

THERMOCITY

Îlot de chaleur urbain

Version 1.0 du 08/12/2022

CNES M Vincent LONJOU	 18 avenue Edouard Belin 31401 Toulouse Cedex 9 @ vincent.lonjou@cnes.fr  +33 (0)5 61 27 40 29	 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES
---------------------------------	---	---

Responsables techniques : Mme Marine GORET Mme Alexane LOVAT	@ marine.goret@meteo.fr  0561078583	 METEO FRANCE
	@ alexane.lovat@meteo.fr  01 77 94 70 03	

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
Rapport_v2022_12_08	18/10/2022	V1.0	Création

Signatures

	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Marine Goret Alexane Lovat	DSM/CS/DC	
Relecteur(s)	Raphaël Legrand	DSM/CS/DC	
Approbateur(s)			

Table des matières

1	Contexte	8
2	Présentation de la plateforme de modélisation	8
3	Étude	10
3.1	Comparaison des températures satellites et modèle	10
3.1.1	Choix des situations	10
3.1.2	Comparaison sur l'ensemble de l'image	11
3.1.3	Comparaison sur les zones urbaines	14
3.1.4	Conclusion	17
3.2	Construction d'un indice de confort thermique à l'échelle de la maille modèle	18
3.2.1	Position du problème	18
3.2.2	Comparaison des fractions d'ombre réelle et simplifiée et leur impact sur le calcul d'un indice de confort moyen	19
3.2.3	Conclusion	24
3.3	Impact du changement climatique sur l'îlot de chaleur urbain	26
3.3.1	Méthodologie	26
3.3.2	Estimation de l'îlot de chaleur urbain de Montpellier en climat futur	29
3.3.3	Conclusion	36
[ANNEXE A]	La plateforme CLUE (Climat Urbain Etude)	37
[ANNEXE B]	Traitement des données d'occupation du sol	37

Liste des figures

Figure 1: Représentation schématique de la plateforme de modélisation du climat urbain CLUE. Elle s'appuie sur deux modèles numériques : Méso-NH (modélisation atmosphérique) et SURFEX (modélisation des échanges surface-atmosphère). Dans SURFEX, chaque type de surface (ville, surfaces naturelles, mer et lacs) est décrit par un schéma différent. Le schéma TEB (Town Energy Balance) décrit les surfaces urbaines.	9
Figure 2: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m et leur différence (à gauche) sur Toulouse le 16/07/2019 à minuit heure locale.	11
Figure 3: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m ainsi que leur différence (à gauche) pour le 07/08/2020 à 14 h heure locale sur Toulouse.	12
Figure 4 : Boîtes à moustaches des différences de températures de surfaces entre les données modèles et satellites pour les deux images sélectionnées (16/07/2019 00 h et le 07/08/2020 14h heure locale)	13
Figure 5: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m ainsi que leur différence (à gauche) pour le 16/07/2019 à minuit et le 07/08/2020 à 14 h (heure locale), sur les zones considérées comme urbanisées dans le modèle.	14
Figure 6 : Boîtes à moustaches des différences de températures de surfaces entre les données modèles et satellites pour les deux images sélectionnées (16/07/2019 00 h et le 07/08/2020 14h heure locale)	15
Figure 7: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m pour le 16/07/2019 à minuit et le 07/08/2020 à 14 h (heure locale), sur les zones considérées comme urbanisées dans le modèle. La température de surface modèle est une température dite reconstruite, <i>qui a été calculée à partir des températures de surfaces des surfaces élémentaires visibles depuis l'espace : les toits, les routes et les espaces naturelles/la végétation urbaine.</i>	16
Figure 8 : Boîtes à moustaches des différences de températures de surfaces entre les données modèles et satellites pour les deux images sélectionnées (16/07/2019 00 h et le 07/08/2020 14h heure locale)	17
Figure 9: Représentation schématique du problème	19
Figure 10: Fractions d'ombre calculées sur l'Eurométropole de Strasbourg pour le 30/06/2015 à 5TU à partir de la géométrie simplifiée du modèle (à gauche) et de la géométrie réelle (à droite). La couleur jaune indique une fraction d'ombre égale à 1 et la couleur bleu foncé une fraction d'ombre égale à 0.	21
Figure 11: Erreur de la fraction d'ombre simplifiée par rapport à la fraction d'ombre réelle pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).	22
Figure 12: Boxplot des erreurs de la fraction d'ombre simplifiée par rapport à la fraction d'ombre réelle pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).	23
Figure 13: Erreur de l'indice mixte simplifié par rapport à l'indice mixte réel pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).	23
Figure 14: Boxplot des erreurs de l'indice mixte simplifié par rapport à l'indice mixte réel pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).	24

Figure 15: Répartition des 10 types de temps sensibles de Montpellier selon la direction du vent, l'amplitude thermique journalière moyenne, la pression et l'humidité relative.	30
Figure 16: Répartition des 10 types de temps sensibles de Montpellier selon la nébulosité, la force du vent et la quantité de pluie.	30
Figure 17: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier pour toutes les journées comprises entre le 1er janvier 2014 et le 31 décembre 2021.	31
Figure 18: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier par saison entre 2014 et 2021 (été en haut à gauche, automne en haut à droite, hiver en bas à gauche et printemps en bas à droite).	32
Figure 19: ICU moyen heure par heure (indiquée en UTC dans les bulles grises) pour le type de temps sensible 10 de Montpellier. Attention, la palette de couleurs est différente pour chaque image.	33
Figure 20: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier en 2041 pour tous les jours de l'année (à gauche) et pour les journées de juin, juillet, août (à droite)	34
Figure 21: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier en 2099 pour tous les jours de l'année (à gauche) et pour les journées de juin, juillet, août (à droite)	34
Figure 22: ICU moyen heure par heure (indiquée en UTC dans les bulles grises) pour le type de temps sensible 7 de Montpellier. Attention, la palette de couleurs est différente pour chaque image.	35

Glossaire

Abréviation	Signification
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
LCZ	Local Climate Zone
RCP	Representative Concentration Pathways (Profils représentatifs d'évolution de concentration)
UTCI	Universal Thermal Comfort Index (indice de confort thermique)
USR	Unité Spatiale de Référence (zone géographique de la taille du pâté de maisons)
T2M	Température à deux mètres au-dessus du sol
TTS	Type de temps sensible
TU	Temps Universel (Heure au niveau du méridien de Greenwich)
ZS	Altitude

1 Contexte

Le projet SCO THERMOCITY (2021-2022) a pour objectif d'utiliser les images satellites pour étudier les territoires urbains. L'accent est mis plus particulièrement sur la valorisation des images thermiques à travers deux grands axes d'études : la mise en évidence des pertes de chaleur en hiver, et le diagnostic du phénomène d'îlot de chaleur urbain en été. La contribution de Météo-France à ce projet s'inscrit dans le deuxième axe.

Météo-France a développé depuis de nombreuses années, en recherche puis sous forme de services aux industriels, une compétence reconnue en modélisation très haute résolution (100 m) des milieux urbains notamment. Les modèles utilisés (MESONH, SURFEX, TEB) sont des modèles à l'état de l'art, reconnus par la communauté scientifique internationale. Ils sont capables de simuler tous les paramètres atmosphériques et de surface d'intérêt avec une paramétrisation de la nature de l'occupation des sols : végétation, bâtiment, couleur du revêtement, etc. Dans le cadre du projet THERMOCITY, Météo-France a mis à disposition ses compétences de modélisation afin de répondre à quatre questions :

- Les températures de surfaces mesurées par satellites sont-elles proches des températures simulées par les modèles de climat urbain ?
- Quelle relation existe-t-il entre la température de surface et la température de l'air ? Peut-on estimer l'îlot de chaleur à partir d'images satellites ?
- Comment construire un indice de confort thermique à l'échelle de la maille du modèle (1ha) qui tienne compte de la part d'ombre disponible ?
- Quel est l'impact du changement climatique sur l'îlot de chaleur urbain ?

En particulier, les villes de Toulouse, Strasbourg et Montpellier ont servi de cas d'études.

2 Présentation de la plateforme de modélisation

L'ensemble de cette étude a été mené en s'appuyant sur de la modélisation numérique effectuée à l'aide de modèles de prévision numérique du temps.

En particulier, les simulations numériques ont été réalisées à l'aide de la plateforme de modélisation CLUE (Climat Urbain Étude) représentée schématiquement dans la Figure 1. Une description détaillée de cette plateforme est donnée en annexe (cf. p 37). Ici, la résolution du modèle de surface est de 100 m.

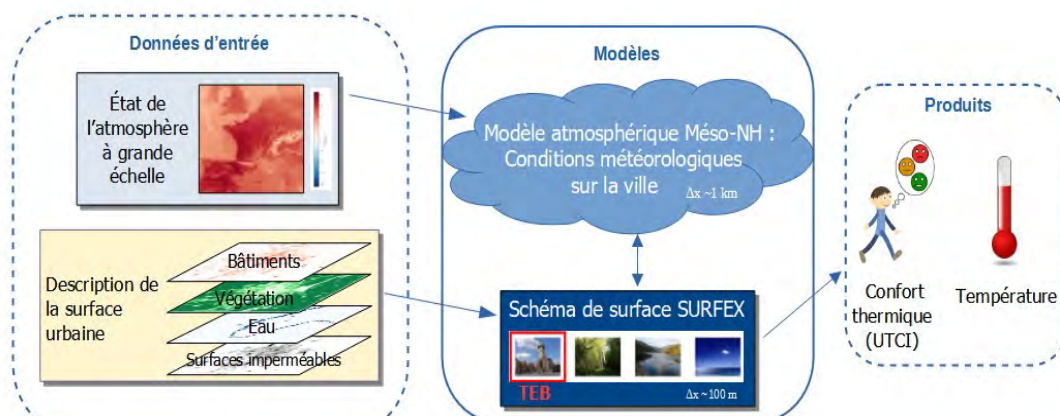


Figure 1: Représentation schématique de la plateforme de modélisation du climat urbain CLUE. Elle s'appuie sur deux modèles numériques : MésO-NH (modélisation atmosphérique) et SURFEX (modélisation des échanges surface-atmosphère). Dans SURFEX, chaque type de surface (ville, surfaces naturelles, mer et lacs) est décrit par un schéma différent. Le schéma TEB (Town Energy Balance) décrit les surfaces urbaines.

Plusieurs types de données sont nécessaires pour alimenter les modèles numériques :

- des données décrivant l'occupation des sols (surfaces végétalisées, surface bâtie...) ;
- des données décrivant l'état des sols (contenu en eau, température...) au début de la simulation ;
- des données décrivant l'état de l'atmosphère à grande échelle, au début de la simulation, puis toutes les 6 heures.

Données d'occupation du sol

Les données d'occupation du sol sont issues de la chaîne Geoclimate¹, produites à partir des données de la BD-Topo v2 (Eurométropole de Strasbourg) ou d'Open Street Map (Montpellier et Toulouse). La chaîne Geoclimate permet de produire plus d'une soixantaine d'indicateurs qui décrivent la morphologie urbaine et l'organisation spatiale du tissu urbain. Pour cette étude, on a utilisé les indicateurs produits à l'échelle des Unités Spatiales de Références (USR, échelle du pâté de maisons).

En dehors du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg les données ont été complétées avec la base de données CORINE Land Cover. Cette base de données a été construite à partir d'images satellites à une résolution de 20 m, converties par interprétation humaine en une base vectorielle de polygones de 25 hectares minimum².

1 Librairie dont le développement a été financé par les projets URCLIM et PAENDORA (cf. <https://github.com/orbisgis/geoclimate>)

2 <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-occupation-des-sols-en-france/>

Des détails sur la mise en forme et le traitement de ces données pour les rendre exploitables par les modèles numériques sont donnés en annexe (cf. p 37).

