

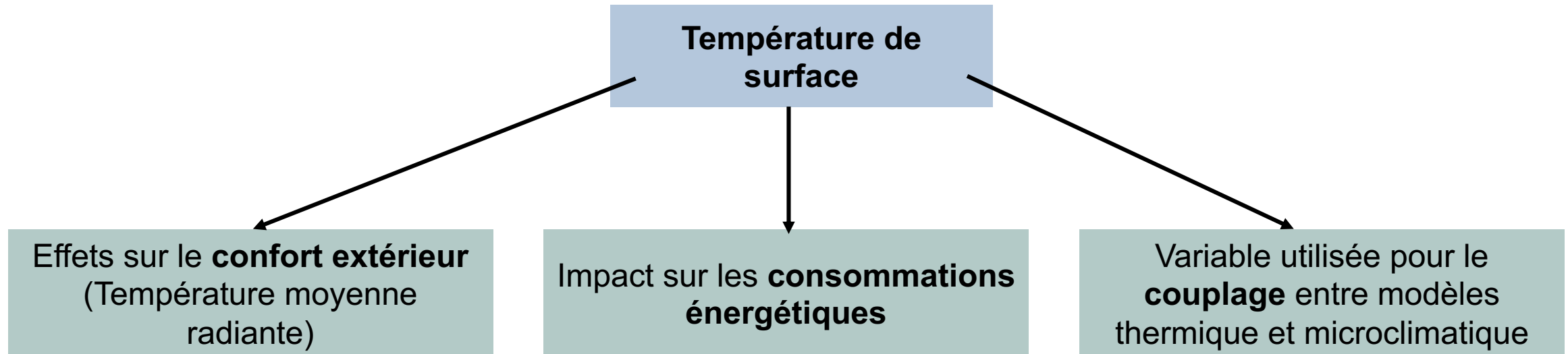
Influence des modèles de convection et de conduction sur les températures de surfaces à l'échelle du quartier : trois cas d'étude

Ziang Cui, Margot Ruiz, Diwen Yao, Xenia Laffaille, Auline Rodler, Marjorie Musy
Equipe BPE, Cerema Nantes

Journée SFT – 5 décembre 2024 – FIAP, Paris



Températures de surfaces urbaines

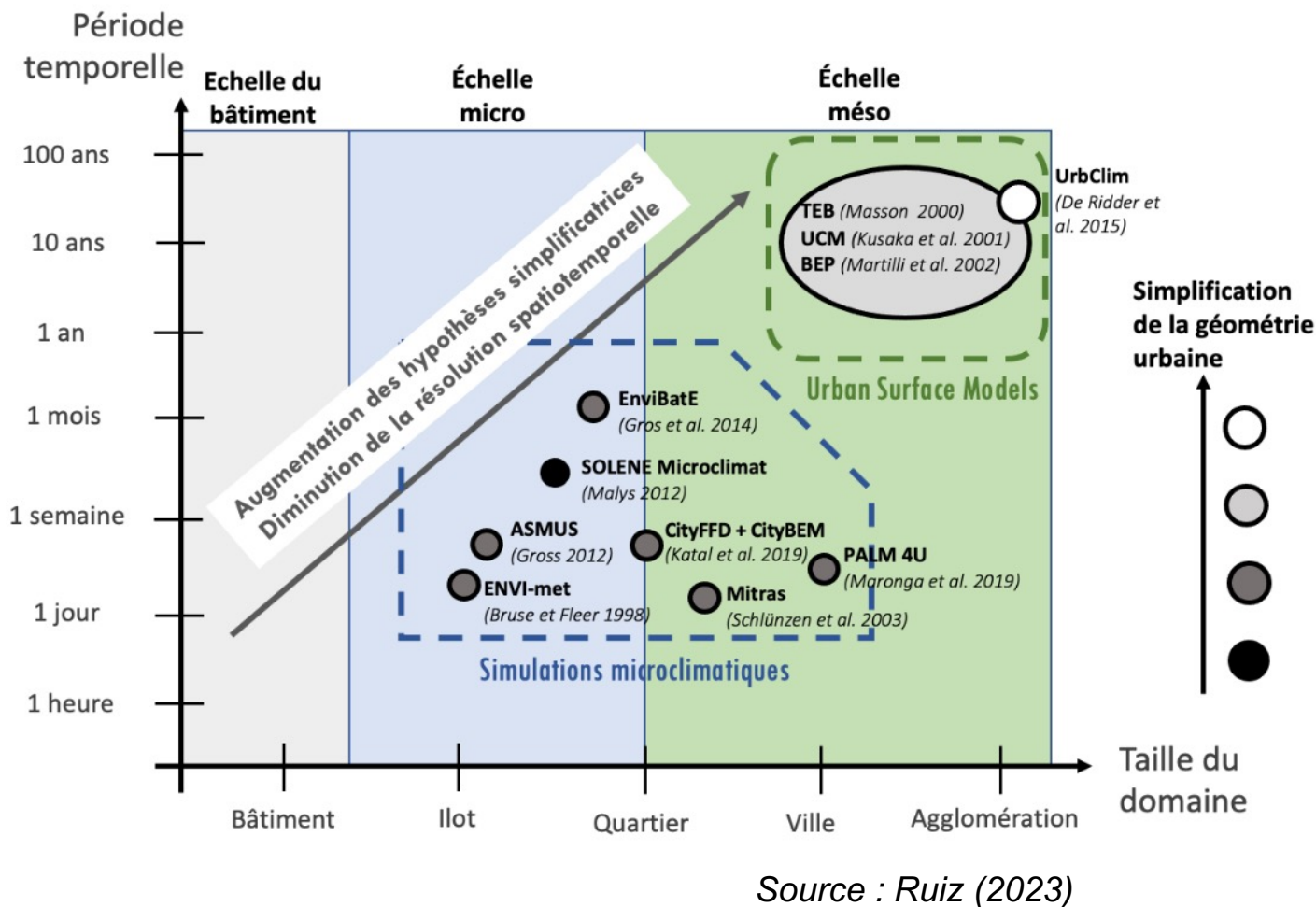


Variable clé pour la modélisation du microclimat urbain

(Yang et al. 2023)

Pour simuler correctement les **températures de surface**, il est nécessaire de bien représenter les **flux convectifs, conductifs et radiatifs**.

Modélisation du microclimat urbain



Article de review	Focus
Ai et al. (2014)	Ventilation naturelle
Toparlar et al. (2015)	Simulation CFD
Shafaghat et al. (2016)	Zones côtières
Bherwani et al. (2019)	Méthodologie
Lai et al. (2019)	Stratégie d'adaptation
Priya et al. (2020)	Végétation
Ampatzidis et al. (2020)	Plans d'eau
Liu et al. (2022)	Mesures

Source : Yang et al. (2023)



Absence de travaux sur la comparaison des approches de conduction et de convection

Modélisation de la conduction et de la convection à l'échelle urbaine

Méthodes de résolution de la conduction thermique en 1D

- simplifiée

Différences finies

Résistances/Capacités

Facteur de réponse

Modèle « force-restore »

+ simplifiée

4 types de modèles de coefficient de convection

(selon Chen et al 2019)

1. Modèle en fonction de la **vitesse du vent** (convection forcée)
2. Autres corrélations incluant **davantage de paramètres d'entrée**
3. Méthode basée sur les **nombres adimensionnels**
4. Modèle **Denby** (principe des résistances aérodynamiques)

Objectif

De **nombreuses approches** dans la littérature pour représenter les **flux conductifs et convectifs**

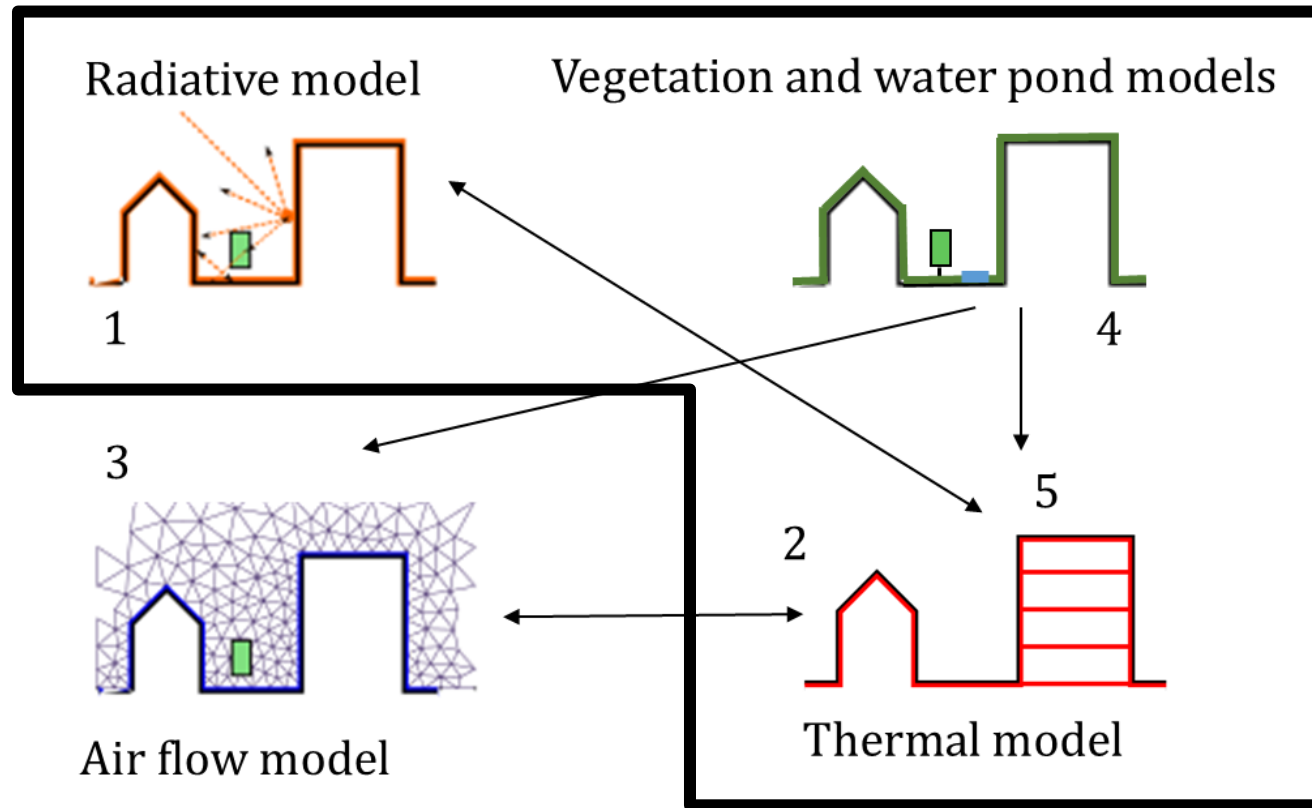


Quels sont les **écarts** engendrés sur les températures de surface simulées à partir des **différents modèles** ?



