



ILOTS DE CHALEUR URBAINS

Projets du Haras

Marly-la-Ville

31 Janvier 2025

Groupe 3f

Immobilière 3F 
Groupe ActionLogement



MAÎTRE D'OUVRAGE

RAISON SOCIALE	Immobilière 3f
COORDONNÉES	159 rue Nationale 75638 PARIS CEDEX 13
INTERLOCUTEURS	Julia MUNARRIZ POLO Tél : 06 69 58 49 64 Mail : julia.munarriz-polo@groupe3f.fr

SCE

COORDONNÉES	9 boulevard du Général de Gaulle 92120 MONTROUGE Tél. 01.55.58.13.20 Fax. 01.55.58.13.21 Mail. paris@sce.fr
INTERLOCUTEUR	M. Geoffroy Dodeux Tél. 01.55.58.13.25 E-mail : geoffroy.dodeux@sce.fr

RAPPORT

TITRE	Étude d'impact des projets d'aménagement du Haras à Marly-la-Ville
NOMBRE DE PAGES	18
OFFRE DE RÉFÉRENCE	P20002790
N° COMMANDE	Bon de commande AM210041

SIGNATAIRE

RÉFÉRENCE	DATE	RÉVISION	DU DOCUMENT	OBJET DE LA RÉVISION	RÉDACTEUR	CONTRÔLE	QUALITÉ
231053		V0			Rédaction ICU	ATR	GDO

Table des matières

Analyse climatique et météorologique	5
1. Analyse du climat passé	6
1.1. Sources de données	6
1.2. Analyse de la température	6
1.2.1. Températures annuelles	6
1.2.2. Températures mensuelles	6
1.2.3. Températures maximales diurnes	7
1.2.4. Températures maximales nocturnes	7
2. Analyse du climat futur	7
2.1. Sources de données	7
2.2. Analyse de la température à l'horizon 2100	7
2.3. Analyse des précipitations à l'horizon 2100	8
3. Analyse satellitaire de l'été de 2022	8
3.1. Analyse météorologique	8
3.2. Données satellitaires	9
3.2.1. Données SENTINEL 2	9
3.2.2. Données LANDSAT 8 et 9	9
3.3. Calcul d'indicateurs	9
3.3.1. Indice de végétation	9
3.3.2. Indice d'humidité	10
3.3.3. Température de brillance	10
3.4. Constitution d'un référentiel	10
3.5. Analyse cartographique de la végétation et de l'humidité	11
3.6. Analyse spectrale de la végétation et de l'humidité	11
3.7. Analyse de la température de brillance	14
MODELISATION DES TEMPERATURES	16
1. Périmètre de la modélisation	17
2. Données d'entrées	17
2.1. Données météorologiques	17
2.2. Données relatives au projet	17
2.2.1. Altimétrie	17

2.2.2. Bâtiments	17
2.2.3. Arbres	17
2.2.1. Occupation du sol	17
3. Jeu de données de référence	19
4. Modélisation des ombres	19
5. Modélisation des températures	21
5.1. Température diurne	21
5.2. Température nocturne	23
6. Préconisations	24
6.1. Mesures de rafraichissement	24
6.1.1. Cours oasis	24
6.1.2. Toitures végétalisées	24
6.1.3. Ecoulement des eaux pluviales	25
6.1.4. Matériaux et couleurs des revêtements	25
6.1.5. Alignement d'arbres le long des voiries	25
6.1.6. Points d'eau	25
6.1.7. Structures d'ombrages	25
6.2. Modélisation de la plantation d'arbres supplémentaires	26
7. Modélisation des températures - Arbres supplémentaires	27
7.1. Comparaison des ombres	27
7.2. Comparaison des températures diurnes	28
8. Conclusion	29

Table des figures

Figure 1 - Evolution des températures annuelles entre 1974 et 2023	6	Figure 36 –Comparaison des ombres avec 60 arbres supplémentaires	27
Figure 2 - Températures maximales par année et par décade.....	6	Figure 37 –Comparaison des températures relatives avec 60 arbres supplémentaires	28
Figure 3 - Nombre de jours avec des températures élevées par année et par décade	7	Figure 38 –Ecart de températures entre les deux scénarios	28
Figure 4 - Nombre de nuits avec des températures élevées par année et par décade	7	Figure 39 –Ecart de températures entre les deux scénarios – OAP 5.....	29
Figure 5 - Température annuelle à l'horizon 2100.....	7		
Figure 6 - Nombre de jours avec des températures élevées à l'horizon 2100.....	7		
Figure 7 - Cumul des précipitations à l'horizon 2100	8		
Figure 8 – Données Météo-France mesurées lors de l'été 2022 – Station 95427001.....	8		
Figure 9 – Sélection des images SENTINEL 2.....	9		
Figure 10 – Caractéristiques des images SENTINEL 2	9		
Figure 11 – Sélection des images LANDSAT 8 et 9.....	9		
Figure 12 – Caractéristiques des images Landsat 8 et 9	9		
Figure 13 – Indice de végétation par différence normalisée NDVI	9		
Figure 14 – Indice d'humidité par différence normalisée NDVI	10		
Figure 15 – Equation de Planck de la Température de Brillance Tb	10		
Figure 16 – Jeu de données de référence – été 2022.....	10		
Figure 17 – Cartographie de l'indice NDVI au cours de l'été 2022.....	11		
Figure 18 – Cartographie de l'indice NDMI au cours de l'été 2022	11		
Figure 19 – Cartographie de la température de brillance au cours de l'été 2022	14		
Figure 20 – Température de brillance observée au cours de l'été 2022	14		
Figure 21 – Cartographie de la température de brillance au cours de l'été 2022 – Zones environnantes.....	15		
Figure 22 – Données d'entrée de la modélisation	18		
Figure 23 – Occupation du sol	18		
Figure 24 – Occupation du sol – OAP 5 Nord	19		
Figure 25 – Jeu de données de référence	19		
Figure 26 – Somme des ombres dans la journée du 13 août.....	20		
Figure 27 – Température moyenne radiante diurne à l'horizon 2100 – Données de référence.....	21		
Figure 28 – Température moyenne radiante diurne à l'horizon 2100.....	21		
Figure 29 – Température moyenne radiante diurne à l'horizon 2100 – OAP 5 Nord.....	22		
Figure 30 – Température moyenne radiante nocturne à l'horizon 2100 – Données de référence.....	23		
Figure 31 – Température moyenne radiante nocturne à l'horizon 2100.....	23		
Figure 32 – Température moyenne radiante nocturne à l'horizon 2100 – OAP 5 Nord.....	24		
Figure 33 – Périmètre de la plantation modélisée d'arbres supplémentaires	26		
Figure 34 –Plantation modélisée d'arbres supplémentaires.....	26		
Figure 35 –Plantation modélisée d'arbres supplémentaires – OAP 5 Nord	27		

Analyse climatique et météorologique

Ce document présente une étude complémentaire en réponse à l'Autorité Environnementale à propos de la vulnérabilité du projet face au changement climatique. Cette étude envisage une **modélisation de la vie quotidienne sur le site à l'horizon 2100** pour apprécier l'effet des mesures prévues dans le projet pour prévenir le phénomène d'îlots de chaleur urbains.

La première partie consiste en l'**analyse du climat passé et du climat futur**, pour évaluer avec quelle intensité et avec quelle occurrence les événements exceptionnels du passé pourront se reproduire à l'horizon 2100. **Une analyse satellitaire est réalisée lors de l'été 2022** pour évaluer les températures observées lors d'un événement caniculaire récent. La deuxième partie repose sur l'**analyse des îlots de chaleurs urbains** à partir des plans du projet et d'une modélisation des ombres et des températures envisagées en 2100.

1. Analyse du climat passé

1.1. Sources de données

L'analyse du climat passé repose sur l'extraction des **données quotidiennes de Météo-France**, téléchargeables à cette adresse : <https://meteo.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-quotidiennes/>

La station la plus proche du site d'étude et avec une période historique étendue est celle de ROISSY (ID 95427001). Elle est située à 6,5km au Sud-Sud-Est du site d'étude. L'analyse du climat passé est réalisée sur une période de 50 ans entre 1974 et 2023.

Source	Station 95427001	Période
Météo-France	ROISSY	1974 - 2023

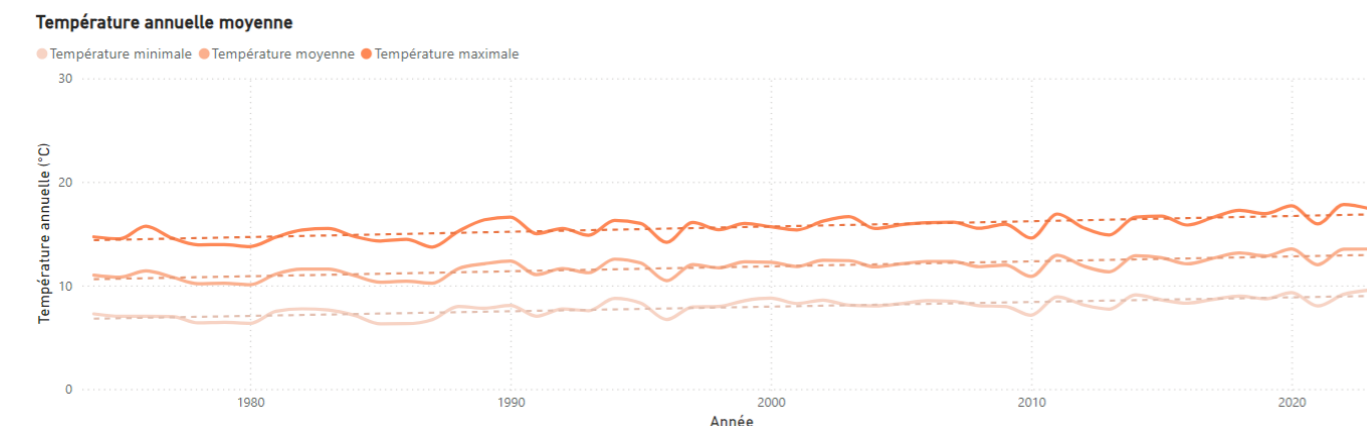
1.2. Analyse de la température

L'analyse de la température repose sur trois variables mesurées :

- ▶ TN : Température minimale sous abri (en °C et 1/10)
- ▶ TX : Température maximale sous abri (en °C et 1/10)
- ▶ TM : Moyenne quotidienne (TN+TX)/2 (en °C et 1/10)

1.2.1. Températures annuelles

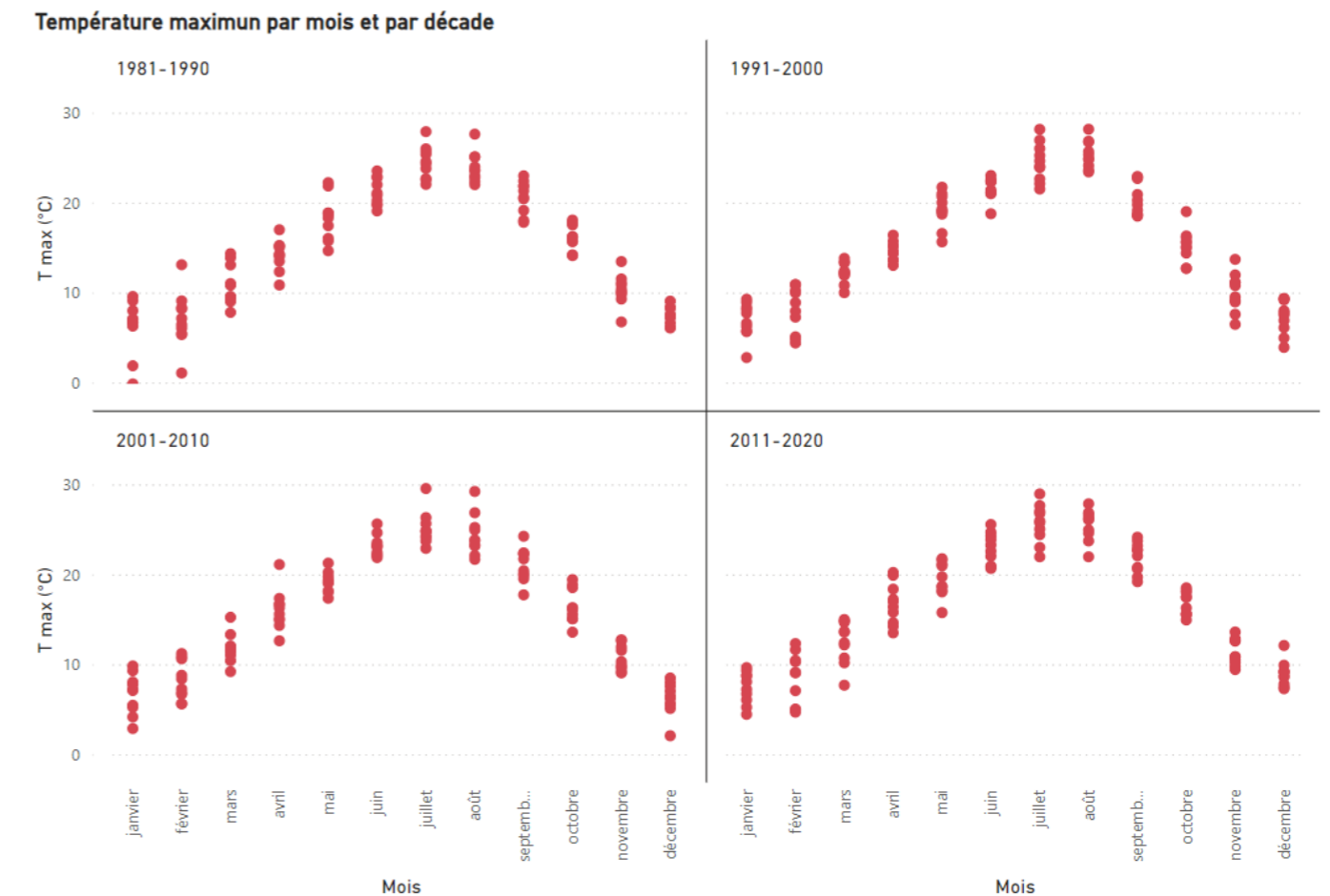
Figure 1 - Evolution des températures annuelles entre 1974 et 2023



Le graphique ci-dessus présente la **moyenne annuelle des températures minimales, moyennes et maximales entre 1974 et 2023**. On observe une variation interannuelle composée d'années plus froides (1996, 2010, 2021) et plus chaudes (1990, 2011, 2022). La tendance est une augmentation de +1,5°C pour les températures annuelles moyennes sur cette période et de +2,5°C pour les températures annuelles maximales.