Données météorologiques

Pour connaître l'état du sol et de l'atmosphère à grande échelle, on utilise des données issues de modèles de prévision numérique du temps, et plus particulièrement des données d'analyses. Ces dernières correspondent à la dernière prédiction du modèle météorologique, recalibrée en fonction de données d'observation (observations satellites, mesures in-situ, radiosondage...). Il s'agit de la meilleure connaissance de l'état de l'atmosphère que l'on ait pour un instant donné.

Pour l'Eurométropole de Strasbourg, les données proviennent du modèle du Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme. Il s'agit d'un modèle de prévision numérique du temps dont le domaine de simulation recouvre l'ensemble du globe avec une résolution de l'ordre de 10 km. Le modèle du centre européen est l'un des meilleurs modèles de ce type au niveau mondial. Ses résultats sont utilisés régulièrement par les services météorologiques nationaux pour élaborer leurs prévisions météorologiques.

Pour les villes de Toulouse et Montpellier, on utilise les données du modèle AROME (modèle haute résolution – 1,3 km) de Météo-France. Il s'agit d'un modèle à aire limitée (disponible uniquement sur la France Métropolitaine), mais avec une résolution plus fine que le modèle du centre européen.

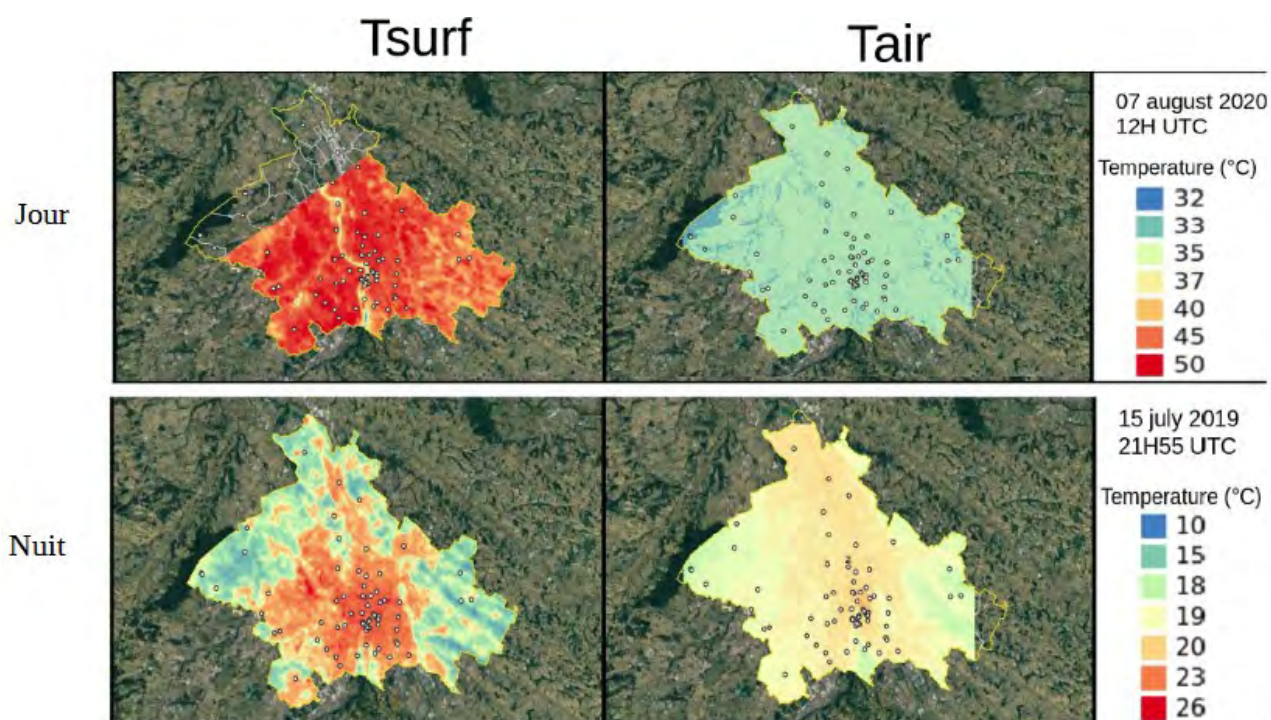
3 Étude

3.1 Comparaison des températures satellites et modèle

Dans le cadre du projet THERMOCITY, l'ONERA a mis en place une chaîne d'acquisition spécifique aux milieux urbains pour traiter les images thermographiques hautes résolutions issues des satellites ECOSTRESS et ASTER. On se propose ici de comparer ces images thermographiques avec les températures de surfaces simulées par le modèle de surface SURFEX.

3.1.1 Choix des situations

Deux images ont été retenues pour la comparaison : une de jour et une de nuit. Le choix s'est porté sur le couple d'image déjà sélectionné par Aurélie Michel et Guillaume Dumas pour étudier la comparaison entre la température de surface mesurés par satellite et la température de l'air mesurée avec le réseau d'observation de la métropole de Toulouse. Les images ont été prises par le satellite ECOSTRESS le 7 août 2020 à 12TU et le 15 juillet 2019 à 21h55TU au-dessus de la métropole de Toulouse avec une résolution horizontale de l'ordre de 70 m.



Pour pouvoir comparer les deux sources de données, les données satellites ont été reprojettées sur la grille modèle en utilisant une interpolation bilinéaire.

3.1.2 Comparaison sur l'ensemble de l'image

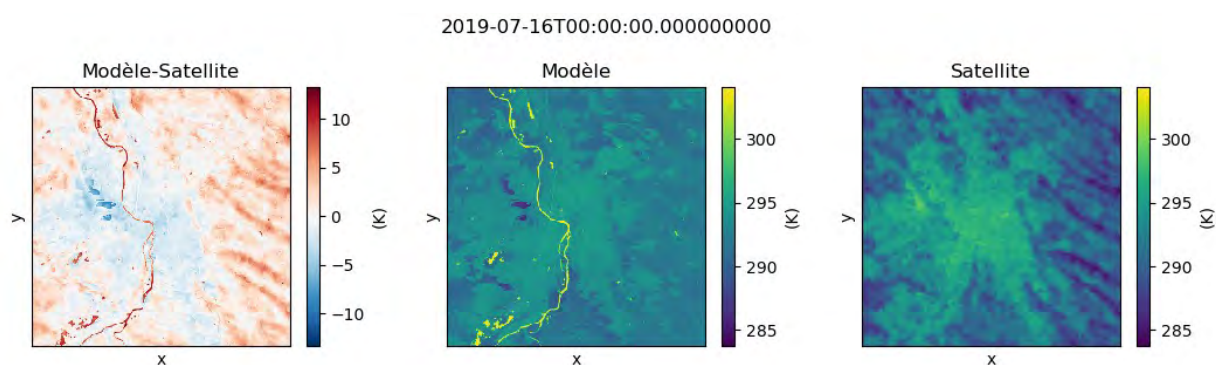


Figure 2: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m et leur différence (à gauche) sur Toulouse le 16/07/2019 à minuit heure locale.

La comparaison de nuit montre que sur certains points les différences sont importantes entre les deux sources de données (cf. Figure 2). Sur les surfaces en eau, le modèle est plus chaud que le satellite, pointant un biais chaud du modèle (sur ce type de surface, la confiance dans les mesures satellites est particulièrement bonne). Ce biais trouve plusieurs explications :

- l'écoulement de l'eau des rivières et fleuves (ici la Garonne) n'est pas simulé par le modèle : ces surfaces sont représentées par une eau stagnante, dont la température est plus élevée que celle d'une eau fraîche provenant des montagnes ;

- les températures d'initialisation (température de surface et température des différentes couches d'eau) sont probablement trop chaudes. Un tel défaut provient du modèle coupleur (ici AROME), et peu s'expliquer par de mauvaises valeurs des paramètres qui permettent de simuler les lacs. Par exemple, une profondeur de lac trop faible entraîne un réchauffement de l'eau trop rapide au cours de la saison estivale.

A l'est de l'agglomération toulousaine, l'image satellite laisse apparaître des températures de surfaces plus froides en fond de vallées. Cette caractéristique n'est pas reproduite par le modèle. Une des pistes avancées pour expliquer ces températures plus fraîches relevées par ECOSTRESS est la mise en place de brises de vallée accompagnées d'une stratification de la masse d'air, en d'une descente de l'air froid au fond des vallées. Un tel phénomène ne peut être vu par le modèle, car l'atmosphère y est représentée avec une résolution de 1 km, trop lâche pour bien voir ces vallées étroites (cf. Figure 2).

On peut également noter des zones particulièrement froides dans le modèle au niveau de la zone aéroportuaire de Toulouse-Blagnac. Ce biais froid correspond à un défaut connu de la base de données d'occupation du sol à cet endroit.

De jour, on observe de plus grandes différences entre les températures de surfaces satellite et modèle que la nuit (cf. Figure 3). Les différences sont particulièrement marquées en zone rurale sur le sud-est du domaine.

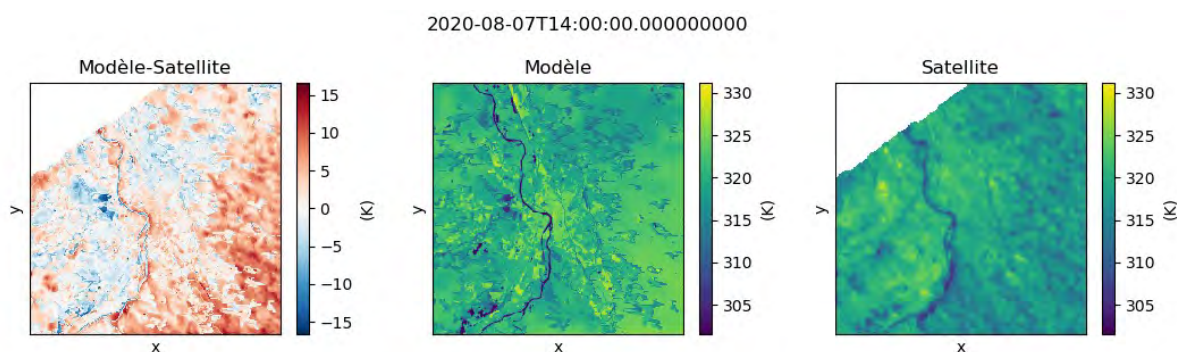


Figure 3: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m ainsi que leur différence (à gauche) pour le 07/08/2020 à 14 h heure locale sur Toulouse.

La Figure 4 montre que sur l'ensemble du domaine, la température médiane du modèle est légèrement plus chaude que celle du satellite (différence de 0,7 °C la nuit et de 2 °C le jour). Elle confirme des écarts modèle/satellite plus importants le jour.

