

Mémoire S8 : SAPI

Influence croisée de la morphologie urbaine et des façades sur les microclimats

Recherche de typologie de façades optimisant le confort thermique extérieur en fonction de l'orientation et de la morphologie urbaine dans un climat méditerranéen

Professeurs encadrant :
Joaquim SILVESTRE Anne TUSCHER Louis VITALIS

Rémi Pialoux

Remerciements

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Alice Bichat et Alice Hubert-Habart pour leur accompagnement et leurs précieux conseils au cours de la rédaction de ce mémoire. Mes remerciements vont également à Éléonore Martin, Gabriel Rousseau et Augustin Hervouet pour leur relecture attentive.

Résumé

La hausse des températures transforme le confort thermique extérieur en un enjeu sanitaire. Si l'influence de la morphologie urbaine sur les îlots de chaleur urbains a été étudiée, l'impact spécifique de la géométrie des façades sur le confort extérieur reste peu étudié. Ce mémoire analyse l'interaction entre ces deux échelles afin d'identifier les typologies de façades optimisant le confort thermique extérieur.

L'étude se concentre sur un climat méditerranéen (Saint-Raphaël, France) durant une période estivale diurne. La méthodologie repose sur une simulation numérique paramétrique (Rhinoceros 3D, Grasshopper, Ladybug Tools), couplant l'analyse de trois tissus urbains distincts (la barre, le plot, l'îlot) avec des variations modulaires de façades. Le confort thermique est évalué par l'indice UTCI (Universal Thermal Climate Index), converti en Degrés-Heures d'inconfort DH_{UTCI} pour quantifier le stress thermique cumulé.

Abstract

Rising temperatures are transforming outdoor thermal comfort into a critical public health issue. While the influence of urban morphology on Urban Heat Islands (UHI) has been widely studied, the specific impact of facade geometry on outdoor comfort remains under-researched. This thesis analyzes the interaction between these two scales to identify facade typologies that optimize outdoor thermal comfort.

The study focuses on a Mediterranean climate (Saint-Raphaël, France) during daytime summer periods. The methodology relies on parametric numerical simulation (Rhinoceros 3D, Grasshopper, Ladybug Tools), coupling the analysis of three distinct urban forms (slab block, point block, and courtyard block) with modular facade variations. Thermal comfort is evaluated using the UTCI (Universal Thermal Climate Index), converted into Discomfort Degree-Hours to quantify cumulative thermal stress.

Note IA :

Certaines parties ont été rédigées à l'aide de ChatGPT

Ci-joint le lien repertoriant tous les prompts : <https://chatgpt.com/share/68558483-d734-8002-8f12-6220c0cb6644>

Table des matières

Remerciement.....	2
Résumé.....	3
Abstract	3
Glossaire.....	6
Avant-Propos.....	8
1 Introduction	9
1.1 Exposition Générale.....	9
1.1.1 Définition du microclimat	9
1.1.2 Les stratégies urbaines bioclimatique au cours du temps	12
1.2 Intérêt de la Recherche :	13
1.2.1 Conséquence des microclimats.....	13
1.2.2 Recherches sur les microclimats.....	14
1.3 Problématique	15
1.4 Hypothèses.....	16
1.5 Méthode Générale :.....	16
2 Etat de l’art	18
2.1 Définition du confort thermique	18
2.2 Les différents paramètres influençant les microclimats.....	21
2.2.1 Paramètre morphologique.....	22
2.2.2 Paramètres Anthropique	25
2.2.3 Paramètres architecturaux.....	25
2.2.4 Végétation urbaine.....	26
3 Etat de l’art méthodologique	28
3.1 L’échelle de la ville.....	28
3.2 L’échelle du quartier	30
3.3 L’échelle du bâtiment	33
4 Méthode de recherche	36
4.1 Approche globale.....	36
4.2 Définition des critères comparatifs	37
4.3 Paramétrisation des cas d’études.....	39
4.3.1 Morphologies urbaines étudiées.....	39
4.3.2 Définition des Modules.....	42
4.3.3 Application des modules de façade aux tissus urbains.....	44
4.4 Conditions climatiques et temporelles de l’étude	49
4.4.1 Localisation de l’étude.....	49
4.4.2 Analyse des données climatique du site :	50
4.4.3 Délimitation temporelle de l’étude	52
5 Résultats.....	54

5.1	Barre.....	55
	55
5.1.1	Influence selon la typologie de façade.....	55
5.1.2	Influence de l’ombrage.....	56
5.2	Ilot.....	58
5.2.1	Influence selon la typologie de façade.....	58
5.2.2	Influence de l’ombrage.....	59
5.3	Plot.....	60
5.3.1	Influence selon la typologie de façade.....	60
5.3.2	Influence de l’ombrage.....	61
6	Conclusion.....	63
6.1	Limites du modèle.....	63
Annexes :.....		65

Glossaire

Vocabulaire

Morphologie urbaine : Discipline étudiant la forme physique de la ville et l'organisation spatiale de ses tissus. Elle se caractérise par l'analyse de l'interaction entre trois composantes :

1. Le plan au sol (tracé viaire et parcellaire).
2. La volumétrie du bâti (hauteur, densité, emprise).
3. Les espaces libres (rues, places, cours).

Ventilation urbaine : désigne les mouvements d'air dans le tissu urbain. Elle est essentielle pour dissiper la chaleur accumulée, réduire la concentration de polluants et améliorer le confort thermique ressenti.

Elle dépend fortement de la morphologie urbaine (alignement des rues, hauteur des bâtiments, porosité du tissu) et de la géométrie des façades, qui peuvent soit canaliser, soit obstruer les flux d'air.

Confort thermique :

Le confort thermique correspond au bien-être thermique d'un individu dans un environnement extérieur non climatisé. Il dépend de nombreux facteurs : température de l'air, humidité, rayonnement solaire, température des surfaces, et vitesse du vent.

L'inconfort thermique survient lorsque ces paramètres dépassent la capacité du corps humain à réguler sa température, en particulier lors de fortes chaleurs ou dans des environnements peu ventilés.

Pour mesurer cet effet, ce mémoire s'appuie sur l'UTCI (Universal Thermal Climate Index), un indice bio-climatique reconnu pour sa capacité à intégrer l'ensemble des paramètres environnementaux dans une estimation unique de la charge thermique perçue par une personne.

Stress thermique : État de tension physiologique subi par le corps humain lorsque ses mécanismes de thermorégulation (sudation, vasodilatation, frissonnement) sont sollicités pour maintenir la température interne à 37°C.

Il survient lors d'un déséquilibre du bilan thermique corporel :

- Stress thermique chaud (Hyperthermie) : Les gains de chaleur (métabolisme + environnement) excèdent les capacités de dissipation du corps.
- Stress thermique froid (Hypothermie) : Les pertes de chaleur excèdent la production métabolique.

Albédo : Pouvoir réfléchissant d'une surface (rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie incidente).

Inertie thermique : Capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer avec un décalage temporel (déphasage).

Canyon urbain : Unité géométrique de base de la ville constituée par la rue et les façades qui la bordent (souvent caractérisé par le ratio H/W).

Met : Unité de mesure du métabolisme énergétique (flux de chaleur produit par le corps). 1 Met = 58 W/m² (personne assise au repos).

Facteur de Vue du Ciel (SVF - Sky View Factor) : Indicateur géométrique (de 0 à 1) représentant la portion de ciel visible depuis un point donné. Un SVF faible indique un fort piégeage radiatif.

Clo : Le Clo est l'unité de l'isolement thermique vestimentaire. Par définition, 1 clo correspond à la résistance thermique nécessaire pour maintenir un homme au repos (métabolisme de 1 met) en équilibre thermique dans une pièce à 21°C, avec une vitesse d'air de 0,1 m/s. Soit $IClo=0,155m^2 \cdot K/W$.

Ecart type : Mesure statistique de la dispersion d'un ensemble de données autour de leur moyenne.

SWR (Shade-to-Wall Ratio) : Ratio surfacique entre la surface des protections solaires projetée et la surface totale de la façade.

WWR (Window-to-Wall Ratio) : Ratio surfacique entre la surface vitrée et la surface totale de la façade.

Degré-Heure d'Inconfort (DH) Indicateur cumulant l'intensité et la durée du stress thermique sur une période donnée. Il se calcule par la somme des écarts de température au-dessus d'un seuil de confort défini (ici 26°C UTCI).

Evapotranspiration : Phénomène combiné d'évaporation directe de l'eau du sol et de transpiration des plantes (processus de refroidissement adiabatique).

Acronymes

ICU : Ilot de chaleur urbain

IFU : Ilot de fraîcheur urbain

UTCI : Universal Thermal Climate Index

Avant-Propos

La volonté d'étudier les microclimats urbains découle d'expériences personnelles. J'ai pu ressentir ce phénomène dans mon village d'origine, situé dans le Sud de la France. La transition radicale entre un parking et la place centrale de mon village, qui se situent à une cinquantaine de mètres l'un de l'autre. Le parking était entièrement goudronné, avec peu de végétaux ou d'ombre. Cette absence d'ombrage et ce revêtement de sol provoquaient une augmentation de la température rendant l'air en été quasiment irrespirable. La place, elle, était entourée de bâtiments et abrité par quatre grands platanes qui assuraient un ombrage quelle que soit l'heure de la journée, ce qui permettait de rendre l'air plus respirable malgré les hautes températures estivales. Ces deux situations urbaines radicalement différentes rendent deux sensations thermiques drastiquement opposées. Comment la morphologie urbaine influe-t-elle sur le confort thermique en extérieur ?

En parallèle, je me rappelle aussi le souvenir d'une tour à Londres surnommée le « *Walkie-Talkie* » en raison de sa forme, qui avait fait fondre les carrosseries des voitures garées en contrebas. La façade de la tour était entièrement vitrée et concave. A cause de cette forme, la tour a reproduit le fonctionnement des fours solaires, concentrant les rayons du soleil incidents vers le foyer de la parabole que formait la façade, qui était ici une rue. Ce cas extrême montre que la façade peut augmenter l'inconfort thermique extérieur par une augmentation de la température effective et ressentie. Alors qu'en est-il des façades ordinaires ? Ont-elles aussi un impact notable sur les microclimats urbains ?

Il est à noter que le *Walkie-Talkie* est une immense stèle monolithique avec une façade de verre. De par ses dimensions, elle est logiquement moins impactée par son tissu urbain. A l'inverse, les façades ordinaires, elles, s'intègrent la plupart du temps de manière homogène dans leurs tissus urbains. Ces deux observations m'ont amené à m'interroger sur l'implication des façades dans la formation des microclimats urbains.

1 INTRODUCTION

1.1 Exposition Générale

L'étude des microclimats est un domaine d'étude encore récent, bien que sa prise en compte pour la mise en place de stratégies urbaines remonte aux *Rites des Zhou*, un ouvrage datant de -2 AV JC¹. Ces stratégies vernaculaires, principalement présentes dans les pays où le corps humain subit un stress thermique important, ont très peu été prises en compte lors des restructurations ou la construction de villes modernes. Cela s'explique en partie par les progrès technologiques : l'Homme étant capable de reproduire artificiellement des conditions confortables par une utilisation abondante d'énergie, s'est détaché de sa dépendance à son environnement pour bâtir en défiance des contraintes environnementales. Avec les crises d'énergie et de ressources successives qui ont eu lieu au cours des dernières décennies, les ressources et l'énergie se sont faites de plus en plus rares, en parallèle d'une aggravation du réchauffement climatique et des conséquences sur la qualité de vie des habitants des villes. La recherche et la mise en place de dispositifs et de stratégies s'adaptant au climat en est une conséquence directe.

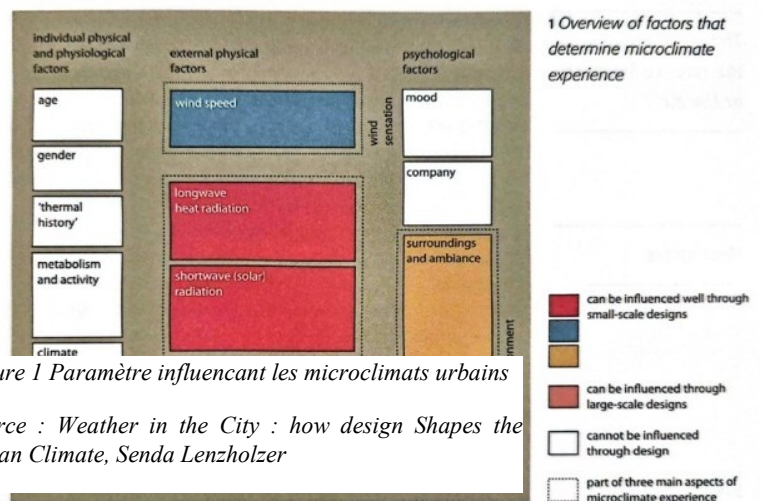
1.1.1 Définition du microclimat

Le terme de *microclimat* ne désigne pas seulement une modification locale de la température, mais un ressenti en réponse à un environnement². Comme décrit dans la Figure 2, l'expérience des microclimats est sujette à une combinaison de 3 types de facteurs :

- Les facteurs physiologiques
- Les facteurs physiques extérieurs
- Les facteurs psychologiques

Les facteurs liés à l'individu, soit les facteurs physiologiques et psychologiques, sont des paramètres subjectifs (tels que l'acclimatation, l'efficacité du métabolisme ou l'isolation vestimentaire) ou variables (la résistance thermique des vêtements que porte l'individu). Il est donc compliqué de quantifier leur impact sur l'estimation du confort thermique lié au microclimat, puisqu'ils sont propres à chaque individu.

Le facteur le plus simple à quantifier est donc le facteur des paramètres physiques extérieurs, et c'est celui que cette recherche se propose d'élaborer. La vitesse du vent, les radiations solaires ou encore la température de l'air ont des modèles permettant une mesure plus fiable et rigoureuse, moins subjective, bien que certains indices de confort thermique contournent ces difficultés en modélisant l'individu avec des paramètres standardisés. Ce sont donc souvent ces paramètres qui sont pris en



¹ Melendo, A., & Cabeza-Lainez, J.-M. (2018). Environmental Features of Chinese Architectural Heritage : The Standardization of Form in the Pursuit of Equilibrium with Nature. *Sustainability*, 10, 2443.

² Lenzholzer, S. (2015). *Weather in the City—How Design Shapes the Urban Climate*. Nai 010 Uitgevers/Publishers.

compte lors de l'étude des microclimats urbains, résumant ainsi les microclimats urbains à une modification locale des paramètres physiques extérieurs, provoquée par l'interaction entre les éléments composants un milieu urbain et le climat dans lesquels ils s'insèrent.

De fait, nous pouvons répartir les microclimats urbains en deux catégories :

- **L'îlot de fraîcheur urbain**, qui correspond à une diminution locale de la température. Ce phénomène peut être provoqué par trois facteurs :

- *L'ombrage* : l'ombre portée des bâtiments, la présence de végétation ou tout autre élément urbain susceptible de réduire le rayonnement solaire direct. L'énergie absorbée par le sol et les surfaces est réduite, ce qui diminue la température de surface et la chaleur réémise.³
- *L'évapotranspiration* : les végétaux utilisent l'énergie solaire pour transformer l'eau en vapeur. L'énergie solaire ne chauffe plus que partiellement le sol et les surfaces environnantes, ce qui diminue l'énergie stockée par ces surfaces⁴.
- *La ventilation urbaine* : elle permet d'évacuer l'air chaud, et de le remplacer par un air plus frais. Dans l'idéal, l'accélération des vents est favorisée par la morphologie urbaine : les rues alignées aux vents dominants, avec un faible rapport Hauteur/Largeur⁵ opposent peu de résistance à l'écoulement de l'air, et agissent comme des couloirs de vent. Les rues traversant des points de basse altitude de la ville sont propices à l'accumulation de l'air frais nocturne. L'air froid, plus dense, descend par gravité vers les points les plus bas, créant des chemins d'air froid. Les couloirs de vent et les chemins d'air froid rafraîchissent le tissu urbain et contribuent à l'apparition d'un IFU.⁶

- **L'îlot de chaleur urbain**, qui correspond à une augmentation locale de la température. Ce phénomène peut être provoqué par quatre facteurs :

- *Le piégeage de rayonnement et l'ombrage* : Le piégeage du rayonnement se décompose en 2 phases. Le jour, les façades ayant un faible albedo (de couleur sombre) absorbent une grande quantité d'énergie solaire qui est ensuite stockée. L'analogie du textile illustre bien : un pull de couleur noire portera plus chaud qu'un pull blanc. La nuit, les morphologies urbaines avec un fort rapport H/L, donc des rues étroites, empêchent la chaleur stockée dans le sol et les murs de s'échapper par rayonnement. La chaleur est piégée, ce qui maintient des températures élevées durant la nuit. En gardant l'analogie du pull en laine, la laine capture de l'air, et cet air est chauffé par le corps humain. Cependant l'air étant piégé par la laine, la sensation de chaleur ne s'évacue pas du pull, et le corps est maintenu au chaud. Les murs agissent comme la laine qui compose le pull.⁷

³ Emmanuel, R., & Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate : The case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research - CLIMATE RES*, 30, 189-200.

⁴ Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055.

⁵ Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1), 103-113.

⁶ Katzschner, L., & Ng, E. (s. d.). *Ventilation Investigations in a densely built up Area of Hong Kong to describe Thermal Comfort*.

⁷ ⁸ Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Heat storage in urban areas: Observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology*, 38(7), 922-940.

- *L'inertie thermique* : Chaque matériau composant une façade a une capacité thermique propre. Les matériaux avec une forte capacité thermique pourront stocker une grande partie de l'énergie reçue par rayonnement solaire, qui sera relâchée durant la nuit. Un pull en laine épaisse et dense (forte inertie) mettra plus de temps à se réchauffer complètement, mais il gardera et restituera la chaleur plus durablement qu'un pull très fin et léger (faible inertie), qui se refroidit lui presque instantanément.⁸
- *La limitation de la ventilation urbaine* : Un tissu urbain avec une longueur de rugosité élevée ralentit le vent près du sol. Cela limite le rafraîchissement par convection et perturbe l'évacuation de l'air chaud, ainsi que l'apport d'air froid.⁹
- *La limitation de l'évapotranspiration* : le faible taux de végétation a pour conséquence une faible quantité d'énergie solaire utilisée pour transformer l'eau en vapeur. L'énergie solaire qui n'est pas dissipée par évapotranspiration contribuera alors à réchauffer l'atmosphère par les différents mécanismes évoqués ci-dessus.¹⁰

Ces deux phénomènes, ICU et IFU et plus généralement les microclimats sont étudiés à différentes échelles :

- La méso-échelle qui correspond à l'échelle de la ville
- L'échelle locale qui correspond à l'échelle du quartier
- La micro-échelle qui correspond à l'échelle du bâtiment.

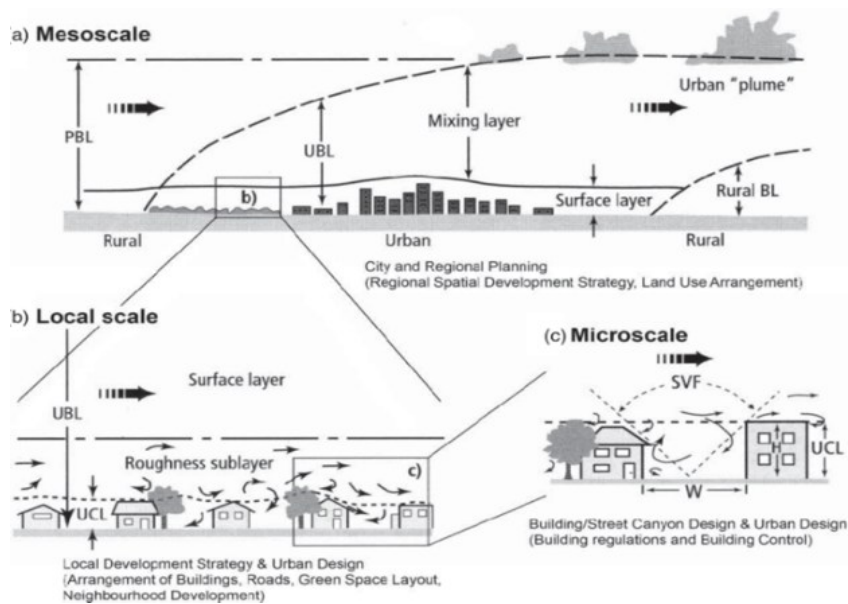


Figure 2 Echelles des microclimats urbains source : Mapping the urban microclimatic spatial distribution in a sub-tropical high-density urban environment

⁹ Katschner, L., & Ng, E. (s. d.). *Ventilation Investigations in a densely built up Area of Hong Kong to describe Thermal Comfort*.

¹⁰ Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055.

Cette discrétisation de la ville permet de simplifier l'environnement urbains dans lequel les microclimats sont étudiés. Cependant ce découpage appelle à une réflexion sur l'interaction mutuelles de ces échelles ainsi que de comprendre la caractérisation des microclimats à l'interface entre deux échelles

1.1.2 Les stratégies urbaines bioclimatiques au cours du temps

En prenant en compte l'incidence des paramètres morphologiques du tissu urbain sur les microclimats, certaines stratégies urbaines ont eu pour objectif d'améliorer le confort thermique urbain. Ces stratégies s'adaptent aux climats environnants ; que ce soit par un savoir vernaculaire, ou sur la base de modèles scientifiques, ces stratégies reposent sur des principes similaires : la protection face aux vents et face aux rayonnements solaires. Ces implantations tirent partie de la formation d'ICU ou d'IFU pour améliorer la sensation thermique des habitants.

En outre, il a été observé que le tissu urbain de multiples villes anciennes permettait la création d'îlots de fraîcheur et de protection face aux vents. Cependant à ce jour, il n'existe aucune preuve que cela proviendrait d'une stratégie urbaine. Ces tissus urbains adaptés à leur contexte climatique sont la conséquence d'un travail itératif s'étalant sur des générations. Chaque génération affinant le travail de la génération précédente, permettant ainsi d'aboutir à une sagesse vernaculaire en adéquation avec leur environnement¹¹. On retrouve de telles implantations dans de nombreux villages provençaux. De même, dans le village de Korčula en Croatie, les rues de la vieille ville sont disposées perpendiculairement aux vents permettant de s'en protéger. On appelle cette disposition un plan en « arrête de poissons »¹²

Ces chemins urbains d'air froid et corridors de ventilation sont de nouveau envisagés comme un moyen de lutter contre les îlots de chaleur urbains. C'est le cas de la ville de Stuttgart. La municipalité y protège des Kaltluftleitbahnen (couloirs d'air froid) par des règles d'urbanisme pour garantir le rafraîchissement nocturne du centre-ville¹³.



Figure 3 Illustration du plan en « arrête de poissons » de Korčula permettant de se protéger des vents provenant de la mer

Source Baş, H., & Eğercioğlu, Y. (2016). *Impact of Quality of Wind on Urban Form : Analysis of Vernacular and Contemporary Wind-Adaptive Urban Design Approaches*.

Il existe d'autres solutions constructives pour lutter face aux climats urbains. Certaines sont temporaires, comme les voiles d'ombrage disposés dans les rues qui permettent de créer des zones d'ombre. Ces toiles, utilisées la journée, et rétractées la nuit pour rafraîchir la rue, permettent d'améliorer le confort urbain. Mais ce n'est pas l'unique solution vernaculaire mise en place pour réduire

¹¹ Rapoport, A. (1969). *House form and culture*. Prentice-Hall

¹² Baş, H., & Eğercioğlu, Y. (2016). *Impact of Quality of Wind on Urban Form : Analysis of Vernacular and Contemporary Wind-Adaptive Urban Design Approaches*.

¹³ Kazmierczak, A., & Carter, J. (2010). *Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies*.

la chaleur urbaine. Il existe aussi l'Uchimizu¹⁴, qui consiste à arroser le sol des rues au Japon. L'eau, en s'évaporant, refroidit l'atmosphère, et diminue le risque de formation des ICU.

Les stratégies d'amélioration du confort extérieur me semblent être un point important dans tout projet urbain. Au-delà de l'aspect physique, le confort thermique est aussi influencé par des critères subjectifs. Par l'inconfort extérieur, l'espace public pourrait perdre son habitabilité

1.2 Intérêt de la Recherche :

1.2.1 Conséquence des microclimats

1.2.1.1 Impact du microclimat sur la santé

La dégradation du confort thermique n'est pas la seule conséquence des microclimats urbains. L'exacerbation du stress thermique et l'altération de la ventilation urbaine ont également un impact sanitaire.

En effet, la température ambiante exerce un impact direct sur le taux de mortalité, indépendamment du contexte géographique. Qu'il s'agisse d'un stress thermique déclenché par une vague de froid ou de chaleur, le taux de mortalité croît significativement affectant en priorité les personnes âgées et les populations vulnérables. Cette augmentation n'est cependant pas uniforme à l'échelle d'un territoire et varie selon l'exposition locale¹⁵. Il a été démontré que les ICU étaient un facteur aggravant direct sur la mortalité lors d'épisode de vagues de chaleurs¹⁶.

L'une des caractéristiques des ICU est la persistance des températures élevées la nuit. Cet inconfort thermique nocturne dégrade la qualité du sommeil. Les températures ambiantes élevées perturbent l'endormissement tout comme les cycles de sommeil. Ces altérations du sommeil diminuent les capacités cognitives, augmentent la fatigue et provoquent une augmentation de l'irritabilité et de l'anxiété¹⁷.