1.2.2. Températures mensuelles

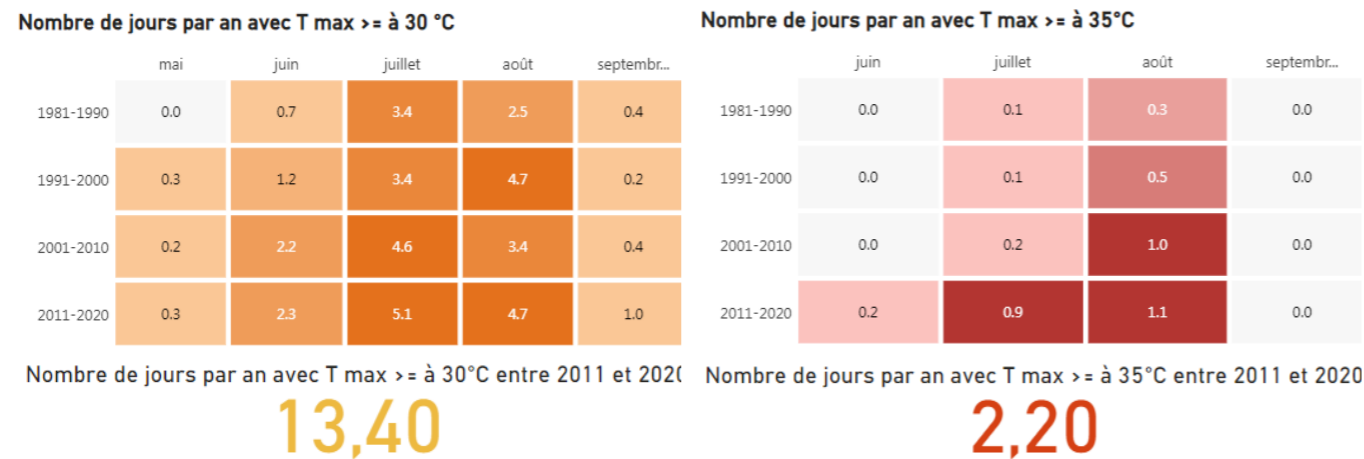
Figure 2 - Températures maximales par année et par décennie



Les graphiques ci-dessus présentent la **moyenne mensuelle des températures maximales recensées par année et par décennie entre 1974 et 2023**. Décade après décennie, on observe une hausse des températures maximales tout au long de l'année et notamment pour les mois les plus chauds de l'année entre Juin et Septembre. La valeur extrême sur la décennie 1981-1990 (> 27 °C en Juillet 1983 et en Août 1990) fait partie des normales saisonnières pour 5 années sur la décennie 2011-2020, en 2013, 2015, 2018, 2019, 2020.

1.2.3. Températures maximales diurnes

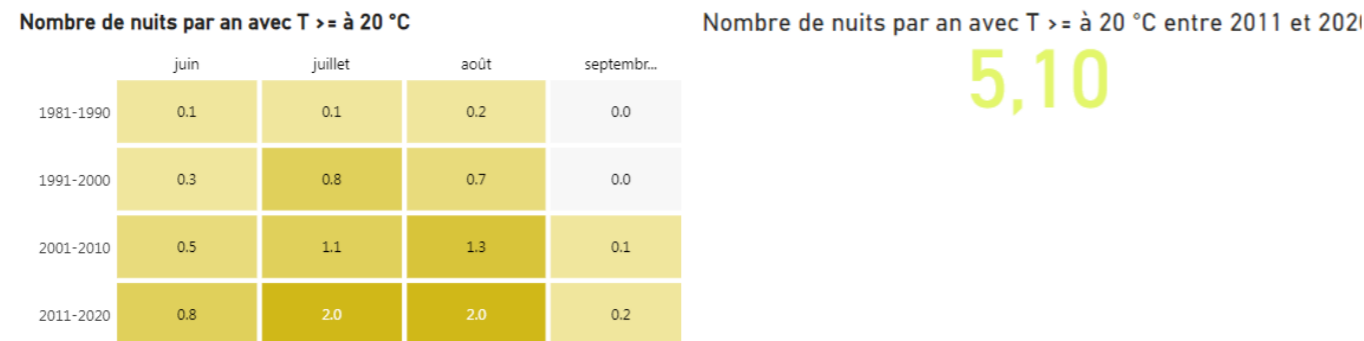
Figure 3 - Nombre de jours avec des températures élevées par année et par décade



Le graphique ci-dessus présente le nombre de jours par mois calculé en moyenne sur une décade avec un dépassement de température diurne > 30°C et > 35°C. Sur la décade 2011-2022, le dépassement de température > 30°C est de plus de 13 jours en moyenne par année, soit près de deux fois les valeurs de la décade 1981-1990. Le nombre de jours avec des températures > 35°C dépasse 2 jours en moyenne par année alors qu'il est quasiment nul entre 1981 et 1990.

1.2.4. Températures maximales nocturnes

Figure 4 - Nombre de nuits avec des températures élevées par année et par décade



Le graphique ci-dessus présente le nombre de jours par mois calculé en moyenne sur une décade avec un dépassement de température nocturne > 20°C. Le nombre de nuits avec des températures > 20°C atteint plus 5 jours en moyenne par année lors qu'il est quasiment nul sur les décades 1981-1990 et 1991-2000.

2. Analyse du climat futur

2.1. Sources de données

Le climat futur est décrit à partir des données DRIAS disponibles à cette adresse : <https://drias-prod.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebDrias/index.jsp>

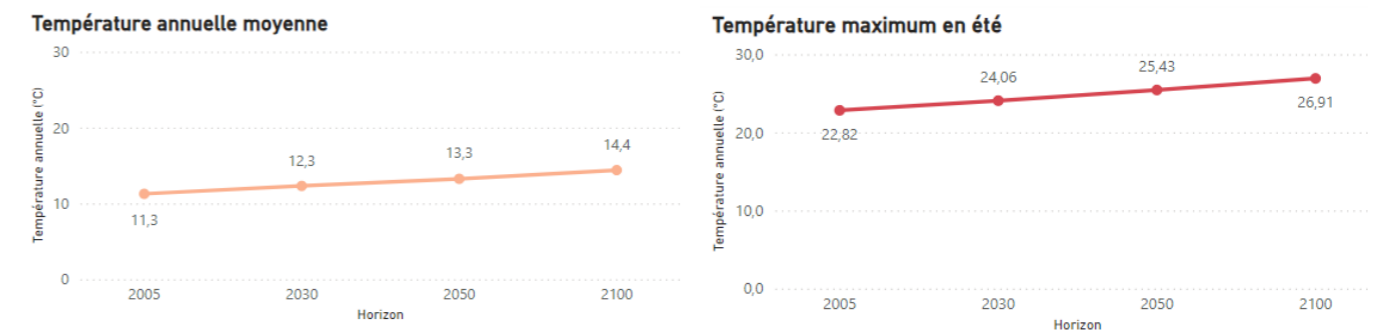
Le jeu de données Explore2 – ADAMONT repose sur des simulations climatiques régionales qui déclinent à l'échelle de l'Europe les simulations globales de l'exercice international CMIP5 (5e phase du Coupled Model Intercomparison Project) ayant servi de base au 5e rapport du GIEC.

4 périodes sont modélisées :

- ▶ REFERENCE = 1976-2005
- ▶ GWL15 = Horizon 2030 : + 2 °C France
- ▶ GLW20 = Horizon 2050 : + 2,7 °C France
- ▶ GWL30 = Horizon 2100 : +4 °C France

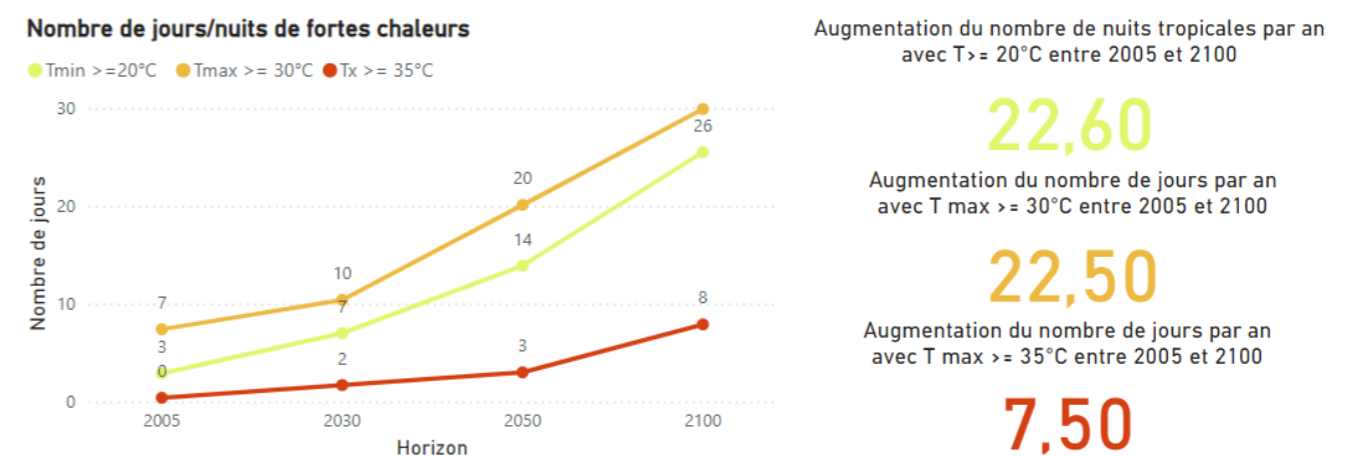
2.2. Analyse de la température à l'horizon 2100

Figure 5 - Température annuelle à l'horizon 2100



Sur le territoire d'étude, un écart de température moyenne annuelle est estimé à +3,1°C entre la situation de référence et l'horizon 2100, de 11,3 à 14,4°C. En été entre les mois de Juin à Septembre, un écart de température maximale annuelle est estimé à +4,1°C, de 22,8 à 26,9°C.

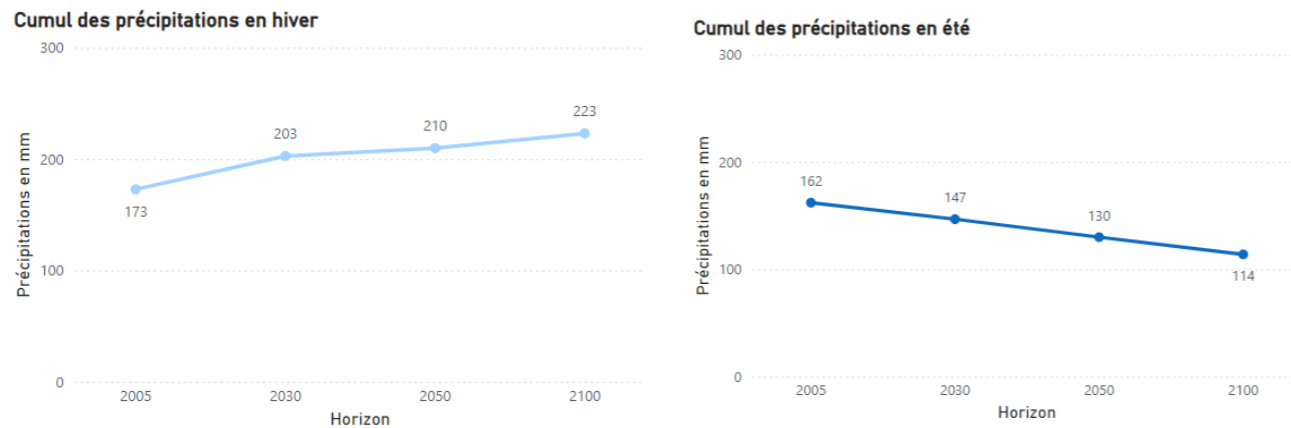
Figure 6 - Nombre de jours avec des températures élevées à l'horizon 2100



Le nombre de jours par an avec des températures diurnes >30°C et >35°C augmente considérablement entre la situation de référence et l'horizon 2100, avec respectivement +22,5 jours par an et +7,5 jours. Le phénomène de nuit tropicale (>20°C) qui était encore limitée aujourd'hui devient très fréquent à l'horizon 2100 avec une augmentation de +22,6 nuits par an.

2.3. Analyse des précipitations à l'horizon 2100

Figure 7 - Cumul des précipitations à l'horizon 2100



Sur le territoire d'étude, une augmentation des précipitations en hiver est estimée de l'ordre de +50mm (+29%) à l'horizon 2100 par rapport à la situation de référence, contre une diminution de -48mm en été (-29%).

Ces données nous amènent à considérer que les périodes de chaleur intense à l'horizon 2100 seront plus fréquentes et plus intenses sur le site d'étude. Elles seront également accentuées par un rafraîchissement nocturne plus limité.

La présence de la végétation est un des facteurs majeurs de rafraîchissement en été. Cette affirmation est vraie tant que les espèces végétales sont en bonne santé et adaptées au climat local. Les conditions climatiques futures, marquées par des températures plus élevées de près de 3 à 4°C et une diminution des précipitations de près de 30% en été, doivent être prises en compte pour le choix des essences végétales implantées.

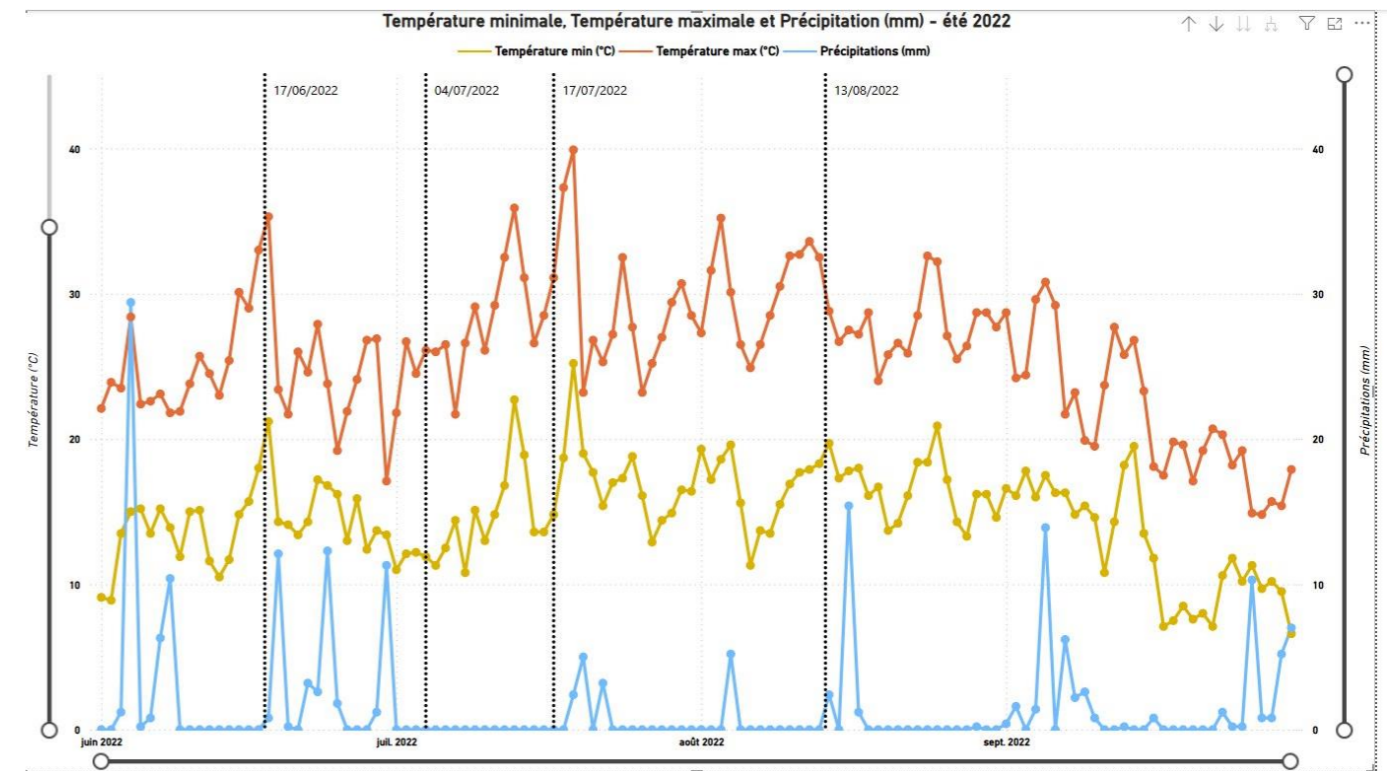
A une échelle macroscopique, l'analyse des images satellitaires de l'été de 2022 nous permettra d'envisager le comportement de la végétation dans un contexte caniculaire et de comparer les températures pour différents types d'occupation du sol, avant de détailler les choix liés au projet par la modélisation.