Comparaison des résultats simulés à partir de plusieurs **modèles de conduction et de convection**, sur **trois cas d'étude**

SOLENE-Microclimat



**Simulation thermo-radiative,
incluant la végétation (si applicable)**

Vitesse de vent fixée égale à une
vitesse de référence à 10m

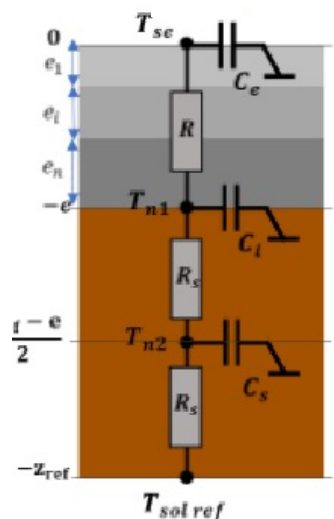
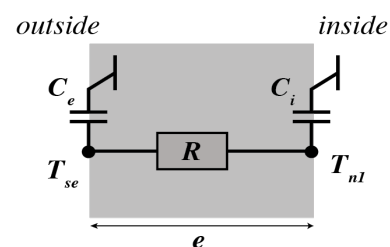
Source : Robineau et al. (2022)

Modèles de conduction comparés

1R2C

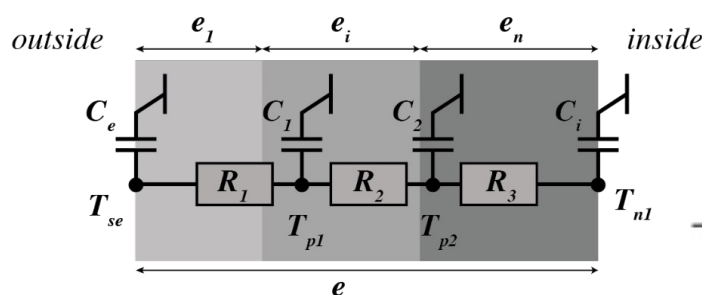
1 résistances et 2 capacités

Modèle par défaut dans
SOLENE-microclimat



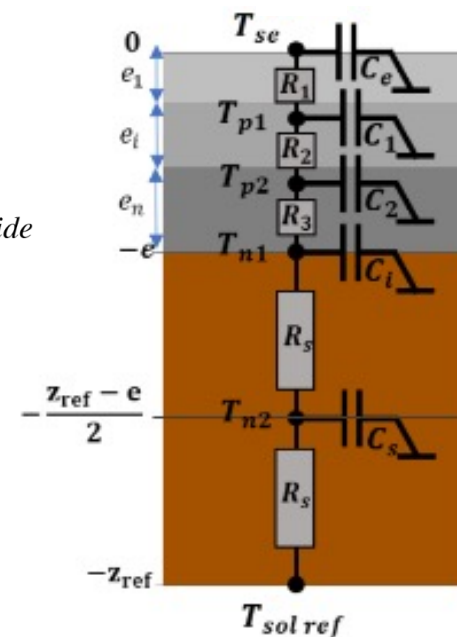
3R4C "distribué"

3 résistances et 4 capacités
supposant une **distribution**
80 %-20 % de la capacité
thermique entre la masse et la
surface



3R4C "réel"

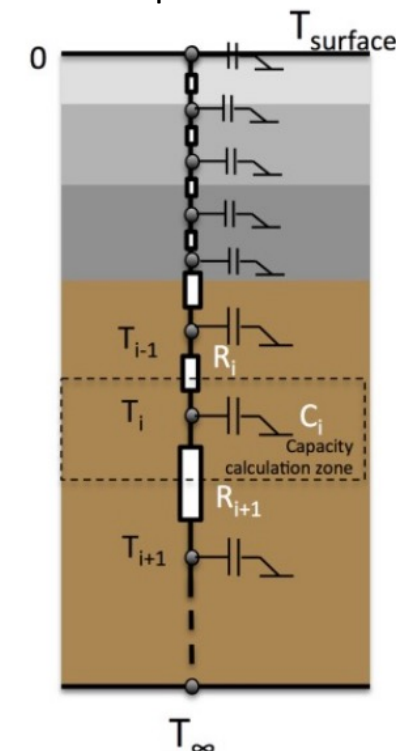
3 résistances et 4 capacités
calculées selon la **méthode**
proposée par Fraisse et al.
(2002)



Différences finies

(uniquement pour le sol)


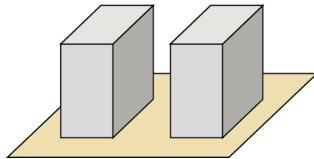
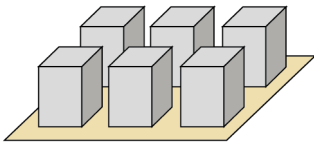
22 nœuds répartis sur 1 m de
profondeur de sol comme
recommandé par Azam et al. (2018)



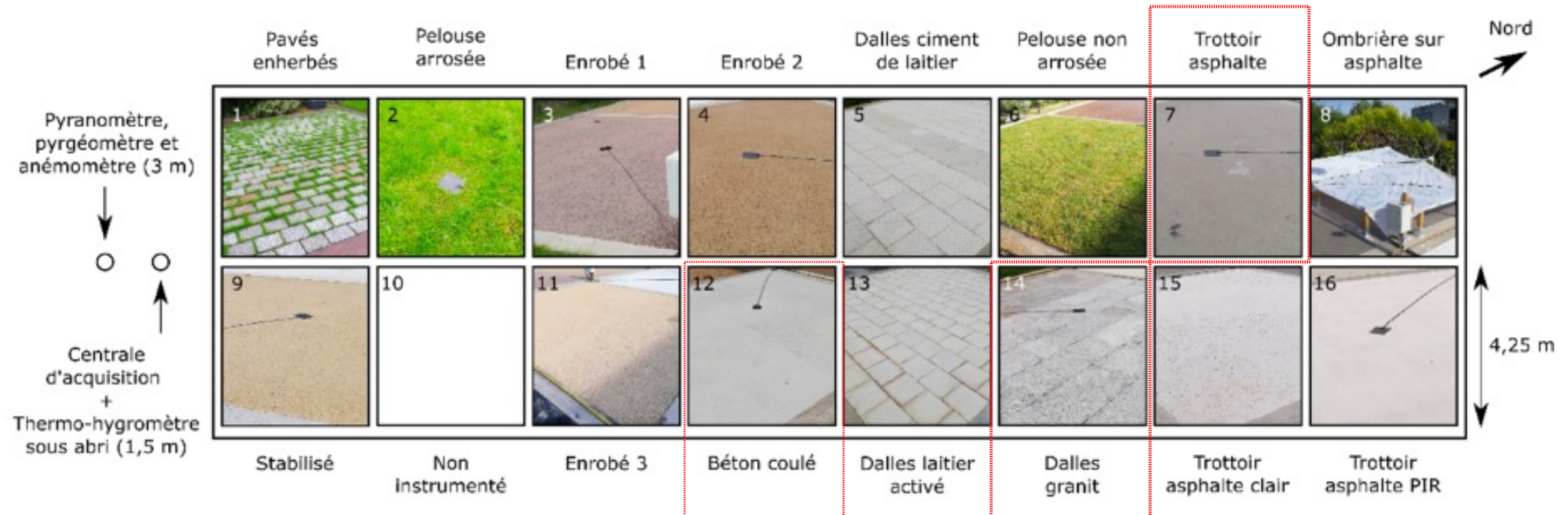
Modèles de convection

	ASHRAE (modèle par défaut dans SOLENE- microclimat)	Montazeri/Vehrencamp	Nusselt	Denby
Toit	Modèle uniquement en fonction de la vitesse du vent $h_c = 5,7 + 3,8U$ (ASHRAE 1985)	Modèle de Montazeri et Blocken Différents polynômes pour le toit et les murs (en fonction de leur position par rapport à la direction du vent) incluant vitesse du vent, largeur et hauteur du bâtiment. (Montazeri et Blocken 2017)	Méthode basée sur les nombre adimensionnels , qui considère les différents modes de convection et les régimes d'écoulement (Azam et al. 2018)	Modèle basé sur les résistances aérodynamiques $h_c = \rho_a C_p / r_T$ ρ_a la masse volumique de l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_p la chaleur spécifique de l'air sec ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), r_T la résistance aérodynamique ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$). (Denby et al. 2013)
Mur				
Route		Modèle de Vehrencamp $h_c = 698,24a_c [0,00144T_m^{0,3}U^{d_c} + 0,00097(T_s - T_{air}) ^{0,3}]$ (Gui et al. 2007)		

Cas et variables étudiés

	Quatre alvéoles	Rue canyon	Quartier typique
Forme urbaine			
Météo	Bonneuil-sur-Marne (15 au 19 juin 2022) Climat tempéré	Singapour (23 au 27 mars 2019) Climat équatorial	Nantes (8 au 10 août 2003) Climat tempéré
Étude	Comparaison des températures de surface de sol mesurées et simulées	Comparaison des températures de surface de toit, mur et sol mesurées et simulées	Analyse de sensibilité des températures moyennes radiantes

Quatre alvéoles



Source : Parison et al. (2022)

Composition des surfaces urbaines

Trottoir Asphalte
 Asphalte (2 cm)
 Béton (10 cm)
 Grave (18 cm)

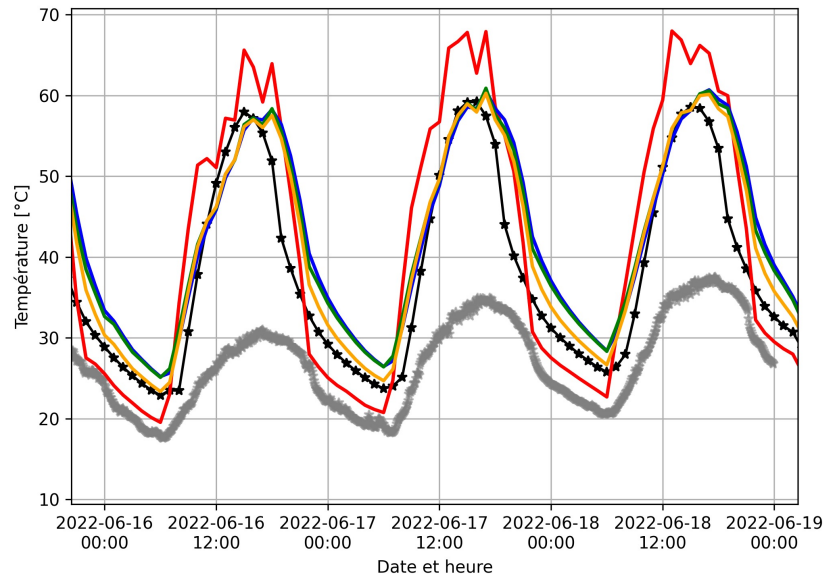
Trottoir Béton
 Béton (10 cm)
 Grave (20 cm)

Trottoir Granit
 Dalle granit (8 cm)
 Sable (7 cm)
 GNTP (15 cm)