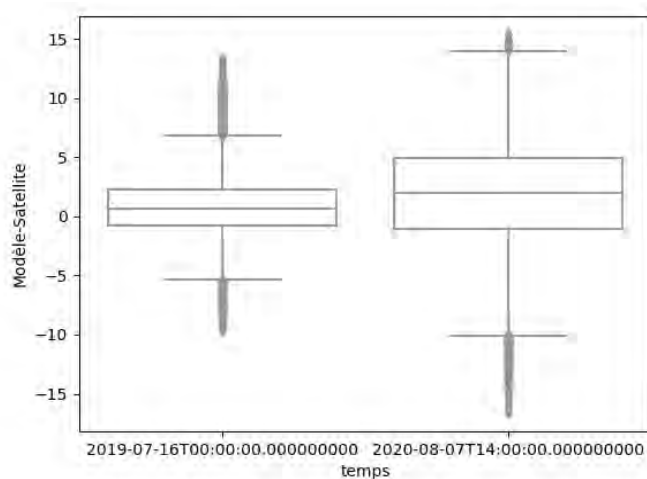


Figure 4 : Boîtes à moustaches des différences de températures de surfaces entre les données modèles et satellites pour les deux images sélectionnées (16/07/2019 00 h et le 07/08/2020 14h heure locale)

3.1.3 Comparaison sur les zones urbaines

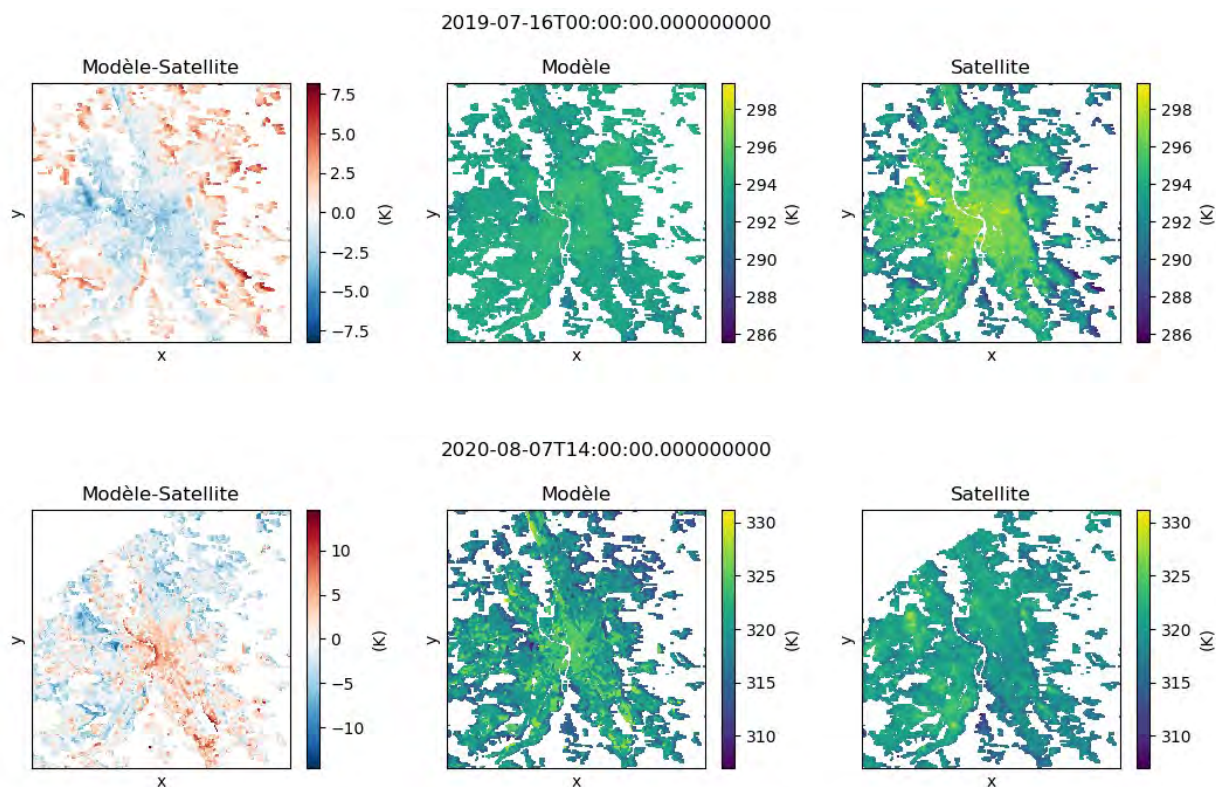


Figure 5: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m ainsi que leur différence (à gauche) pour le 16/07/2019 à minuit et le 07/08/2020 à 14 h (heure locale), sur les zones considérées comme urbanisées dans le modèle.

Le projet THERMOCITY ayant pour objectif l'étude de la température en ville, cette section se concentre plus particulièrement sur les zones urbanisées du territoire. Sur ces zones, les températures issues de la modélisation sont simulées par le modèle TEB. Plusieurs valeurs de températures de surfaces sont disponibles :

- la température de surface globale ;
- la température de surface des murs ;
- la température de surface des toits ;
- la température de surface des routes ;
- la température de surface des espaces naturelles/de la végétation.

Jusqu'à présent, nous avons considéré uniquement la température de surface globale. Les Figures 5 et 6 montrent que sur cette grandeur, les écarts satellites/modèle sont plus faibles en milieu urbain que sur le reste du territoire : la distribution des températures issues du modèle moins les températures issues des données satellites a une médiane plus proche de zéro sur le territoire urbanisé que sur l'ensemble du

territoire. En milieu urbain, la médiane est légèrement négative (-0,3 °C la nuit et -0,5 °C le jour) contrairement à ce que l'on observait sur l'ensemble du territoire, et l'écart interquartile de la distribution est plus resserré : 2,5 °C la nuit et 4,3 °C le jour en ville contre 3 °C la nuit et 6 °C le jour sur l'ensemble du territoire.

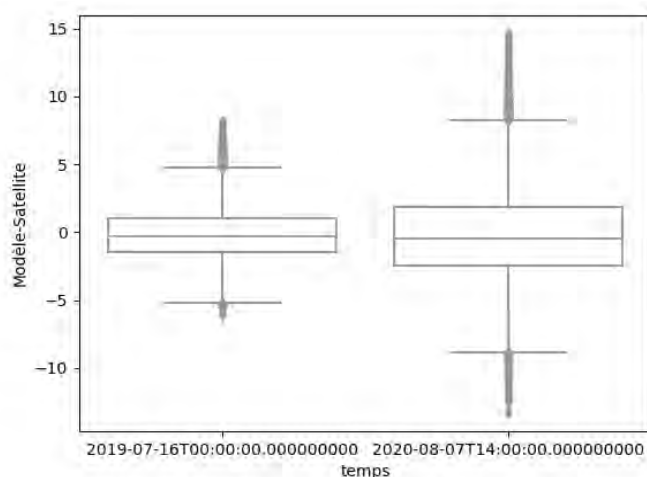


Figure 6 : Boîtes à moustaches des différences de températures de surfaces entre les données modèles et satellites pour les deux images sélectionnées (16/07/2019 00 h et le 07/08/2020 14h heure locale)

Les températures de surfaces fournies par le satellite correspondent aux températures des surfaces visibles depuis l'espace, c'est-à-dire presque exclusivement les toits des bâtiments et les surfaces au sol. Ainsi, pour ne tenir compte que de ces surfaces, on calcule une température de surface modèle reconstruite *TS_recons* de la manière suivante :

$$TS_recons = TS_toit * Frac_bati + TS_veg_urb * Frac_veg_urb + TS_route * (1 - Frac_bati - Frac_veg_urb)$$

avec *TS_toit* la température de surface des toits issue du modèle, *TS_veg_urb* celle des surfaces végétales en ville, *TS_route* celle des routes, et *Frac_bati* la fraction de bâtiments et *Frac_veg_urb* celle des surfaces végétales en ville.

Les figures 7 et 8 montrent la comparaison entre cette température de surface reconstruite et la température mesurée par satellite. On observe un accroissement des écarts par rapport à ce que l'on avait pour la température de surface globale. La nuit, les températures de surface reconstruites sont plus froides, et le jour elles sont plus chaudes que les températures de surface globales. Ainsi, le biais négatif augmente la nuit : -0,8 °C contre -0,3 °C précédemment, et il devient positif le jour : +0,5 °C contre -0,5 °C précédemment. Ce comportement était attendu puisque les murs, dont la contribution n'est pas prise en compte dans le calcul de la température reconstruite, se réchauffent et se refroidissent moins vite que les surfaces horizontales (toits, routes). Au niveau de la dispersion des écarts, celle-ci a tendance à augmenter : l'écart interquartile est de 2,7 °C la nuit et de 5 °C le jour contre 2,5 °C la nuit et 4,3 °C le jour pour la température de surface globale.

Graphiquement, en comparant les Figures 5 et 7, on remarque que sur les parties du territoire les plus densément bâties (centre-ville de Toulouse), le biais du modèle par rapport au satellite est négatif la nuit et positif le jour avec la température de surface globale, et, ce comportement, se renforce lorsqu'on passe à la température *reconstruite*. Cela pourrait être le signe de mauvaises valeurs pour les paramètres servant à définir les capacités thermiques des toits et des routes. Une étude plus poussée (vérification de la valeur des paramètres utilisés, mesures in-situ de températures de surfaces) permettrait de vérifier ou non cette hypothèse.

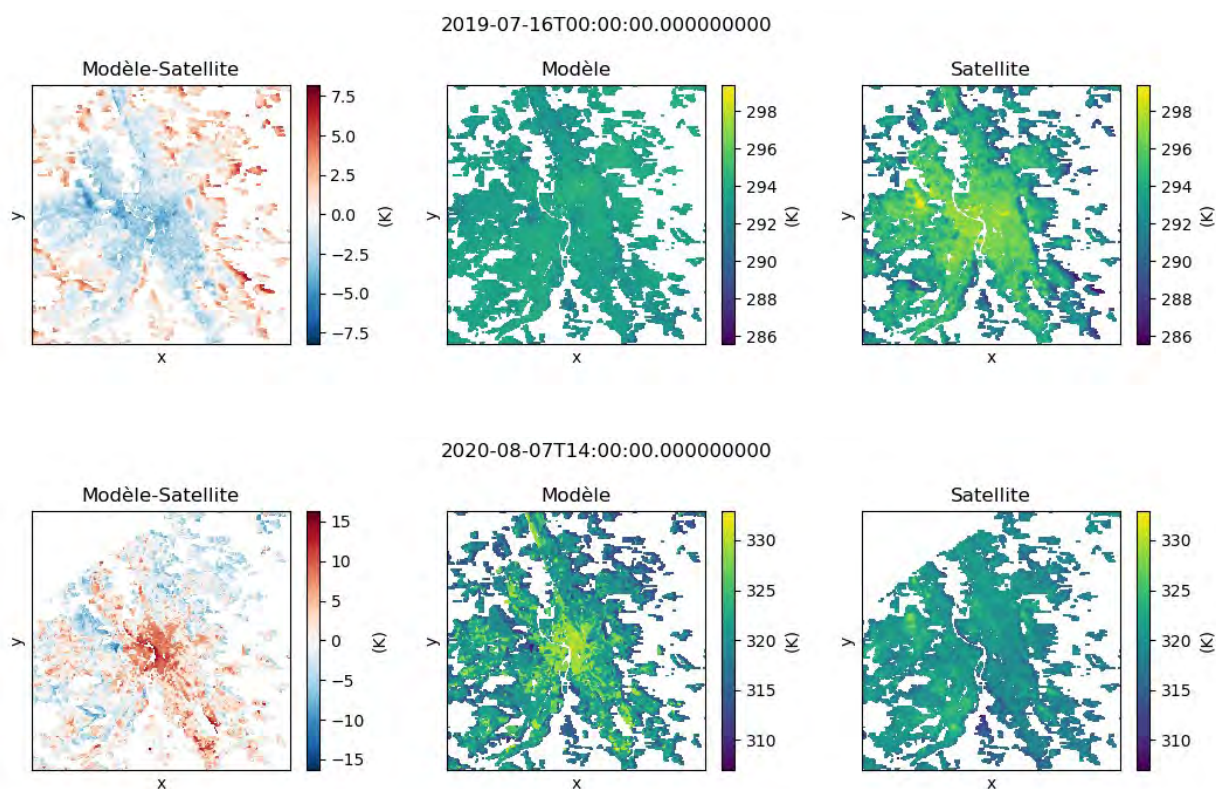


Figure 7: Température de surface mesurée par le satellite ECOSTRESS (à droite) et simulée par SURFEX (au milieu) avec des résolutions horizontales respectives de 70 m et 100 m pour le 16/07/2019 à minuit et le 07/08/2020 à 14 h (heure locale), sur les zones considérées comme urbanisées dans le modèle. La température de surface modèle est une température dite reconstruite, qui a été calculée à partir des températures de surfaces des surfaces élémentaires visibles depuis l'espace : les toits, les routes et les espaces naturelles/la végétation urbaine.