3. Analyse satellitaire de l'été de 2022

3.1. Analyse météorologique

Les données Météo-France révèlent un été particulièrement chaud et sec entre le 15 Juin et le 15 Septembre 2022.

Figure 8 – Données Météo-France mesurées lors de l'été 2022 – Station 95427001



On observe 22 journées avec des températures maximales > 30°C entre le 15 juin et le 15 Septembre 2022, avec une température de 39,2 °C atteinte le 19 Juillet. Les nuits présentent une température moyenne de 16°C entre le 15 Juin et le 15 Septembre avec un pic à 25,2°C le 19 Juillet. Cette journée du 19 juillet est la plus chaude jamais enregistrée sur cette station depuis 1974.

Les précipitations cumulées entre le 15 Juin et le 15 Septembre 2022 sont égales à 110 mm, avec seulement 18mm de pluie entre le 1^{er} Juillet et le 15 Août. On peut imaginer un stress hydrique fort sur la végétation.

4 images satellitaires ont été sélectionnées pendant l'été 2022.

Date de l'image	Température min (°C)	Température moy (°C)	Température max (°C)
17/06/2022	18,0	29,2	33,0
04/07/2022	11,9	19,2	26,1
17/07/2022	14,8	24,3	31,1
13/08/2022	18,3	26,4	32,5

3.2. Données satellitaires

Dans le cadre de l'analyse des îlots de chaleur urbain, les images satellitaires permettent d'identifier des différences de température entre les surfaces artificialisées et les surfaces végétalisées.

3.2.1. Données SENTINEL 2

Les images SENTINEL 2 sont disponibles sur le site de l'Agence Spatiale Européenne : <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

Figure 9 – Sélection des images SENTINEL 2

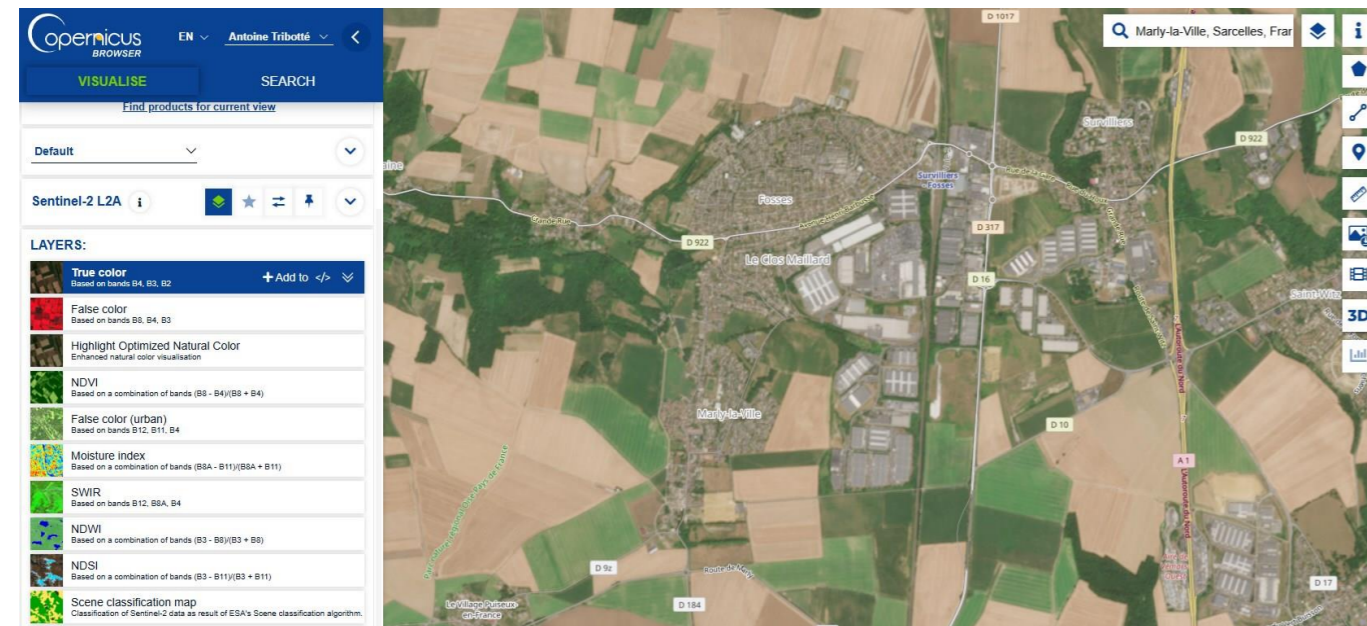


Figure 10 – Caractéristiques des images SENTINEL 2

Résolution temporelle	Résolution spatiale	Résolution spectrale
5 jours	10 m	Rouge / Proche Infra-Rouge

10 metre spatial resolution:

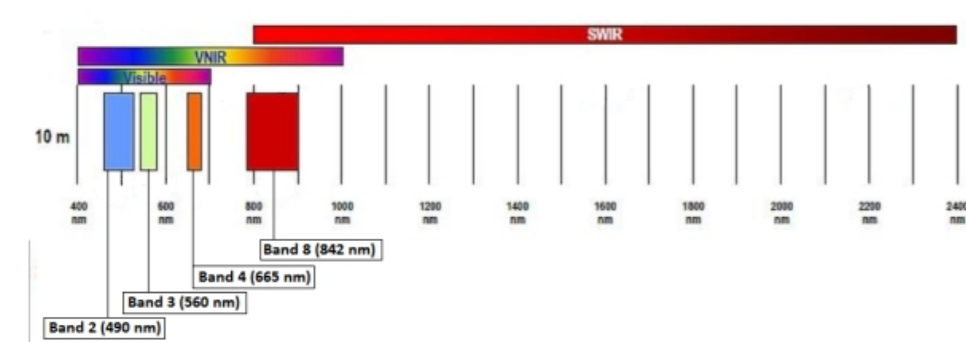


Figure 1: SENTINEL-2 10 m spatial resolution bands: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) and B8 (842 nm)

3.2.2. Données LANDSAT 8 et 9

Les images LANDSAT 8 et 9 sont issues de Earth Explorer de l'United States Geological Survey : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Figure 11 – Sélection des images LANDSAT 8 et 9

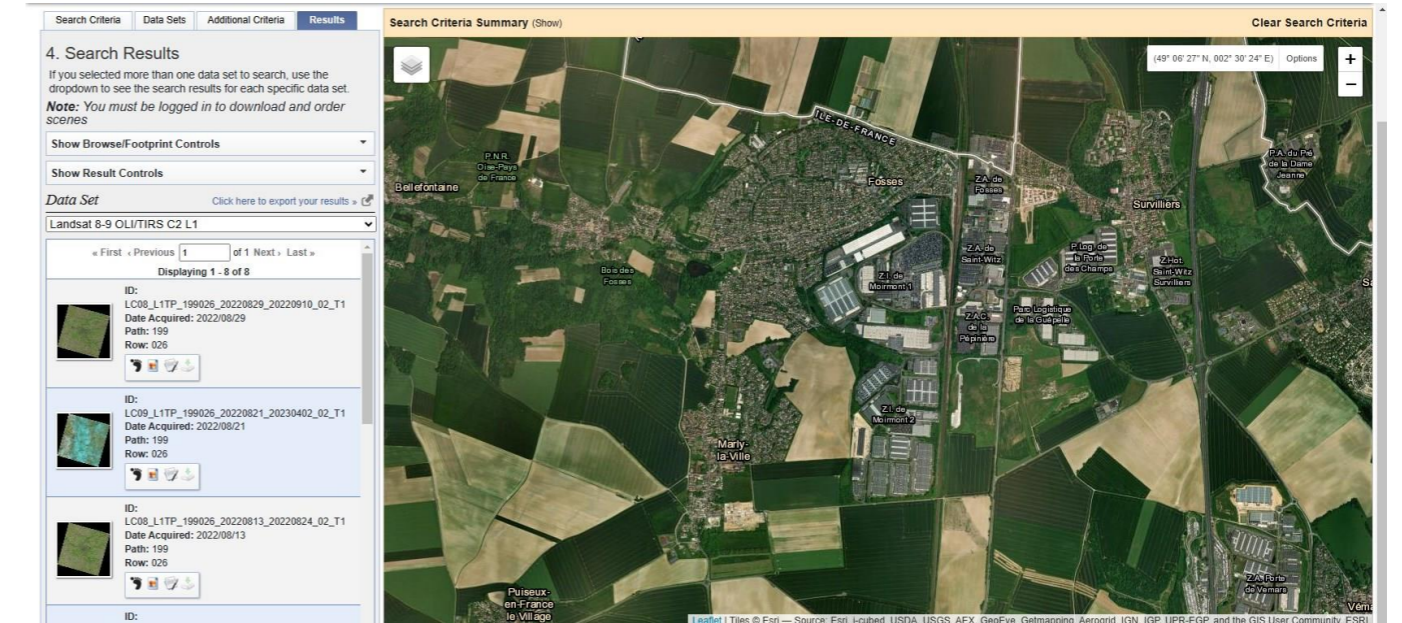


Figure 12 – Caractéristiques des images Landsat 8 et 9

Résolution temporelle	Résolution spatiale	Résolution spectrale
10 jours	30 m	Infra-Rouge Thermique

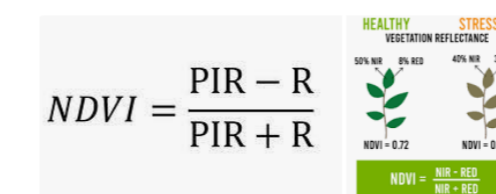
En plus des bandes spectrales du visible et de l'infrarouge, les satellites LANDSAT 8 et 9 disposent de deux bandes thermiques qui permettent le calcul de la température de brillance.

3.3. Calcul d'indicateurs

3.3.1. Indice de végétation

L'indice NDVI est un indice de végétation normalisé qui rend compte de l'état de développement et de santé des végétaux. Les valeurs proches de zéro correspondent généralement à des zones stériles de roche, de sable ou de sols artificialisés. Les valeurs faibles de 0,2 à 0,4 représentent les prairies tandis que les valeurs élevées > 0,6 représentent les zones végétales arbustives et arborées en bonne santé.

Figure 13 – Indice de végétation par différence normalisée NDVI



NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

R : Rouge (665 nm)

PIR : Proche Infra-Rouge (842 nm)

3.3.2. Indice d'humidité

En complémentarité avec l'indice NDVI, l'**indice d'humidité par différence normalisée permet de déterminer la teneur en eau de la végétation et de surveiller les zones de sécheresse**. Les valeurs négatives du NDMI (valeurs proches de -1) correspondent à un sol stérile. Les valeurs autour de zéro (-0,2 à 0,4) correspondent généralement à un stress hydrique. Les valeurs élevées et positives représentent une végétation arborée sans stress hydrique (environ 0,4 à 1).

Figure 14 – Indice d'humidité par différence normalisée NDVI

$$NDMI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$$

NDMI : Normalized Difference Moisture Index

PIR : Proche Infra-Rouge (842 nm)

MIR : Moyen Infra-Rouge (1600 nm)

3.3.3. Température de brillance

La température de brillance est différente de la température de l'air mesurée par les stations météorologiques à 2m du sol ainsi que de la température ressentie par l'utilisateur. **Elle correspond à la température émise par les surfaces au sol** et offre une comparaison pertinente des températures selon le type d'occupation du sol et selon le contexte local sur le site d'étude. **La température de brillance Tb est calculée selon l'équation de Planck** en corrigeant les conditions atmosphériques et les conditions de température des capteurs lors de la prise d'images. Sur le site d'étude, les images LANDSAT sont prises le matin à 10h40, avant les températures les plus chaudes de la journée.

Figure 15 – Equation de Planck de la Température de Brillance Tb

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

T : Température de brillance, exprimée en °C

K1 et K2 : constantes de correction des bandes thermiques B10 et B11

3.4. Constitution d'un référentiel

L'analyse spectrale de la végétation, de l'humidité et de la température de brillance repose sur un jeu de données de référence constitué de 150 polygones répartis, sur le site d'étude et en dehors du site d'étude pour prendre en compte des zones bâties et des zones cultivées.

L'analyse repose sur 4 dates :

- ▶ 17 Juin 2022 / 04 Juillet 2022 / 17 Juillet 2022 / 13 Août 2022

La typologie est définie selon 6 classes d'occupation du sol :

- ▶ **Zone bâtie** : bâtiments, habitations, hangars
- ▶ **Surface perméable** : voirie, bitume, enrobé
- ▶ **Sol nu** : graviers, sable
- ▶ **Zone cultivée** : parcelles aux abords du site
- ▶ **Végétation basse** : herbe, prairie
- ▶ **Végétation arborée** : arbres isolés, haies, petits massifs

Au centre de la zone d'étude, le début des constructions à la fin du printemps 2022 explique une surface en sol nu correspondant à la zone de chantier.