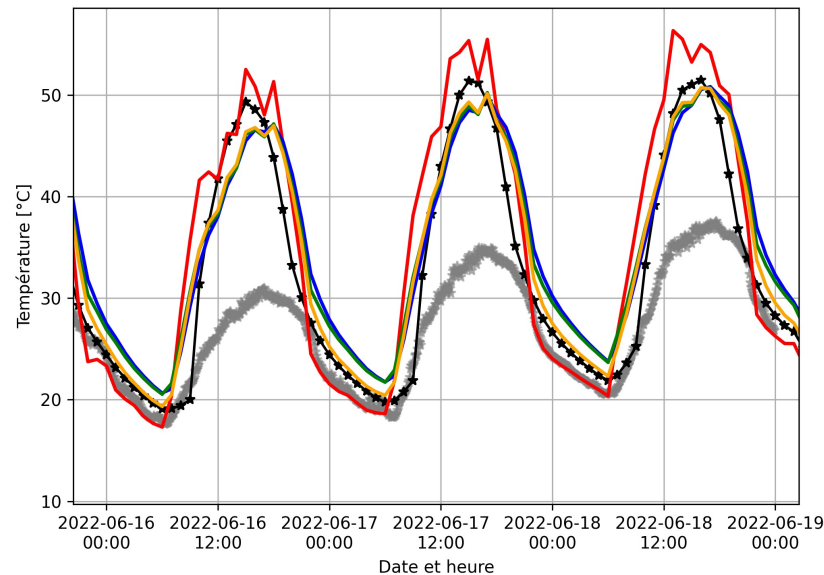
Comparaison des modèles de conduction

Modèle de convection par défaut (ASHRAE)

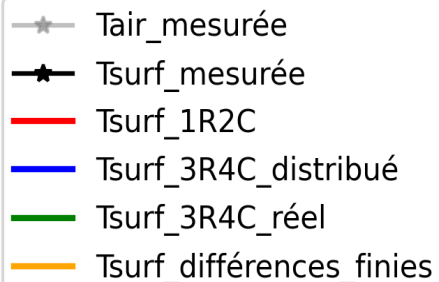
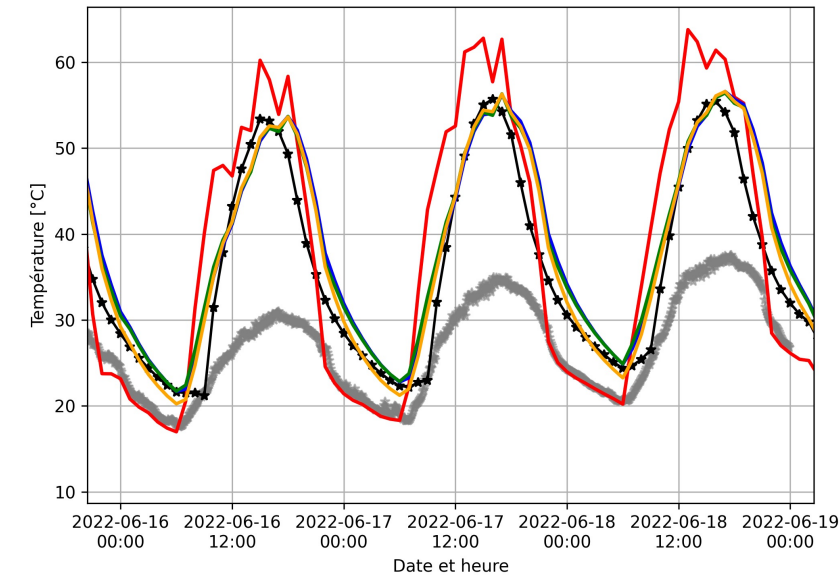
Trottoir Asphalté



Trottoir Béton



Trottoir Granit

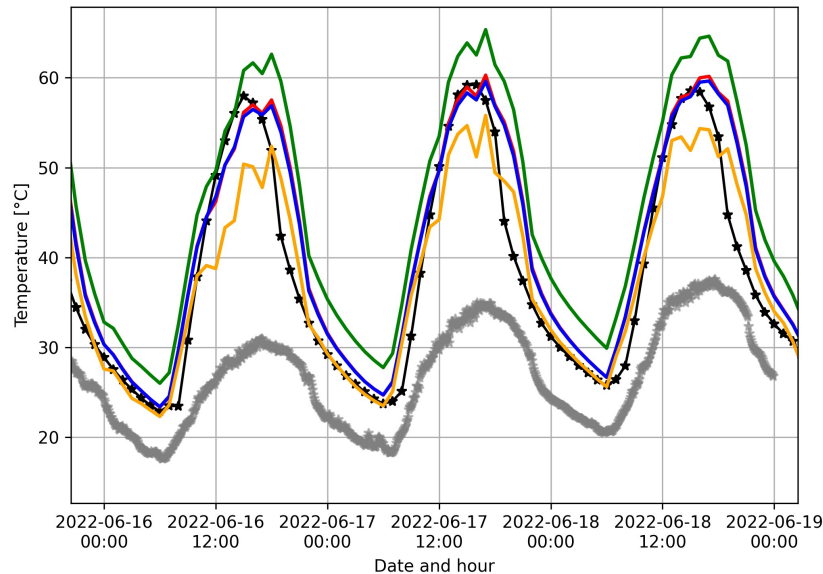


- Le modèle de conduction **1R2C** est le **moins stable**.
- Les modèles **3R4C distribué** et **3R4C réel** offrent des prédictions diurnes proches des mesures, mais surestiment les températures nocturnes.
- Le modèle par **différences finies** fournit les résultats les plus précis.

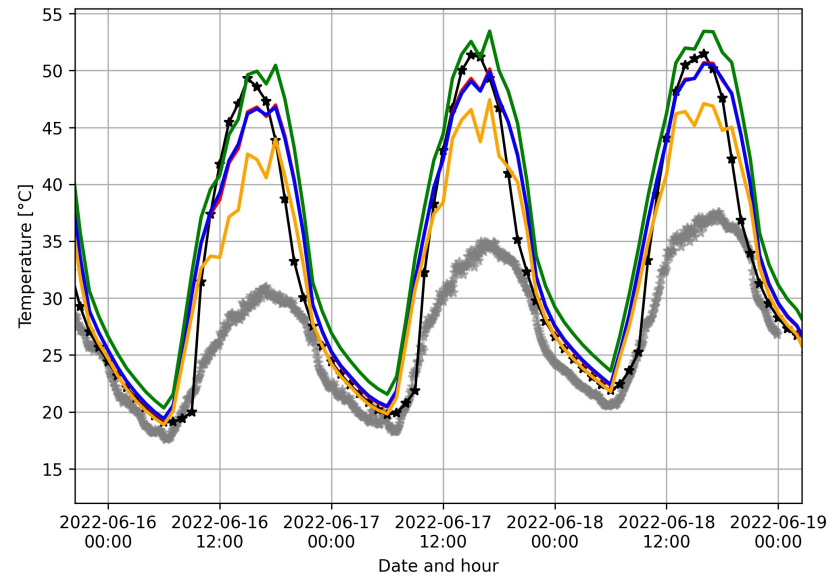
Comparaison des modèles de convection

Modèle de conduction : différences finies pour la route

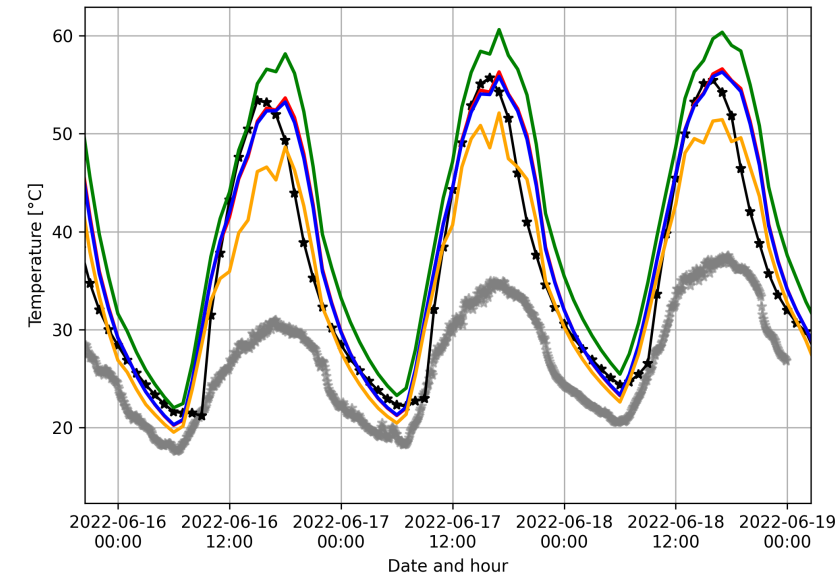
Trottoir Asphalté



Trottoir Béton



Trottoir Granit



- Les modèles de **ASHRAE** (vitesse du vent) et de **Vehrencamp** produisent des résultats très similaires, s'alignant étroitement avec les données mesurées.
- Le modèle de **Nusselt** surestime clairement les températures, **dépassant significativement** les valeurs mesurées.
- Le modèle de **Denby** sous-estime les températures pendant la **journée**, mais offre une bonne correspondance avec les observations **nocturnes**.

Bilan

RMSE calculées entre les températures de surface mesurées et simulées du 17 au 19 juin 2022

Jour
06:00 – 22:00
(UTC+2)

Trottoir Asphalte

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	8.96	8.31	13.86	5.88
3R4C distribué	6.58	6.34	10.23	4.87
3R4C réel	6.31	6.06	10.12	4.72
Différences finies	5.48	5.28	8.86	4.26

Trottoir Béton

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	6.40	6.23	9.52	4.96
3R4C distribué	4.54	4.55	6.28	4.27
3R4C réel	4.41	4.43	6.25	4.24
Différences finies	3.89	3.91	5.50	3.89

Trottoir Granit

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	8.97	8.53	13.13	6.70
3R4C distribué	4.81	4.70	7.71	3.78
3R4C réel	4.72	4.62	7.68	3.85
Différences finies	4.30	4.19	6.94	3.47

RMSE (°C)

10

8

6

4

2

0

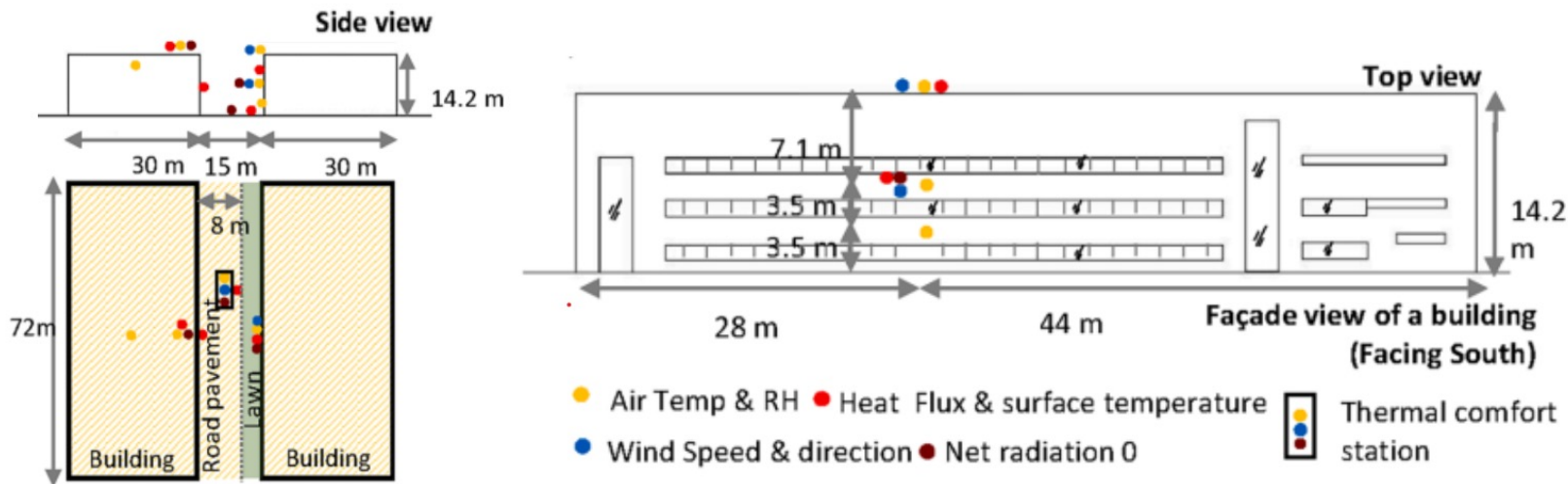
Nuit
22:00 – 06:00
(UTC+2)