Les risques sanitaires associés aux microclimats ne découlent pas uniquement de l'augmentation de la température. La diminution de la ventilation urbaine, provoquée par la morphologie urbaine, entraîne elle aussi des conséquences sanitaires. En effet, les activités anthropiques émettent des polluants dans l'air de la ville. Une ventilation urbaine faible ne permet pas d'évacuer correctement l'air pollué¹⁸. Cette stagnation de polluants est nocive pour les citadins et provoque toux, problèmes respiratoires et aggravation des symptômes de l'asthme et des allergies¹⁹

¹⁴ Solcerova, A., Van Emmerik, T., Hilgersom, K., Van de Ven, F., & Van de Giesen, N. (2018). Uchimizu : A Cool(ing) Tradition to Locally Decrease Air Temperature. *Water*, 10(6), 741.

¹⁵ Guo, Y., Gasparrini, A., Armstrong, B., Li, S., Tawatsupa, B., Tobias, A., Lavigne, E., Coelho, M., Leone, M., Pan, X., Tong, S., Tian, L., Kim, H., Hashizume, M., Honda, Y., Guo, Y., Wu, C.-F., Punnasiri, K., Yi, S.-M., & Williams, G. (2014). Global Variation in the Effects of Ambient Temperature on Mortality : A Systematic Evaluation. *Epidemiology*, 2014, 1-9.

¹⁶ Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., & Beaudou, P. (2012). The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 254-259.

¹⁷ Zhou, W., Li, X., Wang, Q., Ling, L., & Zhang, H. (2025). The combined effects of sleep and extreme heat exposure on cognitive function among older adults. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 117683.

¹⁸ Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons : A review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155-182.

¹⁹ ADEME. (2017). *Pollution atmosphérique et santé : l'essentiel pour comprendre*

1.2.1.2 Impact du microclimat sur le social

L'exposition face aux ICU est inégale en fonction des catégories sociales. L'étude de T. Chakraborty (2020) met en avant qu'aux Etats-Unis, dans 88% des cas, la présence d'ICU est négativement liée aux revenus médians, plus le revenu d'un quartier est faible, plus la chaleur y est intense. Cette disparité est présente dans les 4 climats étudiés : aride, tropical, subarctique et tempéré. En Europe, comme en Espagne, cette connexion entre statut socio-économique et exposition à la chaleur est aussi significative quel que soit l'outil de mesure ou l'échelle d'analyse²⁰. Les quartiers les plus défavorisés ont une forte minéralisation et une forte densité bâtie, donc un piégeage des rayonnements et une inertie thermique du bâti importants. Les espaces végétalisés sont moins voire non présents ne permettant pas aux résidents l'accès à d'éventuelles IFUs.

Cette plus forte exposition aux conséquences des microclimats nuit aux classes sociales défavorisées par plusieurs aspects. Des espaces publics plus chauds et un accès difficile aux îlots de fraîcheur. Au-delà des risques sanitaires, ces conséquences détériorent la qualité des espaces extérieurs.

Comme le décrit Jan Gelh dans *Pour des villes à échelle humaine : Espace public et vie sociale*, les activités présentes dans les espaces publics peuvent se diviser en 3 catégories :

- Les activités nécessaires
- Les activités optionnelles
- Les activités sociales (résultantes des interactions entre les activités sociales et optionnelles)

Lorsque que la qualité de l'espace public se dégrade, ici d'un point de vue thermique, les activités optionnelles ne sont plus pratiquées. Il ne reste plus que les activités nécessaires. L'espace public devient un espace de transition diminuant fortement les interactions sociales.

Cette disparité se prolonge au sein du cadre bâti. Les populations précaires ont des logements avec des performances énergétiques faibles qui ne permettent pas de se protéger des contraintes thermiques liées aux microclimats²¹.

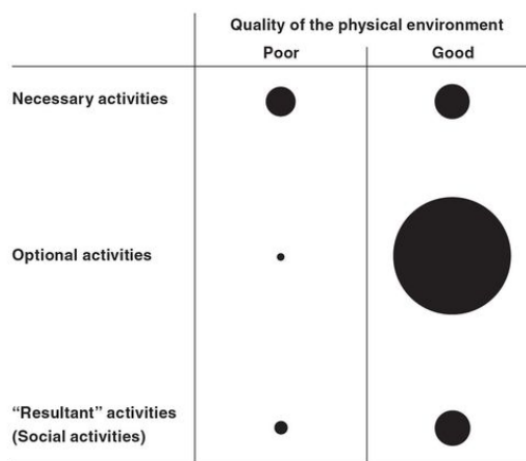


Figure 4 Schéma décrivant les espaces public sont habités
Source : Jan Gelh dans *Pour des villes à échelle humaine : Espace public et vie sociale*

1.2.2 Recherches sur les microclimats

Même si l'étude des microclimats s'est véritablement structurée à partir de l'étude de Oke en 1978, en formalisant les connaissances autour des microclimats urbains, la prise en compte des microclimats dans la conception urbaine et architecturale s'est effectuée en plusieurs étapes.

Dans un premier temps par le savoir empirique, comme l'orientation des rues par rapports aux vents dominants, comme dans les Rites de Zhou. Puis, de manière plus formelle dans les années 2000, lorsque les préoccupations autour du climat sont apparues. De nos jours, la récente émergence d'outils paramétriques et d'algorithmes génératifs permettant d'optimiser les formes urbaines a permis de simuler et d'explorer différents scénarios qui visent à mieux appréhender l'apparition des microclimats²².

²⁰ Marcińczak, S., Iglesias-Pascual, R., Kopeć, D., Wróbel, K., & Mooses, V. (2025). Landscapes of thermal inequality : Exploring patterns of climate justice across multiple spatial scales in Spain. *Landscape and Urban Planning*, 254, 105255.

²¹ Sánchez, C., Núñez Peiró, M., Taylor, J., Mavrogianni, A., & Neila, J. (2019). Assessing population vulnerability towards summer energy poverty : Case studies of Madrid and London. *Energy and Buildings*, 190, 132-143.

²² Dogan, T., & Reinhart, C. (2017). Shoeboxer : An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. *Energy and Buildings*, 140, 140-153.

Cependant, ces nouveaux outils dans le processus de conception décrivent des tendances. Elles fournissent une indication de direction de développement aux urbanistes et architectes leur permettant une conception bioclimatique tout en conservant une liberté de conception²³. En effet, ce processus se situe dans un objectif de recherche d'optimisation, il est donc nécessaire de simplifier les géométries et les modèles physiques pour obtenir des résultats dans des temps cohérents dans le processus de conception urbaine et architecturale (on peut citer par exemple l'absence de prise en compte de l'évapotranspiration de la végétation, ou encore de l'implication de la pollution). De même, l'étude de l'influence de la façade sur le confort intérieur s'est particulièrement développée ces dernières années pour les mêmes raisons (même si ce sujet a été plus amplement étudié que le confort thermique urbain). Or, il semble que l'influence des morphologies de façade sur les microclimats urbains constitue aujourd'hui un champ de recherche en développement, encore peu intégré aux pratiques courantes de conception.²⁴

Ces différents constats ont soulevé plusieurs interrogations : Comment la morphologie urbaine impacte-t-elle les microclimats ? Quels en sont les paramètres majeurs ? Quel est l'impact de l'orientation des rues ? Mais aussi, comment la façade influe-t-elle sur ce phénomène ? Comment quantifier l'impact des microclimats sur les individus ? Après avoir effectué ces recherches, certaines de ces questions ont trouvé des réponses. Cependant, l'impact de la façade sur les microclimats reste encore peu étudié.

1.3 Problématique

Les interactions entre l'échelle de la ville et du quartier ont été particulièrement étudiées . En effet, l'étude de cette interaction permet de mieux définir les microclimats à l'échelle de la ville, et de comprendre l'impact global de l'activité anthropique sur le climat. A l'inverse, l'étude de l'interaction entre le tissu urbain et la morphologie des façades n'est pas encore très développée. Cela s'explique par la difficulté de catégoriser le rapport entre tissu urbain et morphologie de façade, le nombre de scénarios possibles étant trop important²⁵. Mais le rapport entre ces deux échelles me semble aussi pertinent que celui entre la ville et le quartier. La morphologie d'une façade et le climat modifient les paramètres de modélisation des microclimats à micro-échelle²⁶, tandis que l'échelle locale est influencée par la morphologie urbaine puisque le tissu urbain a un impact sur le climat. Cela se répercute sur la modélisation à micro-échelle.

Ainsi l'étude menée dans ce mémoire a pour objectif d'améliorer la compréhension de l'influence mutuelle de l'échelle locale et de la micro-échelle dans la formation des microclimats urbains.

Améliorer la compréhension de cette interaction permettra d'identifier les potentiels espaces publics où règne un inconfort thermique. De plus ,les nouvelles normes imposent des remises à niveau énergétiques sur les bâtiments n'étant pas assez performants thermiquement parlant. Ces bâtiments qui sont considérés comme des « passoires thermiques » sont aussi les bâtiments les plus touchés par les microclimats comme vu dans la partie 3.1.2 . Cette rénovation thermique peut impliquer la modification de l'enveloppe du bâtiment.

²³ Marsault, X. (2018). *Écoconception générative urbaine*

²⁴ Fabbri, K., Gaspari, J., Costa, A., & Principi, S. (2022). The Role of Architectural Skin Emissivity Influencing Outdoor Microclimatic Comfort : A Case Study in Bologna, Italy. *Sustainability*, 14(22), 14669.

²⁵ Dogan, T., & Reinhart, C. (2017). Shoeboxer : An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. *Energy and Buildings*, 140, 140-153.

²⁶ Bouyer, J., Musy, M., Huang, Y., & Athamena, K. (2011). *Mitigating Urban Heat Island Effect by Urban Design : Forms and Materials* (p. 164-181).

Dans quelle mesure les différentes géométries de façades influent sur les microclimats urbains, et donc sur le confort thermique, en fonction des morphologies urbaines ?

Hypothèse

Les hypothèses éprouvées lors de cette étude sont :

- Plus la surface d'une façade est vitrée plus le confort thermique diminue.
- Les façades avec une dispersion des fenêtres horizontales détériorent davantage le confort thermique urbain que les façades avec une dispersion des fenêtres horizontales

1.4 Méthode Générale :

Pour répondre à la problématique et confronter les hypothèses formulées. Nous simulerons une quantité significative de scénarios pour étudier l'influence mutuelle du tissu urbain et des façades sur les microclimats urbains, chaque configuration sera étudiée selon les 4 orientations (Nord, Sud, Est et Ouest). Les logiciels et plugins utilisés seront :

- Rhinoceros 8 : un logiciel de modélisation 3D.
- Grasshopper : c'est un plugin de Rhinoceros 8 permettant d'effectuer de la conception paramétrique à l'aide d'une programmation visuelle nodale
- LadybugsTools : il s'agit d'un ensemble de plugins de Grasshopper réunissant :
 - Ladybug analyse les données météo et propose de nombreux composants permettant de les analyser et de les visualiser.
 - Honeybee se décompose en 2 sous parties : Honeybee Radiance qui permet une analyse de la lumière et Honey Bee Energy qui simule les transferts thermiques complexes et la physique du bâtiment
 - Colibri

Etape 1 : Création des configurations étudiées

Pour faire face aux difficultés liées à la quantité de scénarios et à la complexité programmatique, les scénarios seront composés de trois tissus urbains différents dans lesquels une unique façade sera modifiée. Les bâtiments composant le tissu urbain seront des murs lisses permettant d'influencer au minimum l'étude de la façade qui sera modifiée. Cette façade sera composée de différents modules permettant de modéliser un nombre important de morphologies différentes. Mais le nombre de combinaisons de modules avec ce système étant trop important, une étude méthodologique de la composition des façades étudiées permettra d'aboutir à une solution représentant un nombre raisonnable de scénarios.

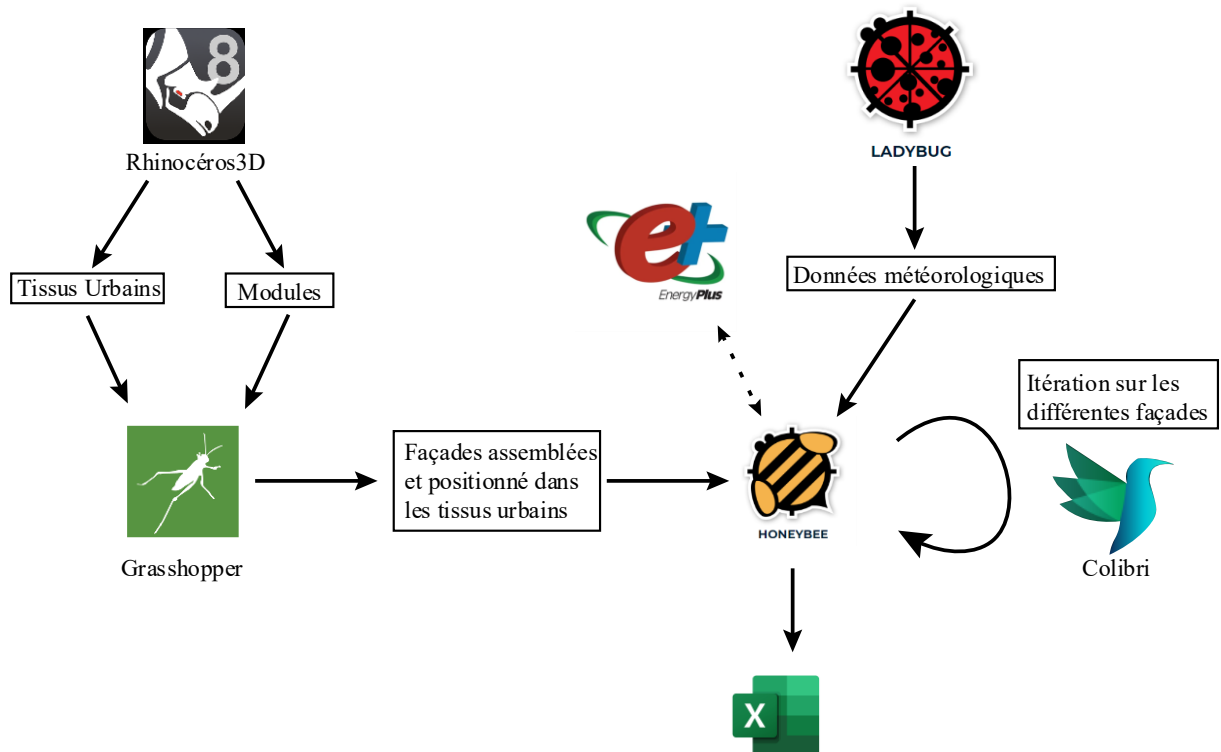
Les modules et les tissus urbains seront définis sur Rhino.

Etape 2 : Simulation des microclimats pour chaque configuration

Une fois les différentes combinaisons définies, une analyse quantitative sera effectuée sur

chacune d'entre elles. Cette analyse prendra la forme d'une heatmap (carte thermique). ayant pour paramètre l'UTCI (Universal Thermal Climate Index). Les données météo choisies pour cette étude proviendront d'une station météo se situant dans le sud de la France, à Saint-Raphaël, boulevard du sémaphore et prendront la forme de fichiers EPW.

Les données météo seront extraites depuis internet sur Grasshopper à l'aide de Ladybug. Les géométries (modules et tissus urbains) seront converties en objet Honeybee. Ce plugin possède nativement des objets « mur extérieur » et « fenêtre » permettant d'associer aux géométries des propriétés physiques qui leur sont propres (Conductivité, thermique, capacité thermique...). Les modules seront assemblés en une façade suivant la méthodologie choisie puis combinés au tissu urbain pour calculer les heatmaps UTC



2 ETAT DE L'ART

2.1 Définition du confort thermique

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'impact morphologique de la façade sur le confort extérieur en fonction du tissu urbain. Il est donc important de définir précisément comment caractériser le confort thermique d'un individu. La notion de confort thermique est simple à comprendre, mais peut être difficile à quantifier de manière précise, puisqu'il s'agit d'un état de satisfaction psycho-physique d'un individu face aux paramètres extérieurs. Ainsi, la sensation de confort est subjective, car propre à chaque personne. Un individu est dans une situation de confort thermique lorsqu'il est à l'équilibre thermique. Dans ce cas, l'accumulation thermique est nulle et le corps laisse les mécanismes de thermorégulation interne (vasoconstriction pour une sensation de froid et vasodilatation pour une sensation de chaud) et externes (changement de postures, d'activités, de vêtements) inactifs.

L'équilibre thermique d'un individu s'exprime par le bilan d'énergies suivant²⁷ :

$$S = M - W - Esk - Rres - C - R - Ck$$

- $S [W/m^2]$ = variation d'énergie interne du corps humain dans l'unité de temps (De manière évidente, à l'équilibre $S=0$)
- $M [W/m^2]$ = production de chaleur par le corps (métabolisme), toujours positif
- $W [W/m^2]$ = travail mécanique échangé avec l'environnement extérieur (activité effectuée), négligeable
- $Esk [W/m^2]$ = pertes thermiques latentes par évaporation par la peau. Ces pertes dépendent de l'humidité absolue de l'air, la température de l'air, la température de la peau, la vitesse relative de l'individu par rapport à l'air, les vêtements portés par l'individu et le pourcentage de peau mouillée par la sueur)
- $Rres [W/m^2]$ = Sont les pertes thermiques dues à la respiration (saturation de l'air), en partie pertes sensibles et en partie pertes latentes. Ces pertes varient en fonctions de l'activités effectuées, humidité absolue de l'air et la température de l'air)
- $C [W/m^2]$ = échanges (pertes et gains) thermiques (sensibles) par convection avec l'air environnant. Ces échanges varient en fonctions de température de la surface extérieur du corps habillé, de la température de l'air, de la vitesse relative individu-air et du coefficient lié à l'aire des vêtements)
- $R [W/m^2]$ = échanges (pertes/gains) thermiques par radiation. Ces échanges varient en fonctions de la température de la surface externe du corps couvert et de la température moyenne radiante)
- $Ck [W/m^2]$ = échanges thermiques par conduction, négligeable

On observe que le confort thermique dépend de deux types de paramètres, les paramètres liés à l'individu et ceux à l'ambiance thermique.

Les paramètres liés à l'individu :

- $M [W/m^2]$ Le métabolisme énergétique
- $Icl [Clo]$ l'isolement thermique vestimentaire. L'isolement n'apparaît pas directement dans la formule, en effet les vêtements agissent comme une résistance, Icl est donc un paramètre de R , Esk , C .

Ces deux paramètres, bien qu'importants, seront toujours peu considérés, car de manière évidente indépendants des caractéristiques qui nous intéressent pour l'étude des microclimats. Ils sont pris comme des constantes dans les articles lus²⁸

²⁷ Gao, S., Li, Y., Wang, Y. A., Meng, X. Z., Zhang, L. Y., Yang, C., & Jin, L. W. (2017). A human thermal balance based evaluation of thermal comfort subject to radiant cooling system and sedentary status. *Applied Thermal Engineering*, 122, 461-472.

²⁸ Salamanca, F., & Martilli, A. (2010). A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate

Les paramètres liés à l'ambiance thermique sont :

- Ta La température de l'air environnant (°C)
- Tmr Température moyenne de rayonnement (°C)
- va La vitesse relative de l'air (m/s)
- Tr Température radiante (°C)
- φ Humidité relative de l'air, soit le pourcentage de la pression partielle de la vapeur d'eau sur la pression de saturation de la vapeur d'eau à la même température

De cet équilibre, on peut extraire différents indices ou plages de valeurs pour définir le confort thermique. Cependant le confort thermique est divisé en deux catégories, le confort thermique extérieur et le confort thermique intérieur. Cette distinction permet de mieux prendre en compte les environnements dans lesquels ils sont évalués. Par exemple, pour l'extérieur, une meilleure prise en compte de l'impact de la ventilation urbaine, ou pour l'intérieur des CVC (climatisations, ventilations et chauffages).

Comme dit précédemment le confort thermique reste subjectif puisqu'il est basé sur un ressenti propre à chaque individu. Cette subjectivité peut être prise en compte en définissant des plages de valeurs selon lesquelles on peut se considérer en confort thermique. L'un des indices les plus utilisés pour étudier le confort thermique est le PMV.

Le PMV²⁹ (Predicted Mean Vote), correspond au vote moyen prévisible de la sensation de confort thermique sur un grand groupe de personnes. Il utilise une échelle allant de -3 à 3.

PMV	Sensation thermique
+3	Chaud
+2	Tiède
+1	Légèrement tiède
0	Neutre (Confort)
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

Cet indice utilise les 4 paramètres liés à l'ambiance thermique définis précédemment, et les deux paramètres liés à l'individu (le métabolisme M et la résistance des vêtements I_{cl}). Le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) est la prévision quantitative du pourcentage de personnes insatisfaites thermiquement. Les conditions de confort thermique se trouvent entre: $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$. Ce qui correspond à un PPD inférieur à 10 % (donc moins de 10% du groupe votant pour évaluer leur sensation de confort thermique se sont sentis en inconfort). Ces deux indices ne sont valables que pour des conditions en intérieurs. Il existe une adaptation de ces indices à des endroits semi-ouverts nommé OPMV (Open Predicted Mean Vote) et OPPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).

Pour évaluer le confort thermique en milieu urbain, deux indices de référence sont principalement utilisés dans la littérature scientifique : le PET (*Physiological Equivalent Temperature*) et l'UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) :

Le PET³⁰, Physiological Equivalent Temperature, est un indice de température équivalente. Cette température correspond à la température de l'air dans un environnement intérieur de référence standard où une personne aurait le même bilan thermique que dans l'environnement extérieur étudié. Dit autrement, la température PET correspond à la température que l'on ressentirait assis dans une pièce intérieure.

L'environnement de référence est défini à partir des paramètres standardisés suivants :

simulations—Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4), 345-356.

²⁹ ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

³⁰ Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75.

- Vitesse de l'air (v_a) : fixée à 0,1 m/s.
- Rayonnement : La température radiante moyenne (T_{mrt}) est égale à la température de l'air (T_a).
- Humidité : La pression de vapeur est fixée à 12 hPa.
- Paramètres humains : L'isolement vestimentaire est fixé à 0,9 clo et le métabolisme à 80 W (personne assise)

Ces données permettent de résoudre l'équation de l'équilibre thermique d'un individu :

$$S = M - W - Esk - Rres - C - R - Ck$$

Cette méthodologie permet d'obtenir une classification du stress thermique

PET (en degrés Celsius °C)	Classe de stress thermique	Sensation subjective
<4	Stress froid extrême	Très froid
4-8	Fort stress froid	Froid
8-13	Stress froid modéré	Frais
13-18	Léger stress froid	Légèrement Frais
18-23	Pas de stress thermique	Neutre (confort)
23-29	Léger stress chaud	Légèrement tiède
29-35	Stress chaud modéré	Tiède
35-42	Fort stress chaud	Chaud
>42	Stress chaud extrême	Très chaud

Tableau 1 : classification du stress thermique pour le PET

L'UTCI,³¹ Universal Thermal Climate Index est aussi un indice correspondant à une température équivalente. Il reprend le même principe que le PET à la différence que l'UTCI est un modèle dynamique. Dans le calcul du PET, les données d'entrées étaient fixes. Avec l'UTCI, les données d'entrées changent. pour calculer l'UTCI on n'utilise donc plus un environnement de référence standard, mais un individu de référence.

L'individu de référence est caractérisé par :

- Un niveau d'activité de marche légère, soit 135 W/m^2 . Le métabolisme est défini en Watts par m^2 , permettant une meilleure définition pour une activité dynamique.
- La résistance des vêtements est adaptative, en fonction de la température ambiante et varie de 0,5 à 1 Clo

Les paramètres d'entrée de l'environnement sont les variables climatiques réelles, les mêmes qui permettent de définir le PET.

- V_a (m/s) la vitesse de vent qui est une donnée mesurée à 1,7 mètres qui correspond à la hauteur de l'individu standard.
- T_{mrt} (°C) qui est calculé en décomposant le rayonnement en quatre flux :
 - Rayonnement solaire direct.
 - Rayonnement solaire diffus (ciel).
 - Rayonnement infrarouge des surfaces environnantes (façades du tissu urbain, sol).
 - Rayonnement infrarouge descendant (atmosphère).
- T_{mrt} (°C)
- Φ Humidité relative (%)

³¹ Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI - Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421-428.

De surcroît, l'individu de référence est modélisé selon le modèle thermique FIALA. Ce modèle simule la régulation thermique physiologique de l'homme (tremblements, transpiration, vasomotricité : ajustement de la circulation sanguine) et l'impact des données d'entrées définissant l'environnement sur les contraintes thermique de l'individu standard, comme le refroidissement par humidité provoqué par l'évaporation de la sueur. Ce modèle permet de déterminer la température cutanée et centrale de l'individu standard améliorant la précision de l'évaluation du confort thermique. Le modèle FIALA et l'adaptation des paramètres vestimentaires fait de l'UTCI un indice universel qui est pertinent peu importe le climat du milieu considéré tout en prenant en considération certains paramètres subjectifs présents lorsque le microclimat a été défini³². En outre, à l'instar du PET, l'UTCI possède aussi une échelle standard de classification du stress thermique ressenti,

UTCI (en degrés Celsius °C)	Classe de stress thermique
<40	Stress froid extrême
-40 < -27	Fort stress froid
-27 < -13	Stress froid modéré
-13 < 0	Léger stress froid
0 < 9	Pas de stress thermique
9-26	Pas de stress thermique
26 < 32	Stress chaud modéré
32 < 38	Fort stress chaud
38 < 46	Très fort stress chaud
>46	Stress chaud extrême

Pour ces raisons, l'UTCI est l'indice retenu pour cette étude.

