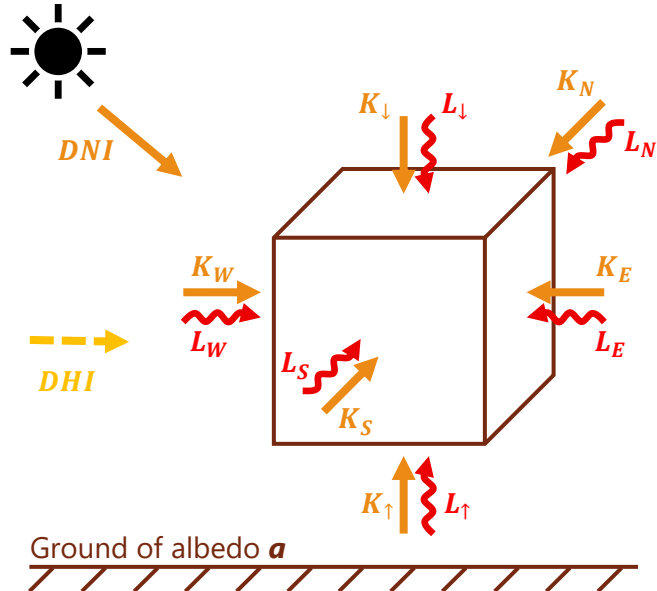
Via rayonnement solaire global et données XXX – *Méthode Guzman-Echavarria et al., 2024 (détail en Annexe A) et Middel et al., 2023*



$$K_E = \begin{cases} 0 \leq \psi < 180^\circ : DNI \cdot \cos(\gamma) \sin(\psi) + DHI + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha \cdot GHI \\ \psi \geq 180^\circ : DHI \end{cases}$$

$$K_S = \begin{cases} \psi < 90^\circ : DHI \\ 90 \leq \psi < 270^\circ : DNI \cdot \cos(\gamma) \sin\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) + DHI + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha \cdot GHI \\ \psi > 270^\circ : DHI \end{cases}$$

Pour les faces latérales, le « facteur de vue du sol est pris à 0,5 »

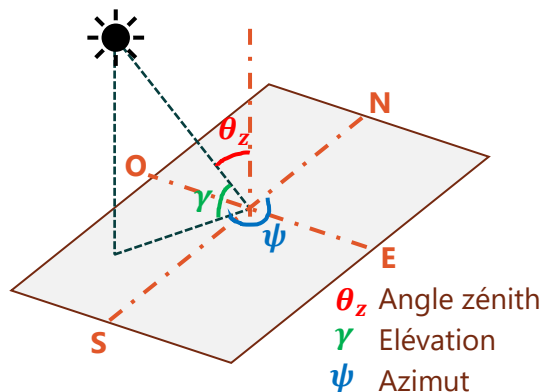


$$K_W = \begin{cases} \psi < 180^\circ : DHI \\ 180 \leq \psi < 360^\circ : DNI \cdot \cos(\gamma) \sin(\psi - \pi) + DHI + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha \cdot GHI \\ \psi \geq 360^\circ : DHI \end{cases}$$

Adapté de Lindberg et al, 2011

● Température moyenne de rayonnement (MRT)

Via rayonnement solaire global et données XXX – Méthode Guzman-Echavarria et al., 2024 (détail en Annexe A) et Middel et al., 2023



Rayonnement thermique

- Estimation de l'émissivité du ciel :

$$\varepsilon_{sky} = 1 - \left(1 + 46,5 \cdot \frac{P_v}{T_{db}}\right) e^{-\sqrt{1,2+3 \times + (46,5 \cdot \frac{P_v}{T_{db}})}}$$

Tiré de Prata, 1996

D'où l'estimation de L_{\downarrow} :

$$L_{\downarrow} = \varepsilon_{sky} \sigma T_a^4$$

- Estimation de la température de sol pour le calcul des autres composants de rayonnement thermique : Basé sur la solution d'un bilan d'énergie à la surface du sol en milieu urbain (Oke et al., 2017) faisant intervenir le calcul du stockage net de chaleur ΔQ_s (heat flux in the ground in this case). ΔQ_s est calculé à partir de l'Objective Hysteresis Model de (Grimmond et al, 1991)

Calcul des autres composants du rayonnement thermique à partir de T_{sol} :

$$L_{\uparrow} = \sigma \varepsilon_{sol} T_{sol}^4 + (1 - \varepsilon_{sol}) L_{\downarrow}$$

$$L_N = L_E = L_S = L_O = \frac{1}{2} \cdot 0,95 \cdot (L_{\downarrow} + L_{\uparrow} + (1 - \varepsilon_{sol})(L_{\downarrow} + L_{\uparrow}))$$

- $\frac{1}{2}$ traduit la prise en compte de la moitié de l'hémisphère visible
- 0,95 traduit le fait que la zone source LW latérale doit être plus petite que la zone source SW en raison de la proximité avec le sol