Figure 16 – Jeu de données de référence – été 2022

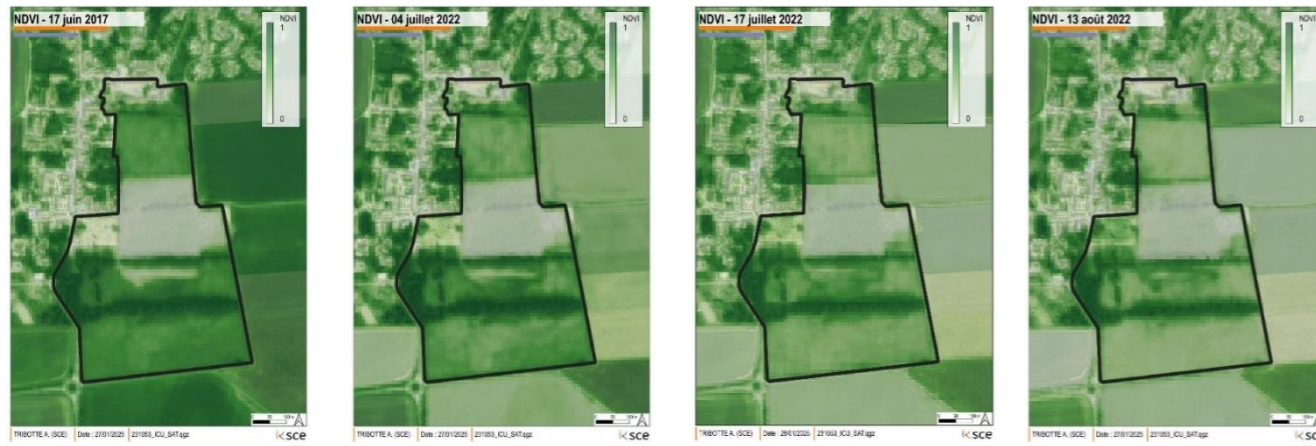


TRIBOTTE A. (SCE) | Date : 29/01/2025 | 231053_ICU_SAT.qgz

sce

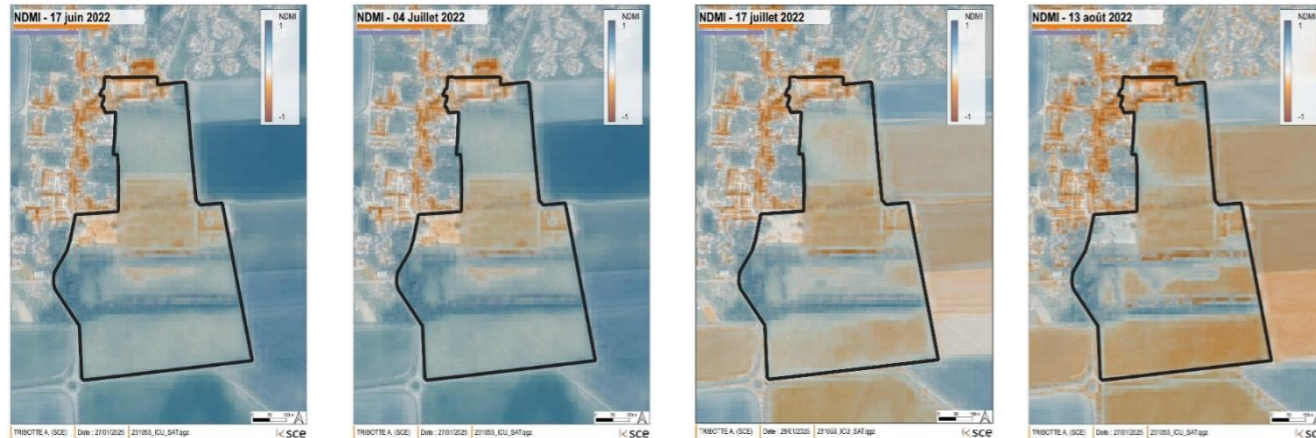
3.5. Analyse cartographique de la végétation et de l'humidité

Figure 17 – Cartographie de l'indice NDVI au cours de l'été 2022



Les cartes ci-dessus présentent l'évolution de l'indice NDVI au cours de l'été 2022. On observe une diminution progressive de l'intensité de la végétation sur l'ensemble du site. Les surfaces herbacées sont les plus impactées par la chaleur et la sécheresse et présentent une réponse spectrale proche des surfaces en sol nu au 13 Août. La plupart des arbres maintiennent un indice NDVI relativement élevé tout au long de l'été.

Figure 18 – Cartographie de l'indice NDMI au cours de l'été 2022



Les cartes ci-dessus présentent l'évolution de l'indice NDMI au cours de l'été 2022. En cohérence avec les cartes NDVI, les cartes NDMI révèlent le maintien d'une bonne humidité dans les zones arborées les plus denses. Les surfaces en herbe présentent des valeurs de plus en plus négatives au cours de l'été, avec un taux d'humidité proche des sols nus au 13 Août 2022.

NB : A noter les évolutions très nettes des parcelles cultivées aux abords du site, qui s'expliquent notamment par les récoltes des cultures en place au début de l'été. Après récolte, ces parcelles agricoles présentent le même taux d'humidité que les sols nus et contribuent ainsi au réchauffement du site d'étude au Sud et à l'Est.

3.6. Analyse spectrale de la végétation et de l'humidité

Pour chaque polygone de référence, la réponse spectrale est extraite et mise sous forme graphique pour interpréter d'une part la distribution des valeurs au sein d'une même classe d'occupation du sol, et d'autre part l'évolution de chaque classe d'occupation du sol au cours de l'été. Les graphiques ci-dessous présentent l'indice NDVI en abscisse (indice de végétation) et l'indice NDMI en ordonnée (indice d'humidité).

L'image du 17 Juin révèle deux groupes distincts :

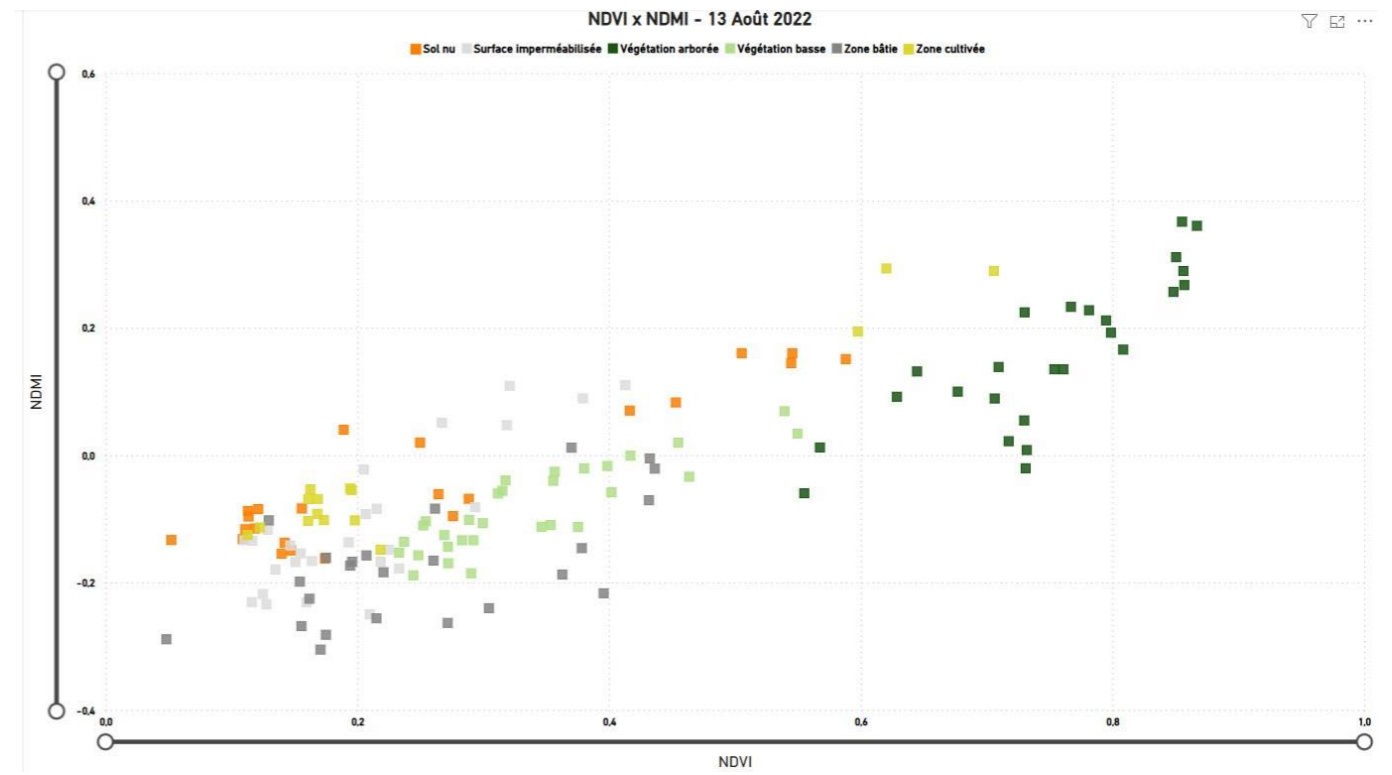
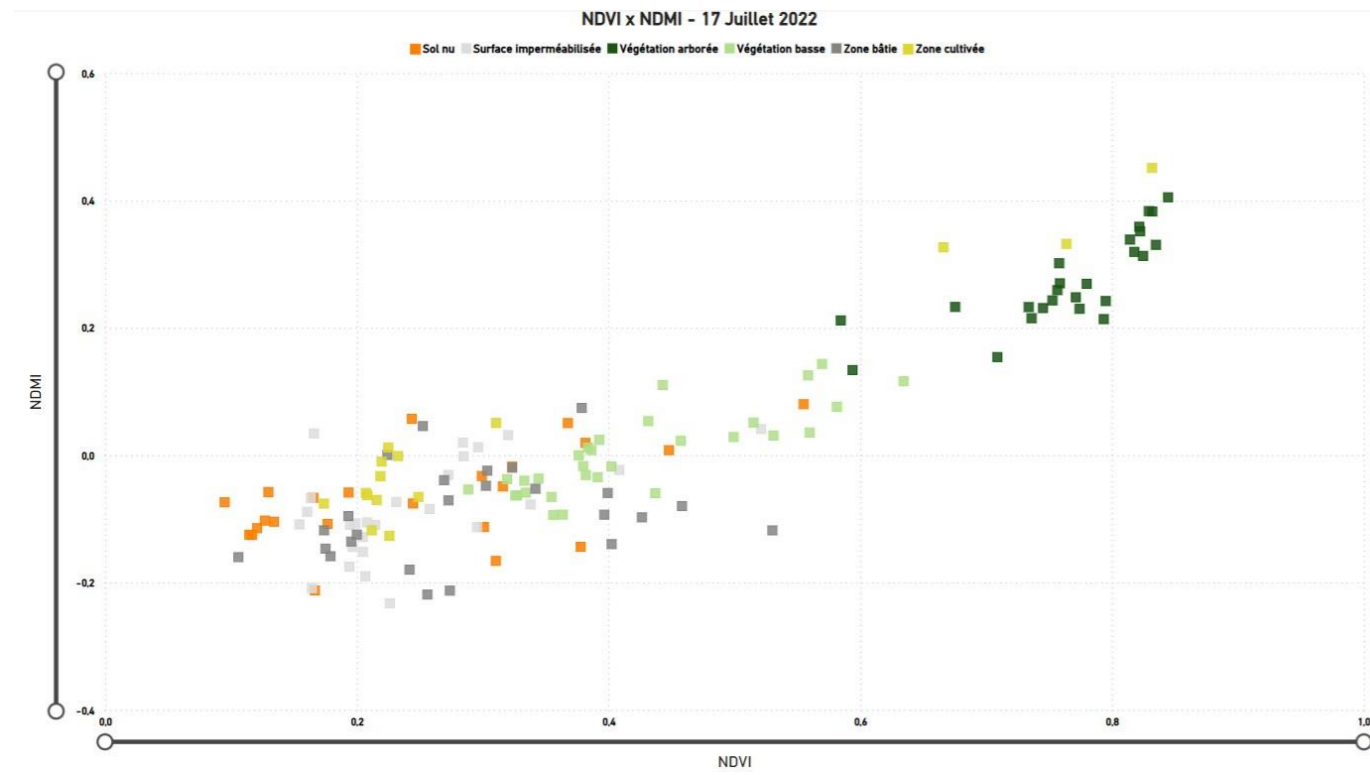
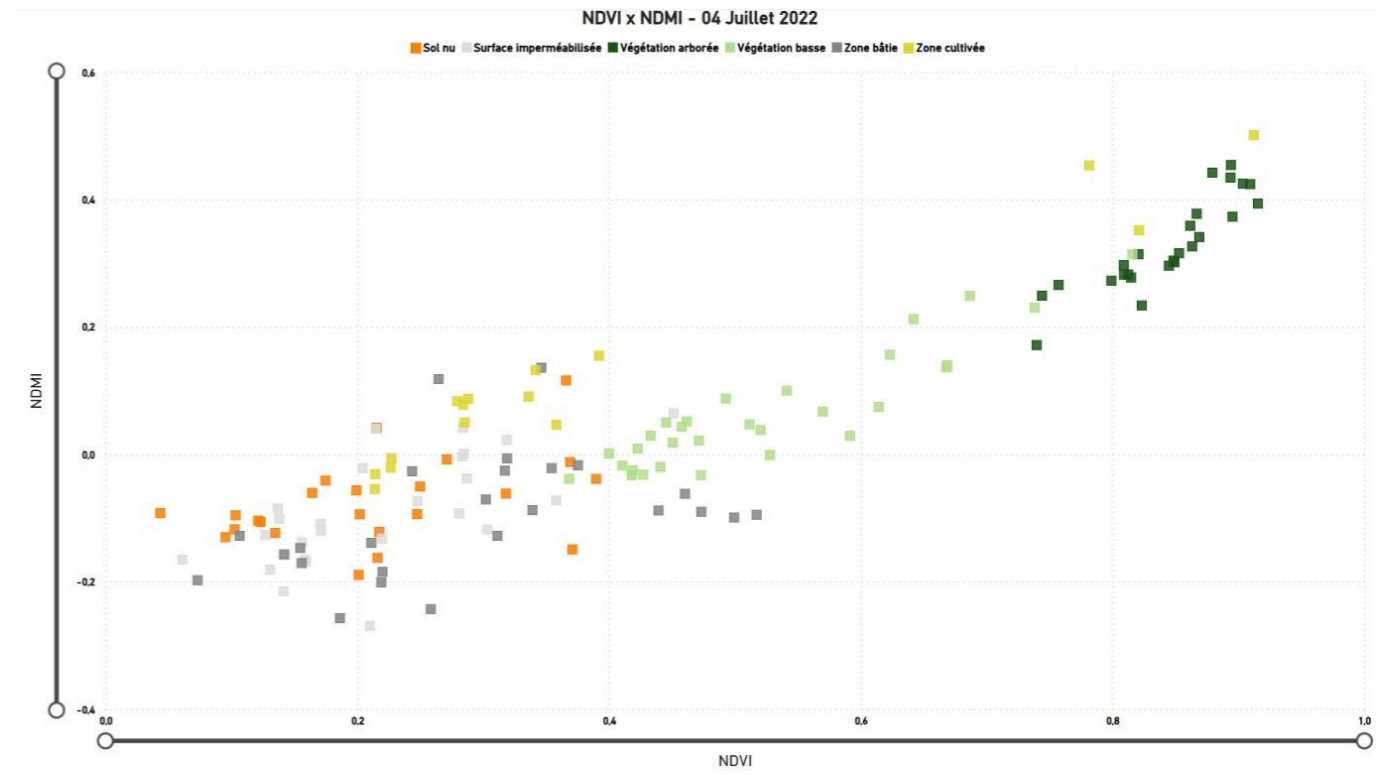
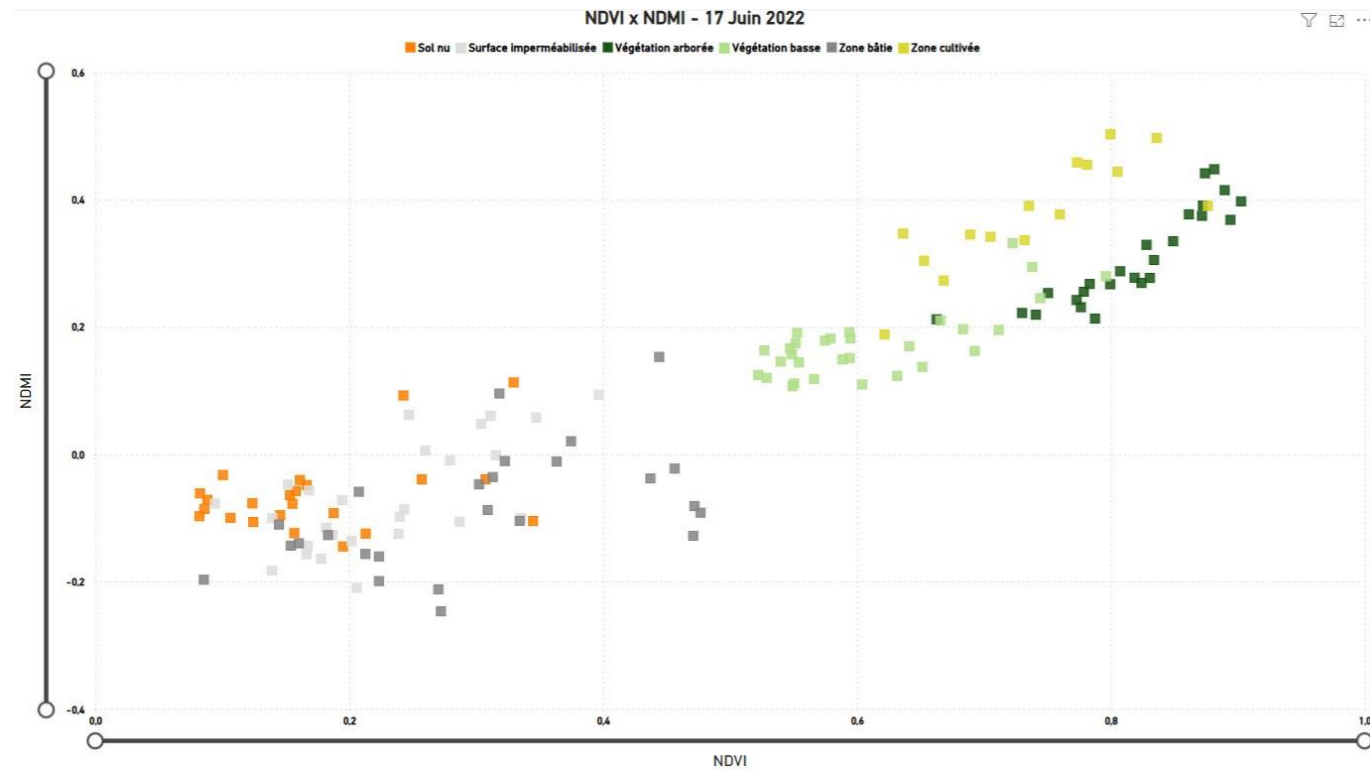
- ▶ Les sols nus (orange), les surfaces imperméabilisées (gris clair) et les surfaces bâties (gris foncé) présentent des valeurs NDVI < 0,5 et des NDMI < 0,1.
- ▶ Les surfaces cultivées (jaune), les surfaces en herbe (vert clair) et les surfaces arborées (vert foncé) présentent des valeurs NDVI > 0,5 et NDMI > 0,1.