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	3.41	3.42	1.30	4.46
3R4C distribué	5.01	4.81	9.47	2.88
3R4C réel	4.52	4.36	8.87	2.54
Différences finies	2.25	2.16	5.79	0.78

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	2.13	2.19	1.76	2.70
3R4C distribué	3.16	3.24	5.50	2.15
3R4C réel	2.66	2.76	4.84	1.74
Différences finies	0.88	0.95	2.39	0.27

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	5.74	5.85	5.33	6.45
3R4C distribué	2.91	2.83	6.42	1.39
3R4C réel	2.57	2.52	5.99	1.16
Différences finies	1.46	1.40	3.97	1.28

Rue canyon dans un site industriel à Singapour



Source : Donthu et al. (2024)

Composition des surfaces urbaines

Toit

Toiture métallique (0,15 cm)
Isolant (10 cm)
Lame d'air (20 cm)
Faux plafond métallique (0,1 cm)

Mur

Mortier de ciment (2 cm)
Maçonnerie en briques (18 cm)
Mortier de ciment (1 cm)

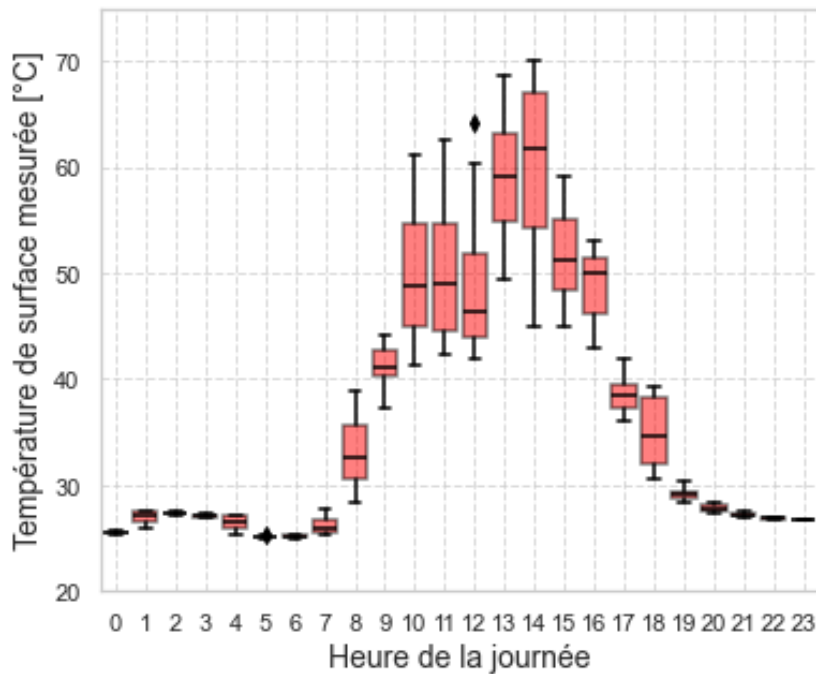
Route

Béton d'asphalt (15 cm)
Gravier (20 cm)
Sol compacté (30 cm)
Sous-sol (30cm)

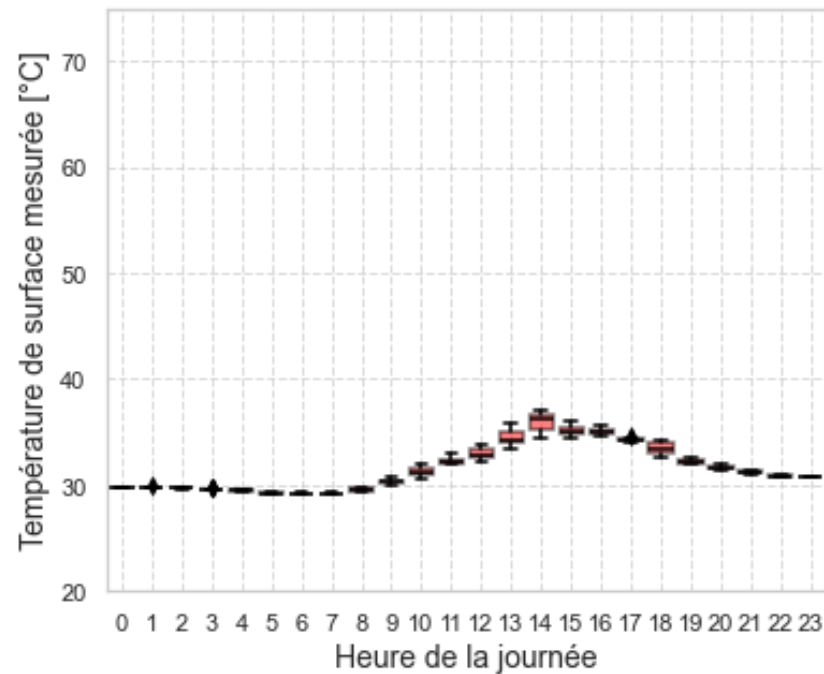
Températures de surface mesurées

Répartition des mesures par heure le 26 mars 2019

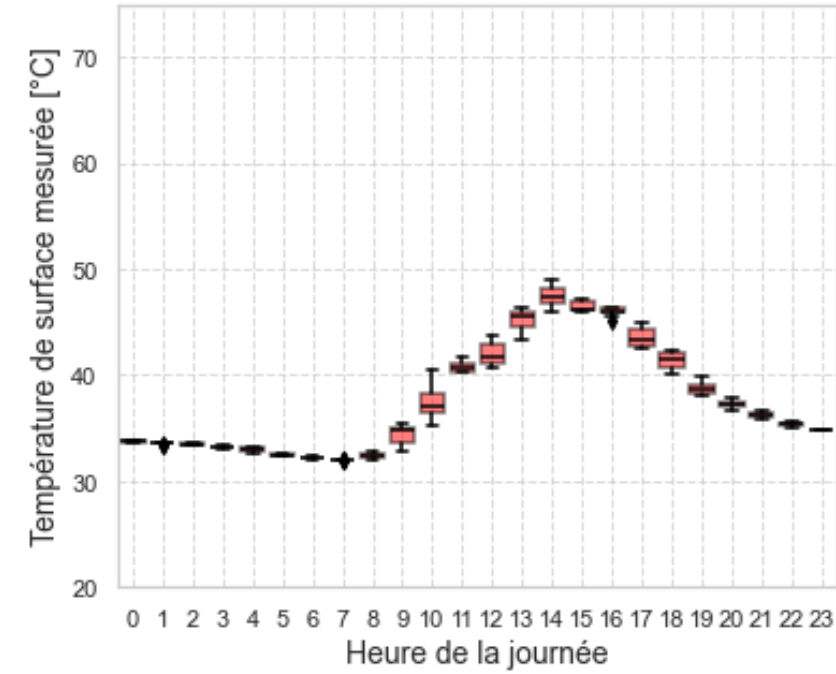
Toit



Mur



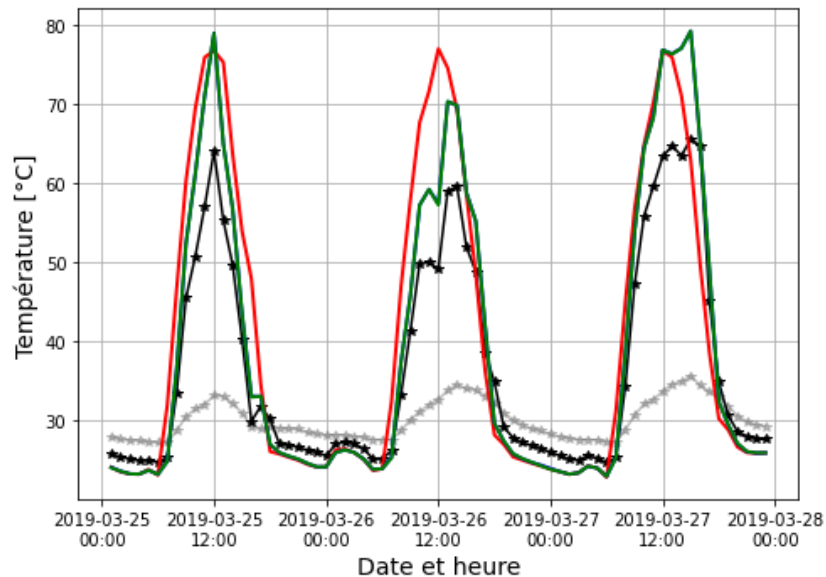
Route



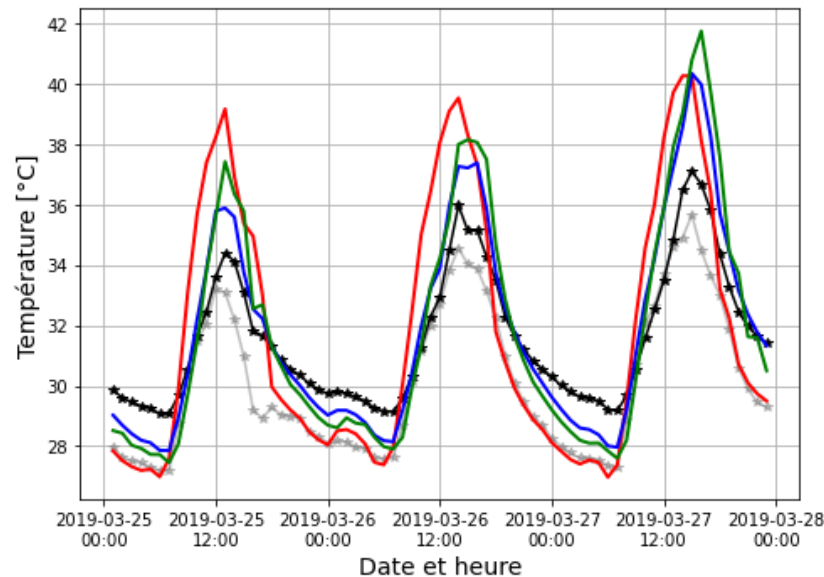
Comparaison des modèles de conduction

Modèle de convection par défaut (ASHRAE)