Un autre indice qui sera couplé avec l'UTCI dans cette étude est le degré-heure³⁴ noté (°C · h). Cet indice originellement utilisé pour le confort intérieur, permet de quantifier le stress thermique cumulé sur une période donnée (intensité × durée). Il est défini ainsi :

$$DH = \sum_{t_i \in D} (T - T_{seuil}) \times t_i$$

- T (°C) est la température relevée, pour la RE2020, T est la température opérative, un autre indice de confort thermique intérieur
- T_{seuil} (°C) est une température seuil qui définit la limite entre le confort et l'inconfort
- D l'ensemble des heures pour lesquelles $T > T_{seuil}$, égale à 26°C, ce qui correspond à la limite de confort de l'UTCI.

Par sa définition, le degré-heure est sensible aux périodes caniculaires. En effet, une heure où la température est de 40 degrés aura un DH de 14°C · h tandis qu'une température de 28 le DH sera égale à 2 °C · h

Combiné à l'UTCI, cet indice permettra de calculer les degrés-heure d'inconfort thermique ressenti

2.2 Les différents paramètres influençant les microclimats

³² Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429-441.

³³ Krüger, E., & Di Napoli, C. (2022). Feasibility of climate reanalysis data as a proxy for onsite weather measurements in outdoor thermal comfort surveys. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 1-14.

³⁴ Ministère de la Transition Écologique. (2020). *Méthode de calcul Th-BCE 2020 : Règles Th-Bâtiment*. Annexe III : Confort d'été. CSTB.

2.2.1 Paramètres morphologiques

Les paramètres morphologiques décrivent la volumétrie de la ville et son implantation. Leur influence sur les microclimats s'exprime principalement à travers deux mécanismes physiques : l'aéroulque et l'échange radiatif.

D'un point de vue aéroulque, l'implantation des bâtiments agit comme une résistance qui s'oppose à l'écoulement du vent. Ce phénomène est quantifié par la longueur de rugosité z_0 et se traduit par deux phénomènes :

- Le ralentissement du vent près du sol (particulièrement important au niveau piéton).
- La déviation et la turbulence des flux d'air au sein des canyons urbains.

Ainsi une forte rugosité limite la ventilation urbaine, réduisant le rafraîchissement par convection, l'évacuation de la chaleur et de l'air pollué.

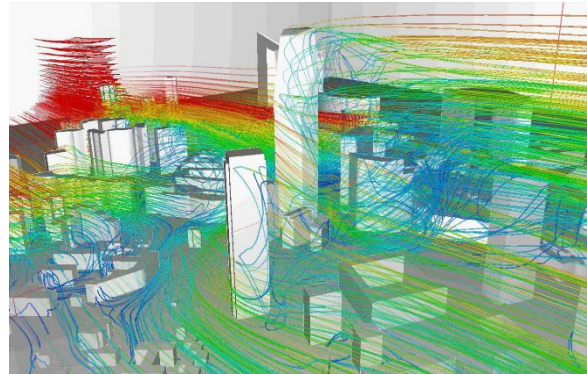


Figure 5 Exemple de l'aerodynamise d'un tissu urbain.

Source : <https://broadtechengineering.com/cfd-consulting/>

D'un point de vue radiatif, la morphologie conditionne le flux incident de rayonnement solaire et la capacité de refroidissement nocturne. La géométrie urbaine, combinée aux propriétés thermiques des matériaux, favorise le piégeage radiatif. (Comme nous l'avons vu dans la partie 2.1 Ces deux phénomènes sont les principales causes de la formation des ICU.)

La quantification de ces phénomènes s'effectue par des indices traduisant les propriétés morphologiques du tissu urbain permettant de mesurer son impact sur les microclimats urbains d'indices spécifiques.

- L'orientation du tissu est un des paramètres principaux car elle conditionne la durée d'ensoleillement des parois et l'alignement des vents dominants (donc les échanges radiatifs et les flux d'airs).
- L'étude de la densité du bâti. En effet, un bâti dense aura tendance à favoriser l'ombrage au sein du tissu urbain en journée, à limiter la ventilation urbaine et à augmenter le stockage thermique urbain
- Le Facteur de Vue du Ciel (SVF) : Indice décrivant la proportion du ciel visible depuis un point donné.

Pour illustrer ces différents paramètres nous utiliserons le tissu urbain suivant qui sera soit représenté soit en plan, soit en axonométrie selon l'indice expliqué.

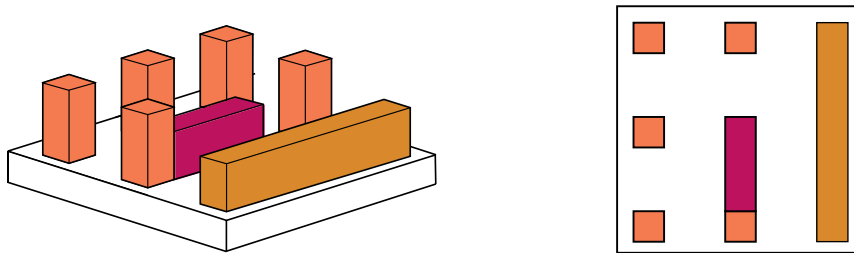
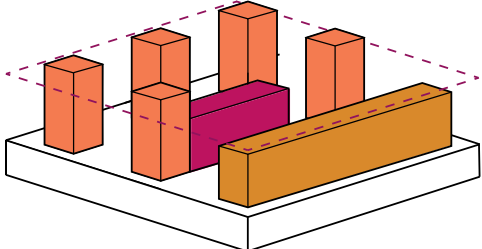
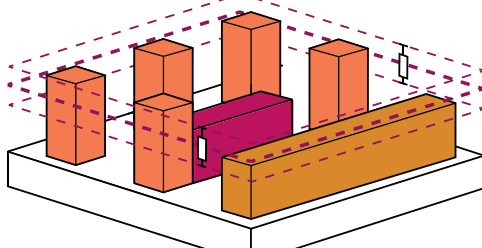
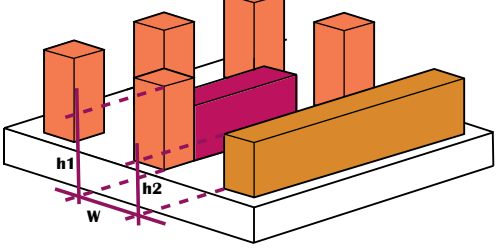
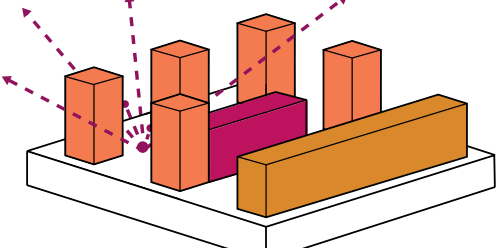
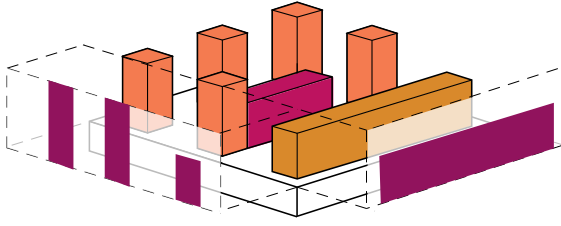


Figure 6 : Axonométrie et plans schématisés du tissu urbain servant à illustrer les différents paramètres. Source : Auteur

Tableau 2- Paramètres morphologiques urbains ayant un impact sur les microclimats urbains Tableau provenant de Masson, V., Heldens (2020)		
Paramètres		Commentaire
Fraction de bâtiments λ_p		<p>Surface des bâtiments S_{bld}, vue de dessus, divisée par la surface horizontale de la zone urbaine considérée S_{hor}. Plus λ_p est élevé plus le tissu urbain est dense, limitant la ventilation</p>
Fraction des surfaces perméables et des routes		<p>Même principe que pour λ_p, mais pour les surfaces perméables et les surfaces de route/imperméables. ($1 - \lambda_p$)</p>
Densité des murs λ_w		<p>Rapport entre la surface des murs en contact avec l'atmosphère S_w et la surface horizontale urbaine, soit $\lambda_w = S_w / S_{hor}$. Ce paramètre quantifie le potentiel de stockage thermique et de convection</p>

<p>Hauteur moyenne des bâtiments, h</p>		<p>La hauteur moyenne h un paramètre principalement utilisé dans les modèles simulant l'échelle de la ville ou du quartier</p>
<p>σ_h</p>		<p>Écart type de la hauteur des bâtiments.</p>
<p>h/w</p>		<p>Rapport d'aspect des canyons urbains (hauteur des bâtiments divisée par la largeur du canyon, h/w)</p>
<p>Ψ</p>		<p>Facteur de vue du ciel (Ψ), qui décrit la compacité de la ville.</p>
<p>Densité de la surface frontale λ_f</p> <p>Porosité frontale bâti</p>		<p>λ_f (surface violet) correspond à la surface des murs exposés au vent, normalisée par la surface. La porosité de surface bâtie est définie par $1 - \lambda_f$. (surface blanche). Ce paramètre sera utilisé dans notre simulation pour estimer le vent dans nos contextes urbains</p>

Comme illustré dans le tableau, h/w et Ψ sont des facteurs clés dans la paramétrisation de l'influence morphologique urbaine sur les microclimats. Leur différence repose sur le fait que le facteur de vue du ciel Ψ prend en compte l'implantation et la géométrie des bâtiments, là où le h/w suppose une rue infinie et continue.

Tous ces paramètres peuvent être compilés de manière indépendante à la micro-échelle, qui est l'échelle de l'étude. A l'échelle mésoscopique, les cellules de calculs étant de grande taille, les géométries utilisées sont simplifiées. Il est donc impossible de prendre en compte les interactions mutuelles entre les bâtiments. Ces problèmes d'échelles causent la perte d'indépendance de ces paramètres.

2.2.2 Paramètres Anthropiques

L'être humain doit être considéré comme un système thermique actif. Par sa température interne (37°C) et son évapotranspiration, il dégage en permanence de la chaleur sensible et de la chaleur latente dans son environnement.

Les activités et rejets de chaleur de chaque bâtiment, selon son usage et ses horaires d'occupation, influencent le microclimat urbain notamment par l'activité interne (appareils électriques, cuisine, climatisation). Bien que ces flux anthropiques ne soient pas modélisés dans cette étude, leur existence est un fait établi : ils s'ajoutent à la charge thermique accumulée par les parois³⁵.

2.2.3 Paramètres architecturaux

Les paramètres les plus importants incluent :

L'albédo est la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire incident. Il est défini comme le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire totale reçue. Il est souvent noté α ou alb et étant un rapport, sa valeur sera comprise entre 0 et 1. Plus celui-ci sera élevé plus le matériau considéré sera réfléchissant. Ainsi, un matériau avec un albédo élevé aura un fort pouvoir réfléchissant et donc aura tendance à avoir une température de surface plus faible. (ici noté comme réflectance)

L'absorbance (A) est en quelque sorte le complémentaire de l'albédo, est la capacité d'une surface à absorber le rayonnement solaire incident. Cette grandeur est liée à une autre grandeur également très importante dans les bilans d'énergie, l'émissivité (ϵ) qui désigne la capacité d'un matériau à émettre l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnement thermique infrarouge.

La transmittance est le rayonnement transmis, elle sera nulle pour les toits, les routes et les murs, mais rentrera en compte pour les fenêtres (c'est un paramètre déterminant pour le confort extérieur vu qu'il renvoie directement l'énergie dans l'environnement extérieur)³⁶

Ces trois valeurs étant des ratios, elles ne possèdent donc pas d'unité.

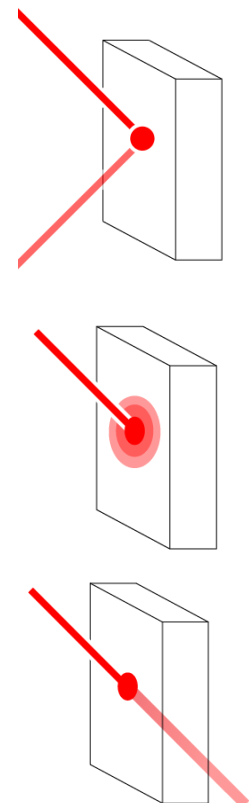


Figure 7 : Schémas décrivant respectivement l'albédo, l'absorbance et la transmittance

³⁵ Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., & Clappier, A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4), 331-344

³⁶ 2021 ASHRAE handbook. *Fundamentals* (Inch-pound edition). (2021). ASHRAE.

En plus de son comportement face aux rayonnements reçus , il est important de prendre en compte les propriétés thermiques des matériaux. Pour cela, on utilise 2 grandeurs :

La conductivité thermique (λ) qui est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction (Ainsi, un matériau isolant aura une très faible conductivité thermique).

La capacité thermique (C) caractérise la quantité de chaleur nécessaire que doit recevoir le matériau pour que sa température augmente. Un matériau avec une forte capacité thermique emmagasiner une importante quantité de chaleur pendant la journée qui sera relâchée la nuit.³⁷

Ces paramètres sont à mettre en parallèle avec l'épaisseur des couches des matériaux. Un mur de briques de 50 cm ne stockera pas la même quantité de chaleur qu'un mur de briques de 20 cm. Il faut donc prendre en compte l'épaisseur de chaque couche de l'élément étudié, par exemple dissocier pour une façade l'isolant et le bardage car ils n'ont pas la même résistance thermique (épaisseurs de la couche/ conductivité thermique).

Comme vu précédemment, le rayonnement solaire joue un rôle important dans les considérations énergétiques des bâtiments. Pour une paroi opaque, il n'y a pas de transmittance, mais pour les fenêtres ce n'est pas le cas. En plus d'être une partie du bâtiment qui n'aura pas la même résistance thermique que le reste de la façade. Il est donc important de connaître la fraction de fenêtres sur les façades , leur position sur la façade et à quelle orientation elles sont exposées.

Cela peut être résumé grâce a des ratios :
Pour les fenêtres le ratio appelé Window-Wall-Ratio³⁸ (WWR) qui est la surface totale de fenêtre sur la surface totale de la façade.

2.2.4 Végétation urbaine

En plus du cadre bâti, la végétation et la nature des sols jouent un rôle thermique majeur. Comme vu précédemment, l'eau possède une capacité thermique élevée. Tout élément favorisant la rétention d'eau en ville contribue donc à diminuer la température ambiante par trois mécanismes principaux :

- L'évaporation du sol nu
- La rétention d'eau dans les substrats
- L'évapotranspiration des végétaux.

Ces processus consomment de l'énergie, ce qui participe au refroidissement de l'air urbain. Des études ont montré que la présence de végétation peut réduire la température de l'air ambiant de plusieurs degrés grâce à ce mécanisme³⁹.

Tout comme les murs d'un bâtiment, les sols possèdent leurs propres caractéristiques physiques impactant le confort. Le sol urbain peut être décomposé en différentes strates géologiques ou anthropiques (remblais, asphalte, terre végétale). Chacune de ces couches possède une

³⁷ 2021 ASHRAE handbook. Fundamentals (Inch-pound edition). (2021). ASHRAE.

³⁸ Ratio fenêtre/mur

³⁹ Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment : Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-76

conductivité et une capacité thermique propre. Les surfaces minérales imperméables (béton, asphalte) stockent massivement la chaleur le jour pour la relâcher la nuit. Tandis que les sols naturels présentent une inertie thermique plus favorable au rafraîchissement nocturne⁴⁰

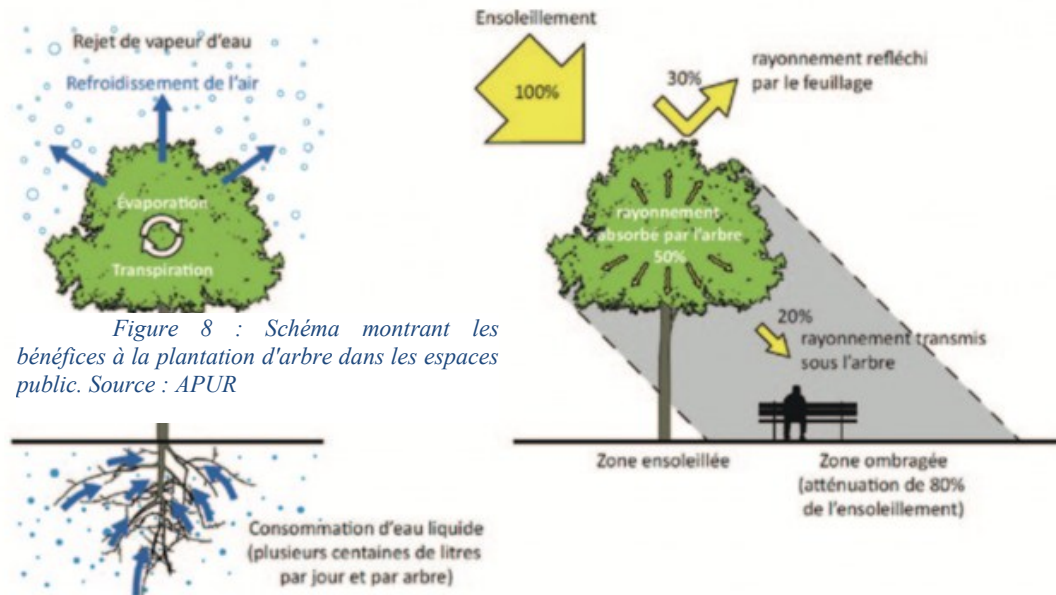


Figure 8 : Schéma montrant les bénéfices à la plantation d'arbre dans les espaces publics. Source : APUR

En outre les arbres, par leur hauteur, leur largeur et la densité de leur feuillage modifient la géométrie du canyon urbain en augmentant l'ombrage et donc l'interception du rayonnement solaire.⁴¹ Cependant les arbres ne sont pas toujours en faveur du confort urbain. La végétation de grande hauteur peut empêcher une ventilation urbaine convenable empêchant l'évacuation de l'air pollué de la ville⁴².

⁴⁰ Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of Increasing Urban Density on Local Climate : Spatial and Temporal Variations in the Surface Energy Balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(4), 477-493.

⁴¹ La, D., Dai, Y., Li, Y., Ge, T., & Wang, R. (2010). Study on a novel thermally driven air conditioning system with desiccant dehumidification and regenerative evaporative cooling. *Building and Environment*, 45(11), 2473-2484.

⁴² Santiago, J.-L., Martilli, A., & Martin, F. (2017). On Dry Deposition Modelling of Atmospheric Pollutants on Vegetation at the Microscale : Application to the Impact of Street Vegetation on Air Quality. *Boundary-Layer Meteorology*, 162(3), 451-474.

3 ETAT DE L'ART METHODOLOGIQUE

Comme expliqué précédemment, il existe différentes échelles de microclimats. Bien que les paramètres influant sur les différentes échelles soient liés, il n'est pas pertinent d'étudier ces échelles de la même manière pour plusieurs raisons. À grande échelle, les microclimats ne sont pas significativement affectés par des phénomènes localisés, dont l'impact reste limité à des zones spécifiques. Par ailleurs, intégrer une multitude de phénomènes ponctuels dans des modèles à grande échelle engendrerait un volume d'informations trop important. Cela pourrait rendre les simulations inexploitable, en raison de temps de calcul excessifs et d'une complexité inutile. Comme vu dans la partie 2.1 on peut diviser les microclimats en trois échelles, la ville, le quartier et le bâti.

Même si, pour cette étude, nous nous concentrons sur les interactions des microclimats à l'échelle du bâti avec les tissus urbains et les morphologies de façades, il est également essentiel de comprendre le fonctionnement des modélisations des microclimats aux autres échelles

3.1 L'échelle de la ville

L'échelle mésoscopique (MM), peut couvrir quelques kilomètres carrés jusqu'à plusieurs centaines voire milliers de kilomètres carrés, la taille des cellules composant la grille varie généralement de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Chaque cellule uniformise les propriétés physiques, atmosphériques, géographiques, l'occupation et l'usage du sol. Cette uniformisation dépend du modèle étudié et permet de faciliter et de simplifier (ce qui implique forcément des pertes de précision) la quantité nécessaire de calculs à effectuer pour étudier de telles surfaces. Cette échelle mésoscopique permet d'analyser des processus climatiques régionaux ou globaux, comme la distribution des îlots de chaleur urbains ou les interactions entre zones urbaines et rurales⁴³. Il est important de comprendre comment cette échelle fonctionne, en effet les données d'entrée météorologiques et les conditions aux bords utilisés dans les modèles à l'échelle du quartier ou du bâtiment proviennent en partie des modèles à l'échelle mésoscopique. Or la modélisation à cette échelle nécessite des simplifications. Ce qui engendre des imprécisions allant jusqu'à des incohérences avec la réalité observée. Comprendre le fonctionnement de cette échelle permettra de déterminer si les éventuels écarts observés lors des expériences peuvent provenir des données d'entrées fournies. Parmi les différentes simplifications l'occupation/utilisation du sol est la principale, elle permet d'extrapoler les informations manquantes nécessaires pour le modèle.

L'occupation/utilisation du sol (« Land Cover/ Land uses »)

L'un des moyens les plus simples de simuler un microclimat à grande échelle est d'effectuer un maillage de la zone à simuler et d'attribuer à chaque cellule de ce maillage des propriétés physiques. C'est cette méthode qui est utilisée dans la classification de l'occupation des sols. Ici, le sol désigne un cadre plus large, il représente aussi bien un environnement urbain qu'un lac ou une forêt. Les caractéristiques des sols (tel que leur perméabilité) vont influencer les échanges thermiques avec l'atmosphère et donc les microclimats. L'intérêt de cette classification réside dans sa capacité à synthétiser des situations urbaines complexes et à combler les manques de données. C'est pour cela que le sol est divisé en différentes classes. Un modèle a permis de standardiser cette approche, il s'agit de la typologie LCZ⁴⁴ Cette standardisation distingue deux milieux, le milieu urbain et le milieu naturel. Le milieu urbain se décompose en 10 classes différentes :

⁴³ Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200-206.

⁴⁴ Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.



Figure 9 Classement LCZ source : Stewart and Oke, 2012

- -LCZ1 :Bâtiments hauts compact
- -LCZ2 : Bâtiments hauts ouverts
- -LCZ3 : Bâtiments de hauteur moyenne compacts
- LCZ4 : Bâtiments de hauteur moyenne ouverts
- LCZ5 : Bâtiments bas : compacts
- LCZ6 : Bâtiments bas : ouverts
- LCZ7 : Industrielle dense
- LCZ8 : Industrielle ouverte
- LCZ9 : Mixte
- LCZ10 : Grands entrepôts

Tandis que les zones naturelles se décomposent en 7 classes différentes :

- LCZ A : Arbres denses
- LCZ B : Arbres dispersés
- LCZ C Arbustes/Buissons
- LCZ D Végétation basse
- LCZ E Herbes/Prairie
- LCZ F Sol nu (Zones sans végétation)
- LCZ G Plan d'eau

Ces classes peuvent être découpées en sous-catégorie par exemple, la présence d'eau peut être découpée en rivière, lac, mer. Le niveau de précision employé dans chaque classe dépend donc du modèle utilisé et des différents paramètres d'entrées qui lui sont fournis à l'aide de collectes d'informations (tel que la télédétection, crowdsourcing etc)⁴⁵. En plus de cette subdivision de chaque classe, ce type de modélisation peut être enrichie par d'autres sous-modèles qui sont des simplifications des modèles élisant les microclimats à l'échelle du quartier.⁴⁶

3.2 L'échelle du quartier

Cette échelle s'entend d'une centaine de mètres à quelques kilomètres, elle permet d'étudier avec précisions les flux (thermiques, air, pollution etc) et leurs interactions avec les différents événements urbains⁴⁷. On peut distinguer deux familles de modèles, les modèles aérauliques (CFD) et les modèles thermiques. Les modèles CFD ont un coût computationnel trop important, ce qui rendrait l'étude de la combinaison de multiples façades avec différentes morphologies urbaines beaucoup trop longue. Nous nous concentrerons donc sur une approche basée sur les bilans d'énergie et les transferts radiatifs.

Les modèles basés sur des bilans d'énergie thermique peuvent se distinguer en deux catégories majeures :

Les modèles dit de Canopée Urbaine et les modèles à géométrie résolue.

Les Modèles de Canopée Urbaine (UCM) reposent sur une simplification géométrique : le canyon urbain. La ville n'est pas représentée bâtiment par bâtiment, mais par une succession de rues infinies ("canyons") définies par le rapport H/W, Hauteur/Largeur⁴⁸ (paramètre morphologique défini dans la partie 4.2.1). Ils sont utilisés pour étudier les interactions thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère, on peut retrouver 2 familles d'UCM :

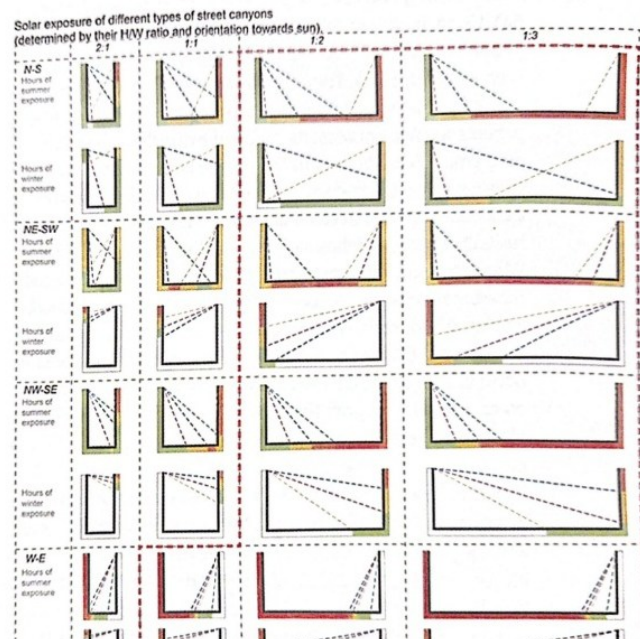


Figure 10 Source *Weather in the City : how design Shapes the Urban Climate*

⁴⁵ Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., ... Zeidler, J. (2020). City-descriptive input data for urban climate models : Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31, 100536.