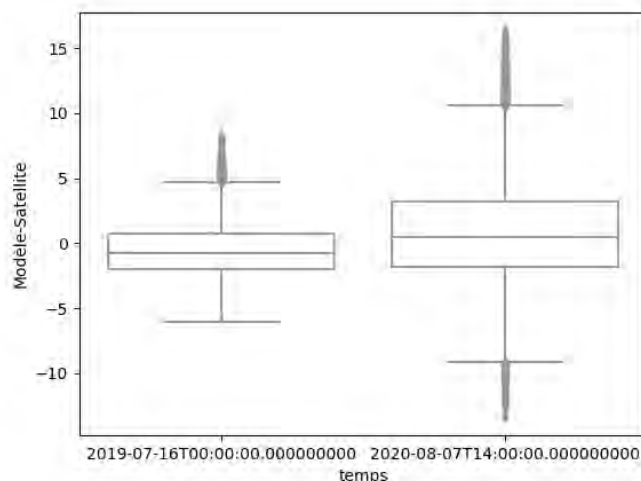


Figure 8 : Boîtes à moustaches des différences de températures de surfaces entre les données modèles et satellites pour les deux images sélectionnées (16/07/2019 00 h et le 07/08/2020 14h heure locale)

3.1.4 Conclusion

La comparaison des températures de surfaces issues des satellites et du modèle montrent qu'il y a de grandes différences entre les deux sources de données, particulièrement le jour. Même si le nombre d'images satellites est pour l'instant limité, cette comparaison a permis de mettre en évidence un certain nombre de points qui pourront être approfondis dans le futur pour améliorer le comportement du modèle SURFEX comme :

- l'amélioration de la représentation des eaux circulantes (fleuves, rivières...) ;
- la vérification des valeurs définissant la profondeur des lacs, et des valeurs d'initialisation de la température de l'eau ;
- réaliser des simulations avec un modèle atmosphérique de plus fine résolution pour voir si on retrouve des températures plus froides en fond de vallées ;
- ou encore vérifier la valeur des paramètres définissant les propriétés thermiques des bâtiments.

3.2 Construction d'un indice de confort thermique à l'échelle de la maille modèle

3.2.1 Position du problème

La perception de confort thermique d'un être humain dépend de la combinaison de plusieurs paramètres météorologiques. Des indices de confort, qui tiennent compte de ces différents paramètres, ont été développés afin d'évaluer, pour une situation donnée, le confort thermique associé. Dans ses simulations, Météo-France utilise l'UTCI³ (Universal Thermal Comfort Index) ; cet indice, exprimé en degrés Celsius, donne une température ressentie qui tient compte de la température de l'air, de la vitesse du vent, du rayonnement incident et de l'humidité de l'air. Une échelle est associée à cet indicateur, elle définit les différents niveaux de stress thermique rencontrés en période de chaleur :

Valeurs UTCI (°C)	Niveau de stress	Acronyme
9 à 26	Pas de stress thermique	NHS (No Heat Stress)
26 à 32	Stress thermique modéré	MHS (Moderate Heat Stress)
32 à 38	Stress thermique élevé	SHS (Severe Heat Stress)
38 à 46	Stress thermique très élevé	VHS (Very Severe Heat Stress)
Au-dessus de 46	Stress thermique extrême	EHS (Extreme Heat Stress)

Actuellement, pour chaque maille du modèle, deux valeurs d'indice UTCI sont données : un indice de confort à l'ombre et un indice de confort au soleil. On propose d'introduire le calcul d'un indice de confort thermique moyen (ombre/soleil) selon la formule suivante :

$$\text{Indice moyen} = \text{Indice ombre} \times \text{Fraction d'ombre} + \text{Indice soleil} \times \text{Fraction de soleil} \quad (1)$$

où les fractions d'ombre et de soleil correspondent à la part de surface au sol à l'ombre/au soleil. L'intérêt d'un tel indice est de pouvoir mieux mettre en valeur les stratégies d'adaptation de la ville aux fortes chaleurs pour lesquelles il y a une augmentation significative de la part d'ombre (par exemple avec la plantation d'arbres).

3 Universal Thermal Comfort Index : <http://www.utci.org/>

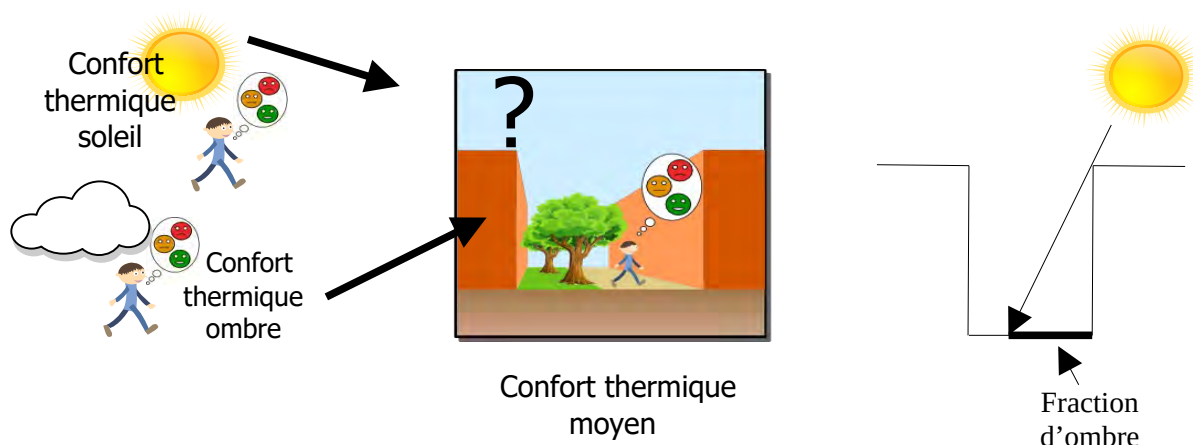


Figure 9: Représentation schématique du problème

Le modèle TEB utilise une représentation simplifiée de l'espace urbain : dans chaque maille, la ville est représentée par un canyon urbain infini. Des fractions d'ombre peuvent être calculées à partir de cette géométrie simplifiée (cf. Figure 9), elles seront par la suite dénommées *fractions d'ombre simplifiées*. Ces fractions simplifiées seront comparées avec des fractions d'ombres dites *réelles*, fournies par le CNES et calculées à partir d'un modèle numérique de hauteur dérivé d'images pléiades.

3.2.2 Comparaison des fractions d'ombre réelle et simplifiée et leur impact sur le calcul d'un indice de confort moyen

La comparaison est effectuée sur la journée du 29/08/2015, sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg, au pas de temps horaire. Localement, les différences peuvent être importantes entre les deux sources de données. La Figure 10 montre qu'à 5TU, dans la géométrie simplifiée du modèle, avec des rues orientées nord/sud, une large part du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg est toujours à l'ombre, alors que dans la géométrie réelle, le sol est déjà largement éclairé (c'est le cas par exemple des rues orientées est/ouest, des places dégagées...). Les différences heure par heure entre les fractions d'ombres réelles et simplifiées sont affichées spatialement Figure 11 et de façon condensée Figure 12. Les erreurs sont maximales au lever et au coucher du soleil, lorsque le soleil est rasant. On note des différences importantes entre 4 et 7TU et entre 16 et 19TU, avec des pics à 4 et 19TU. Spatialement, c'est sur le centre historique de Strasbourg, zone la plus dense de l'agglomération, que les différences sont les plus fortes.

Après cette première analyse, on cherche à savoir quel est l'impact de ces erreurs dans le calcul de la fraction d'ombre, due à la géométrie simplifiée du modèle, sur l'indice de confort mixte. Pour cela, deux indices de confort mixtes sont calculés à partir des indices UTCI à l'ombre et au soleil, suivant la formule (1) : l'un en utilisant les fractions d'ombre simplifiées (par la suite appelé indice mixte simplifié) et l'autre en utilisant les fractions d'ombre réelles (par la suite appelé indice mixte réel).

Les résultats sont présentés Figures 13 et 14. Spatialement, les erreurs les plus fortes sont commises là où il y avait le plus d'erreurs sur le calcul des fractions d'ombre : le centre-ville de Strasbourg, fortement bâti. Au niveau de la temporalité, on observe un décalage, les erreurs les plus fortes sont relevées à 6 et 17TU. Cela

s'explique par le fait que lorsque le soleil est rasant, les erreurs sur les fractions d'ombres sont certes plus fortes, mais la différence entre les valeurs d'UTCI à l'ombre et au soleil sont faibles, d'où des erreurs moins importantes sur le calcul de l'indice de confort mixte. En termes d'amplitude, les erreurs médianes sur les valeurs d'UTCI mixte sont modérées, avec des écarts inférieurs à 0,5 °C, mais localement des erreurs plus importantes, pouvant atteindre 3 °C, sont commises.

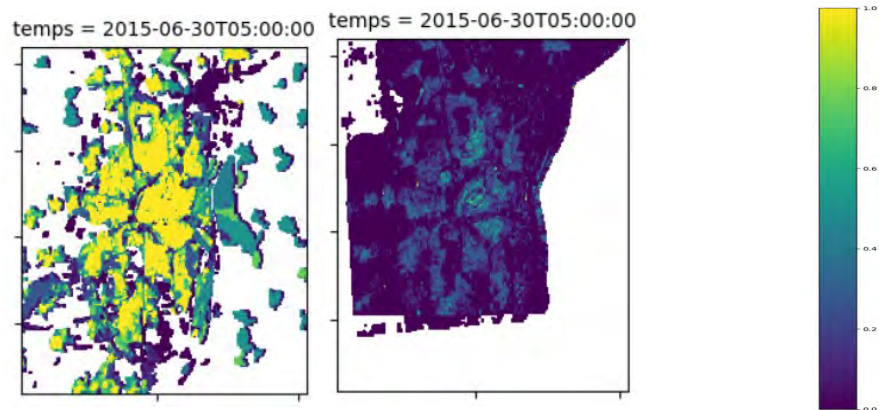


Figure 10: Fractions d'ombre calculées sur l'Eurométropole de Strasbourg pour le 30/06/2015 à 5TU à partir de la géométrie simplifiée du modèle (à gauche) et de la géométrie réelle (à droite). La couleur jaune indique une fraction d'ombre égale à 1 et la couleur bleu foncé une fraction d'ombre égale à 0.

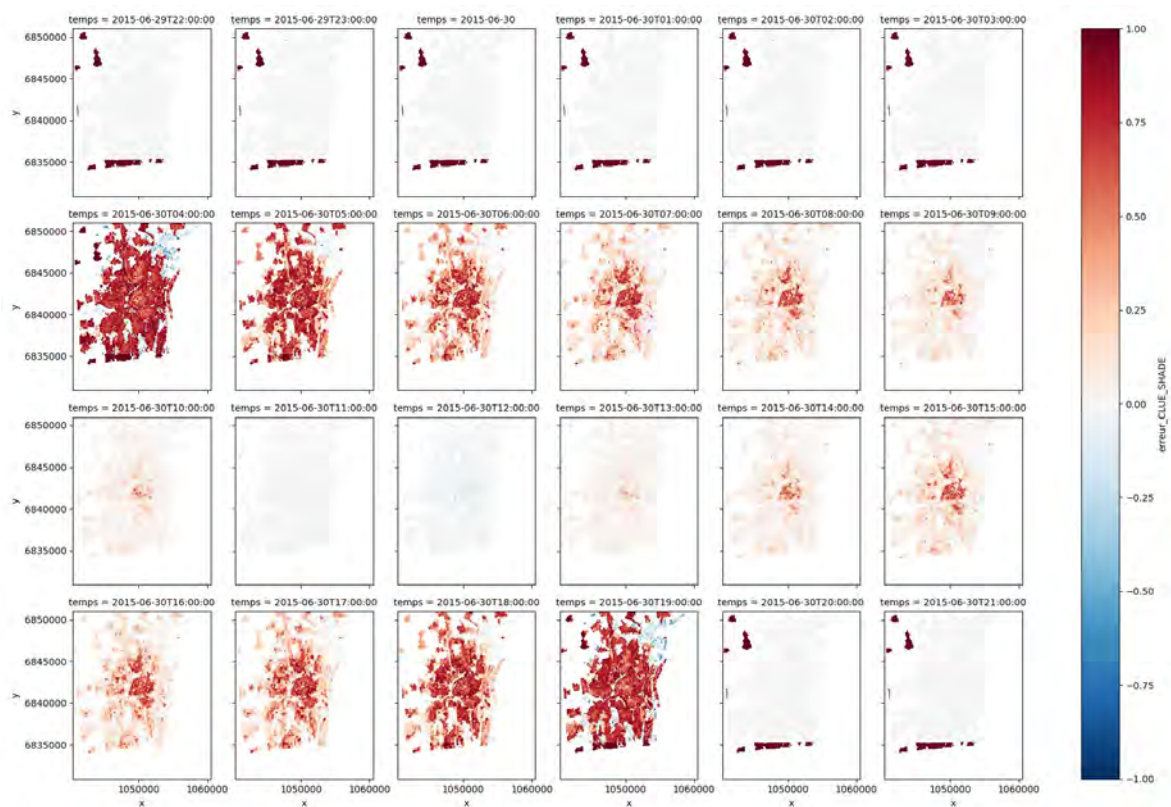


Figure 11: Erreur de la fraction d'ombre simplifiée par rapport à la fraction d'ombre réelle pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).