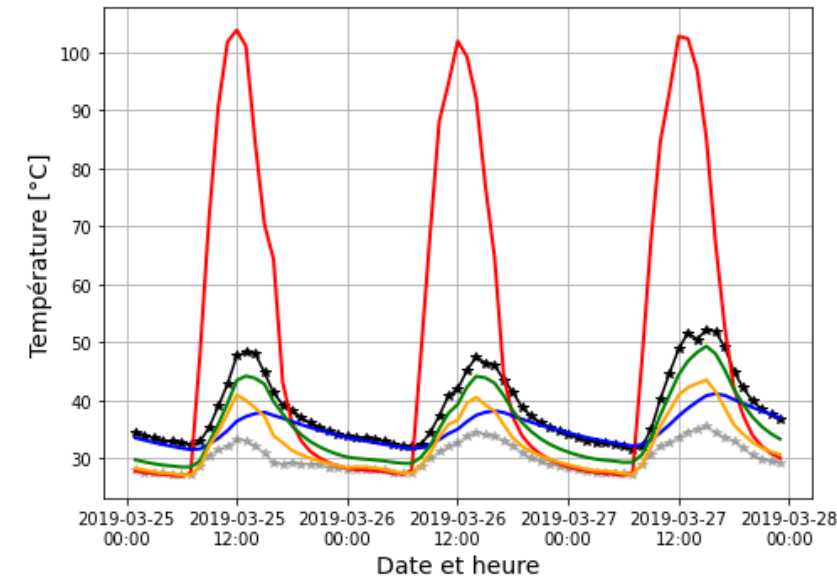
Toit



Mur



Route

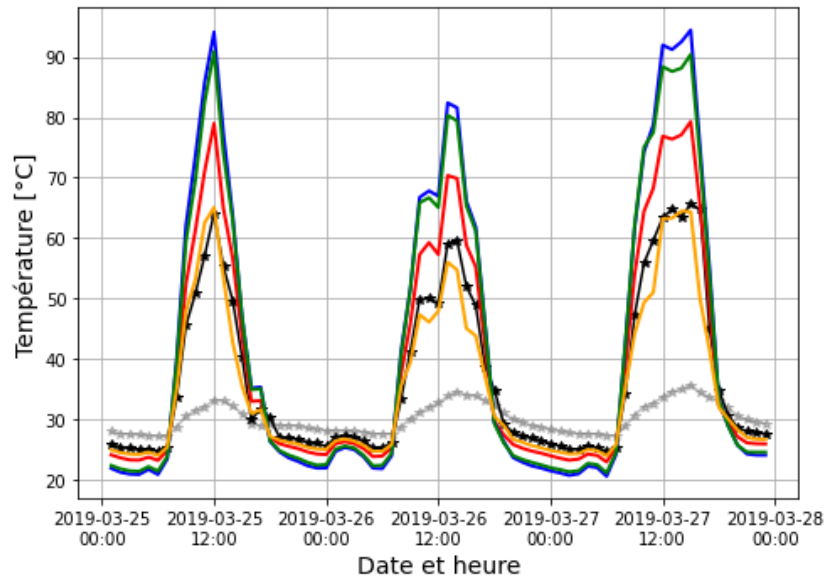


- Le modèle **1R2C** conduit à des températures de surface **incohérentes** au niveau de la route.
- Le modèle **3R4C distribué** ne reproduit **pas correctement** les **variations journalières** de la température de la route.
- Les modèles **3R4C réel** et **différences finies** fournissent des températures de surface avec une **précision satisfaisante**.

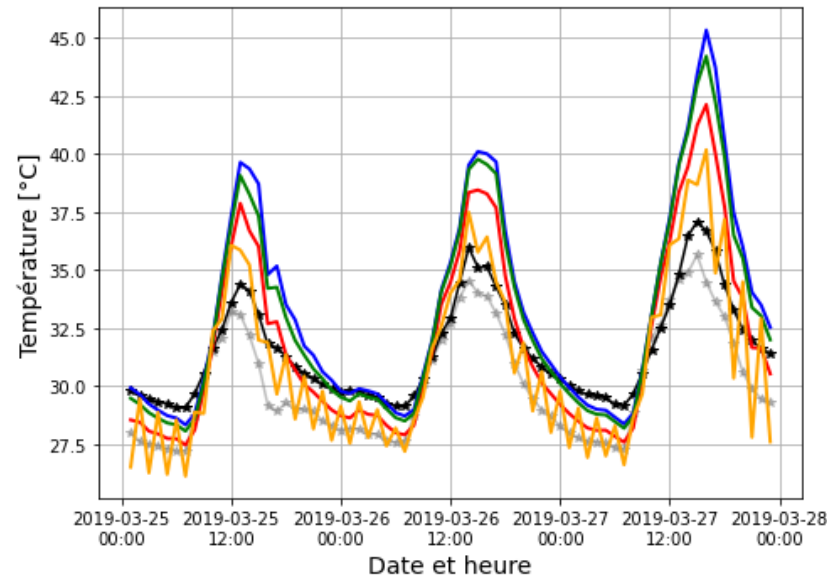
Comparaison des modèles de convection

Modèle de conduction : 3R4C réel pour les toits et les murs, différences finies pour la route

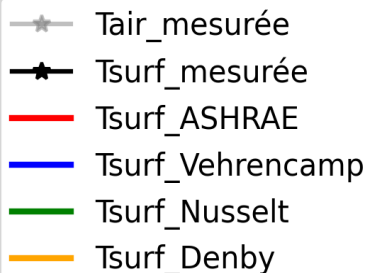
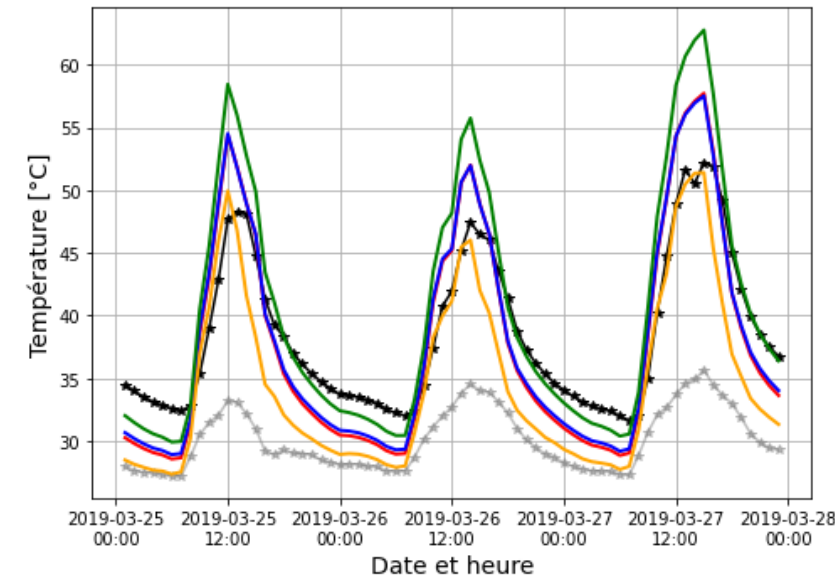
Toit



Mur



Route



- Le modèle **Denby** fournit les **températures de surface de toit les plus précises**, mais entraîne des **oscillations** pour les températures de surface de **mur**.
 - Au niveau de la **route**, le modèle basé sur **Nusselt** fournit les résultats les plus **satisfaisants** durant la **nuit**, mais les plus **éloignés** des mesures durant la **journée**.
- => En fonction de la **surface étudiée** et du **moment de la journée**, différents modèles de convection sont recommandés.

Bilan

RMSE calculées entre les températures de surface mesurées et simulées du 25 au 27 mars 2019

Jour

Toit

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	12.94	17.75	15.78	4.53
distributed 3R4C	7.99	16.96	15.25	4.28
real 3R4C	7.97	16.91	15.24	4.35
combination	7.97	16.91	15.15	4.29

Mur

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	3.06	7.85	7.51	2.40
distributed 3R4C	1.54	3.51	2.30	0.91
real 3R4C	2.18	3.51	3.00	1.59
combination	2.40	3.86	3.42	1.57

Route

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	36.34	17.06	28.09	9.27
distributed 3R4C	7.22	2.88	6.32	8.39
real 3R4C	3.08	2.88	1.86	5.38
combination	3.62	3.64	6.09	4.17

RMSE (°C)



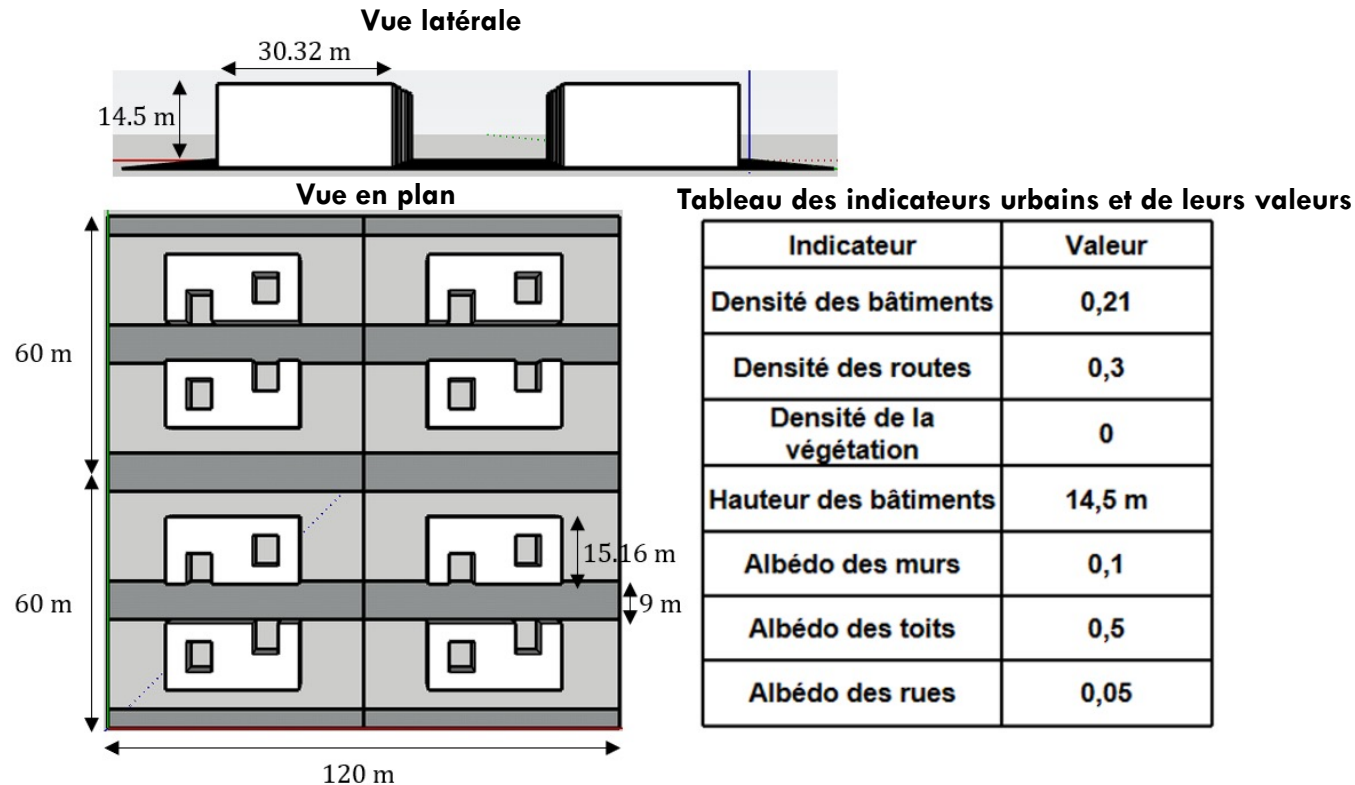
Nuit

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	1.74	3.85	3.41	0.87
distributed 3R4C	1.64	3.64	3.25	0.82
real 3R4C	1.64	3.64	3.22	0.78
combination	1.63	3.64	3.22	0.81

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	1.83	1.73	1.64	1.94
distributed 3R4C	0.76	1.21	0.82	1.16
real 3R4C	1.05	1.21	0.97	2.19
combination	1.04	1.28	1.04	2.02

	ASHRAE	Montazeri /Vehrencamp	Nusselt	Denby
1R2C	5.54	6.22	4.56	6.37
distributed 3R4C	0.81	3.11	1.07	2.13
real 3R4C	3.37	3.11	2.27	4.84
combination	3.32	2.97	1.47	5.20

Quartier typique



Un archétype urbain typique de **GENIUS** (Bonhomme et al. 2012), '**immeuble continu**', basé sur les données des villes européennes.