⁴⁶ Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397.

⁴⁷ Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

⁴⁸ Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

- Les monocouches : les bâtiments sont approximés en une seule entité, le modèle ne prend pas en compte les différentes hauteurs de bâtiments composant le tissu urbain. Les UCM monocouche sont ceux utilisés pour améliorer les modèles des échelles mésoscopiques.⁴⁹

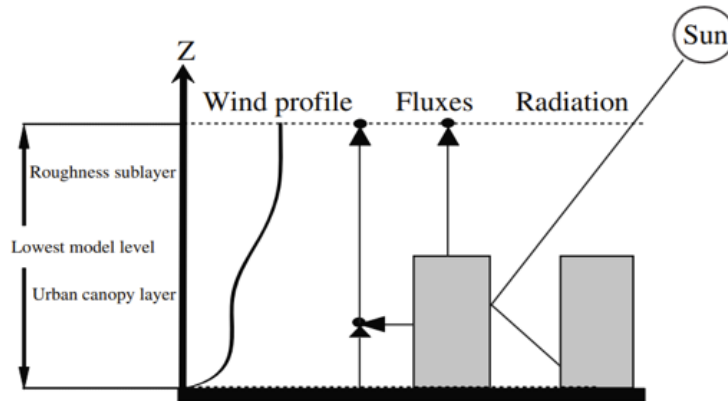
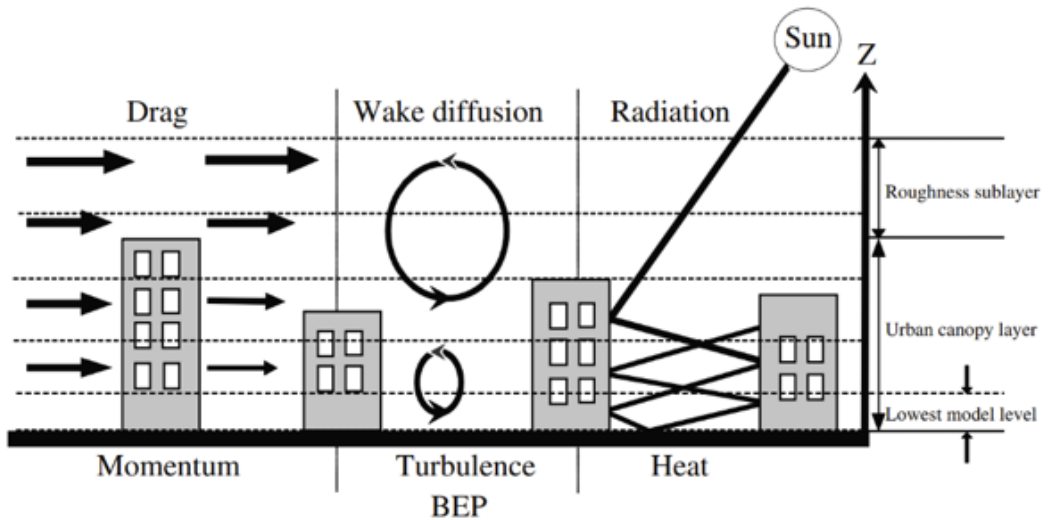


Figure 11 Schéma explicatif des UCM monocouche. Source : Chen, F., *The integrated WRF/urban modelling system : Development, evaluation, and applications to urban environmental problems.*

- Les UCM multicouches discrétisent la hauteur des canyons urbains composant le milieu urbain. Ainsi au lieu d'avoir un environnement avec des propriétés physiques uniformes peu importe la hauteur bâti (comme les UCM monocouche), le contexte urbain est découpé horizontalement, permettant d'adapter les paramètres et les données d'entrées.



selon la hauteur. Ces modèles sont souvent couplé avec des modèles CFD pour une

Figure 12 Scéma explicatif du fonctionnement de la discrétisation d'un UCM multicouche. Source : Chen, F., *The integrated WRF/urban modelling system : Development, evaluation, and applications to urban environmental problems.*

meilleure précision.⁵⁰

⁴⁹ Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397.

⁵⁰ Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K. W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F. P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A. A., & Zhang, C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system : Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273-288.

Le modèle TEB⁵¹ (Town Energy Balance) est l'exemple type de l'UCM monocouche. Il fonctionne selon deux principes :

- Le premier, le canyon urbain, est composé de 3 éléments différents avec des propriétés physiques et des conditions extérieures différentes :
 - Le toit
 - Les murs
 - Les routes
- Le second principe est que ce modèle a une approche statistique : la ville est maillée, et chaque maille se voit attribuer des propriétés morphologiques et physiques moyennes (albédo, densité, H/W). Le modèle résout un bilan d'énergie complet entre la surface urbaine (donc les 3 éléments qui composent le tissu urbain) et l'atmosphère en calculant 5 flux différents déjà définies dans la partie 4 :
 - Le rayonnement net : Bilan des gains solaires et des échanges infrarouges
 - Le flux de chaleur sensible : Chaleur échangée par convection avec l'air du canyon
 - Le flux de chaleur latente : Énergie liée à l'évapotranspiration (végétation, eau).
 - Le flux de stockage : Chaleur emmagasinée dans la masse thermique des matériaux (inertie thermique).
 - Le flux anthropique : Chaleur rejetée par les activités humaines (chauffage, trafic, industrie).

Cependant au vu de ces deux principes de fonctionnement le TEB est peu précis pour rendre

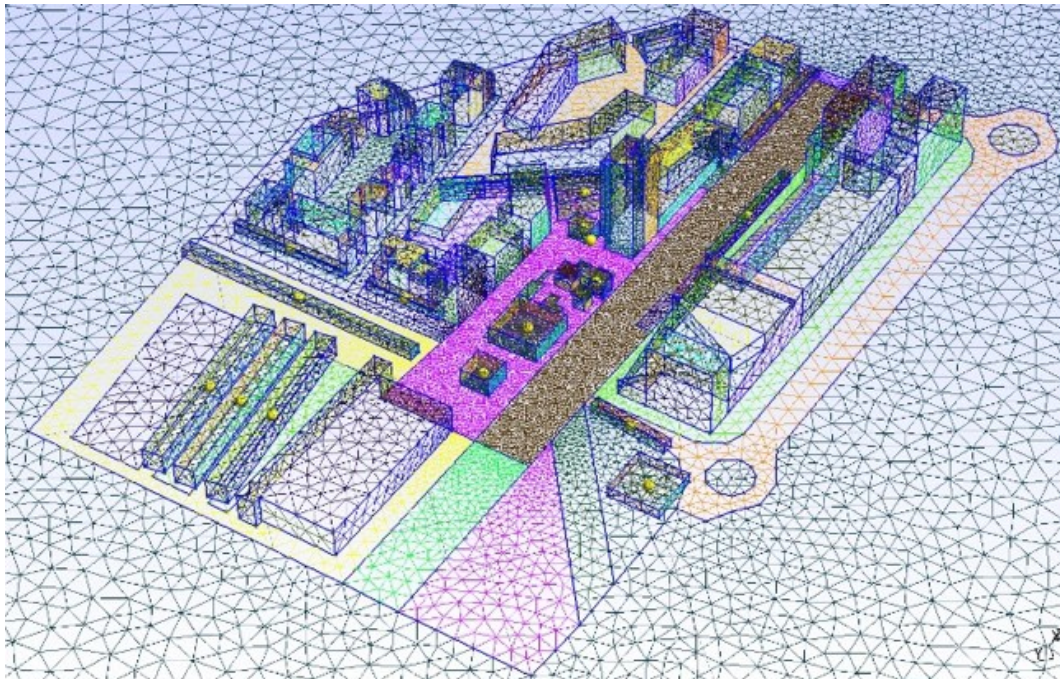


Figure 13 :Exemple de maillage d'un tissu urbain effectué par le modèle SOLENE . Source : [Exemple de maillage \ SOLENE-Microclimat](#)

⁵¹ Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397.

compte des phénomènes locaux ou d'un écart -type important des propriétés morphologiques et physiques au sein d'une maille (comme l'incident du Walkie-Talkie expliqué dans l'avant-propos)

En plus des UCM, il existe un autre type notable de modèle pour les microclimats à l'échelle du quartier, les modèles dits à géométrie résolue. Contrairement à l'approche statistique des UCM, ces modèles discrétisent le contexte urbain en un maillage. Sur chaque maille, un bilan thermique est effectué. Il intègre la réflexion, l'émission et la transmission des rayonnements émis par les bâtiments composant le contexte urbain, et l'énergie des activités anthropiques au sein des bâtiments.⁵²

L'un des modèles de référence est SOLENE-Microclimat développé par le laboratoire de CRENAU de l'école d'architecture de Nantes.

3.3 L'échelle du bâtiment

Cette échelle permet de prendre en compte les particularités architecturales des bâtiments. C'est donc ce niveau de détail qui sera retenu pour modéliser les façades étudiées. Elle est souvent couplée avec les TEB pour une meilleure précision. À cette échelle, les échanges thermiques entre la façade et l'atmosphère sont bien plus précis. Il est donc nécessaire de renseigner précisément les caractéristiques morphologiques telles que la position des fenêtres et des brise-soleils. Enfin, la matérialité de l'enveloppe doit aussi être détaillée, en décomposant les différentes strates constructives qui déterminent les propriétés physiques des façades.

Le modèle utilisé sera EnergyPlus. Ce modèle sert à décrire les échanges thermiques, la consommation énergétique et le comportement des systèmes HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)⁵³. Pour cela, Energy plus a besoin des données d'entrées suivantes :

- Géométrie étudiée
- Données climatiques au travers de fichier météo EPW.
- Occupation et usage du bâtiment
- Systèmes HVAC utilisés.

Avec ces données, le modèle effectue un bilan de masse et de chaleurs à l'équilibre thermique, (soit la somme de la chaleur entrante égale à celle de la chaleur sortante). Pour cela EnergyPlus définit les transferts thermiques comme la somme de multiples paramètres :

- Échanges par conductions
- Échanges par convection naturelle ou forcée (comme la ventilation mécanique)
- Échanges par ventilation et infiltration d'air soit les pertes thermiques causées par le renouvellement de l'air, qu'ils soient volontaires ou non
- Échanges par rayonnement infrarouge,
- Échanges par l'inertie thermique des matériaux,⁵⁴

Par ailleurs, EnergyPlus prend en compte la chaleur latente, soit les transferts d'énergie provoqués par les changements de phase de l'eau et les variations de vapeur. Pour cela, il évalue les apports ou les pertes d'humidité causés par les matériaux, les systèmes CVC et les occupants lors du bilan thermique et massique du bâtiment.

Ce modèle est par nature dynamique. À chaque pas de temps (de 10 à 60 minutes), les conditions météorologiques sont recalculées en prenant en compte les bilans d'énergie de l'incrément précédent. Cela permet une meilleure précision des résultats, notamment sur les échanges liés à l'inertie thermique.

Ce découpage temporel est associé à un découpage spatial. EnergyPlus applique ces bilans énergétiques en divisant le bâtiment en plusieurs zones thermiques, généralement définies pièce par pièce. Chaque zone est traitée indépendamment avec son propre bilan, tout en tenant compte des

⁵² Musy, M., & Bozonnet, E. (s. d.). *Du bâtiment à la ville, panorama des approches de modélisation du comportement thermique des bâtiments dans leur environnement.*

^{53 54} Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus : Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331.

interactions avec les zones adjacentes. Les façades sont modélisées individuellement, ce qui permet de prendre en compte leur orientation, leur exposition solaire et les propriétés thermiques des matériaux.

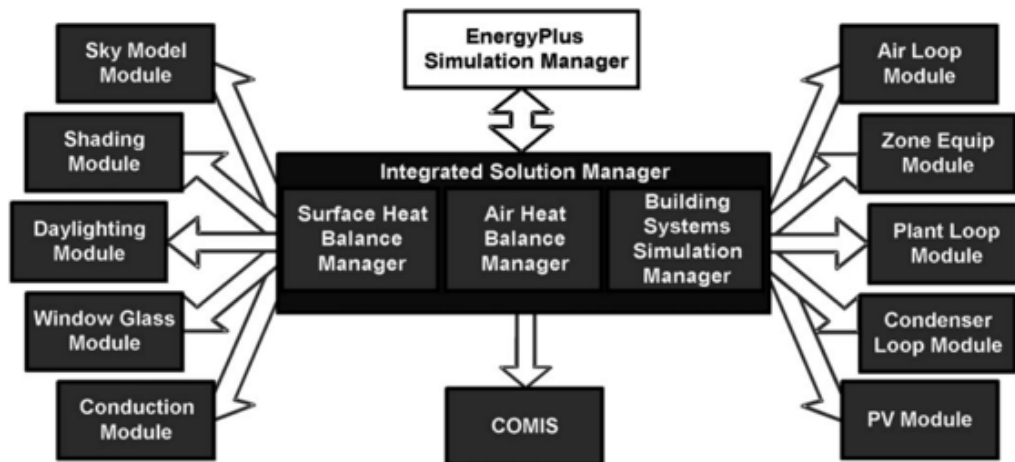


Figure 14 Schéma expliquant comment Energy plus gère les flux de données pour simuler des données climatiques. Source Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus : Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331.

Les résultats obtenus ont été confirmés grâce à une procédure standardisée nommée ASHRAE 140P. Ce protocole permet d'évaluer les algorithmes de simulation thermique des bâtiments à travers une batterie de tests normés où la solution exacte est connue⁵⁵.

Ce type de modèle est traditionnellement utilisé comme outil de dimensionnement, ce qui nécessite une puissance computationnelle importante. Il sert par exemple à déterminer les matériaux exacts d'une paroi ou à régler les systèmes CVC en fonction de la température extérieure.

L'apparition de l'approche paramétrique a permis d'envisager ces analyses microclimatiques comme une aide à la conception. Cependant, pour diminuer le temps de calcul et rendre la modélisation accessible en phase d'esquisse, les géométries d'entrée doivent être simplifiées. Ces outils servent alors de guide pour dégager des tendances qui orienteront les choix architecturaux. C'est une fois le bâtiment dessiné qu'il faudra affiner les résultats avec les modèles de validation présentés précédemment.

Il existe plusieurs logiciels permettant cette approche. Nous nous concentrerons sur ceux disponibles sur Grasshopper et en open-source, ce qui limite le choix à une unique suite d'outils : Ladybug Tools Les plugin de la suite LadybugTool⁵⁶ nous intéressant pour cette étude sont :

- Ladybug : Ce plugin permet d'importer, de traiter et de visualiser des fichiers météorologiques dans Grasshopper.



Figure 15 Logo Ladybug

- Honeybee : Ce plugin permet de modéliser les échanges thermiques entre l'atmosphère et les bâtiments. Il sert d'interface pour EnergyPlus via OpenStudio. Ce dernier convertit les géométries de Honeybee en données lisibles par le moteur de calcul et, inversement, permet d'afficher les résultats d'EnergyPlus sur la maquette 3D.



Figure 16 Logo Honeybee

⁵⁵ NREL. (s. d.). *EnergyPlusValidationReports/ASHRAE140-HERS/Report/ASHRAE140-HERS.md at master · NREL/EnergyPlusValidationReports*. GitHub.

⁵⁶ Sadeghipour Roudsari, M., & Pak, M. (2013). Ladybug : A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 3128-3135.

La pertinence d'une approche paramétrique pour le microclimat a été démontrée par N. Loh et P. Bhiwapurkar dans leur étude « *Urban heat-mitigating building form and façade framework* ». Leur cas d'étude est une tour de 56 étages située à Chicago dans une zone LCZ 1.

Leur méthodologie se distingue par une voxelisation de la tour : le volume est décomposé en cubes (appelés voxels). Cette démarche permet une étude morphologique plus approfondie. En effet, cette discrétisation permet d'augmenter considérablement le champ d'étude des formes du bâti.

Pour trouver une forme optimisée se situant dans ce contexte, ils ont couplé la suite Ladybug Tools avec Octopus, un plugin Grasshopper d'optimisation multi-objectifs. De ces calculs, ils ont aperçu que des tendances distinctes se dégagent.⁵⁷

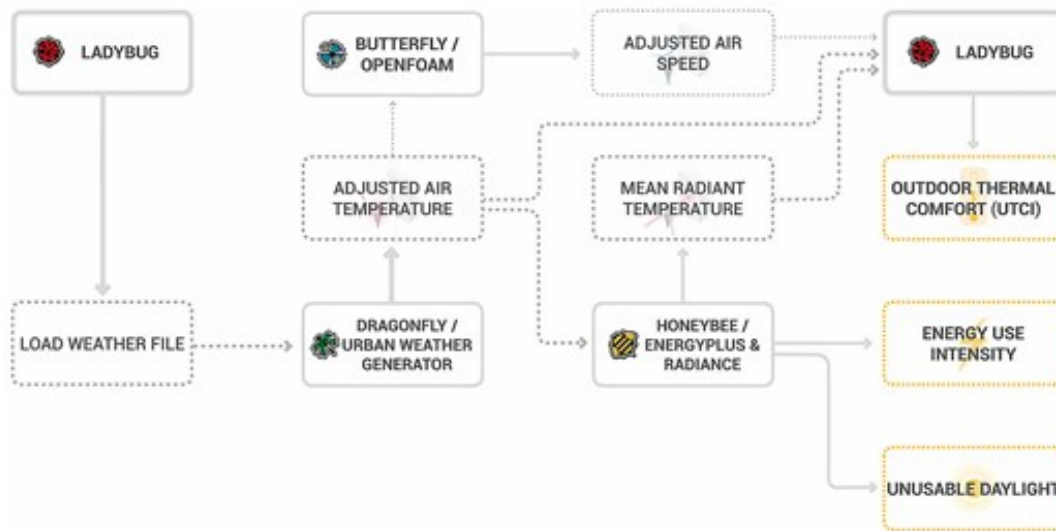


Figure 17 Logigramme de l'étude effectuée par N. Loh et P. Bhiwapurkar
Source : « *Urban heat-mitigating building form and façade framework* ». N. Loh et P. Bhiwapurkar

Il faut noter cependant que cette méthode possède certaines limites, notamment une capacité computationnelle importante. Néanmoins, cet article montre bien l'émergence de l'utilisation des outils paramétriques comme aide à la conception en phase esquisse, ce qui correspond aux objectifs de cette recherche

⁵⁷ Loh, N., & Bhiwapurkar, P. (2022). Urban heat-mitigating building form and façade framework. *Architectural Science Review*, 65(1), 57-71.

4 METHODE DE RECHERCHE

Pour étudier les microclimats, je vais effectuer une simulation numérique, ce choix se justifie de plusieurs façons :

Premièrement, cette étude vise à analyser un nombre important de rapport entre contexte urbain et façade. Une étude expérimentale prendrait donc un temps non réaliste pour tester toutes les possibilités. De surcroît, l'expérimentation ne permettrait de se cantonner qu'à une seule façade, ce qui n'est pas l'objectif.

Deuxièmement, cette étude a pour but d'expérimenter la simulation numérique comme un outil de conception architecturale permettant de dégager des tendances, et d'être une assistance à la conception. Cet outil possède une grande flexibilité par la simplicité des modifications des conditions initiales. De plus les simulations peuvent être couplées avec de nouveaux paramètres propres à un projet (par exemple des règles d'urbanisme à respecter sur un site).

Finalement, la simplicité de mise en œuvre a également motivé le choix de la simulation numérique. En effet, les protocoles expérimentaux sont souvent longs, coûteux, complexes à organiser, et nécessitent parfois des équipements spécifiques comme des souffleries, difficilement accessibles. Or, dans une démarche de conception, il est essentiel d'obtenir des résultats rapidement et à faible coût, afin de pouvoir explorer plusieurs scénarios. Ce besoin d'efficacité correspond précisément aux atouts des modèles numériques choisis ici : leur faible coût computationnel les rend particulièrement adaptés à une utilisation comme outil d'assistance à la conception.

4.1 Approche globale

Ce travail vise à caractériser l'interaction multi-échelle entre la géométrie des façades et la morphologie urbaine, afin de quantifier leur influence sur les conditions microclimatiques locales.

L'analyse repose sur une méthodologie comparative croisée. Trois morphologies urbaines **distinctes** (détaillées ultérieurement) servent de contexte : la **Barre**, le **Plot** et l'**Îlot**. Pour isoler l'impact de la géométrie architecturale sur le confort, une unique façade est modifiée au sein de ces tissus. Cette façade est générée par l'assemblage de 5 modules élémentaires : mur plein, mur avec fenêtre, terrasse ouverte, terrasse protégée, et fenêtre avec brise-soleil.

Les bâtiments environnants sont modélisés comme des volumes aveugles. Leur rôle est double : générer les masques solaires (ombres portées) et simuler l'inertie thermique globale du tissu urbain (captation et stockage).

Le protocole numérique s'implémente de la manière suivante :

- **Modélisation :**

Le logiciel Rhinocéros 3D **est utilisé** pour modéliser les morphologies urbaines et les différents modules. **Grasshopper assure ensuite** l'assemblage paramétrique **de ces** modules pour générer l'ensemble des façades étudiées et leur intégration **au** contexte urbain.

- **Conditions Environnementales :**

Le plugin Ladybug fournit les données climatiques d'entrée (vent, températures, ensoleillement) et définit la délimitation temporelle de l'analyse.

- **Simulation Thermique :**

Le plugin Honeybee convertit les différentes géométries en modèle thermique, et génère la grille de capteurs (sondes) positionnée dans le tissu urbain. Ces données permettront

à Honeybee de calculer l'UTCI⁵⁸ à chaque point de mesure et à chaque heure de la période d'étude. Les séries de valeurs de l'UTCI obtenues seront synthétisées en une unique valeur, les Degrés-Heures qui servant d'indice comparatif.

- **Automatisation :**

Le plugin Colibri permet l'automatisation des calculs sur l'ensemble des façades générées et la transformation des données obtenues en un fichier CSV permettant d'analyser les résultats.

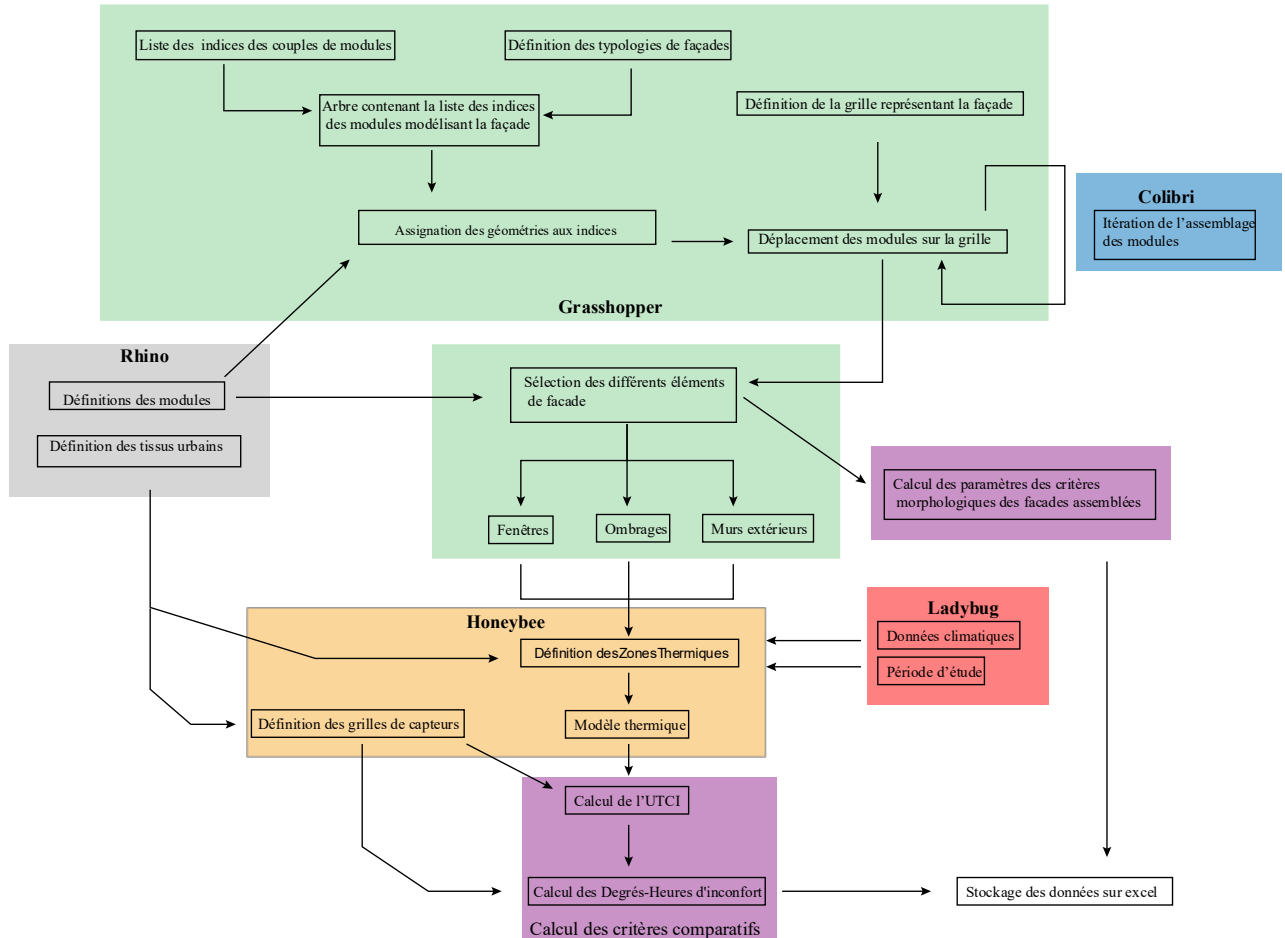


Figure 18 Logigramme du script Grasshopper

4.2 Définition des critères comparatifs

Les critères comparatifs ont pour fonction de synthétiser des données hétérogènes en indicateurs exploitables pour l'évaluation des scénarios.