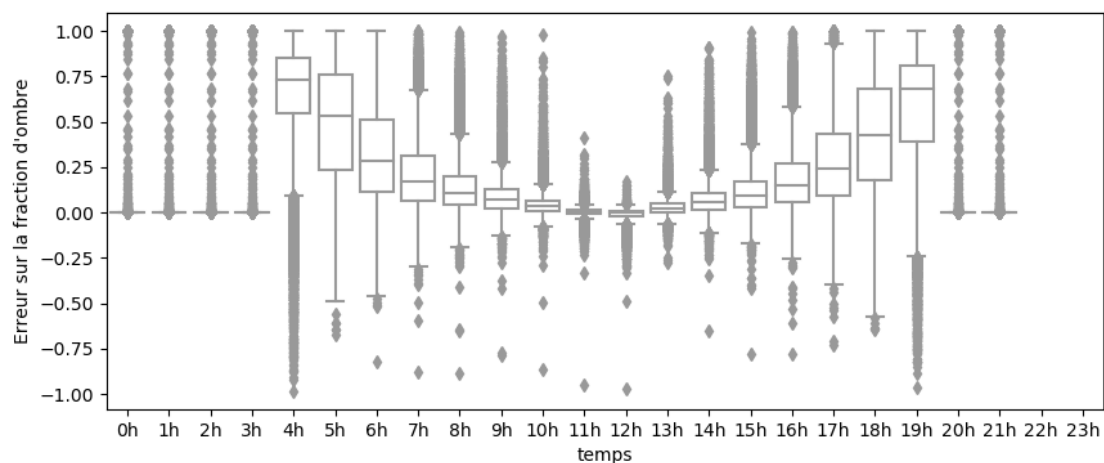


Figure 12: Boxplot des erreurs de la fraction d'ombre simplifiée par rapport à la fraction d'ombre réelle pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).



Figure 13: Erreur de l'indice mixte simplifié par rapport à l'indice mixte réel pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).

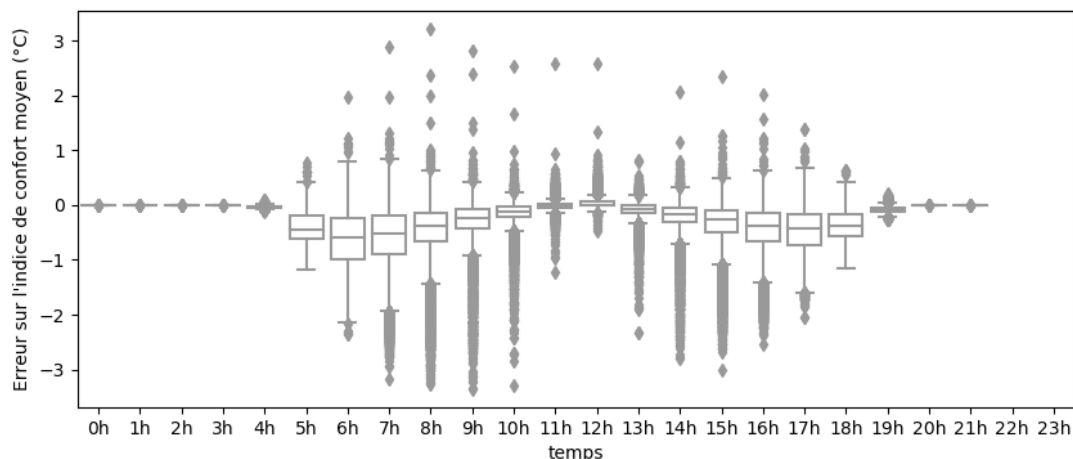


Figure 14: Boxplot des erreurs de l'indice mixte simplifié par rapport à l'indice mixte réel pour la journée du 30/06/2015 (en heure TU).

3.2.3 Conclusion

La géométrie simplifiée du modèle entraîne des erreurs importantes dans le calcul de la fraction d'ombre. Ces erreurs se répercutent sur le calcul de l'indice de confort thermique mixte. Cependant, on observe un décalage temporel entre le pic d'erreur sur la fraction d'ombre et le pic d'erreur sur l'indice de confort. En termes d'intensité, les erreurs commises sur le calcul de l'indice de confort thermique mixte sont le plus souvent acceptables. Pour améliorer les performances du modèle et compléter l'analyse, les pistes suivantes pourraient être explorées par la suite :

- comparaison des fractions d'ombre et indice de confort simplifiés et réels pour d'autres orientations de rues (est/ouest ...) paramétrées dans le modèle ;
- comparaison des fractions d'ombre et indice de confort simplifiés et réels en choisissant pour chaque maille du modèle l'orientation majoritaire des rues.

3.3 Impact du changement climatique sur l'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain (aussi noté ICU dans la suite du document) désigne le fait qu'il fasse plus chaud en ville qu'à la campagne. Par extension il est souvent défini comme étant la différence de température entre la ville et la campagne.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est surtout observable la nuit, lorsque le ciel est dégagé et le vent faible. Il est dû à une diminution de la température, après le coucher du soleil, plus lente en ville qu'à la campagne. Tout au long de la journée, les matériaux urbains (asphalte, béton...) vont stocker une partie de l'énergie solaire reçue. Une fois le soleil couché, ils vont restituer cette énergie à l'air ambiant sous forme de chaleur, ce qui limite la diminution de la température de l'air en ville. À l'inverse, à la campagne, une fois le soleil couché, il n'y a plus de source de chaleur disponible : la température diminue rapidement.

Avec le changement climatique, qui est dû à des modifications de la composition chimique de l'atmosphère et plus précisément de la concentration des gaz à effet de serre, on s'attend à une poursuite du réchauffement en France. Dans sa thèse, B. Le Roy (2021) s'est intéressé à l'estimation de l'îlot de chaleur urbain en climat futur. Il a montré que sur la ville de Paris, le réchauffement climatique entraînait une augmentation des températures minimales quotidiennes aussi bien en zones urbaines que rurales, mais avait peu d'impact sur l'intensité de l'ICU. Sa méthodologie repose sur le fait que pour une ville et une saison données, la forme et l'intensité de l'ICU dépendent essentiellement du type de temps sensible de la journée. Ces types de temps sensibles sont déterminés en s'appuyant sur les travaux d'Hidalgo et Jouglar 2018⁴ qui classifient les journées à l'aide d'une méthode de type K-means se basant sur cinq critères : l'amplitude thermique de la journée, le taux d'humidité, la force et la direction du vent ainsi que la quantité de précipitation.

Ici, on se propose de s'inspirer de la méthode novatrice de Le Roy et al 2021⁵ et de l'adapter, pour estimer l'ICU le plus probable l'été sur la ville de Montpellier en 2041 et en 2099, suivant le scénario RCP8.5 de fortes émissions anthropiques.

3.3.1 Méthodologie

L'estimation de l'îlot de chaleur urbain de la ville de Montpellier en climat futur se fait en 3 étapes :

1. Décrire le climat actuel de Montpellier selon 10 types de temps sensibles :

La classification du climat actuel de Montpellier en 10 types de temps se fait à partir des variables météorologiques issues des réanalyses ERA5-land⁶ (et ERA5⁷ pour la nébulosité) entre 1991 et 2020 (données horaires converties en données journalières). Les réanalyses ERA5 et ERA5-land sont produites

4 Hidalgo, J., & Jouglar, R. (2018). On the use of local weather types classification to improve climate understanding: an application on the urban climate of Toulouse. *PLoS one*, 13(12), e0208138.

5 Le Roy, B., Lemonsu, A., & Schoetter, R. (2021). A statistical–dynamical downscaling methodology for the urban heat island applied to the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics*, 56(7), 2487-2508.

6 Muñoz Sabater, J. et al. (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

7 Hersbach, H. et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. Ce sont des données issues de modèles météorologiques utilisées pour faire la prévision du temps qui ont été corrigées à posteriori à l'aide de données d'observations (satellites, radio-sondages, stations de mesure au sol, données avion...). Ce type de données correspond à la meilleure connaissance que l'on ait de l'atmosphère pour un instant donné. Ce sont des données homogènes, sans valeurs manquantes ni données aberrantes, avec une fréquence temporelle élevée et des résolutions verticales et horizontales fines.

Seules les données de réanalyses des points situés dans une couronne autour du centre-ville de Montpellier sont utilisées et moyennées pour être représentatives de Montpellier tout en s'affranchissant des perturbations du climat par les surfaces les plus urbanisées. Un masque sur l'altitude et les zones océaniques est également appliqué afin de sélectionner des points qui ne soient pas trop influencés par ces deux critères, puisque la température diminue avec l'altitude et l'humidité est plus importante au-dessus des océans. La classification repose sur sept variables météorologiques : l'amplitude journalière de température de l'air près de la surface (calculée comme la différence entre la température maximale et la température minimale à 2 m) et les moyennes journalières de pression, d'humidité relative de l'air, de la quantité de précipitations, de la fraction d'ensoleillement, et des composantes zonale (U) et méridienne (V) du vent (Tableau 1). Le jeu de données est standardisé, c'est-à-dire qu'on retire à chaque variable de chaque individu sa moyenne et on divise par son écart type. Cette méthode permet d'obtenir des variables toutes entre 0 et 1, ce qui permet d'appliquer facilement des méthodes issues de la science des données.

Variable	Description	Transformation
sp	Pression atmosphérique	$sp_{mer_standard}$
RH	Humidité relative	$RH_{standard}$
PR	Cumul des précipitations	$(\log(PR + 0.01))_{standard}$
dT	Ecart de température	$dT_{standard}$
EN	Fraction d'ensoleillement	$EN_{standard}$
u	Composante U du vent	$u_{recalcule_standard}$
v	Composante V du vent	$v_{recalcule_standard}$

Tableau 1: Variables météorologiques utilisées pour la classification en types de temps sensibles.

A partir de ce jeu de données, les types de temps sensibles sont définis en utilisant la méthode de classification non supervisée K-medoids (aussi nommée Partitionning Around Medoids). Cette méthode de partitionnement des données, semblable à celle des K-means, répartit les jours de la période étudiée en un nombre prédéfini de classes (fixé ici à 10) en minimisant la « distance » entre un point (jour) et un point considéré comme le centre de la classe (appelé médoïde), et en maximisant la distance entre les classes. La métrique utilisée ici est la métrique euclidienne, car toutes les variables étudiées sont quantitatives. Les médoïdes sont de réels points du jeu de données, ce qui rend les résultats plus faciles à interpréter.