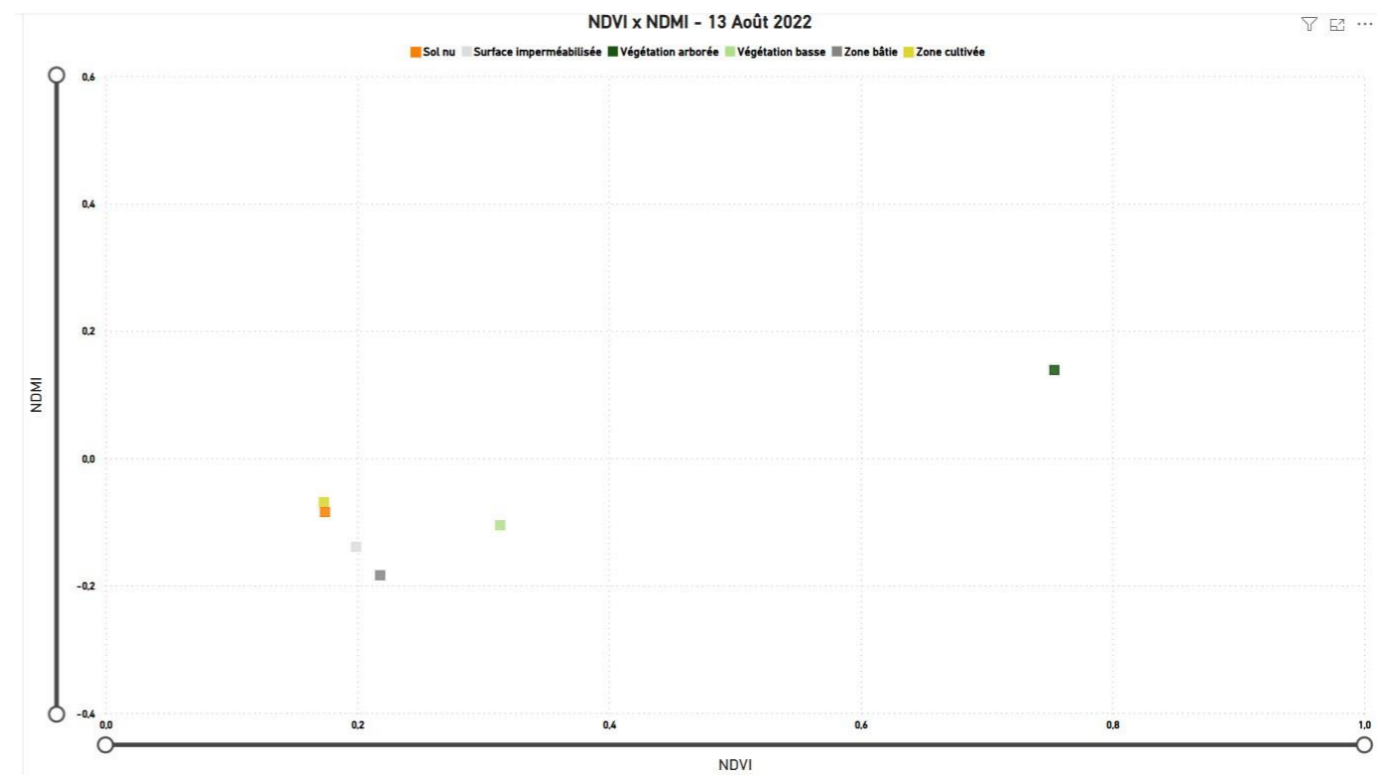
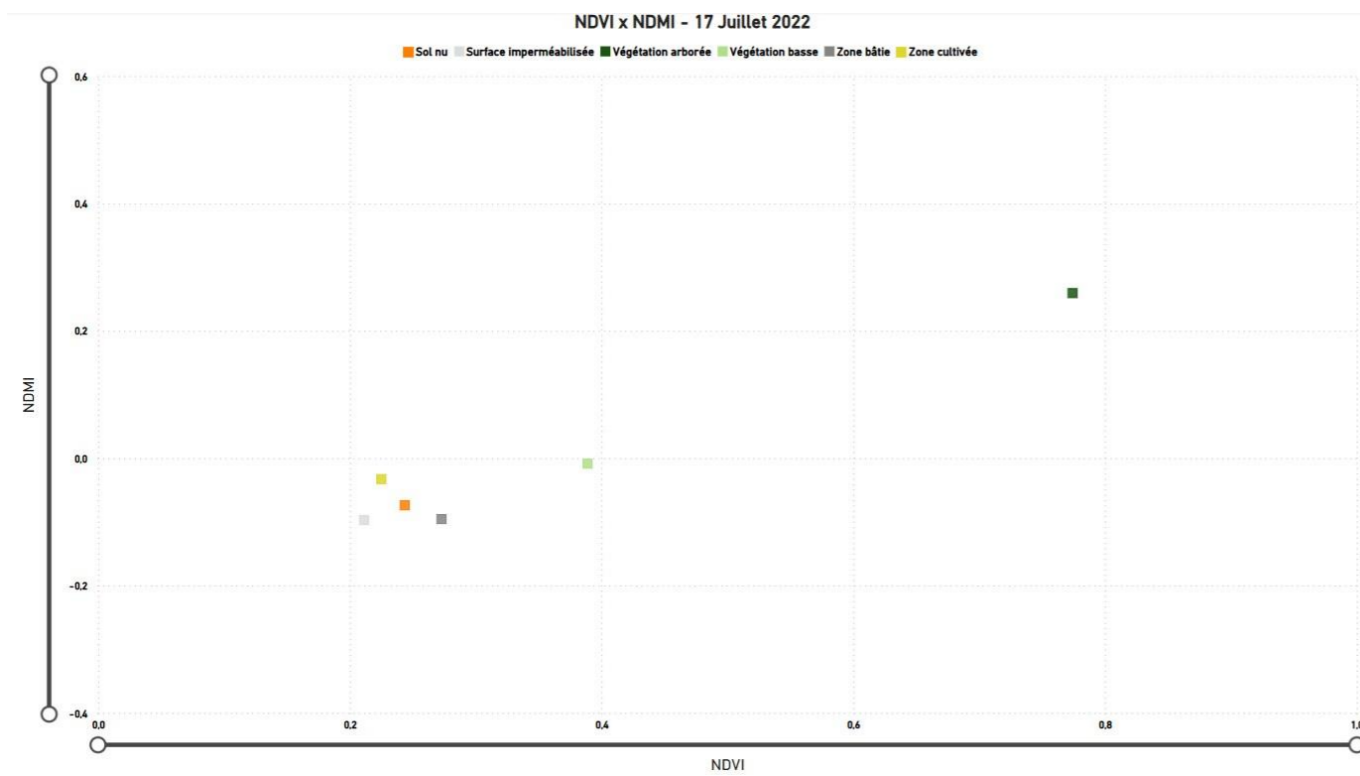
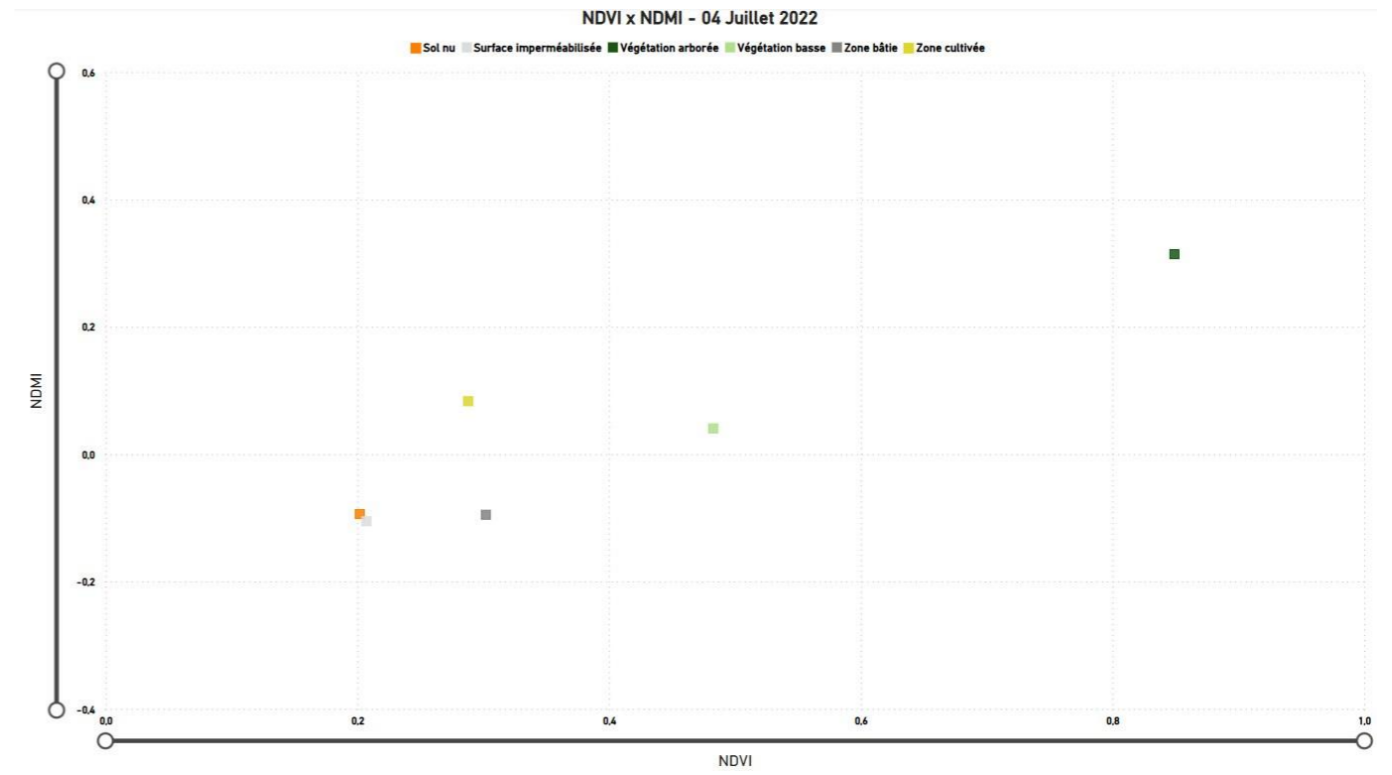
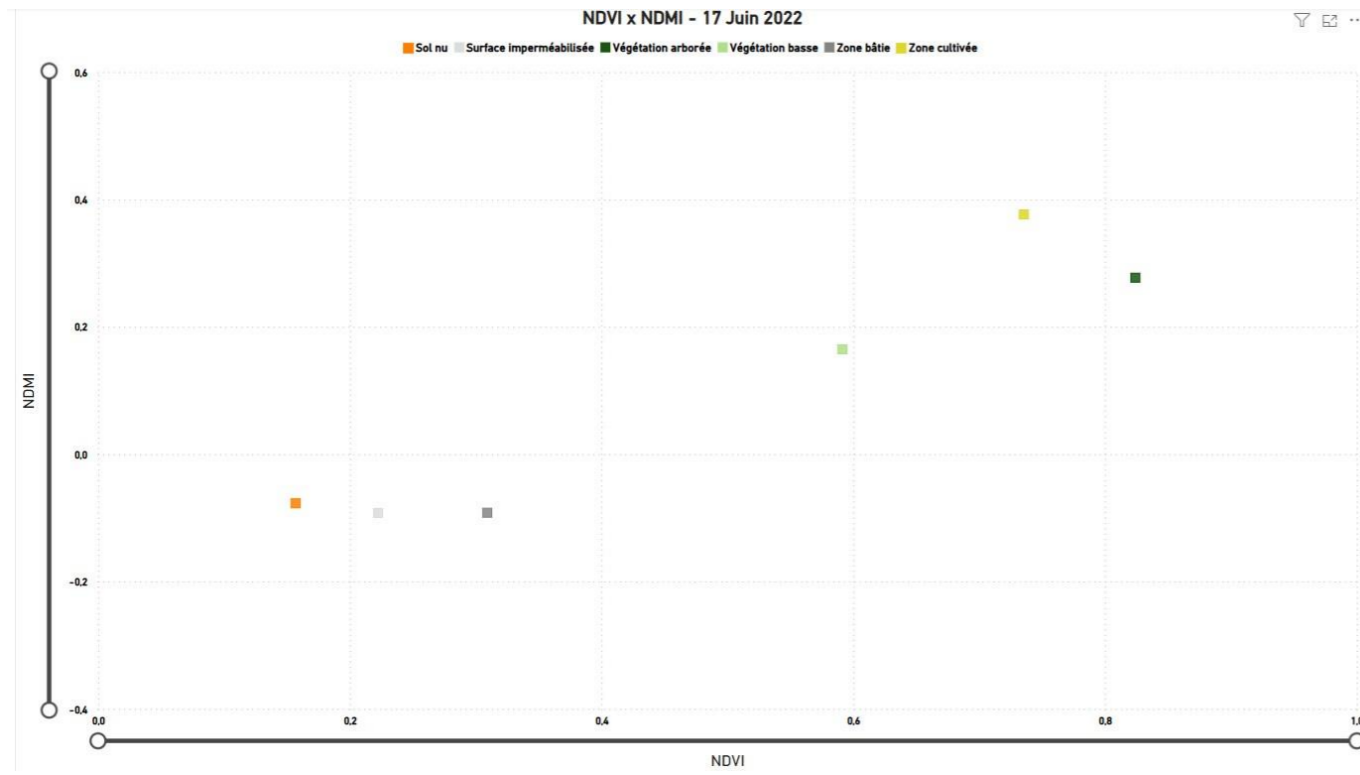
Les surfaces arborées présentent la plus grande valeur d'indice de végétation (NDVI = 0,82) et les cultures présentent la plus forte humidité (NDMI = 0,38). Les surfaces herbacées présentent des valeurs médianes NDVI = 0,59 et NDMI = 0,16.