Pour quantifier le confort thermique on déterminera l'UTCI, qui est une température rendant compte de la température ressentie par un être humain en fonction des conditions climatiques de son environnement. Bien qu'il existe déjà une échelle⁵⁹ permettant de classer les ressentis thermiques, celle-ci n'est pas utilisable ici pour deux raisons :

Premièrement, les variations de température sont trop faibles pour être perçues par le classement actuel.

Deuxièmement, la simulation renverra un grand nombre d'UTCI (Nombre de sonde × Nombre incrément d'heure). Une moyenne de ces valeurs ne permettra pas de quantifier l'intensité ou

⁵⁸ Indice de confort défini dans la partie 4.4.1 page 22

⁵⁹ Echelle présentée à la page 22

la durée des pics de chaleur qui sont critiques dans l'évaluation du stress thermique.

Pour y remédier nous utiliserons le degré-heure. Comme explicité dans la partie 4-1, cet indice a été créé pour évaluer le confort intérieur. Pour notre étude nous transposons le principe du degrés-heure au milieu extérieur. Tout comme la réglementation thermique juge la performance d'un bâtiment sur le cumul des heures de dépassement d'un seuil, nous évaluons la performance croisée d'une façade et du contexte urbain dans lequel elle s'insère sur le cumul du stress thermique. Le seuil choisi sera lui aussi la transposition du seuil UTCI (26°C) au cumul des degrés-heure. Cette approche cumulative a déjà été utilisée pour évaluer l'impact physiologique que subit l'être humain lors de canicules⁶⁰.

Les valeurs obtenues par l'ensemble des sondes seront moyennées pour obtenir la charge moyenne de stress thermique plus représentative du confort thermique extérieur.

Afin de mieux appréhender cette valeur, on peut adapter l'échelle de classification du stress thermique de l'UTCI au degré heure d'inconfort ressenti. (DH_{UTCI}). La période temporelle prise est de 90 heures et l'on se limitera aux températures positives (cette valeur est expliquée dans la partie Délimitation temporelle 6-4-3)

UTCI (en degrés Celsius °C)	DH_{UTCI} (en °C· h), pour 90 heure	Classe de stress thermique
9 < 26	0	Pas de stress thermique
26 < 32	0 < 540	Stress chaud modéré
32 < 38	540 < 1080	Fort stress chaud
38 < 46	1080 < 1800	Très fort stress chaud
>46	>1800	Stress chaud extrême

Dans le cadre de notre étude nous calculerons deux degrés-heures pondérés.

- Un premier à l'échelle locale, soit sur la largeur de la rue en face de la façade modifiée.
- Un second sur une surface élargie (dépendante du tissu urbain considéré) afin de mesurer l'influence étendue des façades étudiées.

Afin de comprendre comment la géométrie de la façade influe sur les microclimats extérieurs, on détermine également des critères synthétisant leurs spécificités.

- WWR : (Window-Wall Ratio) Le ratio entre la surface vitrée et la surface totale de la façade. Plus ce ratio est élevé, plus la matérialité de la façade est dominée par le verre (ce qui modifie l'albédo global et les transferts radiatifs)
- SWR : (Shade-Wall Ratio) Le ratio entre la surface des protections solaires (ombrages) et la surface totale de la façade.
- Ratio de dispersion : Ce ratio est le rapport entre l'écart-type des positions des éléments selon l'axe horizontal σ_x et l'écart-type des positions selon l'axe vertical σ_z . Il permet de caractériser la distribution spatiale des éléments sur la façade :

$$Rd = \frac{\sigma_x}{\sigma_z}$$

- $Rd = 1$ la disposition des éléments sur la façade est uniforme
- $Rd > 1$ les éléments sont disposés de manière horizontale
- $Rd < 1$ les éléments sont disposés de manière verticale

Ce ratio sera utilisé pour classer les façades selon la position des fenêtres, il sera nommé Rd_w

⁶⁰ Nairn, J., & Fawcett, R. (2014). The Excess Heat Factor : A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(1), 227-253.

De même avec les ombrages, il sera nommé Rd_s .

4.3 Paramétrisation des cas d'études

4.3.1 Morphologies urbaines étudiées

4.3.1.1 Morphologie en barre

La morphologie de barre représente ici les immeubles construits en béton dans les années soixante qui permettaient d'accueillir des vacanciers et des saisonniers (Front de mer de Saint Raphael, Cavalaire-sur-mer.) Ce tissu a la plus forte densité au sol ($\lambda_p = 0,45$) et une densité de façade moyenne ($\lambda_w = 0,7$). Son caractère linéaire lui confère une forte hétérogénéité de la porosité frontale, importante (0.5) dans l'axe de la rue, et très faible (0,17) perpendiculairement. Cette disposition provoque en outre d'importants ombrages mutuels.

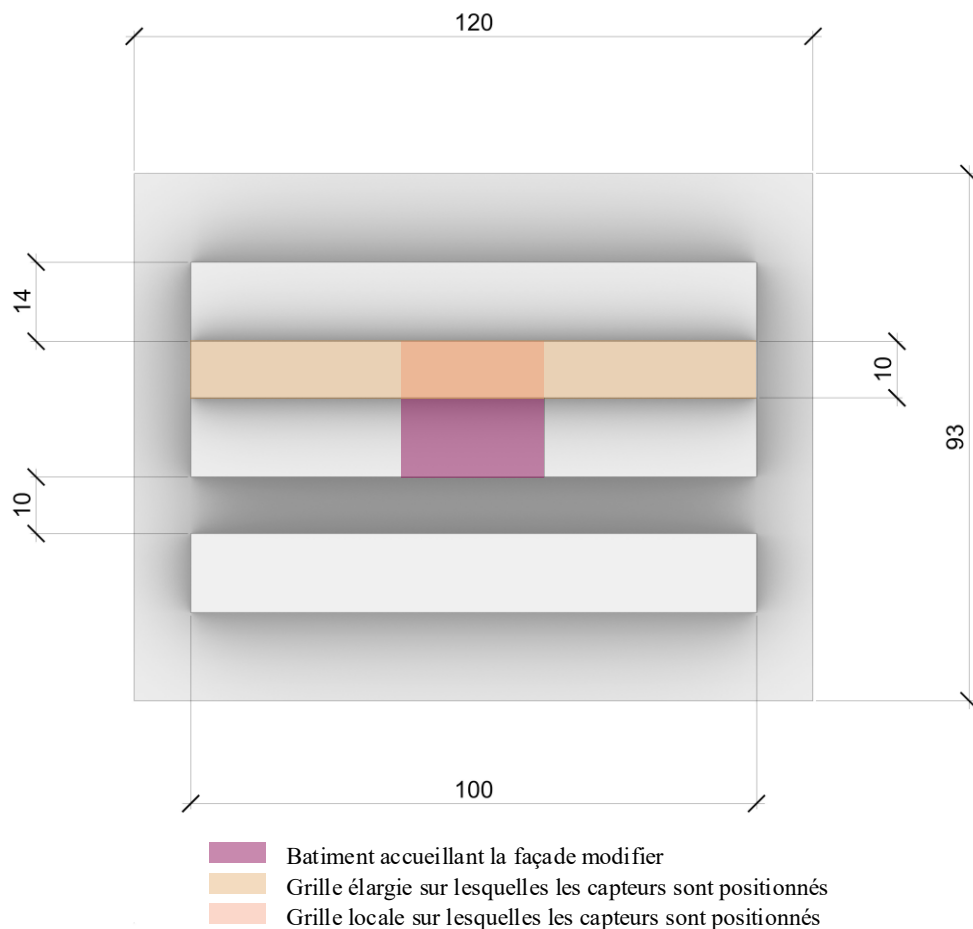


Figure 19 Morphologie urbaine de la barre. Source : Auteur

4.3.1.2 Morphologie en plot :

La morphologie en plot représente l'urbanisme résidentiel des collines de la Côte d'Azur (Cimiez à Nice, La Californie à Cannes), où le bâti s'adapte à la topographie pour préserver les vues. Ce tissu discontinu présente une densité au sol intermédiaire ($\lambda_p = 0,39$) mais une densité surfacique verticale élevée ($\lambda_w = 0,81$), conséquence directe de la fragmentation des volumes. Contrairement à la barre, sa porosité frontale reste constante (0,4) quelle que soit l'orientation, favorisant la circulation des brises de pente et la ventilation naturelle. Cependant, par sa nature fragmentée, cette typologie multiplie les surfaces d'échange : chaque bâtiment étant exposé sur ses quatre faces, la quantité de paroi soumise au rayonnement solaire direct est maximisée.

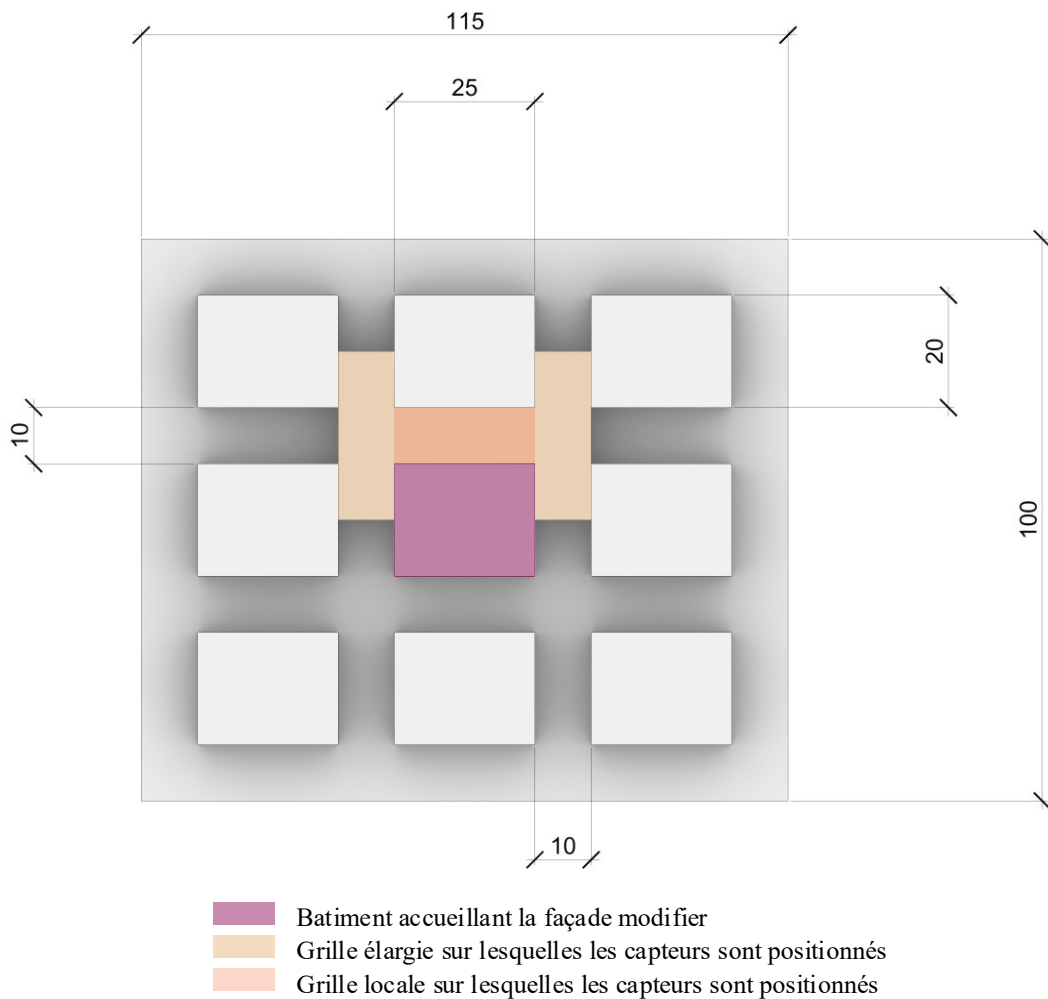


Figure 20 Morphologie urbaine du plot. Source: Auteur

4.3.1.3 Morphologie en îlot

L'îlot fait écho à la trame des centres-villes historiques (comme le quartier du Port à Nice) ou aux formes contemporaines "bioclimatiques" organisées autour d'un espace central. Bien qu'affichant l'emprise au sol la plus faible de l'étude ($\lambda_p = 0,33$) en raison de son large cœur de parcelle, ce tissu détient la densité de façade la plus importante ($\lambda_w = 0,88$). Sa configuration fermée induit une porosité frontale réduite (0,3), créant un microclimat intérieur protégé du vent mais sujet au risque de piégeage radiatif et de stagnation thermique en période de canicule.

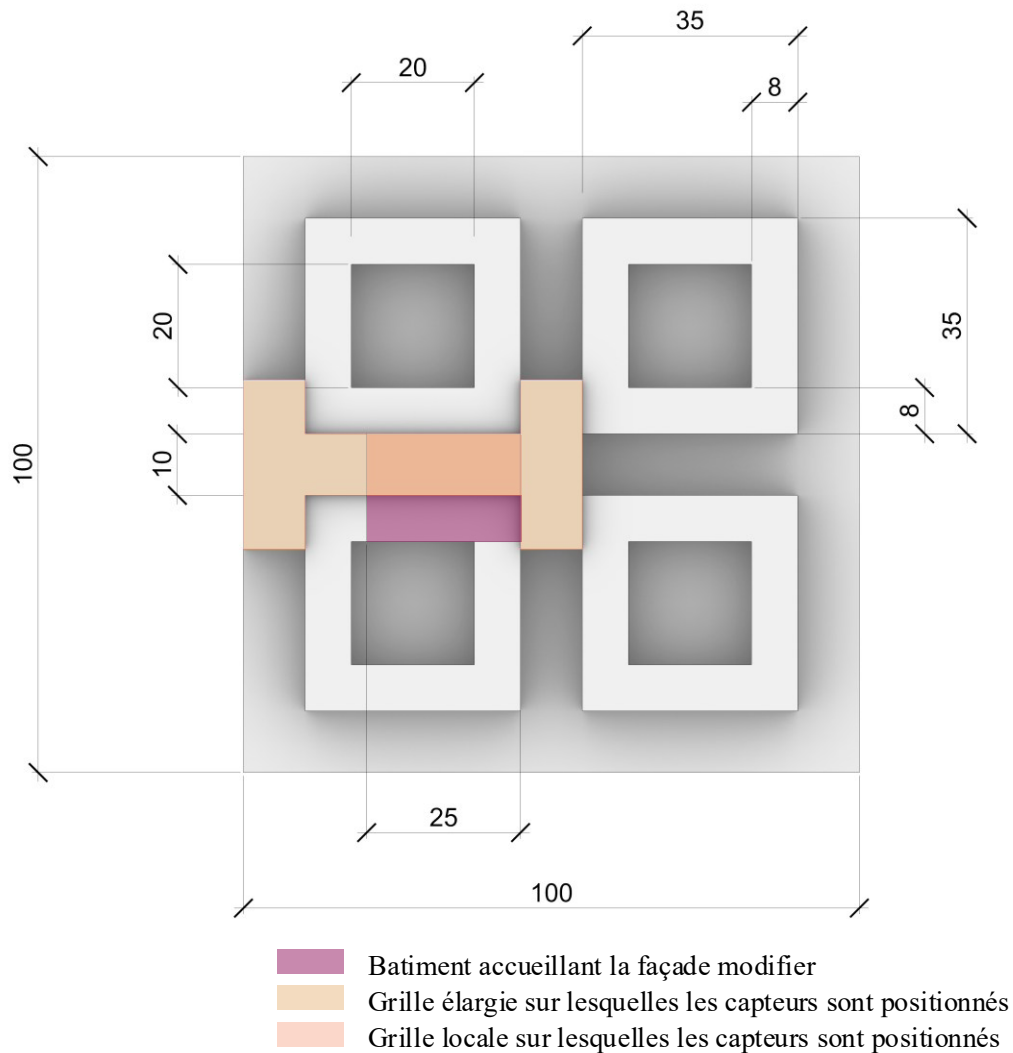


Figure 21 Morphologie urbaine de l'îlot. Source : Auteur

Toutes ces morphologies auront la même hauteur soit R+3. Ce choix de hauteur correspond à la hauteur de bâti que l'on rencontre généralement dans le sud de la France. En outre, fixer une hauteur de bâti unique permet d'avoir des morphologies et de garder une cohérence. Introduire des variations de hauteurs démultipliera le nombre de morphologies urbaines tout en étant peu représentatif du tissu urbain que l'on peut rencontrer, ou alors en ayant un H/W similaire à la hauteur unique fixée. Et puisque la hauteur de bâti et la largeur de route sont aussi fixes, le rapport H/W l'est également. Les capteurs sont disposés sur les surfaces définissant l'espace avec une densité de 1 point par mètre.

Certains paramètres tels que l'albédo général dépendront de la façade qui sera modélisée lors de la simulation. Il n'est donc pas considéré comme un paramètre propre aux morphologies urbaines. Le sol sera simplifié en une surface uniforme en asphalté dont les paramètres sont directement définis sur Honeybee.

	Barre	Plot	Ilot
H/W	1	1	1
λ_p Densité	0.45	0.39	0.33
λ_w Densité surfacique verticale	0.7	0.81	0.88
Porosité frontale du bati 1	0.5	0.4	0.3
Porosité frontale du bati 2	0.17	0.4	0.3

Pour l'indice de densité frontale, les formes urbaines modélisées présentent une quasi-symétrie orthogonale, ce qui limite la variabilité de la surface frontale à deux orientations principales. Cela permet de caractériser la densité de la surface frontale λ_f avec seulement deux valeurs distinctes.

Maintenant que les morphologies urbaines ont été définies, il convient d'aborder la question des façades, élément central de cette étude.

4.3.2 Définition des Modules

La modélisation de la façade est un des processus les plus importants de cette étude. En effet, elle influence directement l'analyse de ses interactions avec les microclimats urbains. Plusieurs approches ont ainsi été envisagées afin de représenter les façades de manière cohérente et pertinente dans le cadre des simulations.

Dans un premier temps, les différentes géométries de façades seront exprimées par des modules avec une hauteur et une largeur de 2,5 mètres et une profondeur variable. Ces dimensions permettent à la fois de modéliser une façade et de conserver des proportions de morphologies urbaines cohérentes qui seront appliquées sur les façades. L'utilisation de huit modules différents permettra de rendre compte des spécificités des façades.

- **Module mur plein :**
représente le cas de référence, ce module diminue l'albedo général de la façade et augmente le stockage thermique des canyons urbains

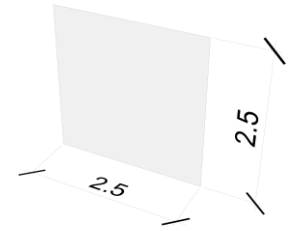


Figure 22 Mur Plein. Source : Auteur

- **Module brise-soleil :**
permet de limiter le rayonnement direct sans impacter la transparence de la façade

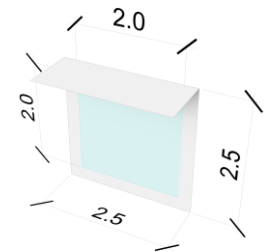


Figure 23 Dimension Brise Soleil. Source : Auteur

- **Module Fenêtre :**
Augmente l'albedo général de la façade

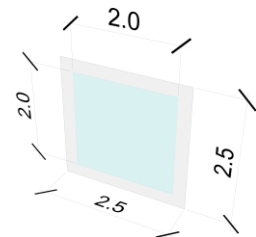


Figure 24 Dimension Fenêtre. Source : Auteur

- **Module terrasse avec garde-corps vide :**
limite le rayonnement solaire directe et possède un faible impact sur la ventilation urbaine

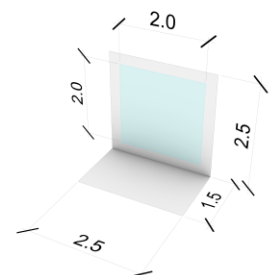


Figure 25 Dimension Terrasse avec garde-corps vide. Source : Auteur

- **Module terrasse avec garde-corps plein :**
limite le rayonnement solaire directe et possède un fort impact sur la ventilation urbaine

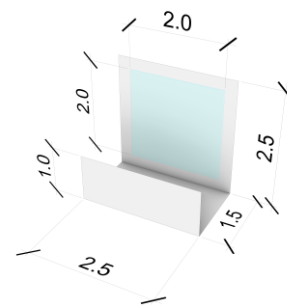


Figure 26 Dimension Terrasse avec garde-corps plein. Source : Auteur

Les différentes combinaisons d'assemblages de ces modules permettront de rendre compte d'une variété importante de typologies de façade.

4.3.3 Application des modules de façade aux tissus urbains

4.3.3.1 Première approche

Une fois ces modules définis il reste à déterminer comment ces 5 modules vont être appliqués dans les morphologies urbaines.

Auparavant, il est important de se rendre compte du nombre de modules mis en place dans chaque morphologie

&	Module barre	Module plot	Module îlot	Morphologie barre	Morphologie plot	Morphologie îlot
Nombre de modules	400	144	352	1200	1296	1408
Nombre de façades	4	4	8	12	36	32

Plusieurs approches ont été considérées.

La première consiste à appliquer toutes les combinaisons possibles de modules sur les morphologies urbaines. Or cela représente 5^{1408} (soit $1,4 \times 10^{984}$). Il n'est évidemment pas faisable d'évaluer un tel nombre de combinaisons (même si certaines sont inintéressantes ou sont identiques par rotation, on peut penser à une morphologie uniquement composée de façades pleines)

La seconde consiste à appliquer une typologie de façade par morphologie urbaine soit un nombre de combinaison de :

Morphologie en plot : 8^{36} Morphologie en barre : 8^{12} Morphologie en îlot : 8^{32}

Là encore, ce sont des nombres de combinaisons extrêmement importants, qui ne sont pas calculables par ordinateur.

En reprenant la valeur de $8^{36} = 3,24 \times 10^{32}$ pour mettre en perspective les supercalculateurs les plus puissants au monde à l'heure actuelle calculent 10^{17} opérations à la seconde, si chaque combinaison nécessite une seule opération il faudrait 100 millions d'années

Paradoxalement, cette manière de procéder ne permettrait pas de rendre compte de beaucoup de typologies de façades, seulement de 8. Ce style d'approche serait plus utile pour évaluer l'impact

croisé de façades avec différentes typologies sur le microclimat

La troisième serait de faire des couples de modules, par exemple 3 modules, mais là encore, un nombre de combinaisons gigantesque.

Finalement la méthodologie retenue est de n'étudier précisément qu'une seule façade se trouvant au sein de la morphologie urbaine. Nous pourrions observer les effets de cette façade tout en prenant en compte le tissu urbain dans lequel elle s'insère. Le tableau suivant montre le nombre de modules composants la façade étudiée.

	Morphologie barre	Morphologie plot	Morphologie îlot
Nombre de modules sur la façade étudié	8 ³²	8 ³²	8 ⁵⁶

Là encore, le nombre de combinaisons est faramineux, mais notre objectif étant d'utiliser la simulation comme un outil de conception qui permettrait de dégager des tendances, il n'est pas nécessaire de calculer toutes les cartes UTCI de toutes les façades. Il suffit d'obtenir 10 typologies de façades différentes permettant d'optimiser le confort thermique et 10 autres permettant d'optimiser l'inconfort thermique.

4.3.3.2 Questionnement sur de la cohérence de la façade

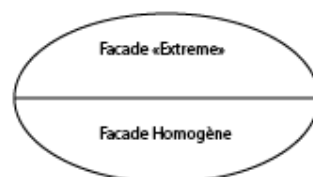
Pendant cette recherche sur la méthodologie est apparu une problématique. Générer de manière brute toutes les façades provoquerait la création d'une quantité importante de façade similaires à un placement de module près. Ce constat a fait apparaître une nouvelle question.

Comment sélectionner des façades qu'on pourrait qualifier de pertinentes ?

Cette question m'a permis de repenser la méthodologie. Puisqu'il y a trop de façades possibles pour toutes les tester, on peut extraire un sous-ensemble de l'ensemble des façades constructibles (ie : avec le système de module). Ce sous-ensemble représentera une partie des façades cohérentes



Cette bulle représente l'ensemble des façades possibles. Cet ensemble est trop grand pour être calculé et de trop nombreuses façades quasiment identiques et (ou) inintéressantes.