La maquette utilisée pour la simulation est basée sur les données réelles de la ville de Nantes.

Période de simulation :

08/08/2003 à 7h00 ~ 10/08/2003 à 6h00.

Période de comparaison :

(les premières 24 heures sont exclues)

09/08/2003 à 7h00 ~ 10/08/2003 à 6h00.

Composition des surfaces urbaines

Toit

Béton (20 cm)

Mur

Béton (20 cm)

Route

Asphalt (10 cm)
Béton (100 cm)

Trottoir

Asphalt (10 cm)
Béton (100 cm)

Parking

Asphalt (10 cm)
Béton (100 cm)

Température moyenne radiante

La Température Moyenne Radiante (Tmrt) représente les échanges de chaleur radiative entre un individu et son environnement. Elle constitue un indicateur essentiel pour évaluer le **confort thermique**.

Dans cette étude de cas, la Tmrt est calculée à l'aide de la méthode proposée par Pickup, J. et de Dear, R. (1999), dont l'équation mathématique est présentée ci-dessous :

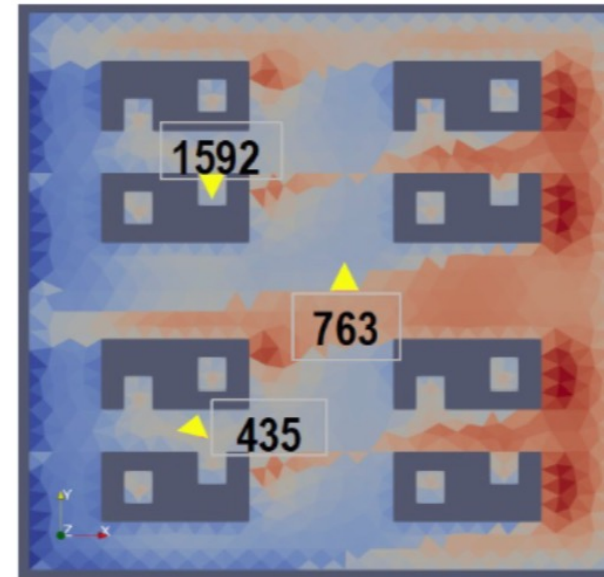
$$T_{MRT} = \left[\left(\frac{\varepsilon_{SKY}}{2} + \frac{\varepsilon_{GND}}{2} \right) T_{SKY}^4 + \frac{f_p (1 - \alpha_{cl}) S \downarrow}{F_{EFF} \sigma} + \frac{(1 - \alpha_{cl}) (D \downarrow + (S \downarrow + D \downarrow) \alpha_{GRND})}{\sigma} \right]^{0.25}$$

radiations à
grande
longueur
d'ondes

radiations
solaires
directes

radiations
diffuses et
réfléchies

Distribution des triangles sélectionnés



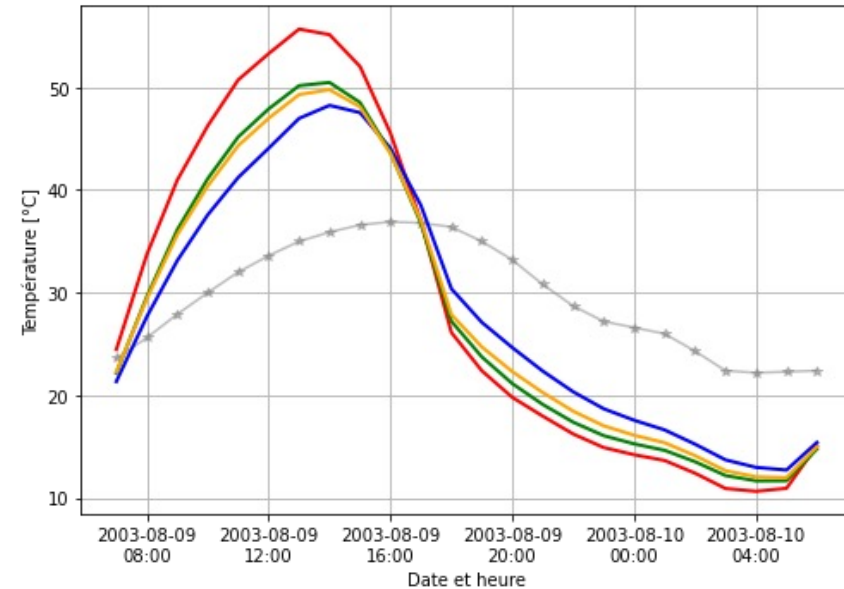
- **Triangle central 763** : au centre du quartier
- **Triangle de la cour 1592** : dans la cour d'un bâtiment
- **Triangle du canyon 435** : dans le canyon entre deux bâtiments

Le jour le plus chaud de 2003 a été choisi comme période d'analyse de Tmrt pour les trois localisations sélectionnées.

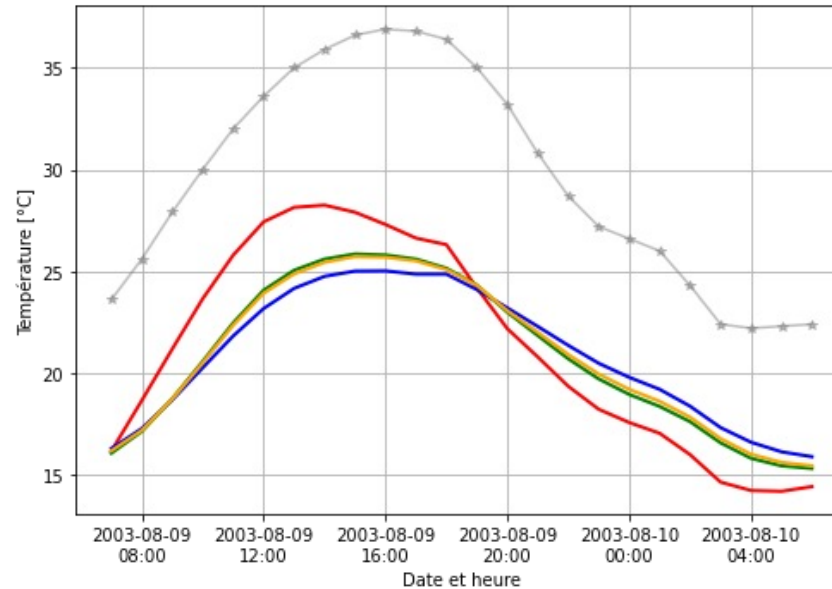
Comparaison des modèles de conduction

Modèle de convection par défaut (ASHRAE)

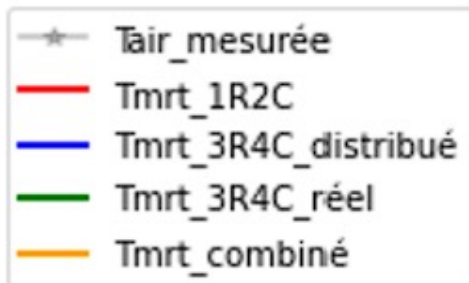
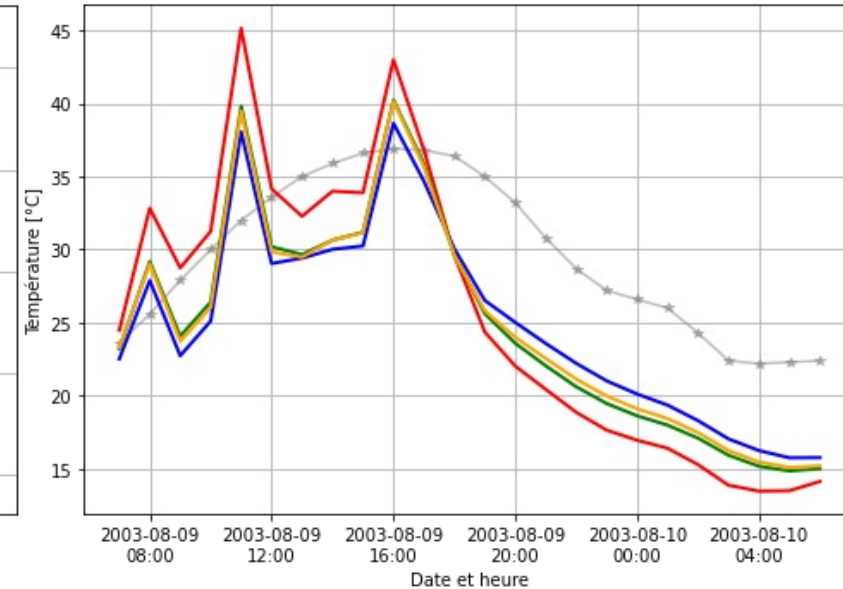
Triangle central



Triangle de la cour



Triangle du canyon

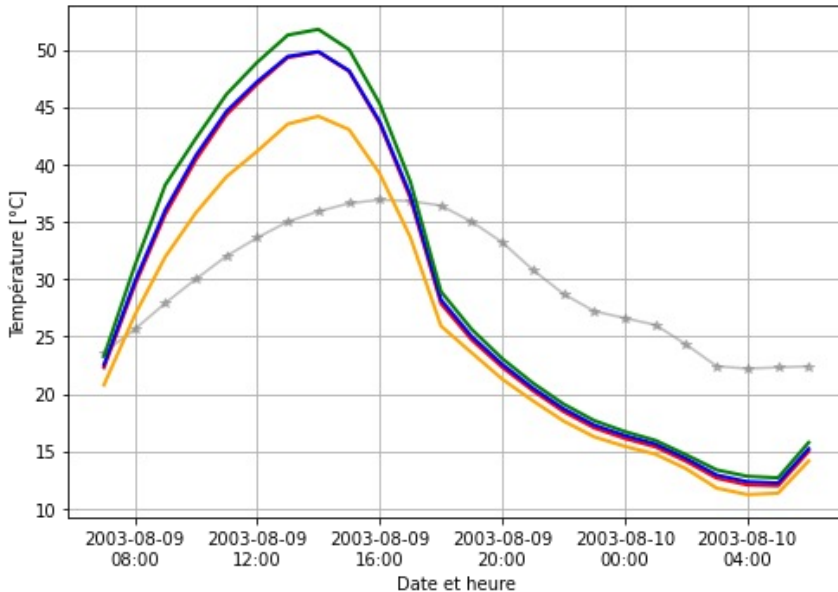


- **Pendant la journée**, le modèle 1R2C donne les températures les plus élevées, suivi par 3R4C réel, puis le modèle combiné, et enfin 3R4C distribué.
- **Pendant la nuit**, c'est l'inverse : 3R4C distribué donne les températures les plus élevées.
- Écart maximal de 9.51 °C (triangle central, entre **1R2C** et **3R4C distribué**, le 09/08/2003 à 11h00)
- Écart maximale de 3.95 °C en excluant le modèle 1R2C (triangle central, entre le **modèle 3R4C réel** et le modèle **3R4C distribué**, le 09/08/2003 à 11h00)
- Le choix d'un modèle conductif approprié est important pour estimer les valeurs de Tmrt.