L'image du 4 Juillet révèle une évolution assez nette de la plupart des surfaces cultivées avec une baisse des valeurs NDVI et NDMI. C'est également le cas pour une partie des surfaces herbacées. Les surfaces arborées restent relativement stables (NDVI = 0,85 ; NDMI = 0,31).

L'image du 17 Juillet révèle que la tendance s'accroît. Les surfaces cultivées ont la même réponse spectrale que les surfaces minéralisées. Les surfaces en herbe présentent un écart très faible de +0,1 selon l'indice NDVI. Les surfaces arborées maintiennent des valeurs médianes relativement élevées NDVI = 0,77 et NDMI = 0,26.

L'image du 13 Août confirme la perte de santé végétale et d'humidité des surfaces en herbe et des cultures. Les surfaces arborées deviennent plus hétérogènes, avec notamment une diminution des valeurs NDVI et NDMI qui concerne les arbres isolés, alors que les arbres en massifs maintiennent des valeurs relativement élevées et similaires aux valeurs observées au début de l'été.

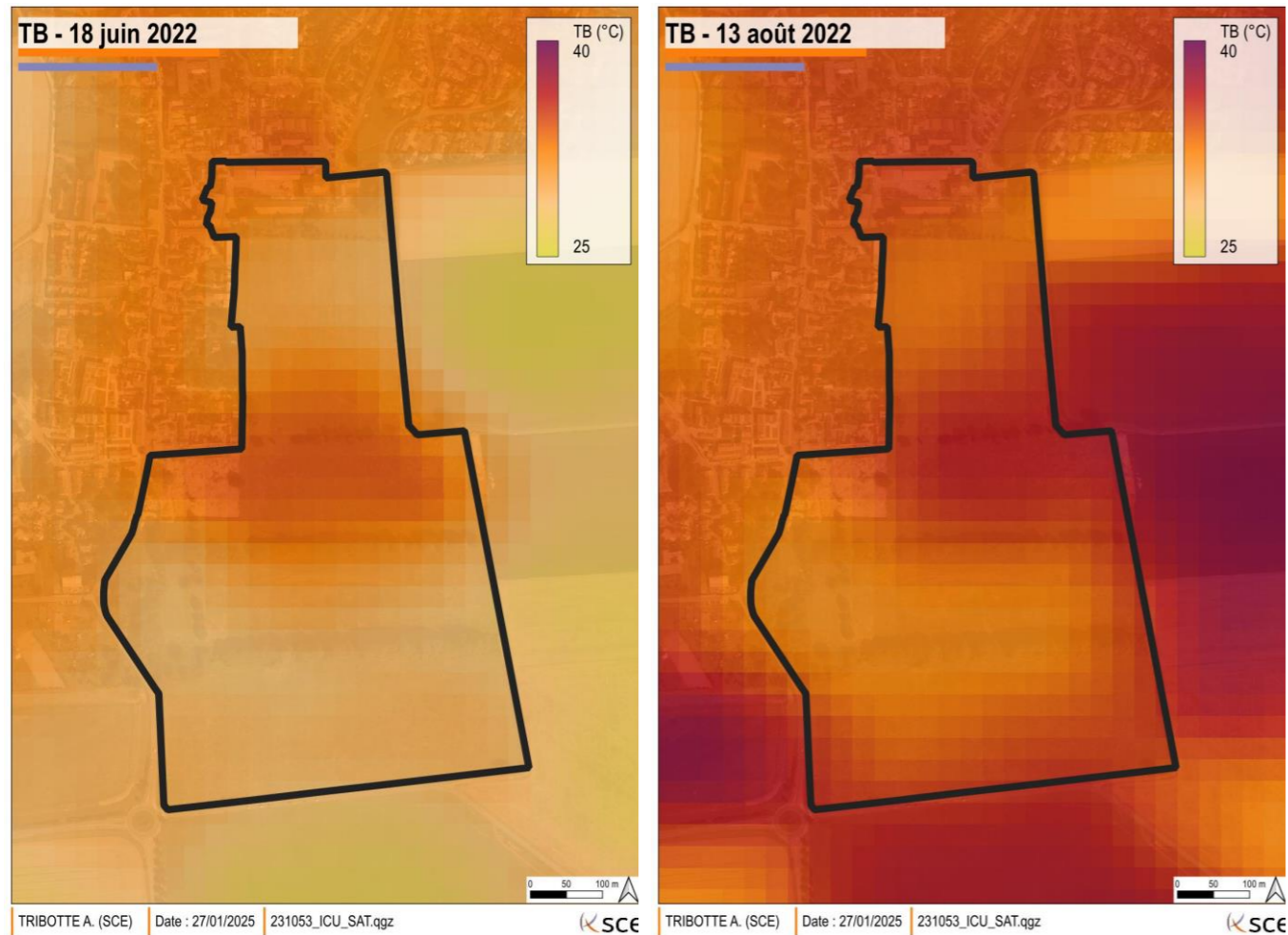




3.7. Analyse de la température de brillance

La température de brillance correspond à la température émise par les surfaces au sol. Elle n'est pas directement comparable à la température mesurée au sol par des caméras thermiques ni par des stations météorologiques localisées. Cependant, elle permet de caractériser les écarts de températures entre différents types d'occupation du sol au cours de l'été. Les images LANDSAT choisies correspondent à deux événements de fortes chaleurs avec des températures maximales de l'air de 35,8°C le 18 juin 2022 et de 33,6°C le 13 Août 2022.

Figure 19 – Cartographie de la température de brillance au cours de l'été 2022



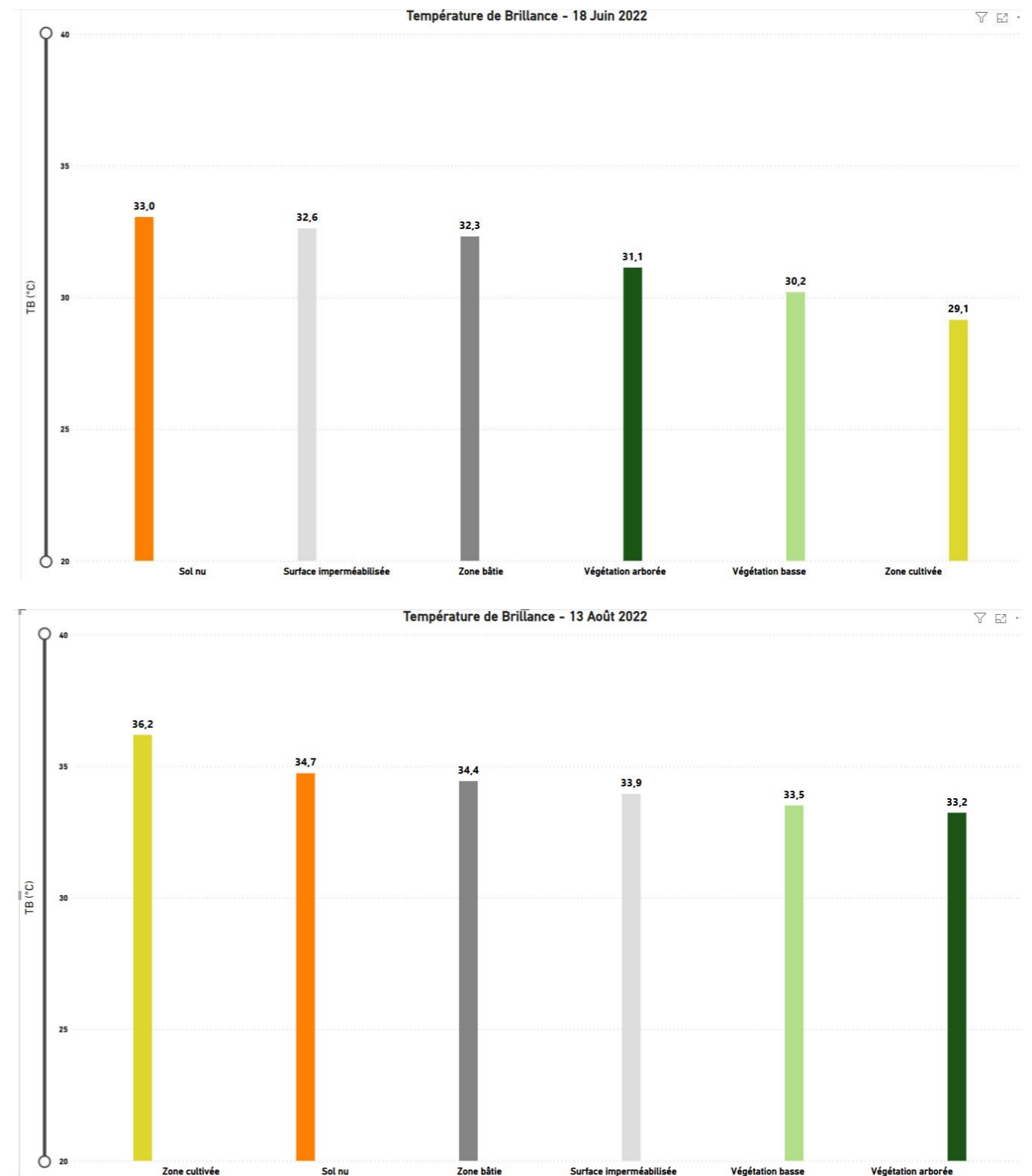
Les zones en sol nu au centre du site d'étude, en chantier au cours de l'été 2022, présentent les plus fortes chaleurs avec des températures de brillance de 33 à 34,7°C. Les surfaces imperméabilisées et les surfaces bâties sont très proches des surfaces en sols nus, avec des températures entre 32,3 à 34,4 °C.

Les zones cultivées évoluent de 29,1 à 36,2°C entre le 18 Juin et le 13 Août, en raison d'une éventuelle récolte des cultures en place au début de l'été. Les parcelles agricoles contribuent au réchauffement du site à l'Est et au Sud.

Les surfaces en herbe qui présentaient au 18 juin un écart moyen de -2,1°C avec les surfaces imperméabilisées se rapprochent des températures observées avec un écart de seulement -0,4°C au 13 Août 2022. Les surfaces arborées augmentent également en température au cours de l'été, de l'ordre de +2.1 °C.

Enfin, alors que la température maximum mesurée par Météo-France est plus élevée le 18 Juin (35,8°C) par rapport au 13 Août 2022 (33,6°C), la température observée sur le site d'étude est plus chaude au milieu de l'été, en raison d'une dégradation de la végétation basse et d'une perte de son pouvoir rafraichissant.

Figure 20 – Température de brillance observée au cours de l'été 2022



Au-delà d'une certaine variabilité inter-annuelle observée entre 1980 et aujourd'hui, les projections climatiques régionales prévoient sur le site d'étude :

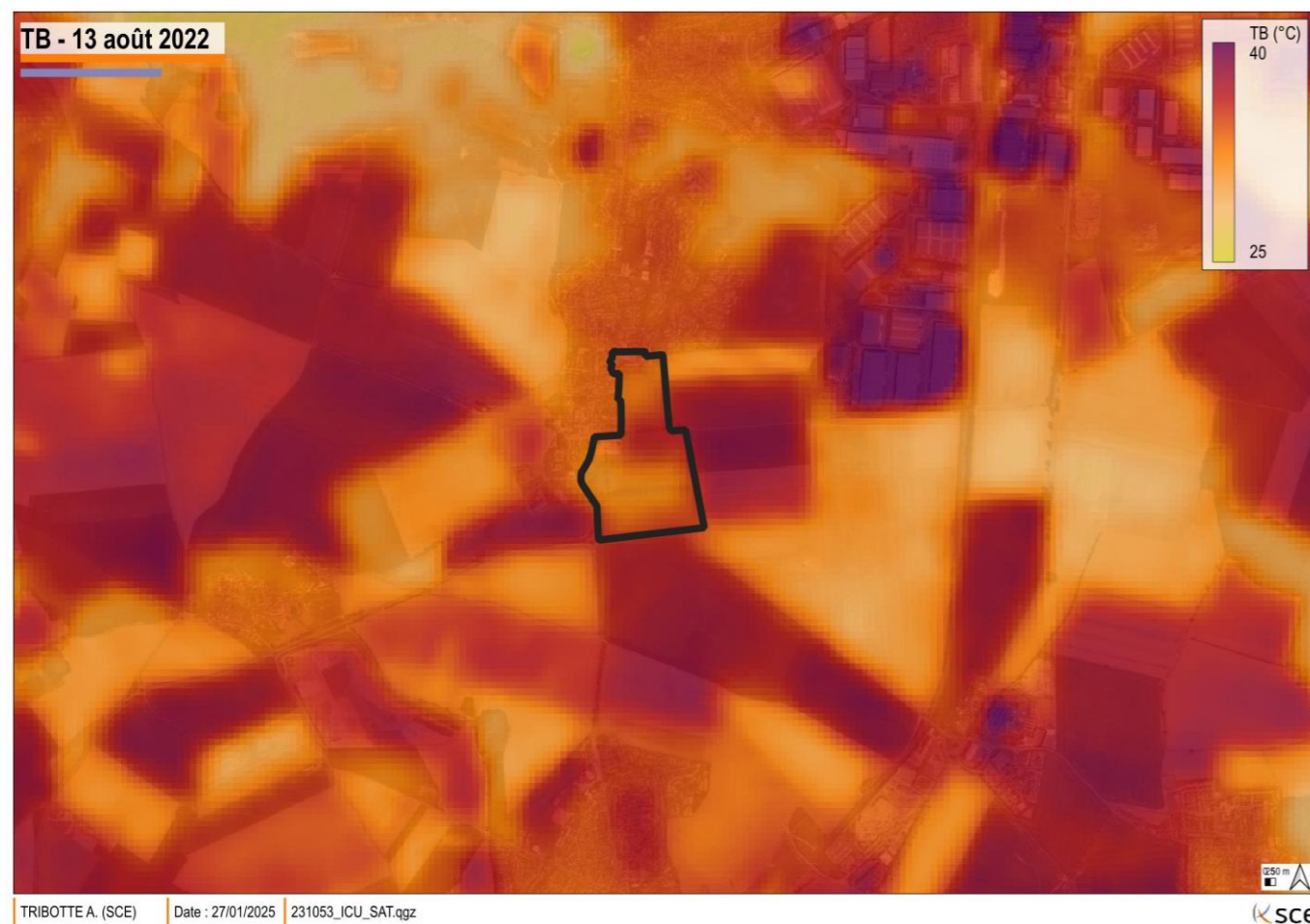
- ▶ une augmentation des températures annuelles de l'ordre de 3 à 4°C
- ▶ une augmentation des températures extrêmes avec plus de 20 jours > 30°C et plus de 20 nuits > 20°C
- ▶ une baisse des précipitations en été de l'ordre 30%.