On cherche donc à séparer ces deux sous-ensembles. Il reste à trouver comment les définir

Figure 27 – a - Réflexion sur les méthodes de modélisation de façade avec des modules
Source : Auteur

Là encore, les méthodologies pour définir une façade cohérente sont nombreuses on ne les détaillera pas. On peut penser à effectuer un test de luminance. En fixant un seuil de luminance minimum à respecter, ce test permettrait de définir si une façade est cohérente. Ce n'est pas la stratégie adaptée, en effet ce test n'est pas constructif. Il valide ou non la cohérence d'une façade mais il ne la construit pas. Il faudrait donc tester toutes les façades possibles ou avoir un sous-ensemble à tester, ce qui déplace simplement le problème. Une autre solution serait d'utiliser un

algorithme génératif, l'ensemble des façades obtenus serait plus difficile à contrôler. Une méthode constructive serait de considérer non plus la façade comme un tout mais comme un ensemble de logements. Donc diviser la façade en groupe de modules

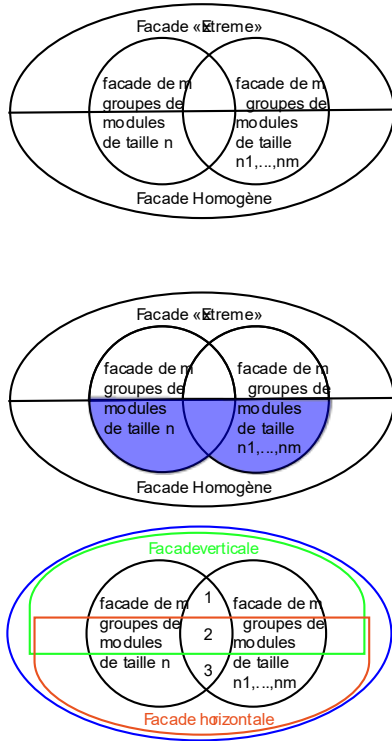
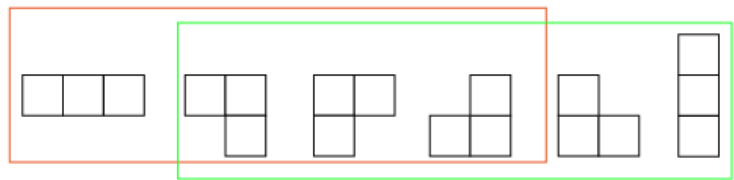


Figure 28-b-Réflexion sur les méthodes de modélisation de façade avec des modules
Source : Auteur

En reprenant l'ensemble des éléments constructibles on peut le diviser en deux groupes, les façades composées d'un même groupe de modules de taille n et les façades composées de groupes de modules différents, tous de tailles différentes. De surcroît il est à noter que les agroupements peuvent prendre plusieurs formes différentes. Ces formes multiples permettent par exemple de prendre en compte les doubles hauteurs dans les bâtiments.

Exemple de l'ensemble d'assemblages possibles pour un groupe de 3 modules différents



On peut, pour l'ensemble d'assemblage pour $n=3$, catégoriser l'ensemble des modules en 3 sous-catégories, les assemblages horizontaux, verticaux et les assemblages mixtes. L'ensemble des façades cohérentes se trouve dans la zone bleue.

On observe que la zone centrale se décompose en 3 parties.

1-Les façades sont définies uniquement par des assemblages verticaux. Ils permettent un meilleur contrôle sur les façades possédant des doubles hauteurs, il y a cependant peu de contrôle sur l'assemblage horizontal des modules

3-Les façades sont définies uniquement par des assemblages horizontaux. Cela permet d'avoir un meilleur contrôle sur les bâtiments qui s'organisent de manière horizontale. Cet ensemble d'assemblage est donc intéressant si on se concentre sur la modélisation de façade de logements qui ont plus tendance à se trouver sur un même étage.

2-Les façades sont définies comme assemblages d'éléments verticaux et horizontaux

On remarque qu'il existe alors plusieurs manières de remplir une façade avec un même ensemble d'assemblage de modules. Le nombre de combinaison possible est donc toujours hors de la portée de calcul dont je dispose. On peut alors réduire la taille du sous-ensemble de trois manières.

En ne considérant qu'un seul type d'assemblage possible par façade modélisée, que ce soit par la morphologie de l'assemblage de modules, ou par le type de module utilisé (figure a). On peut définir une façade par un type d'assemblage et un couple

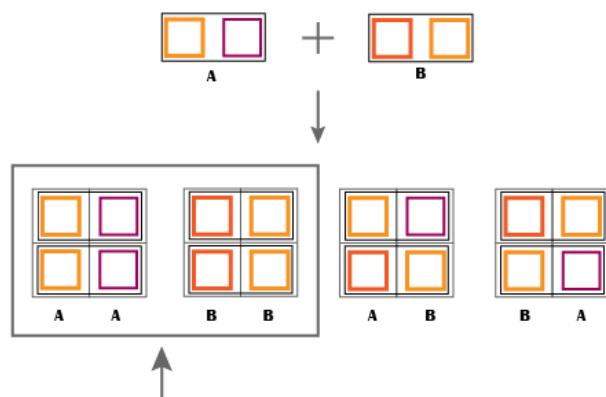


Figure 29 – a- Règle de simplification de disposition des modules sur la façade

de modules définissant l'unique assemblage de modules dont elle est composée.
 En imposant la disposition des rassemblements de modules. (figure b).

Cependant les bâtiments formant le tissu urbain ne sont pas tous composés de façades cohérentes. Par exemple, une façade composée uniquement de mur peut représenter un pignon. Donc le raisonnement qui a mené jusqu'à cette méthodologie était incomplet. Mais les simulations de situations jugées « extrêmes » peuvent être simplement modélisées en ajustant correctement les trois paramètres vu précédemment : le couple de modules choisis, le type d'assemblage et la typologie de façade

Le raisonnement de la figure b m'a permis de penser autrement. Au lieu de définir de quelle façon les assemblages de modules sont disposés sur la façade, on peut directement définir la façade. Cela peut sembler comme un retour en arrière. Or en combinant cette idée avec les simplifications expliquées précédemment (un nombre défini de module, des patterns fixées pour la disposition des modules sur la façade) on peut obtenir une modélisation simple mais radicale de nos façades.

L'avantage de cette méthodologie réside dans sa flexibilité. Elle permet une définition de la façade à différents niveaux de complexité selon les patterns choisies en entrée.

Par la suite, nous nommerons les différentes dispositions d'assemblages de module sur la façade par le terme typologie de façade.

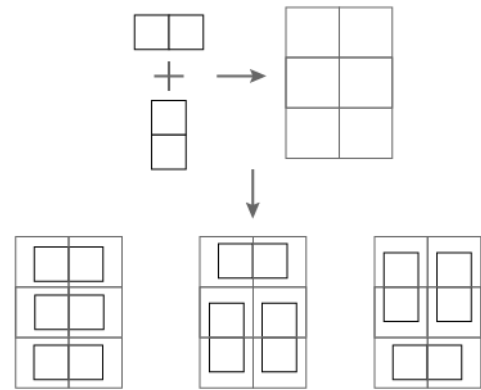
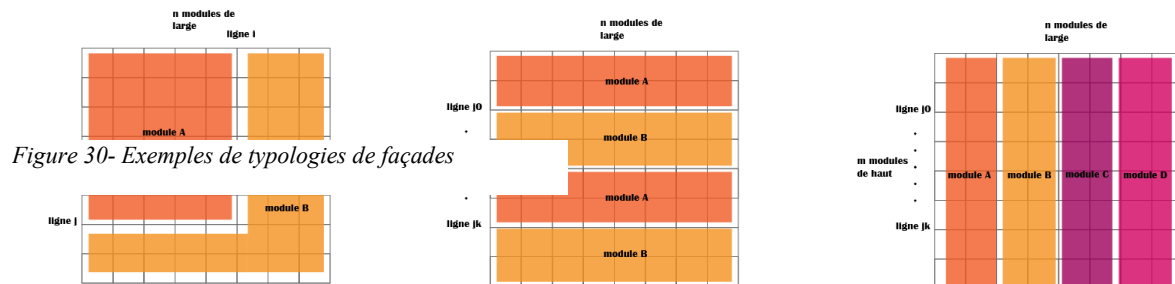


Figure 3- b- Règle de simplification de disposition des modules sur la façade



4.3.3.3 La méthodologie retenue et ses paramètres

Ce raisonnement sur les différentes manières de modéliser une façade avec des modules m'a permis de définir précisément ma méthodologie. Pour établir une méthodologie pertinente dans le cadre de mon étude, il est important de définir des règles simples qui régissent la disposition des modules sur la façade.

En outre, l'objectif de cette étude est de trouver un lien entre la morphologie des façades, le tissu urbain et le confort thermique extérieur. De fait, les patterns seront radicaux, cette radicalité exacerbera les phénomènes observés, simplifiant l'analyse des données obtenues.. Finalement, en prenant en compte les considérations de complexité, de facilité d'implantation, de pertinence vis-à-vis de l'objectif de l'étude la méthodologie retenue est celle définissant des typologies de façades. Comme dit précédemment, un des autres avantages de cette configuration est sa flexibilité. Chacun sera libre d'implanter ses propres typologies avec les modules de son choix. Ce qui assure une meilleure reproductibilité si les conclusions de cette étude s'avéraient pertinentes. Cet avantage a cependant un défaut, cette flexibilité peut rapidement créer un nombre de combinaisons trop importantes.

En conséquence l'étude s'est limitée à trois typologies de façade et des règles simples seront aussi plus facile à implémenter. Ces typologies n'accueilleront que 2 modules à la fois. Bien que l'hypothèse semble réductrice, elle permet de comparer deux à deux tous les éléments de façade permettant d'étudier plus précisément la confrontation entre modules sur le confort urbain.

Ces trois typologies sont représentées sur la figure ci-contre

La première est une séparation verticale de la façade. Cette disposition permet d'augmenter (ou diminuer) la longueur de rugosité de manière significative, ce qui a un impact sur la ventilation urbaine. Cette séparation verticale permet d'étudier l'impact des modules entre eux sur la façade entière. Dans la longueur tous les module à gauche seront influencés par les modules droits (et inversement). Dans la largeur, les modules impactent uniquement ceux du même type. De manière plus précise cette disposition modélise l'impact d'un redan (bien que faible), ou encore des murs pignons présents dans les tissus urbains.

La seconde est une séparation horizontale de la façade. Dans cette disposition il n'y a pas (ou peu) d'influence mutuelle. Dans la hauteur le module supérieur impacte le module inférieur. Dans la largeur, les modules impactent uniquement ceux du même type. De manière plus précise, cette disposition permet d'étudier les morphologies de retrait en rez-de-chaussée, ou les avancées sur rue..

La troisième est un damier de modules. Elle permet d'observer l'impact d'un motif régulier répétés créant une façade homogène. Chaque module (excepté ceux des bords) est entouré par le second module. Plus précisément cette disposition permet de modéliser du logement, avec par exemple des balcons double hauteur.

Il est à noter que la configuration de typologie de façade sera aussi traitée. En effet, elle apparait pour les couples de modules identiques .

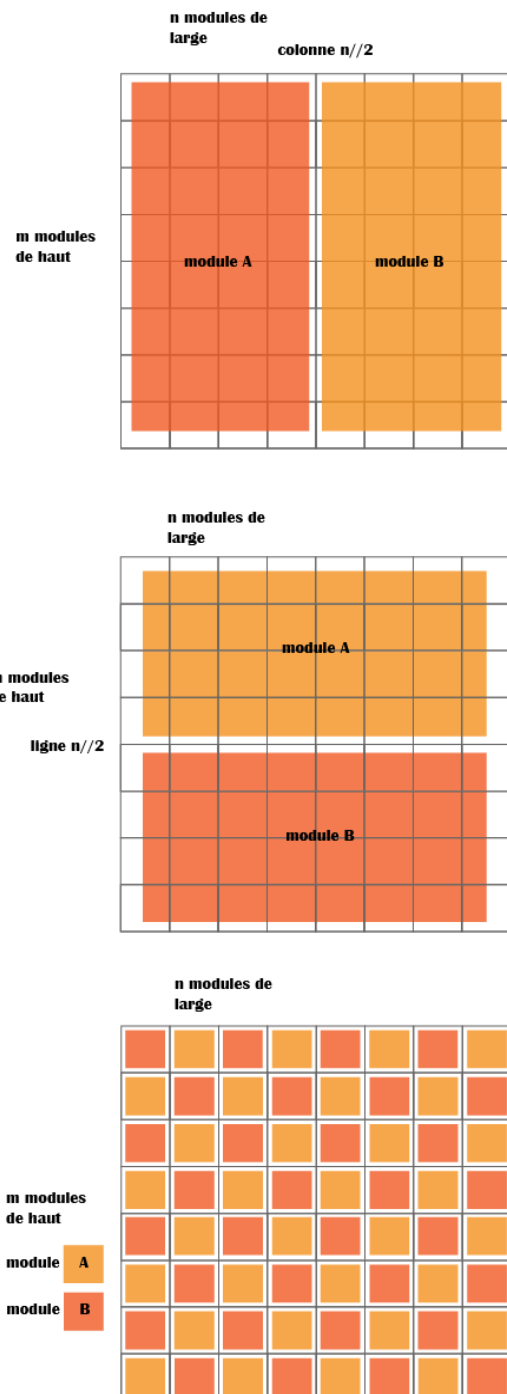


Figure 31 - Typologies de façades retenues
Source : Auteur

D'un point de vue combinatoire, selon les hypothèses d'études citées au-dessus, on peut calculer le nombre de façades étudiées pour n modules. Par typologie de façade (ici trois) on aura $2 \times \binom{n}{2}$.

On aura donc $3 \times (3 \times 2 \times \binom{n}{2} + 5)$ possibilités. Pour 5 modules cela représente donc 195 combinaisons possibles .

Les différentes façades seront orientées au sud dans le cadre de cette étude. Ce choix se justifie puisque dans l'hémisphère, la façade sud est la plus exposée au soleil tout au long de la journée et donc la plus critique pour les risques de surchauffe. C'est sur cette face que les choix d'architecture, comme la taille des fenêtres ou l'ajout de brise-soleil, ont le plus d'impact sur le confort thermique.⁶¹

Pour garantir la cohérence des comparaisons entre les trois morphologies (Barre, Plot et Îlot), toutes les simulations ont été effectuées sur une surface de façade identique de 10 mètres de haut par 25 mètres de large. Cette dimension a été choisie comme un multiple de modules standards (4 modules en hauteur par 10 en largeur), permettant de simuler un échantillon représentatif d'une façade urbaine réelle

4.4 Conditions climatiques et temporelles de l'étude

4.4.1 Localisation de l'étude

Pour effectuer cette simulation, il est d'abord nécessaire de choisir la météo globale. En effet, selon l'endroit où l'on se trouve sur terre , plusieurs paramètres seront modifiés tels que l'angle d'incidence des rayons solaires et les vents dominants.

Pour cela, nous nous placerons dans le sud-est de la France dans un climat méditerranéen. Il s'agit de l'un des endroits en France les plus exposés aux épisodes caniculaires. Ce phénomène devrait devenir de plus en plus fréquents à l'avenir et pourrait potentiellement conduire à un changement climatique local accentuant les effets d'îlots de chaleur urbains. Pour cette raison, il me semble pertinent de situer l'étude dans ce contexte. Ladybug permet d'importer ces données météo dans Grasshopper sous le format de fichier EPW.

La localisation choisie est à Saint-Raphaël , Boulevard du sémaphore, qui possède une station météo. Elle se situe dans un tissu urbain de faible densité, un quartier pavillonnaire. On peut classer cette zone selon le classement de Stewart, Oke (2012) comme étant LC 6/B , c'est-à-dire des bâtiments bas ouverts avec des arbres dispersés. Les autres stations météo du sud-est de la France se trouvent presque toutes sur des aéroports, leur classification se trouverait selon le positionnement de la station météo entre LCZ F sol nu, LCZ D herbes et prairies, LCZ 7 zone industrielle dense.



Figure 32 Carte de la région PACA. Adapté de <https://www.toutdegorgement.fr/carte-detaillee-region-paca/>

⁶¹ DeKay, M., Brown, G. Z., & DeKay, M. (2014). *Sun, wind & light : Architectural design strategies* (3rd ed). Wiley.

Le choix de cette station météo se justifie donc par plusieurs aspects :

La station du boulevard du sémaphore se trouve dans un contexte particulièrement favorable à des microclimats améliorant le confort. Les habitations sont dispersées, ce qui implique une meilleure ventilation urbaine. Elles sont également de faible hauteur donc une densité des murs λ_w (Rapport entre la surface des murs en contact avec l'atmosphère et la surface horizontale urbaine), ce qui implique un stockage thermique urbain plus faible. Cette disposition de tissu urbain diminue l'impact d'autres ICU extérieurs à l'étude pouvant fausser les résultats obtenus. Cependant les habitations se trouvent au milieu d'arbres plus ou moins dispersés ce qui diffère des tissus urbains étudiés. Les données météo provenant d'une localisation aux conditions propices à un bon confort thermique permettront de mettre en avant les effets croisés des morphologies urbaines et de la façade.

Tandis que les stations météorologiques des aéroports se situent près de grandes étendues d'asphalte sans ou avec peu de structures, cette disposition est propice à la formation d'ICU (par la captation et le stockage thermique du sol). Cela pourrait potentiellement amener à des résultats biaisés par le fort impact du sol sur le microclimat.

Ces données météorologiques seront ensuite utilisées comme données d'entrée pour calculer le confort thermique au sein des différentes morphologies urbaines.

4.4.2 Analyse des données climatiques du site :

4.4.2.1 Le vent

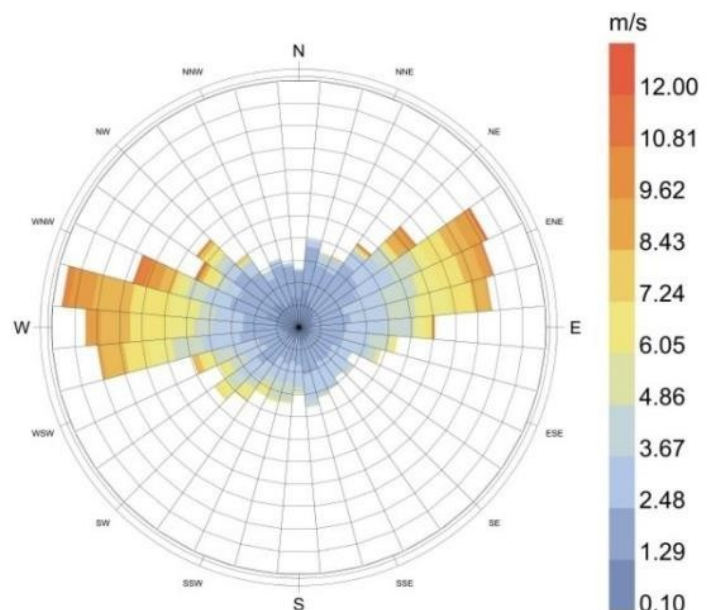
On observe deux vents dominants. Un vent provenant de Est-Nord-Est et un vent provenant de l'ouest.

- Le premier, correspond au mistral qui est un vent fort, froid et sec soufflant du nord ou nord-ouest. Saint-Raphaël étant partiellement protégé par le massif de l'Esterel, le mistral est moins violent
- Le second, le vent d'ouest, est un vent marin, souvent humide et moins frais que le mistral de la vallée du Rhône dont il provient.

Il est à noter que la vitesse maximale enregistrée dans le fichier climatique est de 12 m/s (43,2 km/h), une valeur inférieure aux pointes de 100 km/h caractéristiques des épisodes de Mistral. L'écart s'explique par la nature des données météorologiques (EPW), qui sont des moyennes horaires lissant les phénomènes instantanés.

Cette simplification est cohérente avec la résolution temporelle de notre étude.

Puisque le calcul de l'UTCI est aussi effectué au pas de temps horaire (voir partie *Délimitations*), la modélisation des phénomènes inférieurs à une heure et encore plus



Wind Speed (m/s)
country: FRA
time-zone: 1.0
source: ERA5-TMYx
city: Le.Dramont

Figure 33 Rose des vents de la station météo choisie Source: Auteur

particulièrement les phénomènes brefs tel que les rafales n'est pas prise en compte. L'utilisation des vitesses moyennes constitue donc une hypothèse méthodologique valide.

De plus, les données météorologiques brutes ne peuvent être utilisées telles quelles. En effet la station météo utilisée n'est pas située dans le même type de morphologie urbaine que celle de notre étude. Leurs longueurs de rugosité seront donc différentes.

Pour intégrer l'impact du bâti sur le vent, nous appliquons une pondération basée sur la porosité du tissu urbain. Comme détaillé dans la partie 6.3.1, deux valeurs de porosité ont été définies par symétrie. L'hypothèse retenue est que le vent n'est pas pondéré de manière homogène selon sa direction.

- Pour les vents dont la direction est alignée avec l'axe de la rue à $\pm 20^\circ$ près, nous appliquons le coefficient de porosité correspondant à l'axe de la rue
- Au-delà, le second coefficient est appliqué pour pondérer le vent pénétrant dans le tissu.

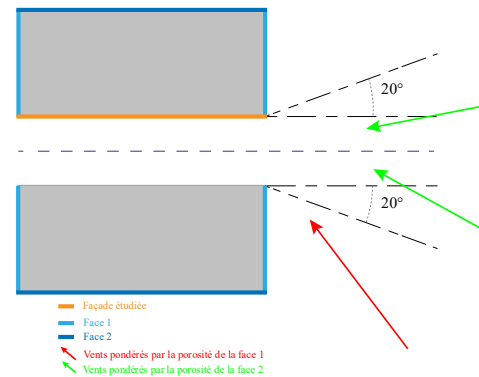


Figure 34 Schéma de l'implémentation du vent dans la simulation. Sourcec : Auteur

En effet, la vitesse moyenne du vent dans une rue dépend majoritairement de la composante parallèle à la rue, lorsque l'angle d'incidence du vent dépasse 20 degrés le vent perd de la vitesse par l'apparition d'un tourbillon⁶².

De surcroît, d'après la rose des vents, le vent suit deux directions. Soit le vent est perpendiculaire à la rue, soit il est aligné à son axe. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une troisième pondération dans le cas où le vent aurait un angle entre 20 et 70 degrés.

4.4.2.2 La température

La température du bulbe sec soit la température de l'air ambiant à l'abri des rayonnements solaires directs et de l'humidité. Les températures semblent faibles avec un maximum autour des 30 degrés, ce qui est étonnant pour le sud-est de la France.

⁶² Soulhac, L., Perkins, R. J., & Salizzoni, P. (2008). Flow in a Street Canyon for any External Wind Direction. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(3), 365-388.

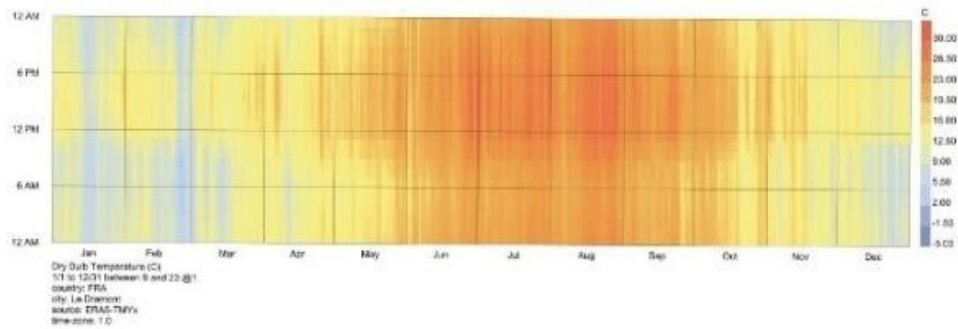


Figure 35 Température de bulbe (°C) sec moyenne sur un an. Source : Auteur

La température du point de rosée, la température à laquelle l'air doit être refroidi pour que la vapeur d'eau qu'il contient commence à se condenser

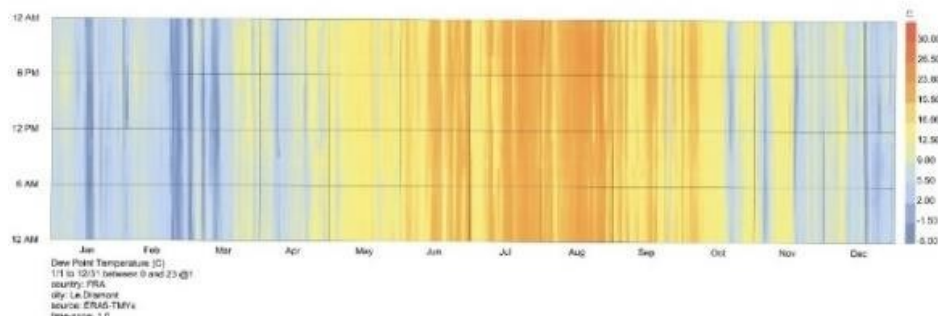


Figure 36 Température de Rosée (°C) moyenne sur un an. Source : Auteur

4.4.2.3 L'humidité

L'humidité relative de l'air, on remarque que l'air est très humide entre 60 et 80 pourcents ce qui est très certainement dû à la proximité de la mer

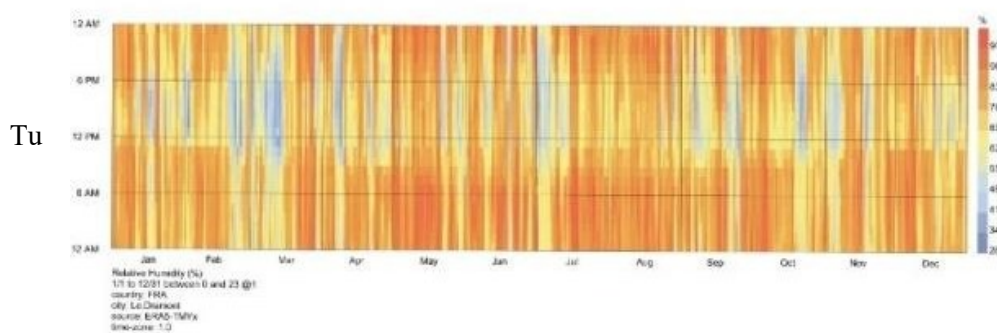


Figure 37 Humidité Relative (%) moyenne sur un an. Source : Auteur

4.4.3 Délimitation temporelle de l'étude

Puisque nous cherchons à étudier le microclimat, et plus spécifiquement les ICU, il est nécessaire de définir la période où l'UTCI sera calculé. Pour optimiser le temps de calcul sans compromettre la précision des résultats, la simulation ne couvre pas l'intégralité de la saison estivale mais se concentre sur la semaine la plus chaude des données EPW fournies par Ladybug. Il s'agit de la semaine du 17 août au 24 août..