2. Simuler pour chacun de ces types de temps l'îlot de chaleur urbain de Montpellier avec une résolution fine (100 m) à l'aide de la plateforme CLUE ;

Afin de connaître la forme et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain propre à chaque type de temps sensible, la plateforme de modélisation haute résolution du climat urbain CLUE [Annexe A] est utilisée. Un épisode de 3 jours, caractéristique de chaque type de temps sensible, est sélectionné et simulé heure par heure à la résolution de 100 m, sur un domaine d'environ 40 km par 40 km centré sur Montpellier. Ces simulations permettent de diagnostiquer finement le signal urbain moyen associé à chaque type de temps.

Dans un premier temps on trace l'ICU spatialisé à une heure donnée, qui résulte de la différence entre la carte de température simulée à 2 m avec une carte de température de référence. La température de référence est une évaluation de ce que serait la température à l'emplacement de la ville, si cette dernière n'existait pas. Elle est calculée en faisant la moyenne de la température modélisée en milieu rural. On considère qu'une maille du domaine de modélisation correspond au milieu rural s'il n'y a pas de surface d'eau dans la maille et que la fraction de végétation est supérieure ou égale à 97 %. À proximité du sol, la température diminue avec l'altitude (il fait plus froid en haut d'une montagne qu'en plaine). Afin de ne pas introduire de biais lié au relief, avant de calculer la température de référence, on ramène toutes les températures à une altitude de référence (celle du centre-ville de Montpellier). La correction est faite en appliquant le taux moyen de - 0,6 °C tous les 100 m.

Dans un second temps, on moyenne pixel par pixel les cartes d'ICU spatialisés horaires obtenus pour les 3 jours de l'épisode sélectionné, afin d'avoir pour toutes les heures de la journée un ICU moyen propre à chaque type de temps.

3. Déterminer les fréquences d'apparition de chacun des types de temps détectés à l'étape 1 en 2041 et en 2099 avec les données AROME-Climat ;

Les projections climatiques reposent sur :

- des modèles numériques qui reproduisent à partir des équations physiques connues, le comportement du système climatique, c'est-à-dire les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les glaciers, la végétation, les rivières... et leurs réponses à différentes contraintes, appelées forçages climatiques ;

- des hypothèses sur l'évolution des émissions anthropiques de gaz à effet de serre et d'aérosols au cours des prochaines décennies, en fonction de plusieurs facteurs comme la croissance démographique, les progrès technologiques ou les décisions politiques à venir. Dans le 5^e rapport du GIEC de 2013, quatre scénarios réalistes et représentatifs nommés RCP (pour Representative Concentration Pathways, ou Profils représentatifs d'évolution de concentration) ont été retenus, dont le scénario RCP8.5. Ce scénario plutôt extrême, décrit un futur excluant toute politique de régulation du climat, menant à environ 5 °C de réchauffement global d'ici la fin du siècle.

Dans cette étude sur Montpellier, les projections climatiques utilisées sont celles d'AROME-Climat avec le scénario RCP 8.5. AROME-Climat, c'est le modèle non-hydrostatique à aire limitée AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle ; Seity *et al.*, 2011), utilisé comme modèle régional de climat à convection profonde résolue (Convection-Permitting Regional Climate Model en anglais) avec une résolution horizontale de 2,5km et 60 niveaux verticaux⁸. Sa résolution fine, la description détaillée des surfaces, ses paramétrisations physiques et son cœur dynamique permettent de bien représenter les processus météorologiques de fine échelle et de simuler des phénomènes convectifs. Il s'appuie également sur des schémas sophistiqués pour la microphysique, les nuages et la turbulence. Le modèle CNRM-AROME

⁸ <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1094&lang=fr>

(AROME-Climat) est notamment utilisé dans le programme européen CORDEX Flagship Pilot Study (FPS) on convection (2016-) et le projet européen H2020-EUCP (EUropean Climate Prediction system, 2017-2022).

Dans cette étude, on considère les projections climatiques d'AROME-Climat pour 2041 et 2099 sur Montpellier. L'idée est de connaître les fréquences d'apparition de chacun des types de temps pour ces deux années et d'en déduire les îlots de chaleur urbains moyens estivaux les plus probables.

3.3.2 Estimation de l'îlot de chaleur urbain de Montpellier en climat futur

Classification des types de temps sensibles sur Montpellier

Dix types de temps sensibles (TTS) ont été obtenus sur Montpellier en appliquant la méthode des K-medoids sur les variables journalières de pression, d'humidité relative, les composantes U et V du vent, l'écart de température entre les températures maximale et minimale de la journée, le cumul de précipitations et la fraction d'ensoleillement. En s'intéressant plus précisément aux médoïdes (journées qui représentent le mieux chaque type de temps), il est possible de caractériser chaque classe en fonction des valeurs prises par les différentes variables météorologiques (Figures 15 et 16).

Les TTS 7, 6, 9 et 10 sont très fortement ensoleillés, contre les TTS 3, 5, 8 et 4 qui possèdent une importante couverture nuageuse. Les écarts de température plus élevés sont aussi caractéristiques des journées chaudes et ensoleillées d'été comme pour les TTS 9 et 10. Les médoïdes représentant un temps arrosé, avec un faible taux d'ensoleillement et une forte humidité ont des vents qui viennent du Sud-Est (TTS 5, 8 et 10). Les médoïdes caractéristiques des temps peu pluvieux, avec une couverture nuageuse faible, des pressions élevées et de faibles taux d'humidité ont des vents qui viennent du Nord-Ouest (TTS 6, 7 et 9). Le TTS 7 est représentatif de journées ensoleillées, sèches et venteuses. A Montpellier, un vent qui vient du Sud-Est est un vent qui vient de la mer, chargé d'humidité tandis qu'un vent venant du Nord-Ouest est un vent de terre plus sec.

Afin de caractériser le climat local actuel de Montpellier, la fréquence de répartition de ces 10 types de temps a été calculée entre le 1^{er} janvier 2014 et le 31 décembre 2021 à partir des réanalyses du modèle de prévision numérique du temps AROME. Chaque journée issue de ces réanalyses est caractérisée sur Montpellier par 7 valeurs météorologiques (d'amplitude thermique, de pression, d'humidité relative, de quantité de précipitations, de fraction d'ensoleillement, et de composantes zonale et méridienne du vent) et peut donc être rattachée à une classe/un type de temps sensible particulier. La figure 17 montre la répartition de ces journées au sein des 10 classes. On remarque que les 10 classes sont réparties de manière assez homogène en termes de fréquence. La fréquence de répartition de ces 10 types de temps par saison est également tracée dans la figure 18.

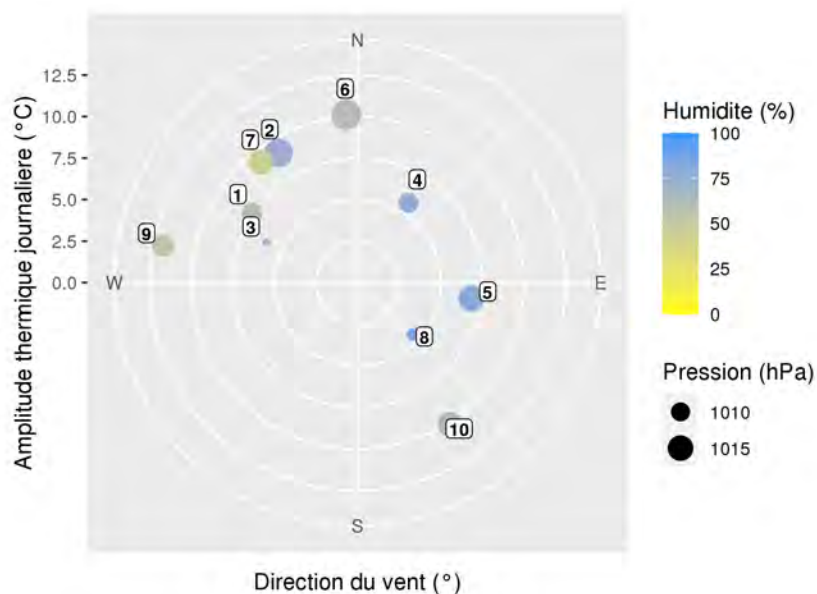


Figure 15: Répartition des 10 types de temps sensibles de Montpellier selon la direction du vent, l'amplitude thermique journalière moyenne, la pression et l'humidité relative.

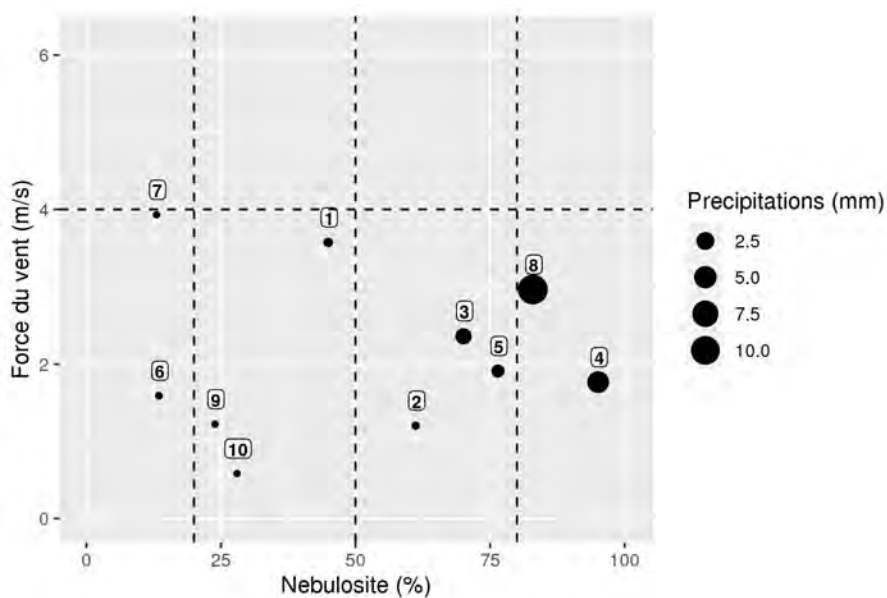


Figure 16: Répartition des 10 types de temps sensibles de Montpellier selon la nébulosité, la force du vent et la quantité de pluie.

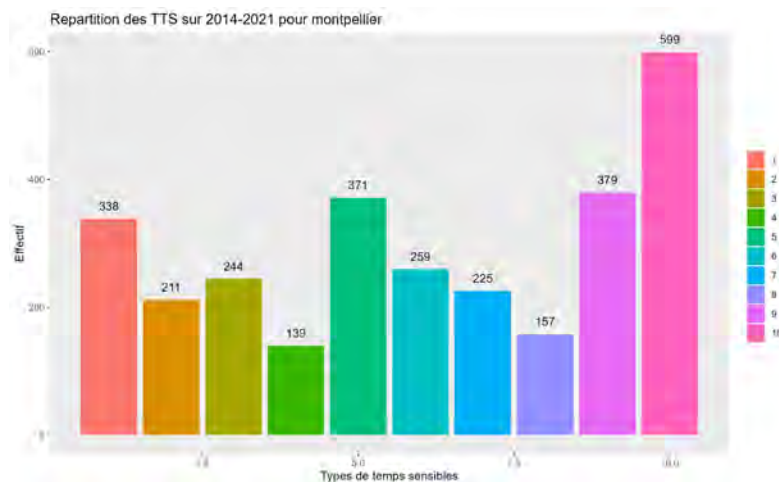


Figure 17: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier pour toutes les journées comprises entre le 1er janvier 2014 et le 31 décembre 2021.