L'été 2022 était un été particulièrement chaud et sec, avec plus de 20 jours de températures maximales > 30°C et seulement 20mm de pluie entre le 1^{er} Juillet et le 15 Août. Au cours de cet été, l'indice de végétation et l'indice d'humidité ont décliné pour les surfaces en herbe et les surfaces cultivées. Au regard de ces deux indices, les surfaces végétalisées se comportaient au milieu du mois d'Août comme les surfaces minéralisées du site d'étude, avec une perte de leur pouvoir rafraichissant.

Les arbres isolés ont également été affectés par ces températures élevées et par l'absence de pluie. Les arbres en massifs ont globalement mieux résisté à ces conditions estivales.

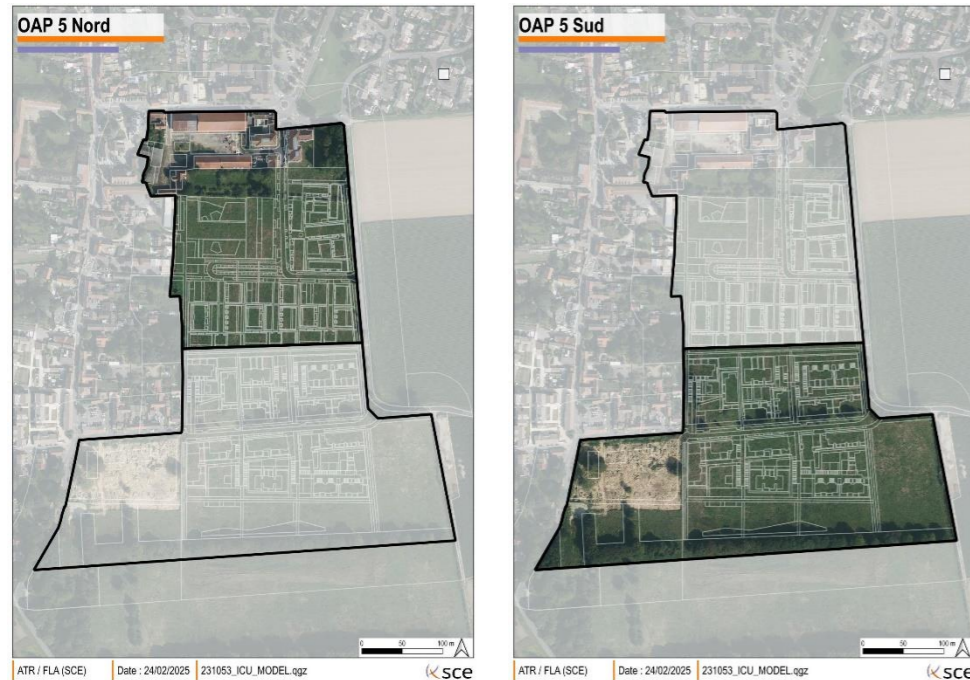
Autour du site, le contexte agricole peut accentuer le réchauffement du site à l'Est et au Sud si les parcelles restent en sols nus au cours de l'été. La zone d'activité au Nord-Est atteint les plus fortes chaleurs environnantes, avec un effet potentiel à l'Est et au Nord du site.

Figure 21 – Cartographie de la température de brillance au cours de l'été 2022 – Zones environnantes



MODELISATION DES TEMPERATURES

1. Périmètre de la modélisation



La modélisation des îlots de chaleur est réalisée à l'échelle du site du Haras de Marly-la-ville pour prendre en compte les effets sur le secteur OAP 5 Nord (Immobilier 3F) et le secteur voisin OPA 5 Sud (Foncim).

2. Données d'entrées

La modélisation est réalisée avec le plugin **UMEP** spécialisé sur les questions relatives à la morphologie urbaine.

Lindberg F, Grimmond CSB, Gabey A, Huang B, Kent CW, Sun T, Theeuwes N, Järvi L, Ward H, Capel-Timms I, Chang YY, Jonsson P, Krave N, Liu D, Meyer D, Olofson F, Tan JG, Wästberg D, Xue L, Zhang Z (2018) Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) - An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling and Software*.99, 70-87

La modélisation repose sur plusieurs sources de données :

- ▶ données météorologiques horaires ERA5 délivrées par Copernicus
- ▶ altimétrie RGE Alti 1m de l'IGN
- ▶ localisation et hauteur des bâtiments du projet
- ▶ localisation et hauteur des arbres du projet
- ▶ occupation du sol issue du plan masse du projet

2.1. Données météorologiques

En cohérence avec la première phase de l'étude ICU, nous avons choisi de considérer les conditions de l'évènement caniculaire du 13 août 2022 pour modéliser les îlots de chaleur urbains à l'horizon 2100 :

- ▶ Une température maximum supérieure à +4°C par rapport aux normales saisonnières
- ▶ Plusieurs jours de fortes chaleurs
- ▶ Une pluviométrie faible

UMEP repose sur plusieurs variables météorologiques fournies par les **données satellitaires ERA5** de Copernicus disponibles sur le site : <https://www.shinyweatherdata.com/>

- ▶ Température à 2m (°C)
- ▶ Couverture nuageuse (%)
- ▶ Précipitations totales (mm)
- ▶ Humidité relative à 2m (%)
- ▶ Azimut du soleil (radian)
- ▶ Irradiance directe du soleil (W/m²)
- ▶ Irradiance diffuse horizontale (W/m²)

2.2. Données relatives au projet

L'occupation du sol est définie selon les données **AutoCAD transmises par le maître d'ouvrage, interprétées et converties au format SIG pour la modélisation**. La carte d'occupation du sol est issue de plusieurs allers-retours pour aboutir à une version validée le 07 Février 2025. Le projet étant encore susceptible d'évoluer à la marge, la carte ci-dessous présente les grands principes d'aménagements du projet.

2.2.1. Altimétrie

L'altimétrie repose sur le RGE ALTI de l'IGN avec une résolution spatiale de 1m. L'altitude est comprise entre 130m et 145m sur le site d'étude.

2.2.2. Bâtiments

Les bâtiments jouent un rôle important dans le calcul d'ombrage. Ils sont caractérisés par :

- ▶ leur emprise au sol
- ▶ leur hauteur (ou nombre d'étages) en mètres.

La modélisation UMEP considère les bâtiments comme des cubes, sans distinction des différentes formes de toit envisagées. La hauteur du bâtiment correspond donc à la hauteur au droit de la gouttière des eaux pluviales, renseignée sur le site d'étude entre 3m et 10m.

2.2.3. Arbres

Dans la modélisation UMEP, les arbres jouent un rôle important pour le calcul d'ombrage et participent aussi au rafraîchissement du site. Les arbres actuels et les arbres plantés sont disponibles dans le plan masse.

Près de 850 arbres sont localisés sur le site d'étude, traités sous la forme d'objets ponctuels et caractérisés par les attributs suivants :

- ▶ hauteur totale de l'arbre : de 6 à 15 mètres
- ▶ hauteur du tronc : de 2 à 6 mètres
- ▶ diamètre du houppier : de 6 à 10 mètres

Les essences des arbres existants et des arbres plantés sont majoritairement feuillues.

2.2.1. Occupation du sol

La modélisation UMEP repose sur **7 types d'occupation du sol**. Le plan masse est exporté au format SIG et traduit en concertation avec le maître d'ouvrage pour correspondre à ces classes.

Les surfaces bâties correspondent à l'emprise des bâtiments. **Les surfaces imperméables** correspondent aux surfaces artificialisées, comme la voirie et les espaces connexes. **Les surfaces perméables** sont majoritairement couvertes de graviers, de sables ou de pavés.

Les surfaces herbacées sont des espaces de pelouses ou de gazons. Les surfaces agricoles aux abords du site sont aussi considérées comme herbacées (végétation basse). **Les surfaces arbustives** sont principalement localisées aux abords des bâtiments, sous forme d'îlots végétalisés ou de haies linéaires.

Les surfaces arborées sont réparties à plusieurs endroits sur le site, à proximité de l'école au Nord, entre les bâtiments au centre, sous la forme d'un petit massif au Sud. **Les surfaces humides** représentent les noues, surfaces enherbées contribuant à la collecte des eaux pluviales, plus humides que les autres surfaces herbacées.

Figure 22 – Données d'entrée de la modélisation

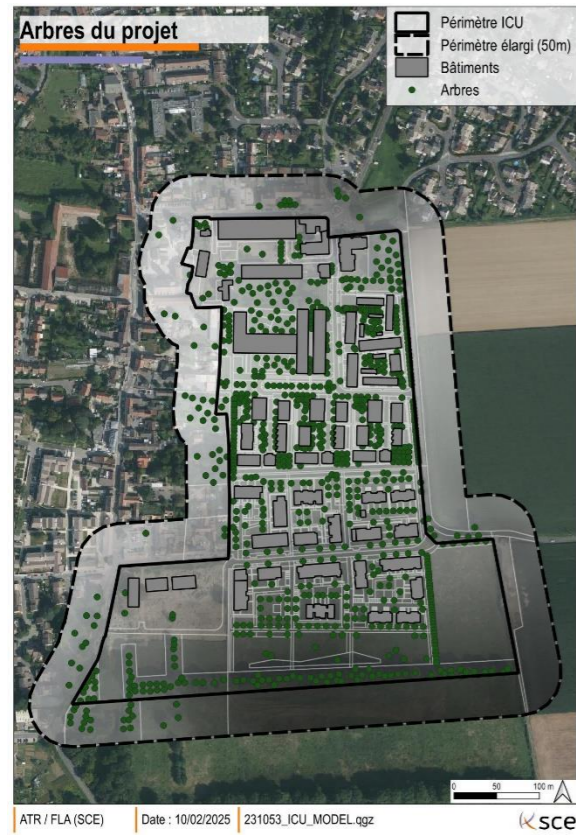
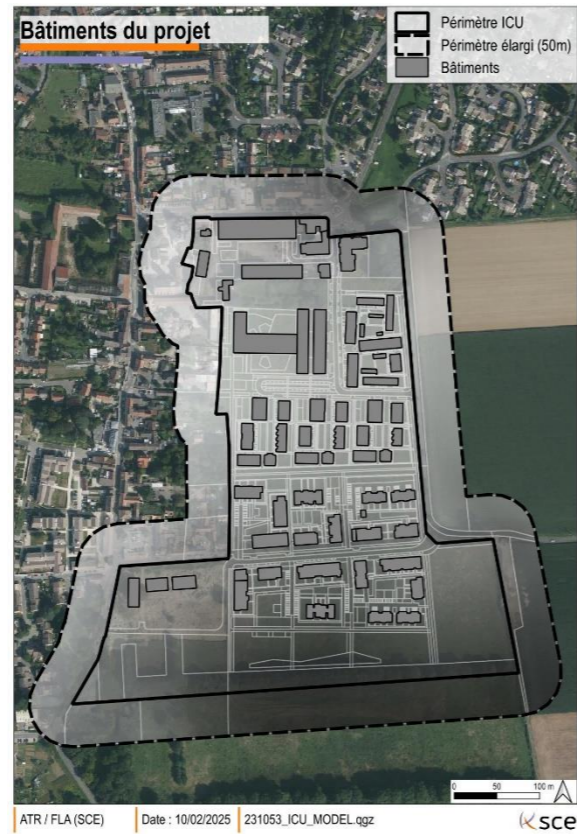
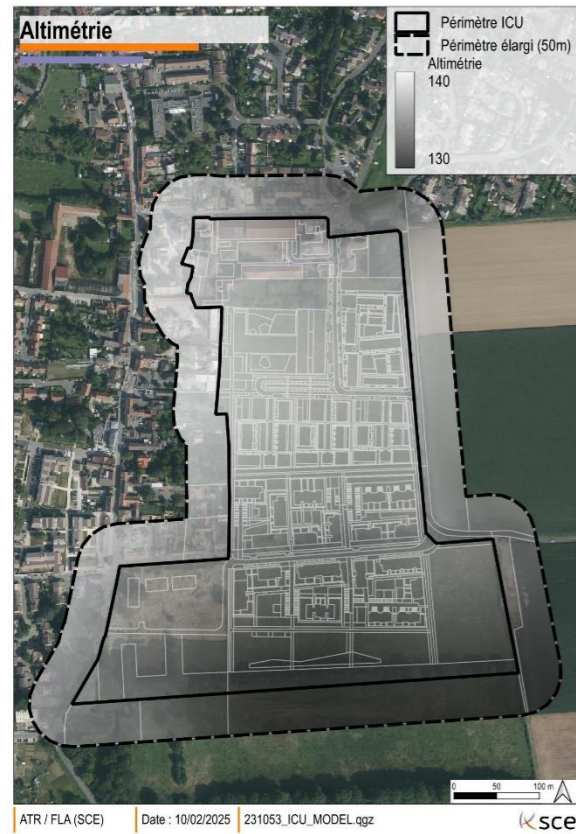