Cette restriction de la période d'étude se justifie par deux aspects :

- L'évaluation du risque de surchauffe doit se focaliser sur les épisodes extrêmes. L'intégration de données mensuelles plus tempérées risquerait de lisser les résultats et de diminuer la visibilité des pics d'inconfort⁶³
- La durée de 7 jours est supérieure aux 3 jours recommandés pour l'initialisation du modèle. En effet, cette durée minimale correspond à la période nécessaire pour que l'inertie thermique des matériaux composant le tissu urbain se stabilise. Une simulation plus longue n'apporterait pas d'information supplémentaire sur l'intensité de la chaleur⁶⁴

De plus, les éléments d'ombrages des modules ont été modélisés sans masse donc sans inertie thermique. Cette simplification provoque un biais des températures modélisées la nuit qui seraient plus fraîches qu'en réalité. Ainsi la modélisation thermique sera faite sur la totalité des 7 jours mais l'UTCI sera uniquement calculé sur les périodes diurnes. On définit ces périodes diurnes dans notre modèle comme les heures où la hauteur solaire est supérieure à 10 degrés ce qui revient à une période de 90 heures. Cette hauteur a été choisie car en dessous, les rayons solaires ne pénètrent pas dans le tissu urbain et n'ont donc aucun impact sur le bilan thermique.⁶⁵

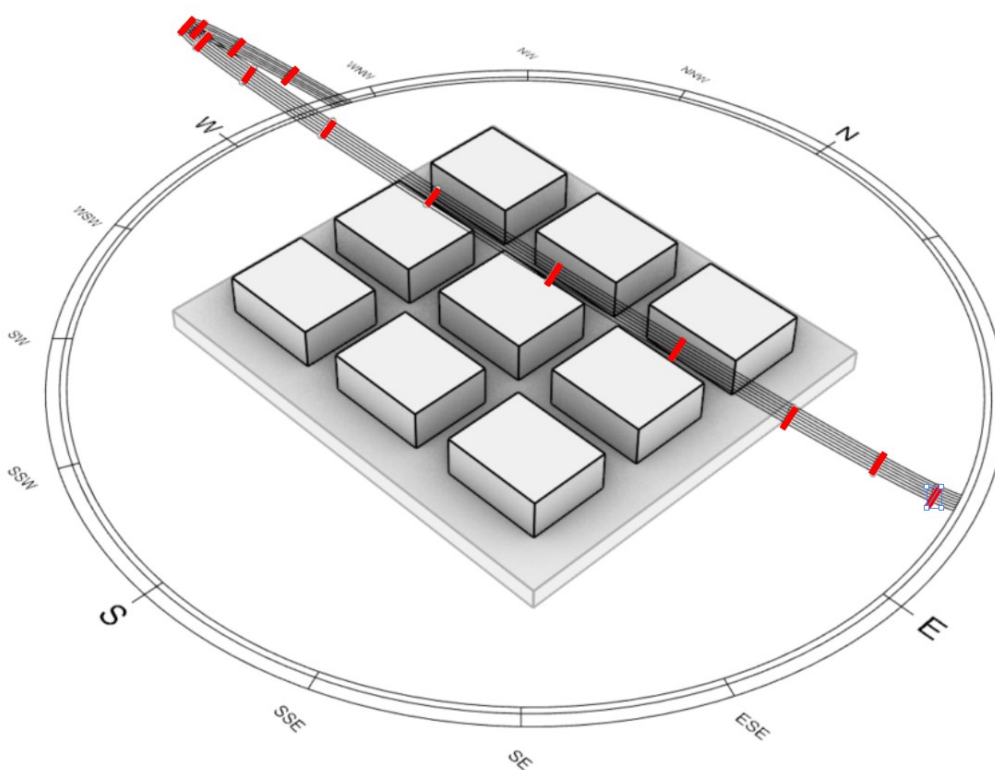


Figure 38 Position du soleil sur la période considérée

⁶³ 2021 ASHRAE handbook. Fundamentals (Inch-pound edition). (2021). ASHRAE.Chapitre 14

⁶⁴ Hensen, J. L. M. (2012). *Building Performance Simulation for Design and Operation* (1^{re} éd.). Routledge.

⁶⁵ Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment : State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 915-931.

5 RESULTATS

Dans un premier temps, il est nécessaire d'avoir un ordre de grandeur des variations de valeurs observées

Exposition Sud	Barre	Ilot	Plot
Degrés-Heure local minimum	308	299	460
Degrés-Heure local maximum	412	401	598
Amplitude des valeurs de degrés-heure local	104	102	138
Degrés-Heure élargi minimum	414	375	496
Degrés-Heure élargi maximum	382	411	547
Amplitude des valeurs de degrés-heure élargi	32	36	51

Pour comparer certains scénarios, je ferai aussi référence à la variation moyenne ressentie. Il s'agit des Degrés-Heures UTCI divisés par le nombre d'heures totales du calcul. Cette valeur correspond simplement à la température ressentie supplémentaire en moyenne sur la période.

Afin d'évaluer l'impact des typologies verticales et horizontales étudiées, nous utilisons un diagramme en boîte. Cet outil permet de visualiser la stabilité de la performance thermique face aux variations de paramètres en représentant la médiane, le premier et deuxième quartile ainsi que l'extrême minimum et maximum. La boîte concentre 50% de simulation.. La hauteur de cette boîte représente la stabilité d'une typologie.

Une boîte "avec une grande amplitude de valeurs est le signe d'une typologie instable (résultats très variables). Une boîte avec faible amplitude de valeurs représente une typologie stable (résultats constants autour de la médiane). Le Trait Blanc représente la médiane. Il indique le point d'équilibre, 50% des résultats de la boîte sont au-dessus, 50% en dessous. Pour finir, les traits verticaux s'étendent jusqu'aux valeurs minimales et maximales observées. Dans le cas de notre étude le minimum représente le meilleur cas (le plus faible DH UTCI) et le maximum le pire cas (le plus haut DH UTCI) .

Pour les graphiques mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF, ceux-ci se décomposent en trois sous-graphiques chacun représentant une typologie de façade.

- La typologie horizontale est la typologie de façade 1.
- La typologie verticale est la typologie de façade 2.
- La typologie en damier est la typologie de façade 3.

5.1 Barre

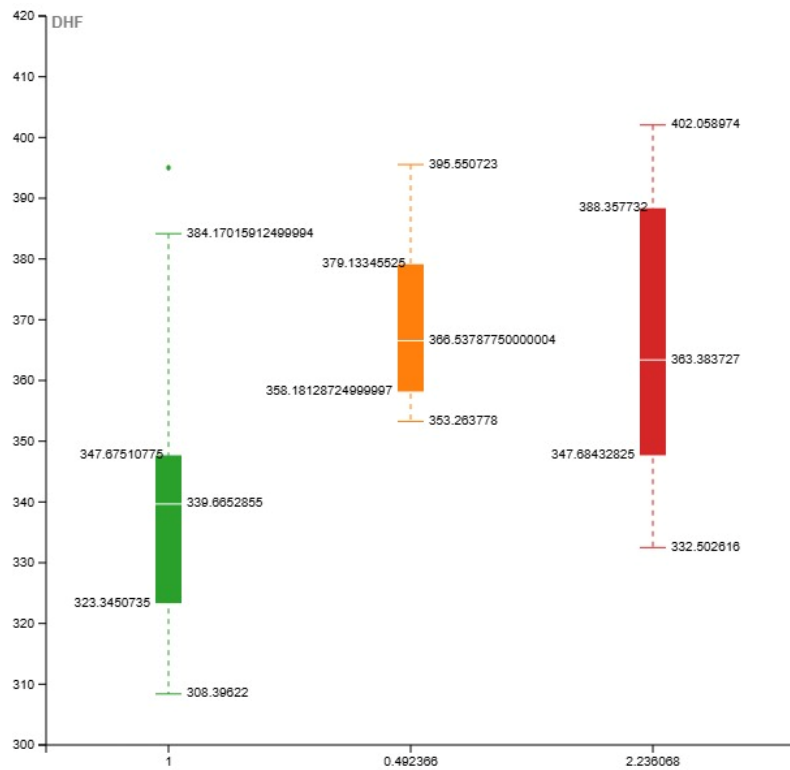


Figure 39 Degrés heure UTI en fonction de la dispersion des fenêtres. Source Auteur

5.1.1 Influence selon la typologie de façade

- Pour un ratio de dispersion des fenêtres supérieur à 1 (disposition horizontale) : La boîte est très allongée, ce qui traduit une grande dispersion des résultats. L'amplitude maximale observée désigne la disposition horizontale comme le facteur d'instabilité prépondérant : elle engendre une variation de 41 Degrés-Heures UTI sur la période étudiée (90h). Cela correspond à une incertitude thermique moyenne de 0,45°C devant la façade.
- Pour un ratio de dispersion des fenêtres inférieur à 1 : La boîte est compacte et les résultats sont resserrés autour de la médiane. Cela démontre que, pour une morphologie urbaine $H/W = 1$, les dispositions verticales exercent une influence homogène sur le confort thermique. Peu importe la configuration exacte, le confort restera compris dans un intervalle réduit de 22 Degrés-Heures UTI, soit une variation moyenne de ressenti de seulement 0,24°C sur la portion de rue face à la façade.
- Pour un ratio de dispersion égale à 1, soit une disposition homogène des géométries sur la façade, l'amplitude de la boîte est de 24 degrés-heure UTI. L'incertitude thermique moyenne est de 0,24°C devant la façade. Cependant à la différence des façades où $Rdf < 1$, les extrema sont ici bien plus importants, témoignant de cas critiques. Ces cas critiques sont une façade composée entièrement d'un mur plein et une façade entièrement composée du module fenêtre pour les maxima. Et la façade entièrement composée du module terrasses avec garde-corps pleins.

5.1.2 Influence de l'ombrage

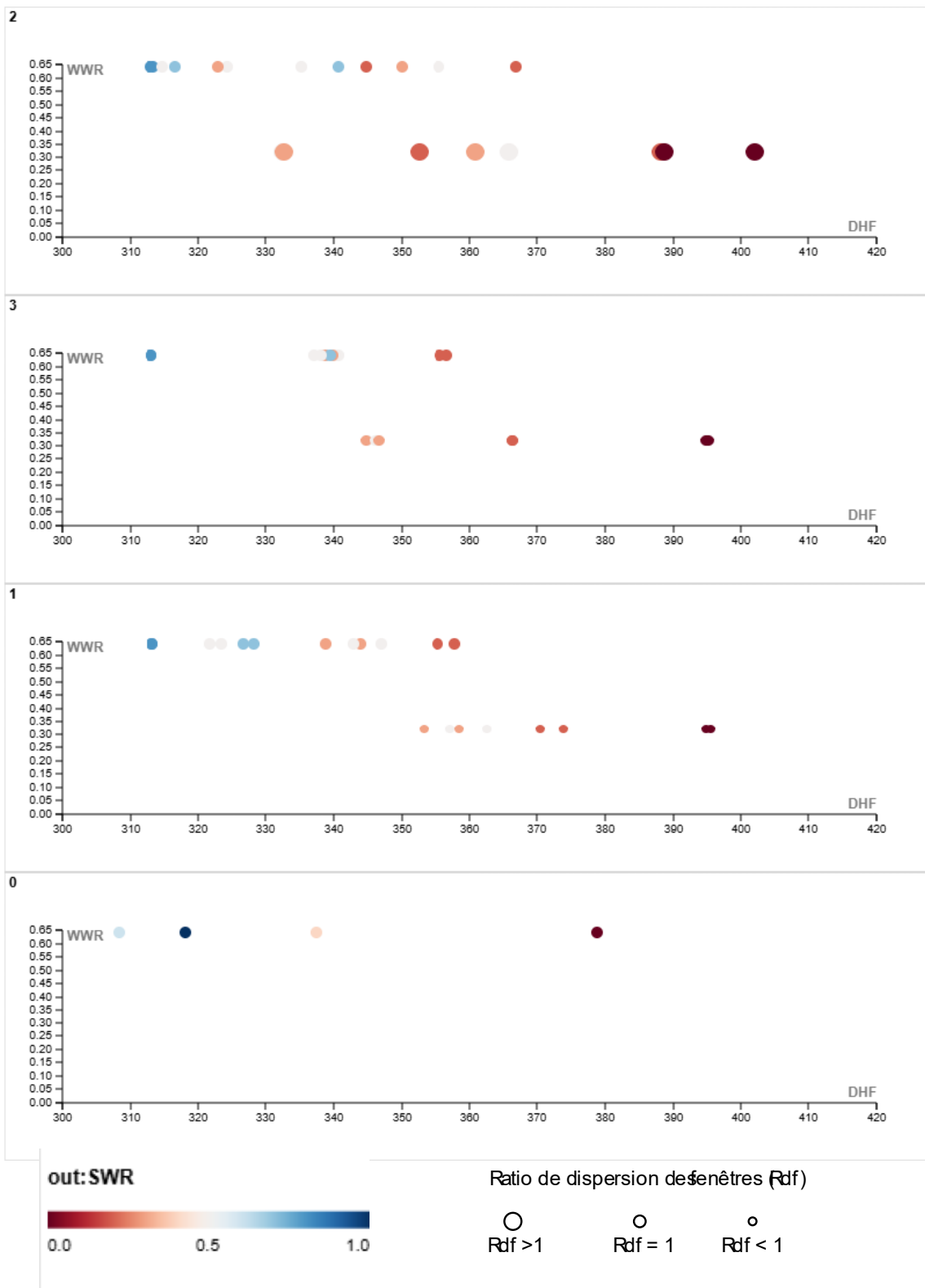


Figure 40 Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie de la Barre .Source Auteur

- **Influence du SWR (variation de couleurs) :**

Comme pour la barre, on observe une variation nette. Les façades ayant une majorité de protections solaires (les points bleus) ont des valeurs de Degrés-Heures de confort bien plus faibles (inférieur à 330DH) quel que soit la typologie. Les façades ayant une faible protection solaire, (les points rouges et orange) forment un dégradé jusqu'à atteindre un maximum qui est systématiquement une façade avec une absence de protection solaire..

La protection solaire dicte la plage de confort. Sans ombrage efficace (SWR élevé), aucune façade ne permet d'atteindre les minimas atteints durant cette étude (<320 DH UTCI).

- **Influence du WWR (axe des ordonnées) :**

La comparaison révèle que les configurations associant une surface vitrée importante (65%) à un dispositif d'ombrage (points bleus, situés vers 310 DH) surpassent nettement les configurations à faible vitrage (30%) dépourvues de protection (points rouges, situés au-delà de 360 DH).

Donc une façade avec un vitrage important (WWR = 65%) n'augmente pas l'inconfort thermique urbain à condition d'être protégée par des protections solaires. En outre, réduire la taille des fenêtres (WWR) est une stratégie moins efficace que d'ajouter des protections solaires.

5.2 Ilot

5.2.1 Influence selon la typologie de façade

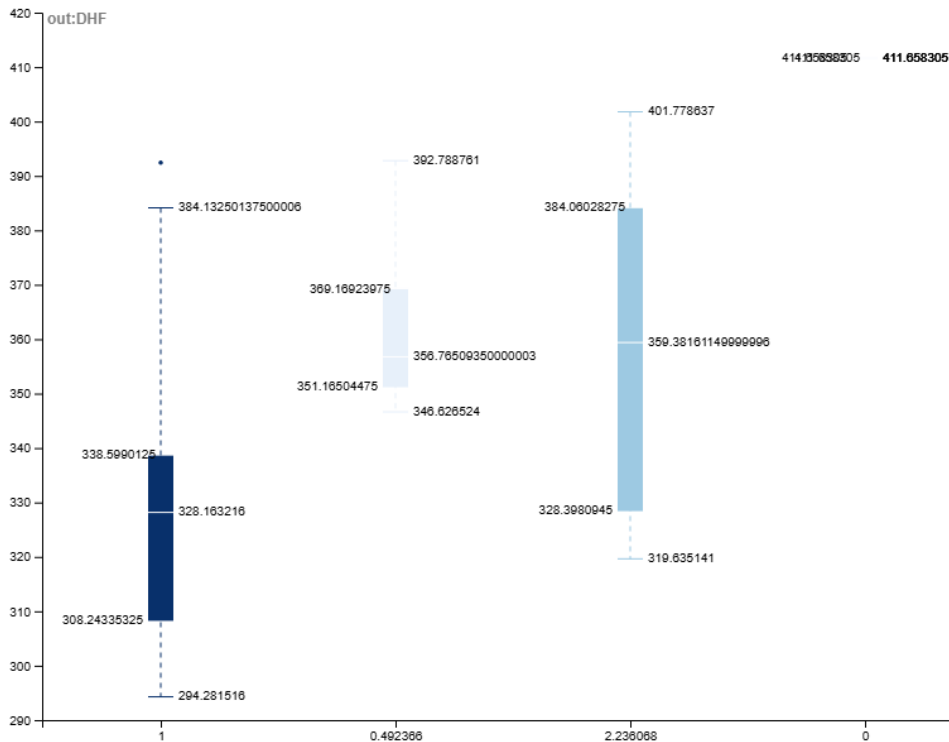


Figure 41 Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie de l'îlot. Source Auteur

Les conclusions sur le tissu urbain de l'îlot sont les mêmes que pour le tissu urbain de la barre

- Les façades ayant un ratio de dispersion des fenêtres supérieur à 1 (disposition horizontale) engendrent une variation de 56 Degrés-Heures UTCI sur la période étudiée (90h). Cela correspond à une incertitude thermique moyenne de 0,62°C devant la façade.
- Comme pour la morphologie de la barre, les dispositions verticales exercent une influence homogène sur le confort thermique. Peu importe la configuration exacte, le confort restera compris dans un intervalle réduit de 18 degrés-heures UTCI, soit une variation moyenne de ressenti de seulement 0,2°C sur la portion de rue face à la façade.
- Pour les façades où Rdf = 1 on observe une boîte avec une amplitude de 30 degrés-heure UTCI (soit 25% de plus que pour la morphologie de la barre.). Cependant la différence d'espérance est de 4% (339 DH pour la barre et 328 DH pour l'îlot, ce qui est négligeable dans notre cas, En effet $4\% \times 339 DH = 13.56 DH$, ce qui correspond à un écart de ressenti moyen de 0.16°C.

5.2.2 Influence de l'ombrage

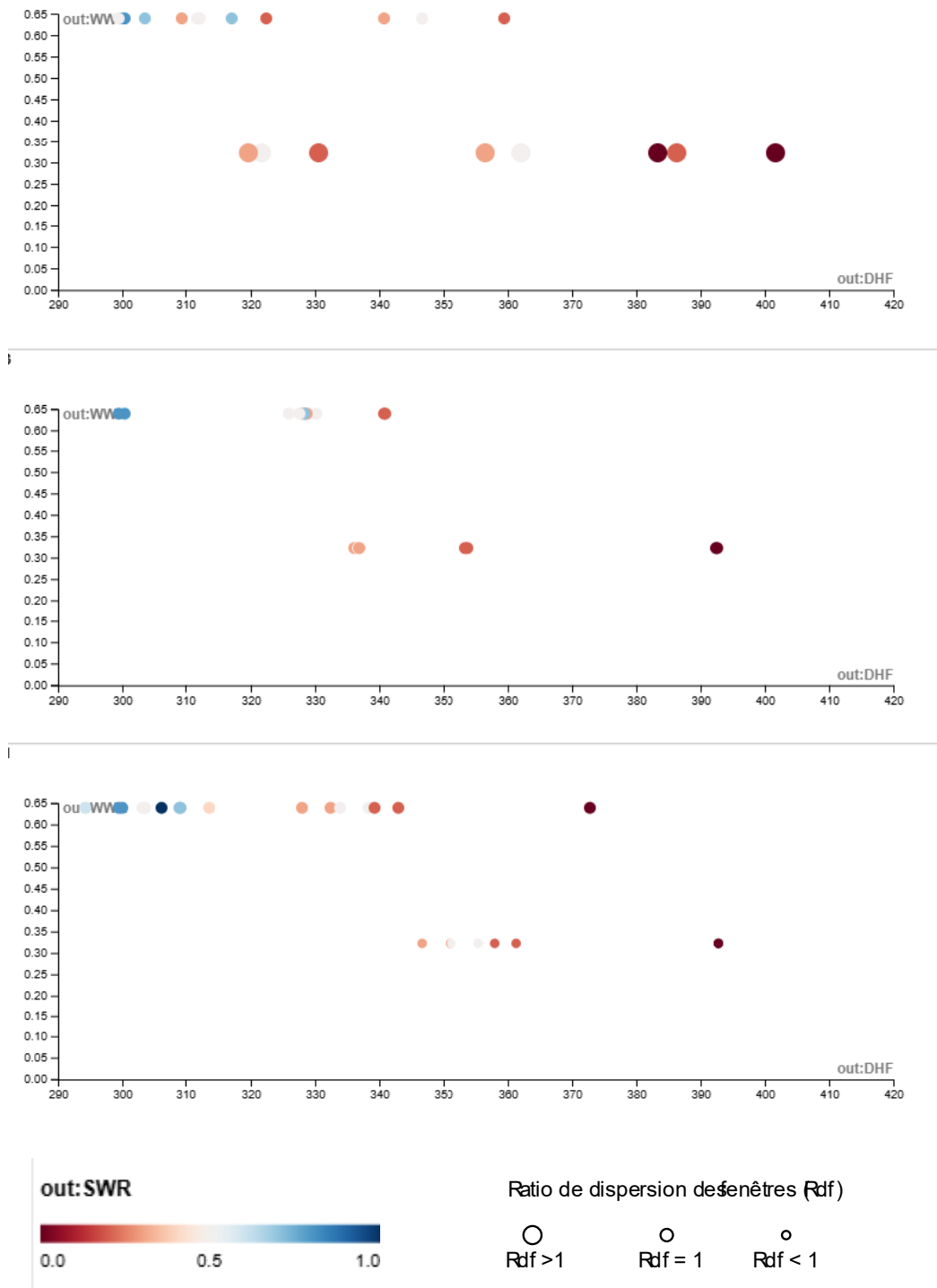


Figure 42 : Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie de l'ilot .Source Auteur

Ce graphique montre que l'ilot et la barre ont un impact similaire sur le confort urbain. L'écart de performance est insignifiant (seulement 2 DH). On retrouve donc le même constat, ce n'est pas la forme du bâtiment qui compte dans notre étude, mais uniquement les protections solaires. Plus elles sont présentes, plus le confort s'améliore.

5.3 Plot

5.3.1 Influence selon la typologie de façade

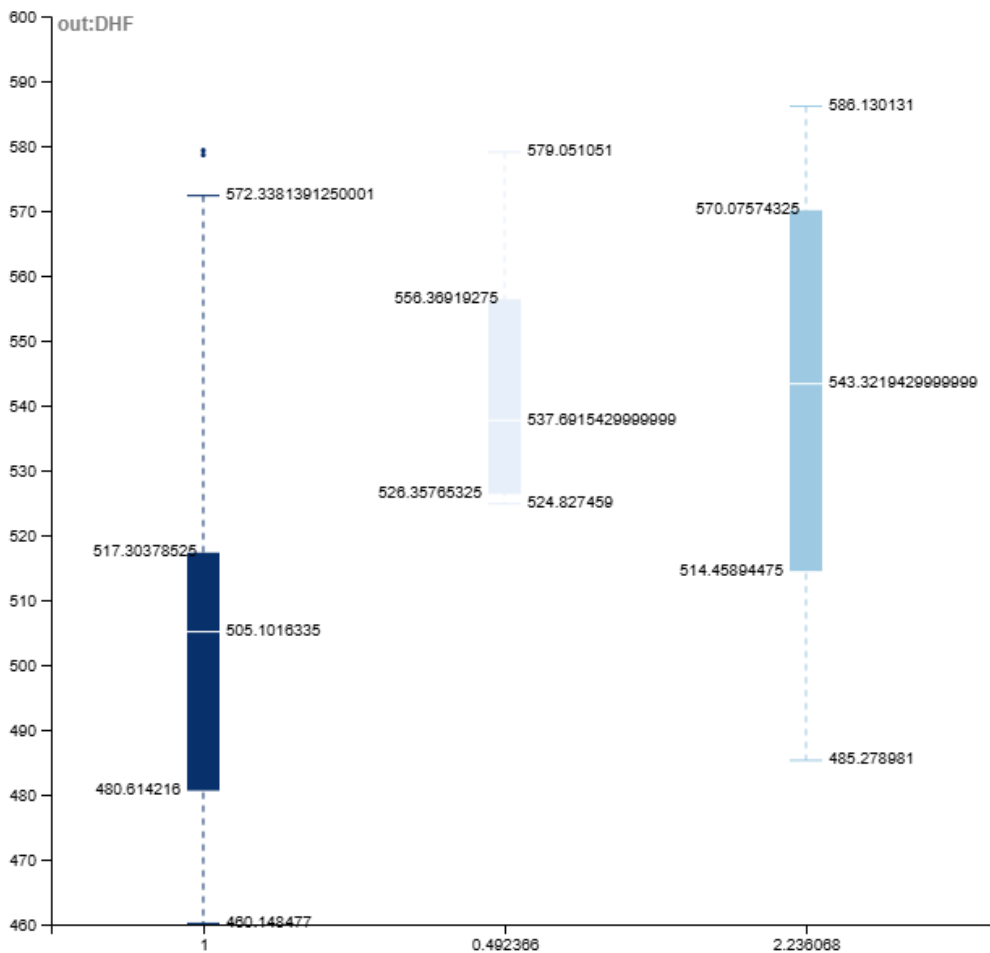


Figure 43 Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie du plot .Source Auteur

Là aussi les conclusions sur l'impact de la position des fenêtres de l'îlot et de la barre s'appliquent sur le plot, cependant les valeurs du plot sont bien plus élevées.