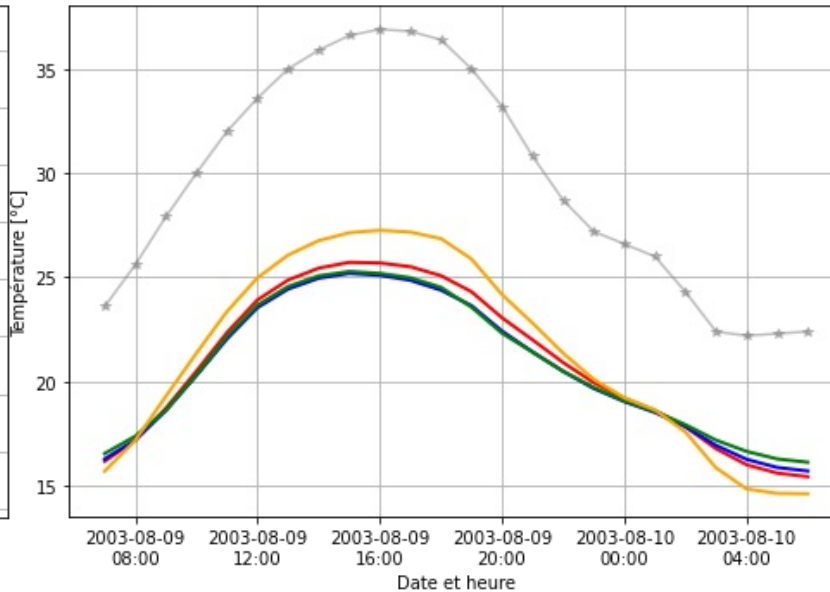
Comparaison des modèles de convection

Modèle de conduction : 3R4C réel pour les toits et les murs, différences finies pour la route

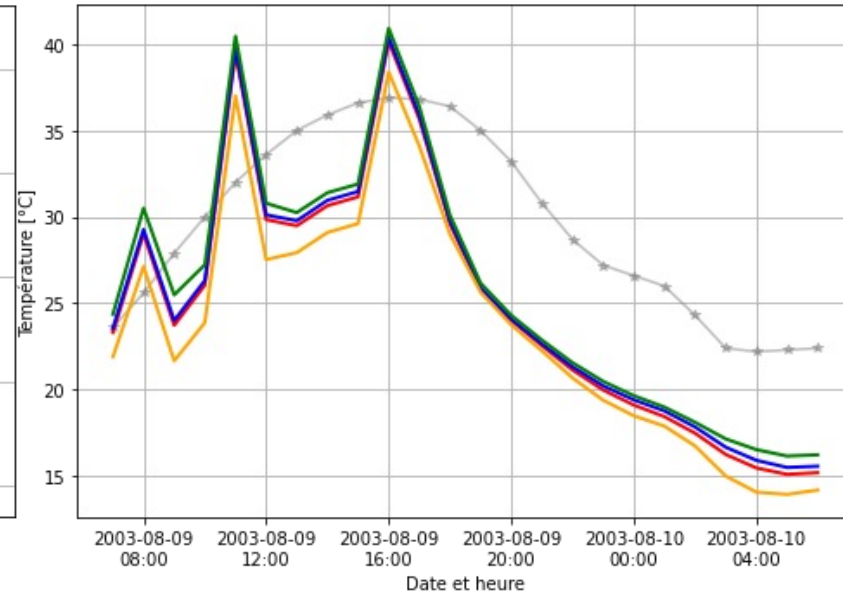
Triangle central



Triangle de la cour



Triangle du canyon



- **Pendant la journée**, le modèle de Nusselt donne les températures les plus élevées au centre et dans le canyon. Dans la cour, c'est le modèle de Denby qui est le plus élevé.
- **Pendant la nuit**, le modèle de Montazeri-Vehrencamp donne les températures les plus élevées, suivi par ASHRAE et Denby.
- La plus grande différence entre les résultats des différents modèles est : 7.75 °C (triangle central, entre le **modèle de Nusselt** et de **Denby**, le 09/08/2003 à 13h00)
- Le choix d'un modèle convectif approprié est également crucial pour la Tmrt

Conclusion

Comparaison mesures/simulation

- **Erreur importante** engendrée par le modèle **1R2C**
- Modèle **3R4C** « réel » = un **bon compromis** entre précision des résultats et coût computationnel
- **Pas de modèle idéal pour la convection**
- Recommandations différentes en fonction du moment de la journée, du type de surface, de la forme urbaine, du climat

Analyse de sensibilité sur la Tmrt

- **Résultats extrêmes** pour le modèle **1R2C** et le modèle **Denby**
- Ecart relativement **faibles** entre les **Tmrt** simulés par les **autres modèles** de **conduction** et de **convection**

Perspectives

Évaluer l'impact du choix des modèles sur l'estimation des **consommations énergétiques** et sur le couplage microclimatique pour calculer la **température de l'air**

Merci pour votre attention

Références

- ASHRAE, A.S. of H., Refrigerating and Air-Conditioning, 1985. ASHRAE Handbook, 1985 Fundamentals: An Instrument of Service Prepared for the Profession Containing Technical Information ... American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Azam, M.-H., Morille, B., Bernard, J., Musy, M., Rodriguez, F., 2018. A new urban soil model for SOLENE-microclimat: Review, sensitivity analysis and validation on a car park. *Urban Clim.* 24, 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.010>
- Bonhomme, M., Ait Haddou, H., Adolphe, L., 2012. Genius: A tool for classifying and modelling evolution of urban typologies.
- Chen, J., Wang, H., Xie, P., 2019. Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. *Appl. Therm. Eng.* 158, 113755. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>
- de Dear, R., Pickup, J., 2000. An outdoor thermal comfort index (Out_SET*)—Part 1—The model and its assumptions. pp. 279–283.
- Denby, B.R., Sundvor, I., Johansson, C., Pirjola, L., Ketzel, M., Norman, M., Kupiainen, K., Gustafsson, M., Blomqvist, G., Kauhaniemi, M., Omstedt, G., 2013. A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP). Part 2: Surface moisture and salt impact modelling. *Atmos. Environ.* 81, 485–503. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.003>
- Donthu, E.V.S.K.K., Long, Y.P., Wan, M.P., Zhou, M., Ng, B.F., 2024. Dynamics of cool surface performance on urban microclimate: A full-scale experimental study in Singapore. *Sustain. Cities Soc.* 102, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105218>
- Fraisse, G., Viardot, C., Lafabrie, O., Achard, G., 2002. Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. *Energy Build.* 34, 1017–1031. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00019-1)
- Gui, J. (Gavin), Phelan, P.E., Kaloush, K.E., Golden, J.S., 2007. Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures. *J. Mater. Civ. Eng.* 19, 683–690. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(683))
- Montazeri, H., Blocken, B., 2017. New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients at building facades and roofs. *Build. Environ.* 119, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.012>
- Parison, S., Chaniel, M., Filaine, F., & Hendel, M., 2022. Démonstrateur expérimental : bilan thermique de surface de seize matériaux de voirie. Dans *Actes du CIFIQ2022 (Article ART-69)*.
- Robineau, T., Rodler, A., Morille, B., Ramier, D., Sage, J., Musy, M., Graffin, V., Berthier, E., 2022. Coupling hydrological and microclimate models to simulate evapotranspiration from urban green areas and air temperature at the district scale. *Urban Clim.* 44, 101179. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101179>
- Ruiz, M., 2023. Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois à l'échelle urbaine : Étude et application au centre-ville médiéval de Cahors. *Acad. J. Civ. Eng.* 41, 655–662. <https://doi.org/10.26168/ajce.41.1.67>
- Yang, S., Wang, L. (Leon), Stathopoulos, T., Marey, A.M., 2023. Urban microclimate and its impact on built environment – A review. *Build. Environ.* 238, 110334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110334>

Annexe – Calcul des coefficients de convection (Montazeri et Blocken 2017)

$$h = U_{10}^b \cdot (a_0 + a_1 \cdot W + a_2 \cdot W^2 + a_3 \cdot W^3 + a_4 \cdot W^4 + a_5 \cdot H + a_6 \cdot H^2 + a_7 \cdot H^3 + a_8 \cdot H^4 + a_9 \cdot W \cdot H + a_{10} \cdot W \cdot H^2 + a_{11} \cdot W \cdot H^3 + a_{12} \cdot W^2 \cdot H + a_{13} \cdot W^2 \cdot H^2 + a_{14} \cdot W^2 \cdot H^3 + a_{15} \cdot W^3 \cdot H + a_{16} \cdot W^3 \cdot H^2 + a_{17} \cdot W^3 \cdot H^3)$$

Les valeurs des coefficients (a_0, a_1, \dots, a_{17}) et (b) dépendent du type de surface étudiée: façade au vent, façade sous le vent, façade latérale, et toiture.