La répartition saisonnière des TTS pour la ville de Montpellier (Figure 18) illustre le fait que certaines classes sont plus caractéristiques d'une saison en particulier. Les TTS 9 et 10 sont caractéristiques de journées de fin d'hiver, de printemps et d'été (de manière majoritaire), très ensoleillées, sans vent ni précipitation. Au contraire les TTS 2, 3 et 4 surtout visibles en hiver et en automne sont caractérisés par une couverture nuageuse importante. Les TTS 1 et 5 plutôt également répartis tout au long de l'année avec une plus forte occurrence en hiver correspondent respectivement aux journées nuageuses sèches et venteuses avec éclaircies et aux journées couvertes, légèrement venteuses avec du vent venant de l'Est avec quelques précipitations. Les TTS 6 et 7 visibles toute l'année représentent les journées très ensoleillées avec plus ou moins de vent et sans précipitation avec un vent de Nord/Nord-Ouest. Le TTS 8, quasiment inexistant l'été et l'hiver, caractérise des journées très pluvieuses avec une pression basse et un vent de Sud-Est venant de la mer. En automne (et parfois au printemps) il pourrait correspondre à des épisodes méditerranéens.

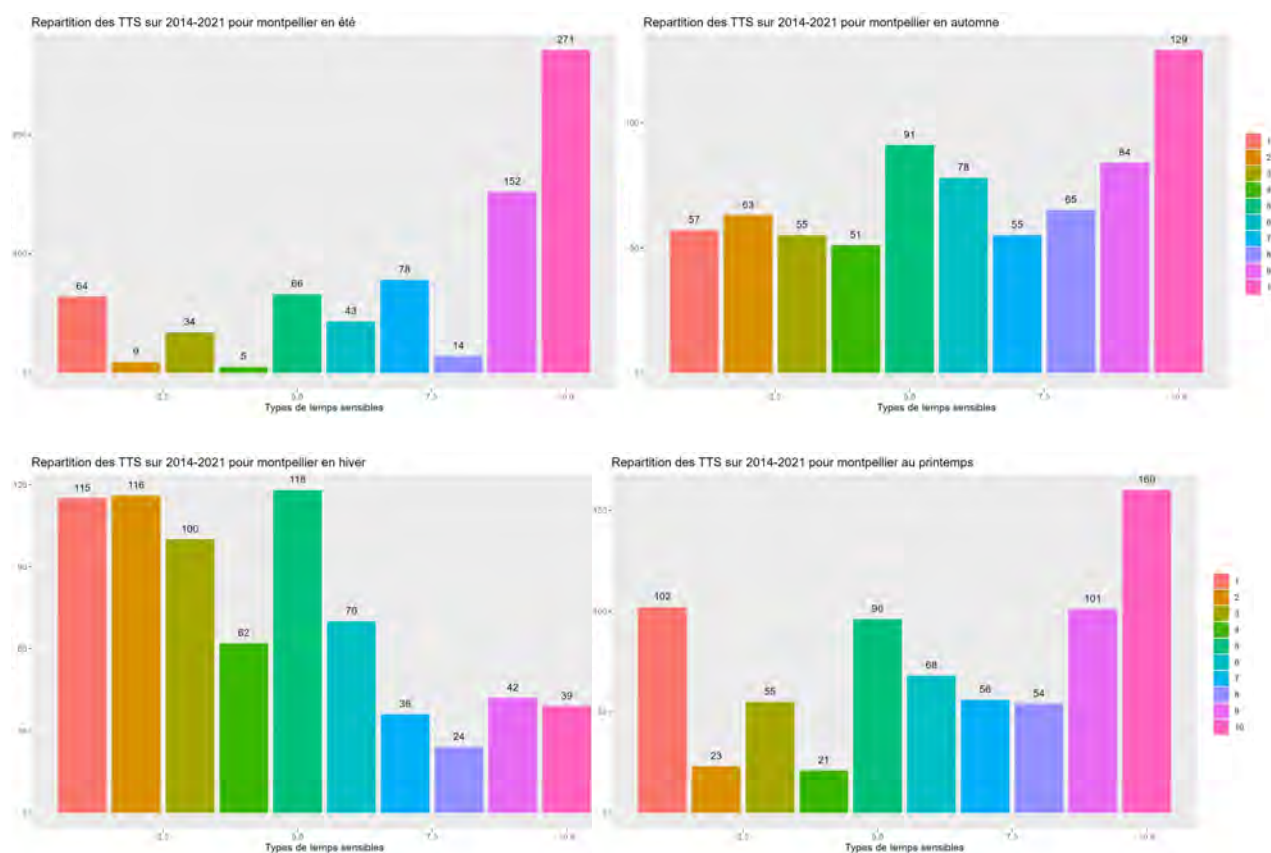


Figure 18: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier par saison entre 2014 et 2021 (été en haut à gauche, automne en haut à droite, hiver en bas à gauche et printemps en bas à droite).

Simulation de l'îlot de chaleur urbain propre à chaque classe de Montpellier

Actuellement, les types de temps les plus rencontrés en été à Montpellier sont ceux des classes 10 et 9 et dans une moindre mesure, ceux des classes 7, 5 et 1 (Figure 18).

La figure 19 illustre heure par heure l'îlot de chaleur urbain spatialisé moyen d'un épisode caractéristique du type de temps sensible 10 à Montpellier (issu ici d'une simulation des 3, 4 et 5 juillet 2019). Les valeurs maximales d'ICU d'environ 2,6 °C sont obtenues vers 23h/00h UTC (01/02h heures locales) dans le centre-ville de Montpellier.

Le parc de Lunaret, le parc Montcalm et le Jardin des Plantes, ainsi que tous les autres grands espaces verts, ressortent bien sur les cartes, comme étant des zones où l'îlot de chaleur urbain est moins intense. Les valeurs nulles ou négatives d'îlot de chaleur localement présentes indiquent les zones où la température à 2 m est plus basse que la température moyenne de référence en milieu rural.

Thermocity

Îlot de chaleur urbain

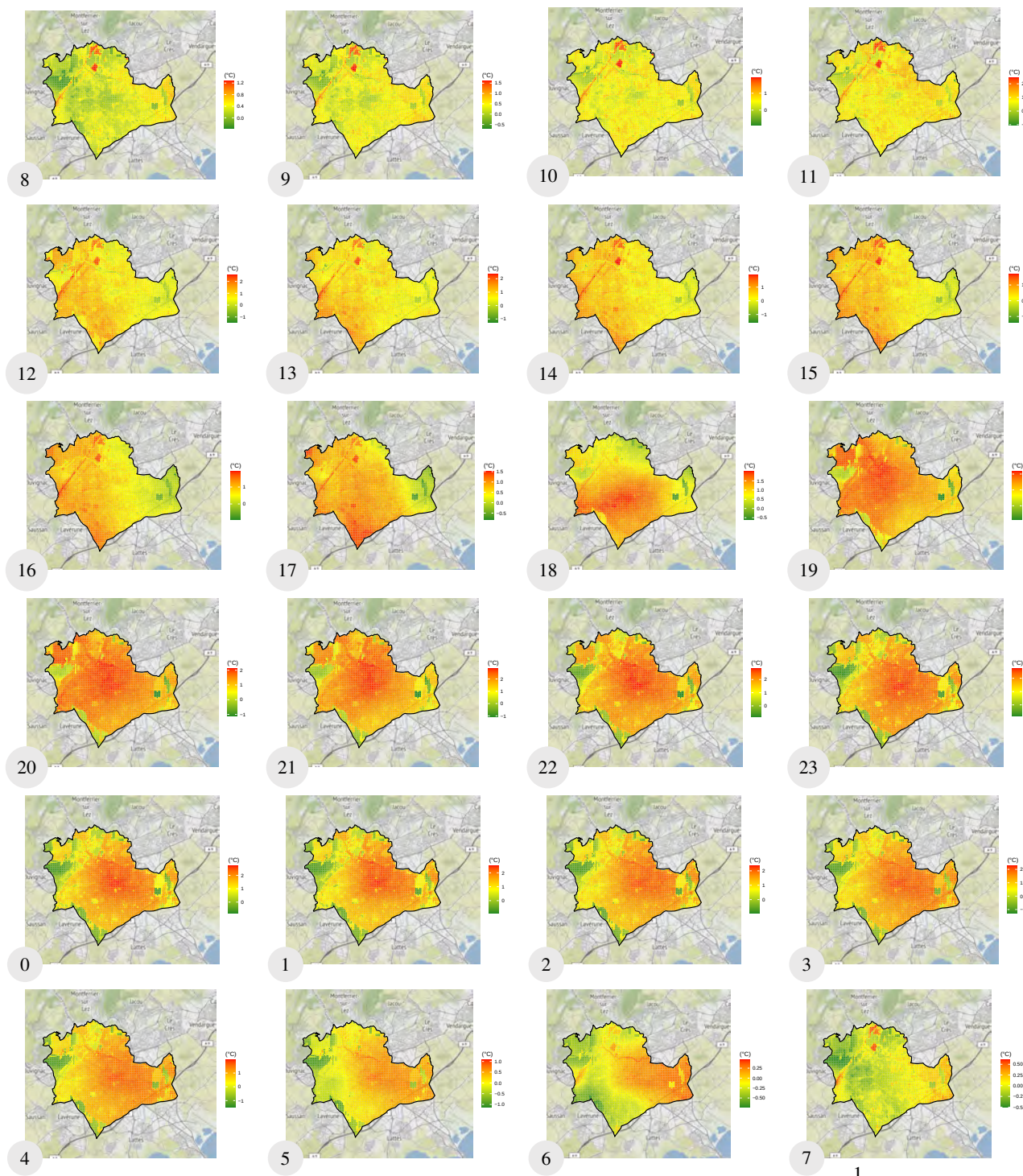


Figure 19: ICU moyen heure par heure (indiquée en UTC dans les bulles grises) pour le type de temps sensible 10 de Montpellier. Attention, la palette de couleurs est différente pour chaque image.

Fréquence des types de temps en climat futur à Montpellier

La figure 20 (respectivement 21) montre la répartition des journées prévues par AROME-Climat en 2041 (respectivement 2099) au sein des 10 classes de types de temps sensibles déterminés en climat actuel. Contrairement à l'été en climat actuel où les classes 9 et 10 étaient prédominantes, l'été 2041 présente davantage de journées du type 6 et 7 et l'été 2099 des journées du type 7 et 1 (dans une moindre mesure).

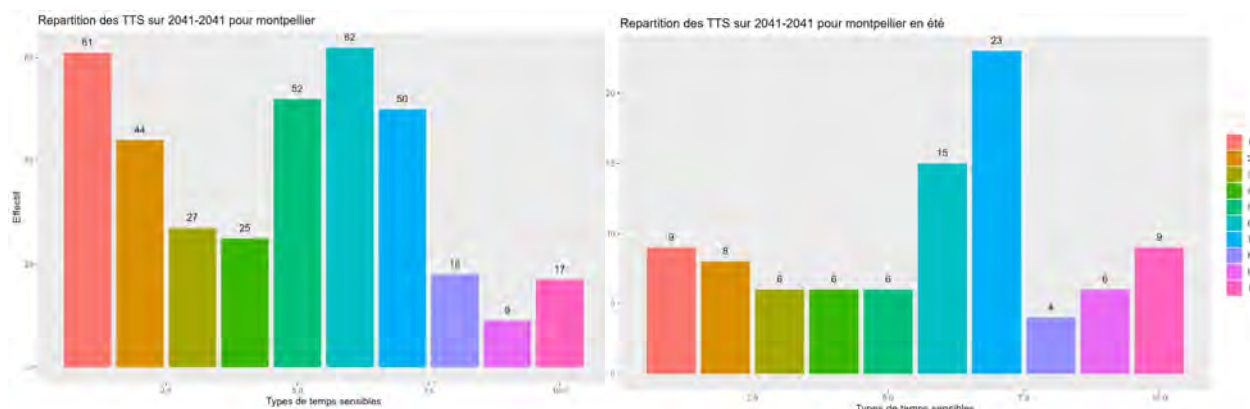


Figure 20: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier en 2041 pour tous les jours de l'année (à gauche) et pour les journées de juin, juillet, août (à droite)