- Les façades ayant un ratio de dispersion des fenêtres supérieur à 1 (disposition horizontale) engendrent une variation de 56 Degrés-Heures UTCI sur la période étudiée (90h). Cela correspond à une incertitude thermique moyenne de 0,62°C devant la façade. Tout comme la morphologie de l'îlot.
- Comme pour la morphologie de la barre et de l'îlot, les dispositions verticales exercent une influence homogène sur le confort thermique. Peu importe la configuration exacte, le confort restera compris dans un intervalle réduit de 30 degrés-heures UTCI(556-526). Soit une variation moyenne de ressenti de seulement 0,2°C sur la portion de rue face à la façade.
- Pour les façades où Rdf = 1 on observe une boîte avec une amplitude de 37 degrés-heure UTCI (soit 25% de plus que pour la morphologie de la barre.).

Cependant on observe que l'espérance de chaque configuration de façades est beaucoup plus élevée.

. On observe en moyenne pour

-Rdf=1, une augmentation de 66%

-Rdf<1, une augmentation de 67%

-Rdf>1, une augmentation de 66 pourcents

Tableau de synthèse des valeurs médianes en degrés heure UTCI des différentes morphologies urbaines			
Rdf	1	<1	>1
Plot	505	537	543
Barre	339	366	363
Ilot	328	356	359

5.3.2 Influence de l'ombrage

On observe un décalage important de l'ensemble des résultats vers la droite de l'axe : le seuil minimal de l'inconfort démarre désormais à 460 DH (contre 310 DH pour l'îlot et 290 pour la barre). Malgré cette dégradation globale de la performance (+150 DH en moyenne), la structure de répartition des points est identique.

En effet, la répartition des façades ayant un SWR élevé (les points bleus) est uniquement présente sur la partie gauche du graphique (460-470 DH) donc les façades optimisant le confort thermique extérieur.

Il en va de même pour les façades qui optimisent l'inconfort thermique (590 DH.), qui sont toutes des façades avec un SWR faible

De surcroît, l'écart entre une façade protégée et une façade sans protection s'est creusé. Il est ici de 130 DH, contre 100 DH UTCI dans la morphologie de la barre et de l'îlot.. Donc plus la morphologie urbaine est exposée, plus l'impact de l'absence des protections solaires est notable. Finalement cette morphologie urbaine est la seule par laquelle la modification de la façade change de catégorie de l'échelle définie dans la partie 4-2. En modifiant la façade, on passe d'un « fort stress chaud » à un stress « chaud modéré » (inférieur à 540 DH UTCI).

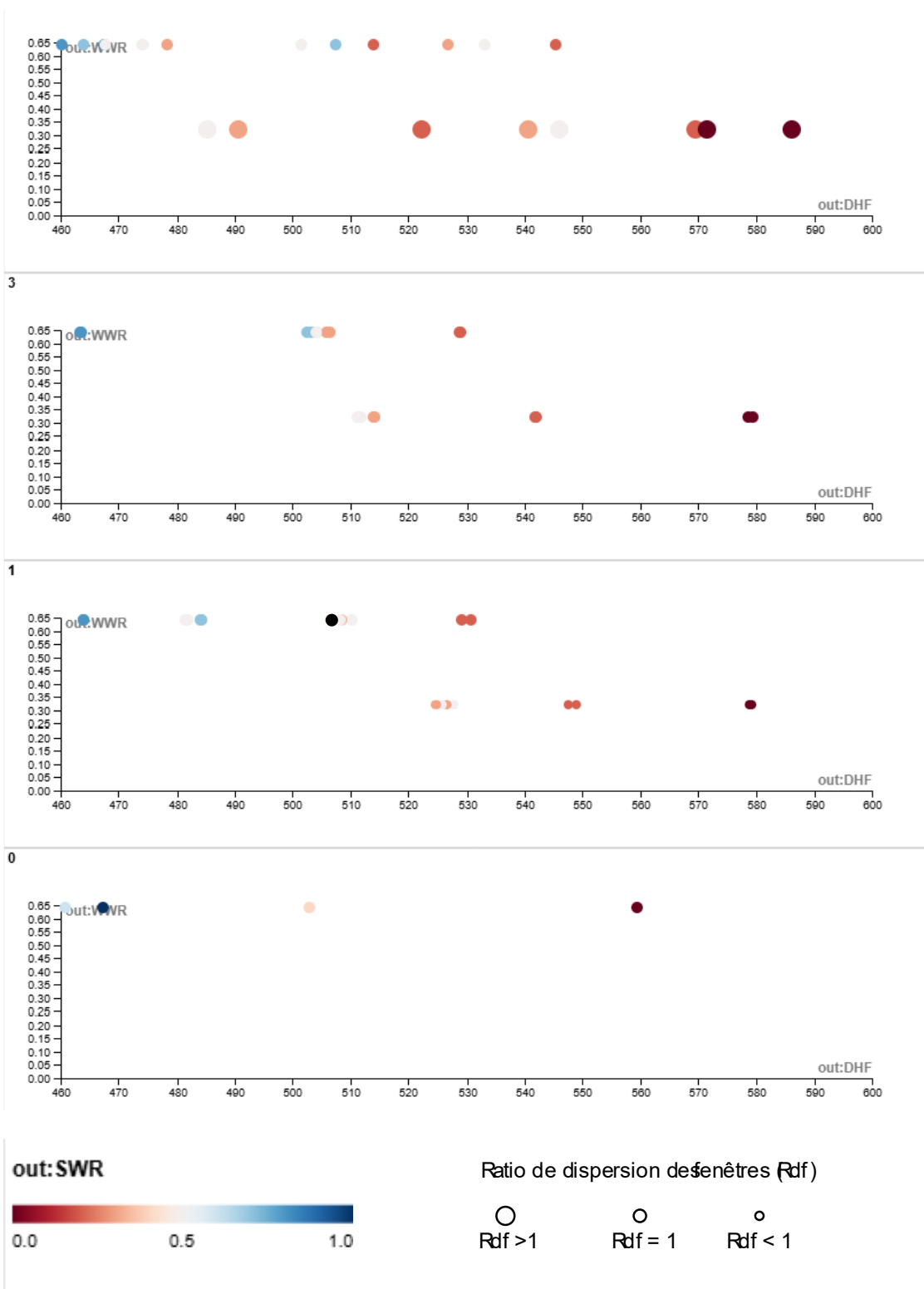


Figure 44 Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie du plot .Source Auteur

6 CONCLUSION

6.1 Limites du modèle

Cette paramétrisation de la simulation a nécessité des approximations. On peut séparer ces dernières en deux catégories, les exclusions systémiques et les simplifications paramétriques.

Deux exclusions systémiques caractérisent notre étude.

- La première est l'absence de l'influence anthropique. La modélisation ne prend pas en compte l'apport thermique produit par les habitants, que ce soit la consommation de la climatisation, du chauffage, ou encore l'utilisation de la voiture, mais également les activités et actions qu'ils peuvent effectuer comme cuisiner ou fermer les stores. De même, la pollution n'est pas prise en compte.
- La seconde limite importante de ce modèle est l'absence totale de végétation, aucun arbre, aucune surface végétalisée n'ont été intégrés dans le modèle, ce qui a plusieurs conséquences :
 - D'une part, cela empêche toute prise en compte de l'évapotranspiration, un phénomène qui participe au rafraîchissement de l'air ambiant.
 - D'autre part, l'ombrage naturel fourni par la végétation sur les façades ou dans les canyons urbains n'est pas pris en compte, ce qui tend à surestimer l'exposition au rayonnement solaire direct. Enfin, la végétation joue un rôle dans la perturbation de la ventilation urbaine. Cet effet est lui aussi absent du modèle.Ainsi, le tissu urbain est considéré comme étant purement minéral. Même si cela est considéré comme une limite vis-à-vis de la simulation, il est aussi intéressant d'avoir un modèle sans végétation car dans la plupart des cas elle est bénéfique au confort thermique. Un tissu purement minéral peut être considéré comme le cas le plus défavorable, donc l'observation de l'impact de la façade sera plus simplement identifiable.

Pour ce qui est des simplifications paramétriques :

- Les 3 morphologies urbaines étudiées ont un ratio $H/W=1$. Cela limite les différents ombres portées entre bâtiments mais uniformise les comportements aérauliques des morphologies urbaines.
- La modélisation du vent est restreinte à deux orientations majeures. Pour limiter les temps de calcul, l'analyse par mécanique des fluides (CFD) a été exclue. Cette simplification ignore les phénomènes aérodynamiques complexes : le modèle ne reproduit ni les turbulences locales, ni les zones de recirculation (air stagnant), ni les accélérations fines entre les bâtiments.
- Seule la façade étudiée varie. Les façades composant le tissu urbain environnant sont modélisées comme des murs pleins. Ce choix représente le pire scénario envisageable . Contrairement au vitrage qui peut réfléchir le rayonnement, un mur minéral opaque stocke la chaleur (inertie) et la restitue par rayonnement infrarouge vers l'espace public (piège radiatif), maximisant ainsi la contrainte sur le confort piéton.
- Les protections solaires ont été modélisées sans masse, elles n'ont donc pas d'inertie thermiques. Le modèle ne prend donc pas en compte le réchauffement propre des protections solaire ni la ré-émission de chaleur vers la fenêtre ou la rue une fois chaud.
-

Cette étude permet d'établir une hiérarchie claire des paramètres influençant le confort thermique extérieur :

La présence de protections solaires est le facteur directeur. Sur l'ensemble des simulations, les façades protégées (SWR élevé) garantissent systématiquement les températures ressenties les plus basses, reléguant les autres paramètres au second plan.

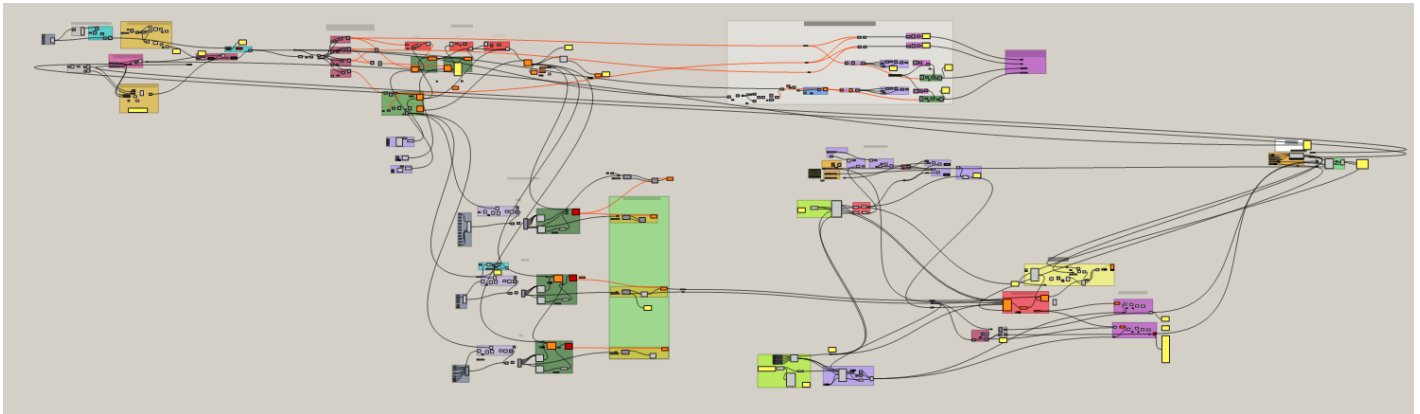
Le ratio WWR n'est pas un facteur aggravant en soi. L'étude démontre qu'une grande fenêtre protégée est thermiquement plus performante qu'une petite fenêtre exposée. L'impact du vitrage est entièrement conditionné par la qualité de ses protections solaires.

L'analyse du ratio de dispersion des fenêtres (Rdf) révèle une différence de comportement marquée entre les dispositions verticales et horizontales :

- Les fenêtres verticales ($Rdf < 1$) présentent une plage de résultats beaucoup plus resserrée. Qu'elles soient bien ou mal protégées, leur impact thermique varie peu et cela quel que soit le tissu urbain. Pour la morphologie de la barre, la variation moyenne observée est de 0.2°C , pour la morphologie de l'îlot 0.2°C et pour la morphologie du plot 0.3°C .
- Tandis que les fenêtres horizontales ($Rdf > 1$) atteignent des extrêmes plus importants. C'est une géométrie à risque : une mauvaise protection solaire aura pour conséquence un inconfort thermique plus important. Pour la morphologie de la barre la variation moyenne observée est de 0.45°C , pour la morphologie de l'îlot 0.6°C et pour la morphologie du plot 0.6°C .

Annexes :

Script Grasshopper utilisé lors de cette étude :



Code couleur :

Vert : Composant lié à Ladybugtools

Filtrage : Rouge

Définition de liste : Jaune moutarde

Orange : Entrée de la simulation

Violet : Calcul des critères comparatifs

Extrait des données issues de la simulation

in:Couple module	in:TypoF	out:DHQ	out:DFH	out:WWR	out:SWR	out:Ratio_dispersion_W	out:Ratio dispersion_S	out:MorphoUout:Orientation
0	1	498,036818	463,911929	0,64	0,8		1	1 Plot 180
1	1	514,437193	510,250587	0,64	0,5		1	0,492366 Plot 180
2	1	504,741901	484,287685	0,64	0,7		1	1 Plot 180
3	1	520,499615	527,804677	0,32	0,5	0,492366	0,492366	Plot 180
4	1	498,230376	463,917346	0,64	0,8		1	1 Plot 180
5	1	514,081256	508,494927	0,64	0,3		1	0,492366 Plot 180
6	1	504,253215	481,845518	0,64	0,5		1	1 Plot 180
7	1	520,238849	526,572811	0,32	0,3	0,492366	0,492366	Plot 180
8	1	514,680249	506,280364	0,64	0,5		1	0,492366 Plot 180
9	1	514,244352	506,712898	0,64	0,3		1	0,492366 Plot 180
10	1	521,588073	529,140001	0,64	0,2		1	0,492366 Plot 180
11	1	540,065737	578,741686	0,32	0	0,492366	0	Plot 180
12	1	505,170746	484,072666	0,64	0,7		1	1 Plot 180
13	1	504,298344	481,421251	0,64	0,5		1	1 Plot 180
14	1	521,907606	530,700585	0,64	0,2		1	0,492366 Plot 180
15	1	528,220798	548,911695	0,32	0,2	0,492366	0,492366	Plot 180
16	1	521,019704	525,71218	0,32	0,5	0,492366	0,492366	Plot 180

Table des Figures

Figure 1 Paramètre influençant les microclimats urbains	9
Figure 2 Echelles des microclimats urbains source : Mapping the urban microclimatic spatial distribution in a sub-tropical high-density urban environment	11
Figure 3 Illustration du plan en « arrête de poissons » de Korcula permettant de se protéger des vents provenant de la mer.....	12
Figure 4 Schéma décrivant les espaces public sont habités Source : Jan Gelh dans Pour des villes à échelle humaine : Espace public et vie sociale.....	14
Figure 5 Exemple de l'aerodynamise d'un tissu urbain.	22
Figure 6 : Axonométrie et plans schématique du tissu urbain servant à illustrer les différents paramètres. Source : Auteur	23
Figure 7 : Schémas décrivant respectivement l'albédo, l'absorbance et la transmittance.....	25
Figure 8 : Schéma montrant les bénéfices à la plantation d'arbre dans les espaces public. Source : APUR.....	27
Figure 9 Classement LCZ source : Stewart and Oke, 2012	29
Figure 10 Source Weather in the City : how design Shapes the Urban Climate.....	30
Figure 11 Schéma explicatif des UCM monocouche. Source : Chen, F.,The integrated WRF/urban modelling system : Development, evaluation, and applications to urban environmental problems.	31
Figure 12 Scéma explicatif du fonctionnement de la discrétisation d'un UCM multicouche. Source : Chen, F.,The integrated WRF/urban modelling system : Development, evaluation, and applications to urban environmental problems.....	31
Figure 13 :Exemple de maillage d'un tissu urbain effectué par le modèle SOLENE . Source : Exemple de maillage SOLENE-Microclimat	32
Figure 14 Schéma expliquant comment Energy plus gère les flux de données pour simuler des données climatiques. Source Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus : Creating a new-generation building energy simulation program. <i>Energy and Buildings</i> , 33(4), 319-331.....	34
Figure 15 Logo Ladybug.....	34
Figure 16 Logo Honeybee.....	34
Figure 17 Logigramme de l'étude effectuer par N. Loh et P. Bhiwapurkar Source : « Urban heat-mitigating building form and façade framework ». N. Loh et P. Bhiwapurkar.....	35
Figure 18 Logigramme du script Grasshopper.....	37
Figure 19 Morphologie urbaine de la barre. Source : Auteur.....	39
Figure 20 Morphologie urbaine du plot. Source: Auteur	40
Figure 21 Morphologie urbaine de l'ilot. Source : Auteur.....	41
Figure 22 Mur Plein. Source : Auteur	43
Figure 23 Dimension Brise Soleil. Source : Auteur.....	43
Figure 24 Dimension Fenêtre. Source : Auteur.....	43
Figure 25 Dimension Terrasse avec garde-corps vide. Source : Auteur	43
Figure 26 Dimension Terrasse avec garde-corps plein. Source : Auteur	44
Figure 27 – a - Réflexion sur les méthodes de modélisation de façade avec des modules Source : Auteur.....	45
Figure 28-b-Réflexion sur les méthodes de modélisation de façade avec des modules Source : Auteur.....	46
Figure 29 – a- Règle de simplification de disposition des modules sur la façade	46
Figure 30- Exemples de typologies de façades	47
Figure 31 - Typologies de facades retenues Source : Auteur.....	48
Figure 32 Carte de la région PACA. Adapté de https://www.toutdegorgement.fr/carte-detaillee-region-paca/	49
Figure 33 Rose des vents de la station météo choisis Source: Auteur	50
Figure 34 Schéma de l'implémentaion du vent dans la simulation. Sourcec : Auteur.....	51

Figure 35	Température de bulbe (°C) sec moyenne sur un an. Source : Auteur.....	52
Figure 36	Température de Rosée (°C) moyenne sur un an . Source : Auteur	52
Figure 37	Humidité Relative (%) moyenne sur un an. Source : Auteur.....	52
Figure 38	Position du soleil sur la période considéré	53
Figure 39	Degrés heure UTCI en fonction de la dispersion des fenêtres. Source Auteur.....	55
Figure 40	Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie de la Barre .Source Auteur.....	56
Figure 41	Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie de l'ilot. Source Auteur.....	58
Figure 42	: Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie de l'ilot .Source Auteur	59
Figure 43	Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie du plot .Source Auteur	60
Figure 44	Graphique mettant en liant le WWR, le SWR et le Rdf en fonction du DHF pour la morphologie du plot .Source Auteur	62

Bibliographie :

- Melendo, A., & Cabeza-Lainez, J.-M. (2018). Environmental Features of Chinese Architectural Heritage : The Standardization of Form in the Pursuit of Equilibrium with Nature. *Sustainability*, 10, 2443.
- Lenzholzer, S. (2015). *Weather in the City—How Design Shapes the Urban Climate*. Nai 010 Uitgevers/Publishers.¹Emmanuel, R., & Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate : The case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research - CLIMATE RES*, 30, 189-200.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1), 103-113.
- ¹Katzschner, L., & Ng, E. (s. d.). *Ventilation Investigations in a densely built up Area of Hong Kong to describe Thermal Comfort*.
- ¹Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Heat storage in urban areas: Observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology*, 38(7), 922-940.
- Katzschner, L., & Ng, E. (s. d.). *Ventilation Investigations in a densely built up Area of Hong Kong to describe Thermal Comfort*.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055.
- Rapoport, A. (1969). *House form and culture*. Prentice-Hall
- Baş, H., & Eğercioğlu, Y. (2016). *Impact of Quality of Wind on Urban Form : Analysis of Vernacular and Contemporary Wind-Adaptive Urban Design Approaches*.
- Kazmierczak, A., & Carter, J. (2010). *Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies*.
- Solcerova, A., Van Emmerik, T., Hilgersom, K., Van de Ven, F., & Van de Giesen, N. (2018). Uchimizu : A Cool(ing) Tradition to Locally Decrease Air Temperature. *Water*, 10(6), 741.
- Guo, Y., Gasparrini, A., Armstrong, B., Li, S., Tawatsupa, B., Tobias, A., Lavigne, E., Coelho, M., Leone, M., Pan, X., Tong, S., Tian, L., Kim, H., Hashizume, M., Honda, Y., Guo, Y., Wu, C.-F., Punnasiri, K., Yi, S.-M., & Williams, G. (2014). Global Variation in the Effects of Ambient Temperature on Mortality: A Systematic Evaluation. *Epidemiology*, 2014, 1-9.
- Laaïdi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., & Beaudeau, P. (2012). The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 254-259.
- Zhou, W., Li, X., Wang, Q., Ling, L., & Zhang, H. (2025). The combined effects of sleep and extreme heat exposure on cognitive function among older adults. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 117683.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons : A review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155-182.
- ADEME. (2017). *Pollution atmosphérique et santé : l'essentiel pour comprendre*
- Marcinčzak, S., Iglesias-Pascual, R., Kopeć, D., Wróbel, K., & Mooses, V. (2025). Landscapes of thermal inequality : Exploring patterns of climate justice across multiple spatial scales in Spain. *Landscape and Urban Planning*, 254, 105255.
- Sánchez, C., Núñez Peiró, M., Taylor, J., Mavrogianni, A., & Neila, J. (2019). Assessing population vulnerability towards summer energy poverty : Case studies of Madrid and London. *Energy and Buildings*, 190, 132-143.
- Dogan, T., & Reinhart, C. (2017). Shoeboxer : An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. *Energy and Buildings*, 140, 140-153.

- Marsault, X. (2018). *Écoconception générative urbaine*
- Fabbri, K., Gaspari, J., Costa, A., & Principi, S. (2022). The Role of Architectural Skin Emissivity Influencing Outdoor Microclimatic Comfort : A Case Study in Bologna, Italy. *Sustainability*, 14(22), 14669.
- Dogan, T., & Reinhart, C. (2017). Shoeboxer : An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. *Energy and Buildings*, 140, 140-153.
- Bouyer, J., Musy, M., Huang, Y., & Athamena, K. (2011). *Mitigating Urban Heat Island Effect by Urban Design : Forms and Materials* (p. 164-181).
- Gao, S., Li, Y., Wang, Y. A., Meng, X. Z., Zhang, L. Y., Yang, C., & Jin, L. W. (2017). A human thermal balance based evaluation of thermal comfort subject to radiant cooling system and sedentary status. *Applied Thermal Engineering*, 122, 461-472.
- Salamanca, F., & Martilli, A. (2010). A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4), 345-356.
- Krüger, E., & Di Napoli, C. (2022). Feasibility of climate reanalysis data as a proxy for onsite weather measurements in outdoor thermal comfort surveys. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 1-14.
- Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., & Clappier, A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4), 331-344
- 2021 ASHRAE handbook. *Fundamentals* (Inch-pound edition). (2021). ASHRAE.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment : Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-7
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of Increasing Urban Density on Local Climate : Spatial and Temporal Variations in the Surface Energy Balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(4), 477-493.
- La, D., Dai, Y., Li, Y., Ge, T., & Wang, R. (2010). Study on a novel thermally driven air conditioning system with desiccant dehumidification and regenerative evaporative cooling. *Building and Environment*, 45(11), 2473-2484.
- Santiago, J.-L., Martilli, A., & Martin, F. (2017). On Dry Deposition Modelling of Atmospheric Pollutants on Vegetation at the Microscale : Application to the Impact of Street Vegetation on Air Quality. *Boundary-Layer Meteorology*, 162(3), 451-474.
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200-206.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., ... Zeidler, J. (2020). City-descriptive input data for urban climate models : Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31, 100536.
- Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K. W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F. P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A. A., & Zhang, C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system : Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273-288.

- Musy, M., & Bozonnet, E. (s. d.). *Du bâtiment à la ville, panorama des approches de modélisation du comportement thermique des bâtiments dans leur environnement.*
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus : Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331.
- NREL. (s. d.). *EnergyPlusValidationReports/ASHRAE140-HERS/Report/ASHRAE140-HERS.md at master · NREL/EnergyPlusValidationReports*. GitHub.
- ¹Sadeghipour Roudsari, M., & Pak, M. (2013). Ladybug : A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, 3128-3135.
- Loh, N., & Bhiwapurkar, P. (2022). Urban heat-mitigating building form and façade framework. *Architectural Science Review*, 65(1), 57-71.
- Nairn, J., & Fawcett, R. (2014). The Excess Heat Factor : A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(1), 227-253.
- DeKay, M., Brown, G. Z., & DeKay, M. (2014). *Sun, wind & light : Architectural design strategies* (3rd ed). Wiley.
- Soulhac, L., Perkins, R. J., & Salizzoni, P. (2008). Flow in a Street Canyon for any External Wind Direction. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(3), 365-388.
- 2021 ASHRAE handbook. *Fundamentals* (Inch-pound edition). (2021). ASHRAE. Chapitre 14
- Hensen, J. L. M. (2012). *Building Performance Simulation for Design and Operation* (1^{re} éd.). Routledge.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment : State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 915-931