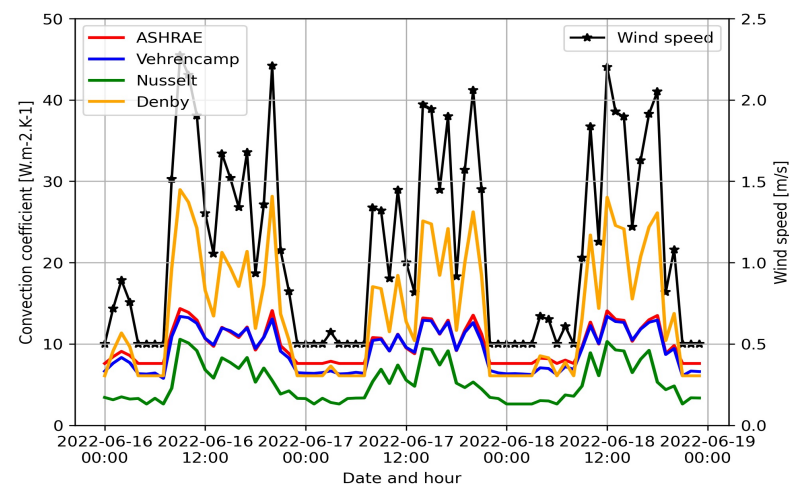
Annexe – Calcul des coefficients de convection en appliquant les nombres adimensionnels

$$Re = \frac{V_{air} \cdot L}{\nu}, Ba = \frac{1}{T_{air} + 273}, Gr = \frac{Ba \cdot g \cdot L^3 \cdot |T_{surf} - T_{air}|}{\nu^2}$$

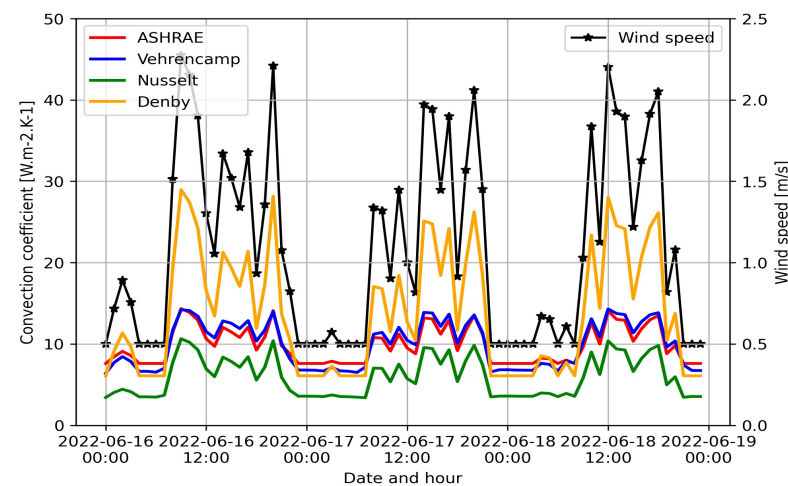
Type de convection	Régime de l'écoulement	Condition de validité	Formule pour (h)
Libre	Laminaire	$Re^2 \ll Gr$ et $Gr < 10^9$	$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.49 \cdot Gr^{\frac{1}{4}}$
Libre	Turbulent	$Re^2 \ll Gr$ et $Gr \geq 10^9$	$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.13 \cdot Gr^{\frac{1}{3}}$
Forcée	Laminaire	$Re^2 \gg Gr$ et $Gr < 10^9$	$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.56 \cdot Re^{\frac{1}{2}}$
Forcée	Turbulent	$Re^2 \gg Gr$ et $Gr \geq 10^9$	$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.03 \cdot Re^{\frac{4}{5}}$
Mixte	Laminaire	$10 \cdot Re^2 \approx Gr$ et $Gr < 10^9$	$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.68 \cdot \left(0.57 \cdot Gr^{\frac{3}{4}} + Re^2 \right)^{\frac{1}{3}}$
Mixte	Turbulent	$10 \cdot Re^2 \approx Gr$ et $Gr \geq 10^9$	$h = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.03 \cdot \left(12.1 \cdot Gr + Re^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{1}{3}}$

Annexe – Valeurs des coefficients de convection dans le premier cas

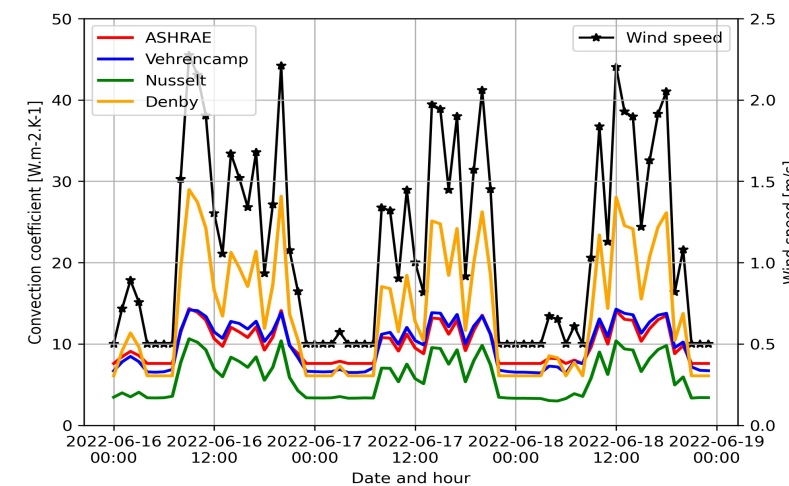
Trottoir Asphalte



Trottoir Béton

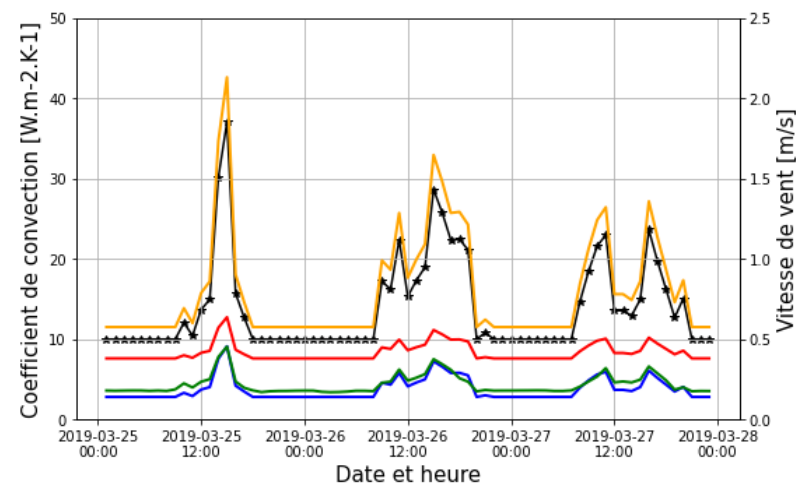


Trottoir Granit

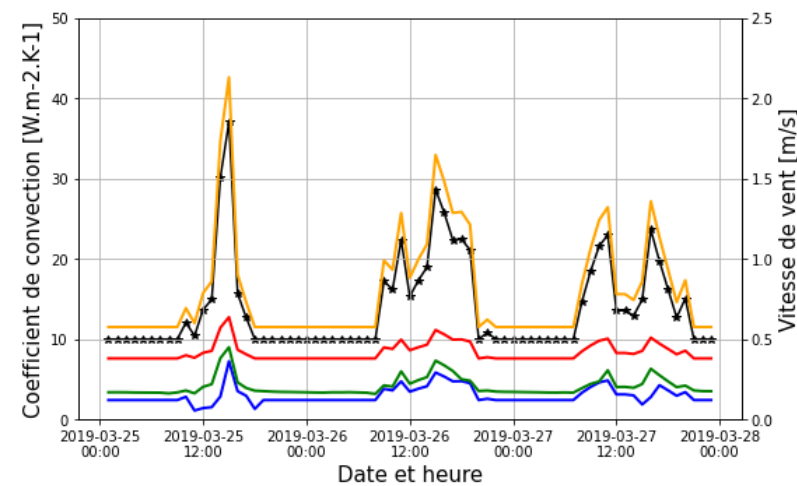


Annexe – Valeurs des coefficients de convection dans le second cas

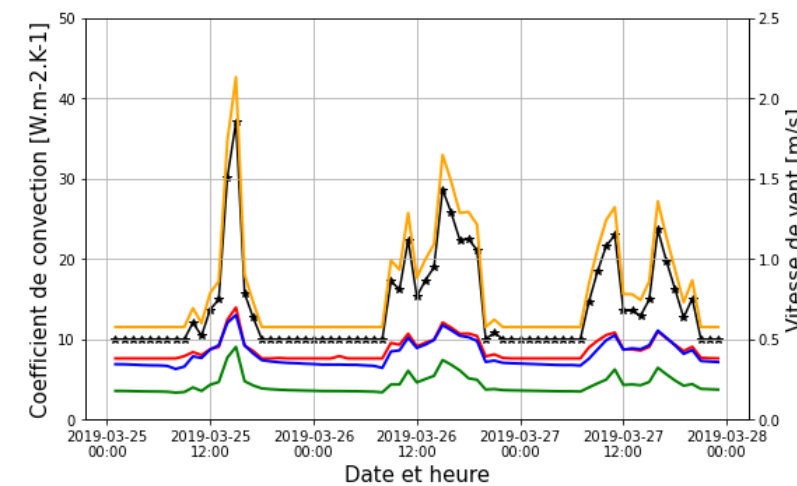
Toit



Mur

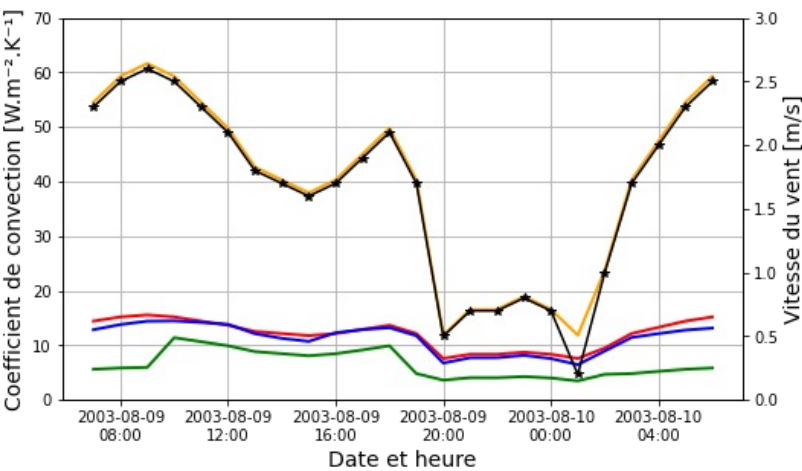


Route

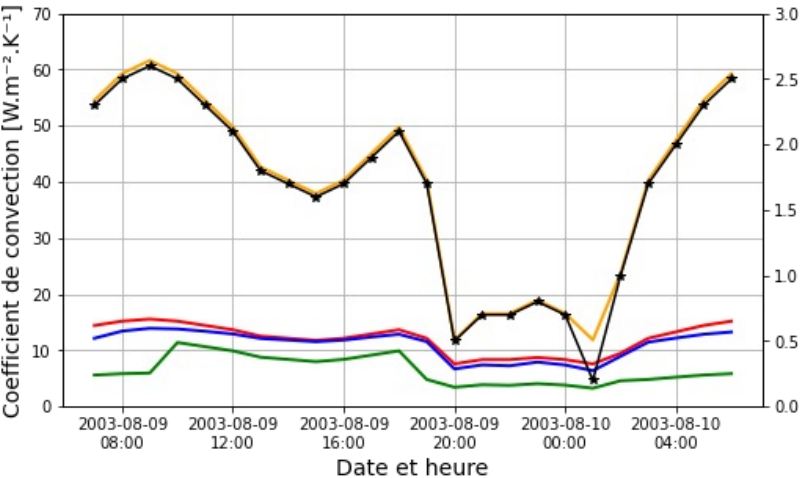


Annexe – Valeurs des coefficients de convection dans le troisième cas

Triangle central



Triangle de la cour



Triangle du canyon