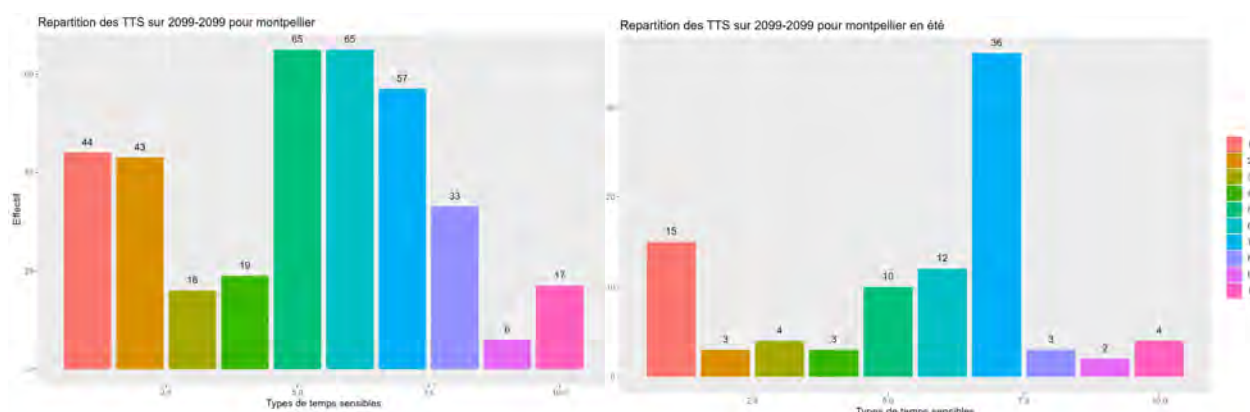


Figure 21: Répartition des types de temps sensibles (TTS) pour Montpellier en 2099 pour tous les jours de l'année (à gauche) et pour les journées de juin, juillet, août (à droite)

La figure 22 illustre heure par heure l'îlot de chaleur urbain spatialisé moyen d'un épisode caractéristique du type de temps sensible 7 à Montpellier (issu ici d'une simulation des 17, 18 et 19 juin 2015). Les valeurs d'ICU dépassent les 2 °C une bonne partie de la nuit (de 19h UTC à 04h UTC) et concernent quasiment toute la ville de Montpellier.

Thermocity

Îlot de chaleur urbain

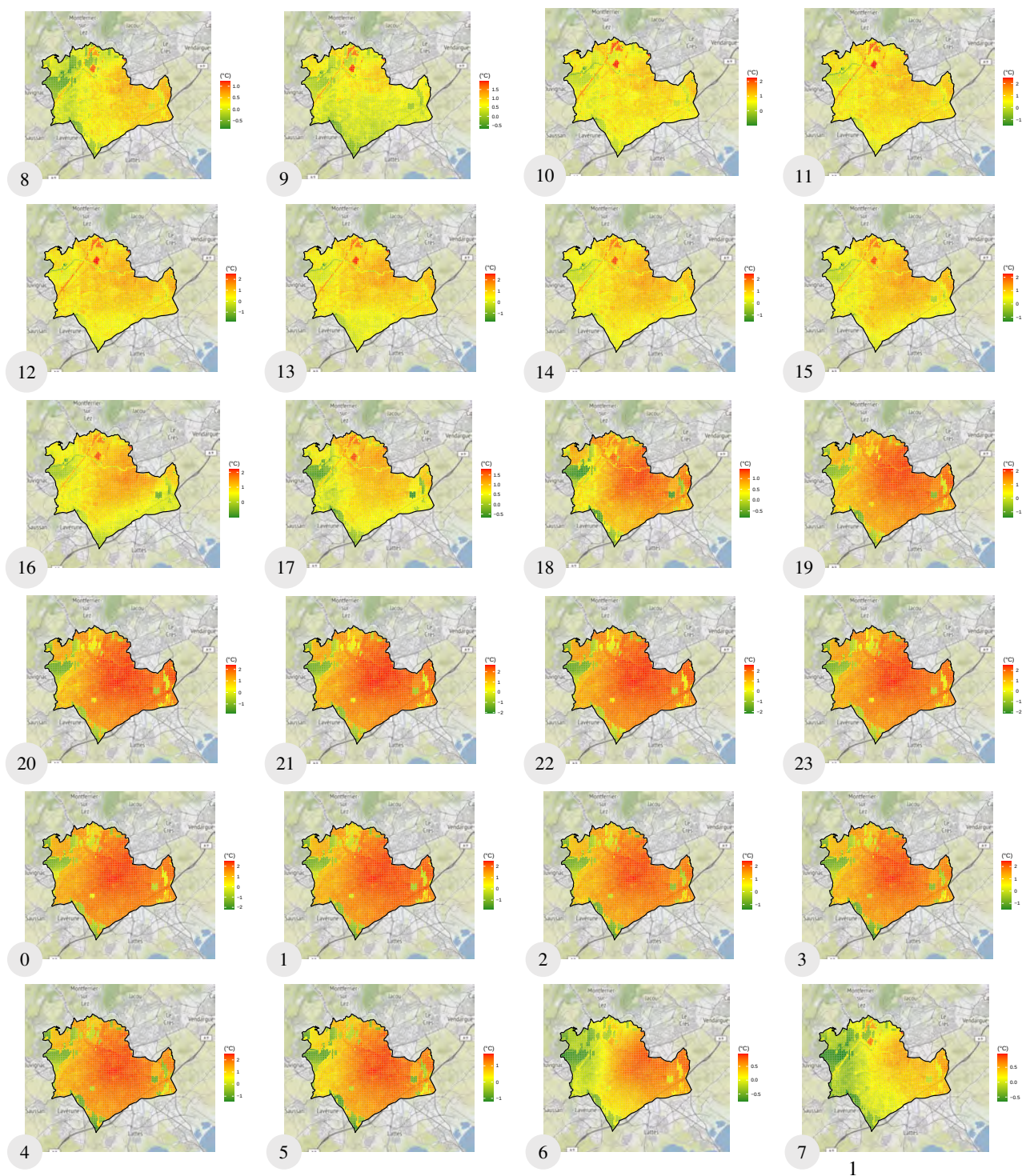


Figure 22: ICU moyen heure par heure (indiquée en UTC dans les bulles grises) pour le type de temps sensible 7 de Montpellier. Attention, la palette de couleurs est différente pour chaque image.

3.3.3 Conclusion

La méthode proposée pour estimer l'îlot de chaleur urbain de Montpellier en climat futur combine une approche statistique de classification des journées simulées par le modèle régional de climat AROME-Climat (scénario RCP 8.5) en types de temps sensibles avec des simulations urbaines à haute résolution issues de la plateforme CLUE. Plusieurs hypothèses ont été faites dans cette étude :

- Les types de temps sensibles déterminés en climat actuel seront ceux également rencontrés en climat futur. Ils ne vont pas varier avec le changement climatique, seule leur fréquence d'apparition va évoluer.
- Chaque type de temps implique une réponse spécifique de la ville sur le climat local, via le phénomène d'îlot de chaleur urbain.
- Un même type de temps va donner le même ICU en climat futur que ce qu'il donne en climat actuel. Aucune évolution de l'occupation du sol ou du tissu urbain de Montpellier n'a été effectuée dans cette étude. La description de la ville actuelle, selon la base de données Open Street Map, a été conservée.

Pour compléter cette étude, des questions scientifiques complémentaires mériteraient d'être creusées :

- Quelle variabilité de l'ICU y a-t-il d'une projection climatique à l'autre ?
- Une nouvelle classification des types de temps faite à partir des données en climat futur serait-elle similaire à celle du climat actuel ? Ou d'autres types de temps seraient-ils détectés ?

ANNEXES

[ANNEXE A] La plateforme CLUE (Climat Urbain Etude)

La plateforme CLUE (Climat Urbain Étude) est une plateforme de modélisation du climat urbain issue du projet de recherche ACCLIMAT⁹ qui a été développée par le centre de recherche de Météo-France (CNRM). Elle a été transférée vers les services opérationnels de Météo-France afin de mener des études de pointe sur le climat urbain à destination des collectivités.

Elle permet de modéliser finement le climat local de la ville en tenant compte de phénomènes météorologiques de plus grande échelle (vent dominant, présence d'un anticyclone...). Pour cela, elle s'appuie sur deux modèles numériques : Méso-NH (modélisation atmosphérique) et SURFEX (modélisation des échanges surface-atmosphère). Le modèle SURFEX décrit de manière précise les échanges thermiques et hydriques entre les différents types de surface (ville, surfaces naturelles, mer et lacs) et l'atmosphère. Chaque type de surface est décrit par un schéma différent. Les villes sont décrites par le schéma TEB (Town Energy Balance), schéma reconnu par la communauté des chercheurs en climat urbain.

[ANNEXE B] Traitement des données d'occupation du sol

Ce paragraphe détaille le traitement des données d'occupation du sol dans CLUE. Sur le territoire de la ville étudiée, on utilise les données de la chaîne Geoclimate. Cette base de données distingue les types de couvert suivants : bâtiments, eau, route et surface imperméable, végétation basse et végétation haute. Sur certaines surfaces, plusieurs types de couverts peuvent se superposer, par exemple : la végétation haute et les routes. A contrario, dans le modèle numérique (SURFEX), on ne peut attribuer qu'un seul type de couvert à chaque surface. Ainsi, lorsque sur une surface, deux types de couvert se superposent dans les données Geoclimate, l'attribution de cette surface à un type de couvert a été faite selon le tableau ci-dessous. Le choix de l'attribution finale s'est fait en fonction de l'importance de chaque type de couvert pour la modélisation.

Types de couverts se superposant	Couvert-s retenu-s
Bâtiment / végétation haute	Bâtiment
Eau / végétalisation haute	Eau
Route / végétation haute	50 % route et 50% végétation haute
Végétation basse / Végétation haute	Végétation haute

Les données Geoclimate exploitées sont données au niveau de l'USR (Unité Spatiale de Référence). Pour certaines USR, il existe des surfaces pour lesquelles le type de couvert est inconnu (ci-après appelées surfaces inconnues). Dans ce cas, un type de couvert a été attribué à ces surfaces, en fonction du rapport entre la taille des surfaces inconnues et la taille totale de l'USR. Lorsque les surfaces inconnues représentent plus de 80 % de la taille de l'USR, on considère que l'on a pas assez d'informations sur l'USR en question dans la base de données Geoclimate, et on utilise les données CORINE Land Cover à la place.

⁹ <https://www.adaptation-changement-climatique.fr/initiatives/acclimat>

Si les surfaces inconnues représentent entre 60 et 80 %, on se situe, en règle général, sur une USR à caractère plutôt rural, aussi on attribue le couvert végétation à 80 % des surfaces inconnues et le couvert route au 20 % restant. À l'inverse, lorsque les surfaces inconnues constituent moins de 60 % de la taille totale, on a affaire à des USR à caractère urbain et, l'attribution des couverts pour les surfaces inconnues est de 80 % de route, et 20 % de végétation. Ces règles de complétion sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Taille des surfaces inconnues par rapport à la taille de l'USR	Couvert·s attribué·s aux surfaces inconnues	Explication
Plus de 80 %	Selon données CORINE Land Cover	Pas d'informations suffisantes dans les données Geoclimate
Entre 60 et 80 %	80% végétation et 20 % route	USR rurale
Moins de 60 %	20% végétation et 80 % route	USR urbaine

Il reste à fusionner les deux sources de données (Geoclimate sur le territoire de la ville étudiée et CORINE Land Cover en dehors) et à convertir les données en images matricielles pour qu'elles puissent être lues par les modèles numériques. Pour cela, les données Geoclimate et CORINE Land Cover sont tout d'abord échantillonnées à 10 m : une grille régulière de 10 m de résolution est superposée sur les données vectorielles, on attribue à chaque maille de cette grille la valeur du point situé au centre de la maille. Ensuite, on fusionne les deux sources de données en prenant la donnée Geoclimate là où elle existe, et en complétant par les données CORINE Land Cover. Enfin, les données sont agrégées à une résolution de 50 m afin d'alléger les fichiers de données et faciliter leur exploitation.

FIN DE DOCUMENT