Figure 23 – Occupation du sol

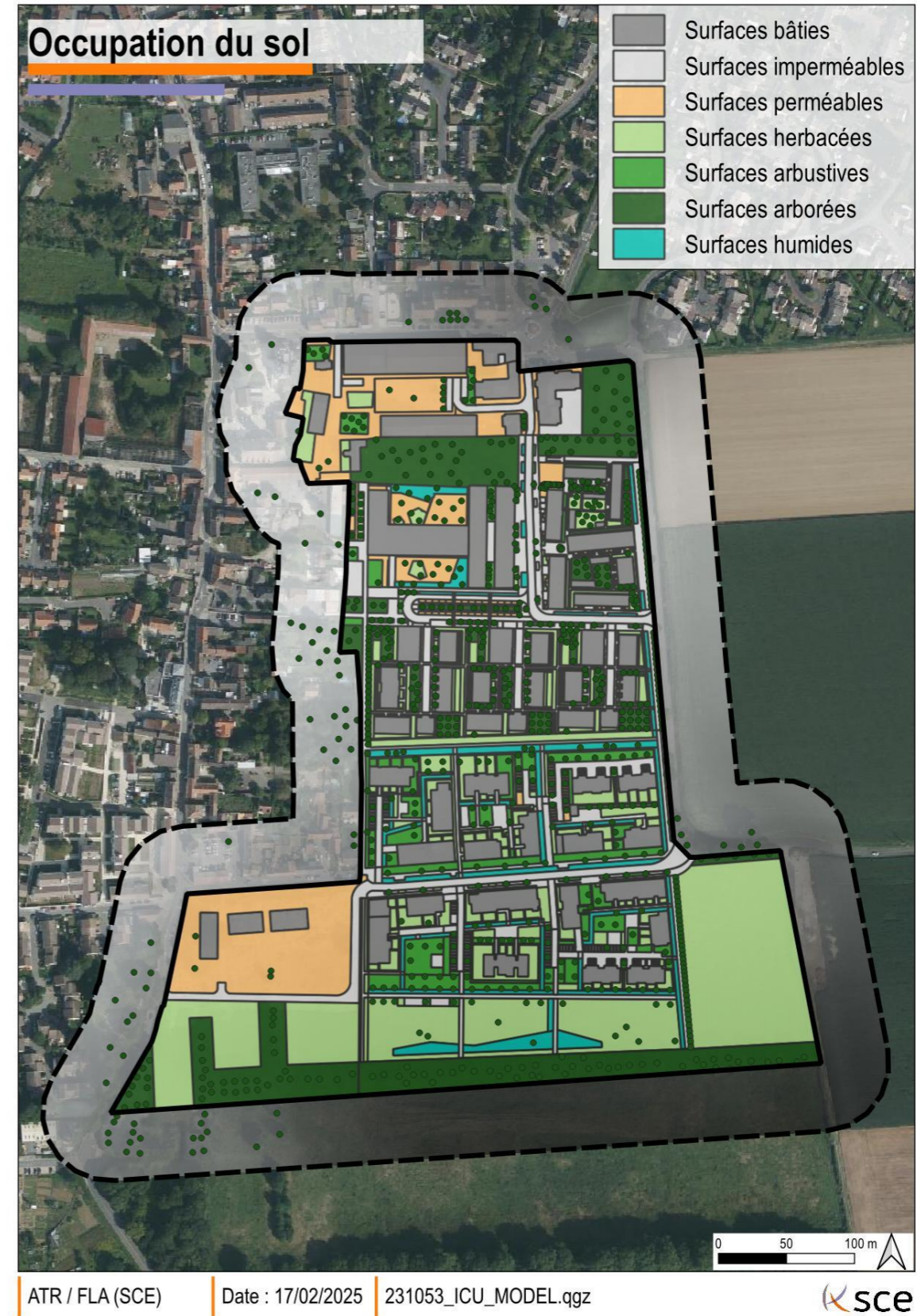


Figure 24 – Occupation du sol – OAP 5 Nord

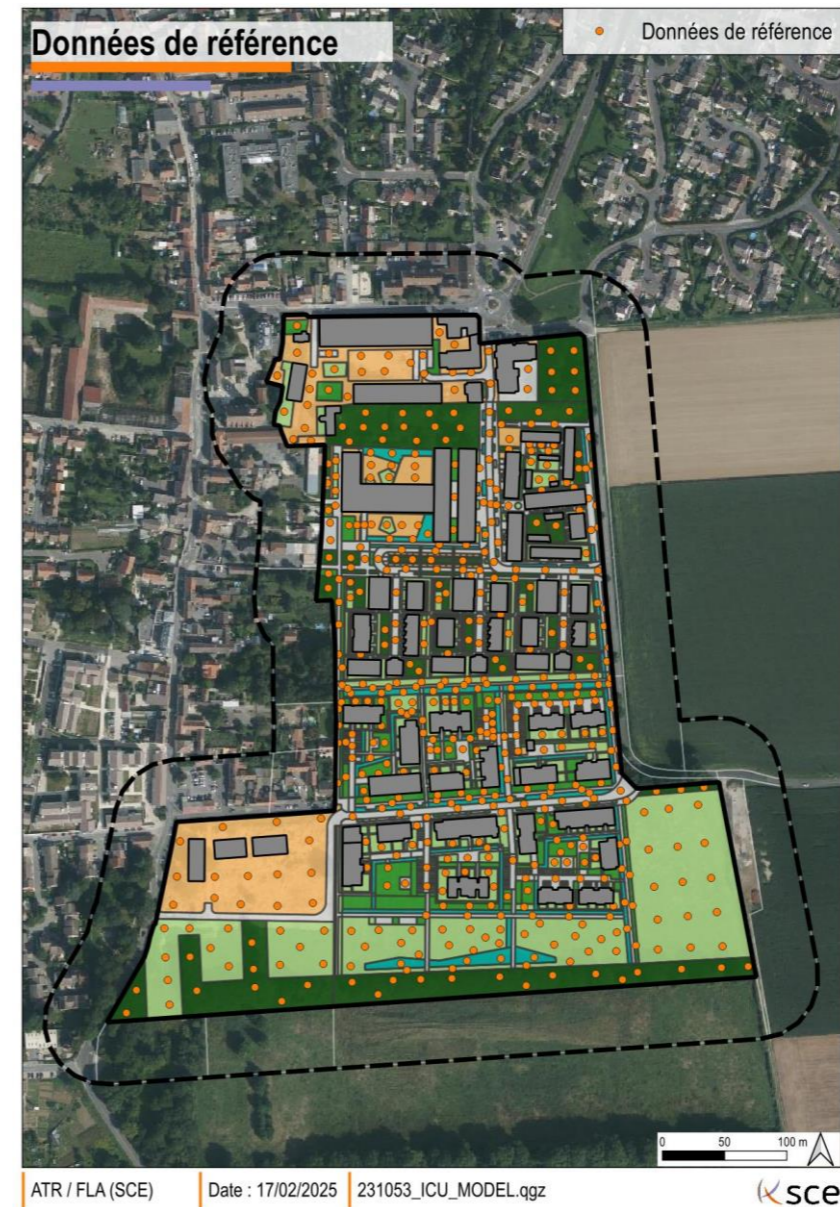


Les surfaces artificialisées (imperméables, perméables et bâties) représentent 60% de la surface de l'OAP 5.

3. Jeu de données de référence

Un jeu de référence constitué de 500 polygones est élaboré pour l'analyse statistique. Chaque polygone est caractérisé par l'occupation du sol et permettra d'extraire localement les valeurs d'ombrage et de température.

Figure 25 – Jeu de données de référence

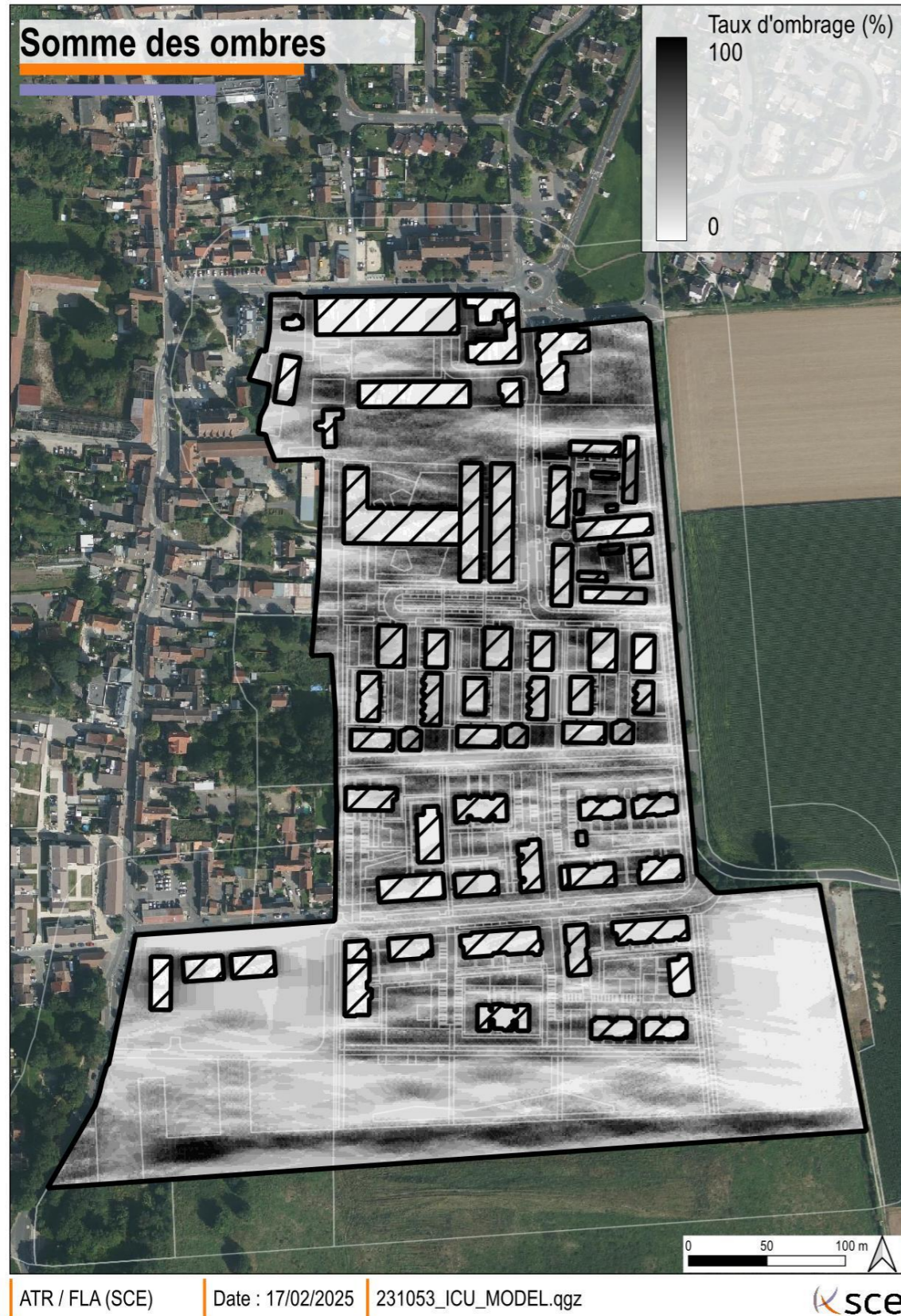


4. Modélisation des ombres

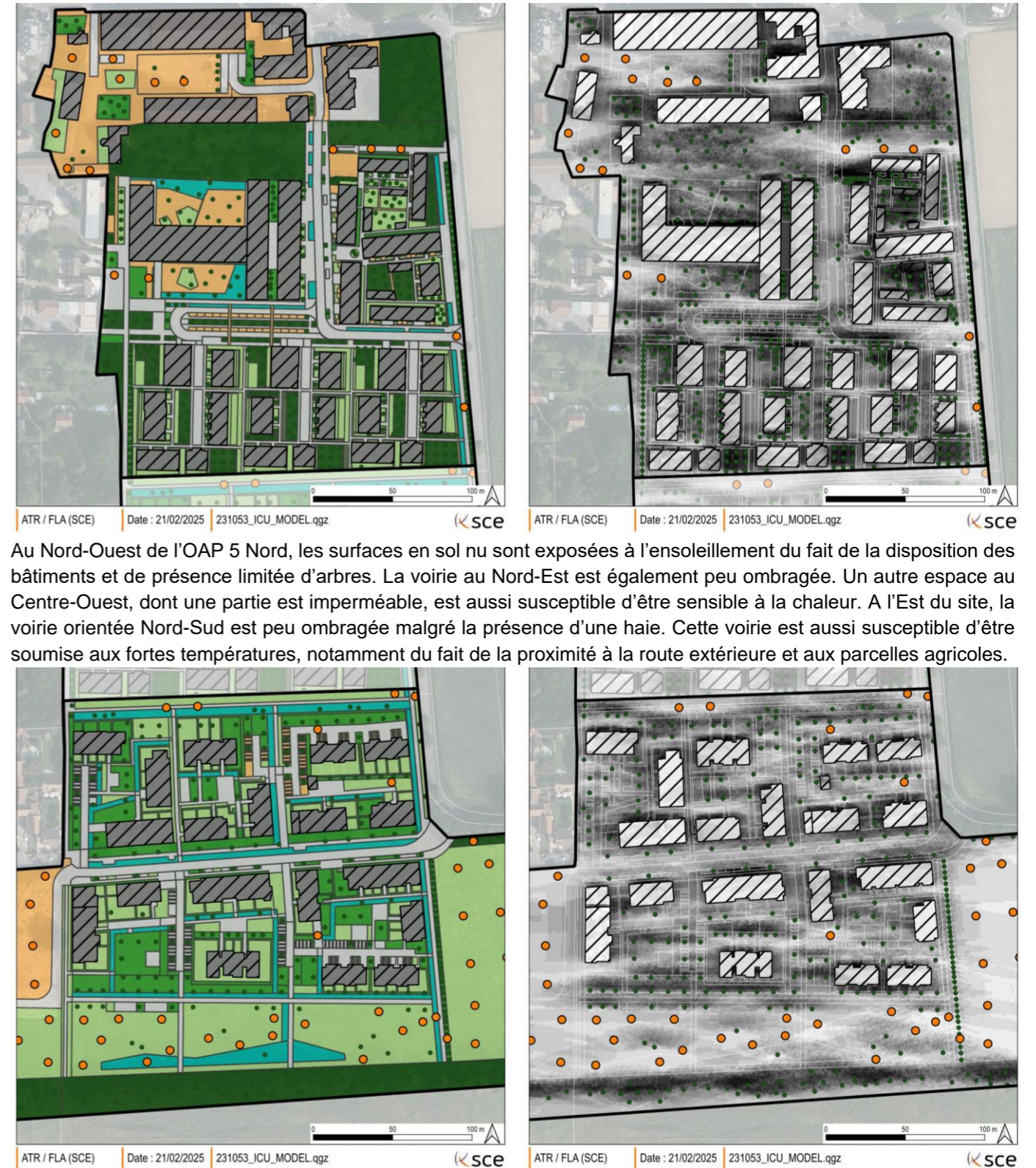
Les ombres sont calculées via le module **Solar Radiation - Shadow Generator** de UMEP à partir des données suivantes :

- ▶ Azimut du soleil heure par heure pendant la journée du 13 Août
- ▶ Altimétrie du site
- ▶ Emprise et hauteur des bâtiments
- ▶ Localisation et hauteur des arbres

Figure 26 – Somme des ombres dans la journée du 13 août



Les illustrations ci-dessous présentent les points de référence avec moins de 20% d'ombrage.



Au Nord-Ouest de l'OAP 5 Nord, les surfaces en sol nu sont exposées à l'ensoleillement du fait de la disposition des bâtiments et de présence limitée d'arbres. La voirie au Nord-Est est également peu ombragée. Un autre espace au Centre-Ouest, dont une partie est imperméable, est aussi susceptible d'être sensible à la chaleur. A l'Est du site, la voirie orientée Nord-Sud est peu ombragée malgré la présence d'une haie. Cette voirie est aussi susceptible d'être soumise aux fortes températures, notamment du fait de la proximité à la route extérieure et aux parcelles agricoles.

Au Nord de l'OAP 5 Sud, la voirie orientée Est-Ouest est localement peu ombragée, alors que les arbres implantés dans les nœuds plus à l'Est et plus à l'Ouest atténuent l'ensoleillement. Quels espaces au cœur des bâtiments sont localement peu ombragés. Au Sud, l'absence d'arbres et de bâtiments limite l'ombrage, majoritairement inférieur à 20%. Malgré la présence d'un petit massif arboré, ces surfaces en herbe et en sol nu sont susceptibles d'être plus sensibles aux fortes chaleurs.

5. Modélisation des températures

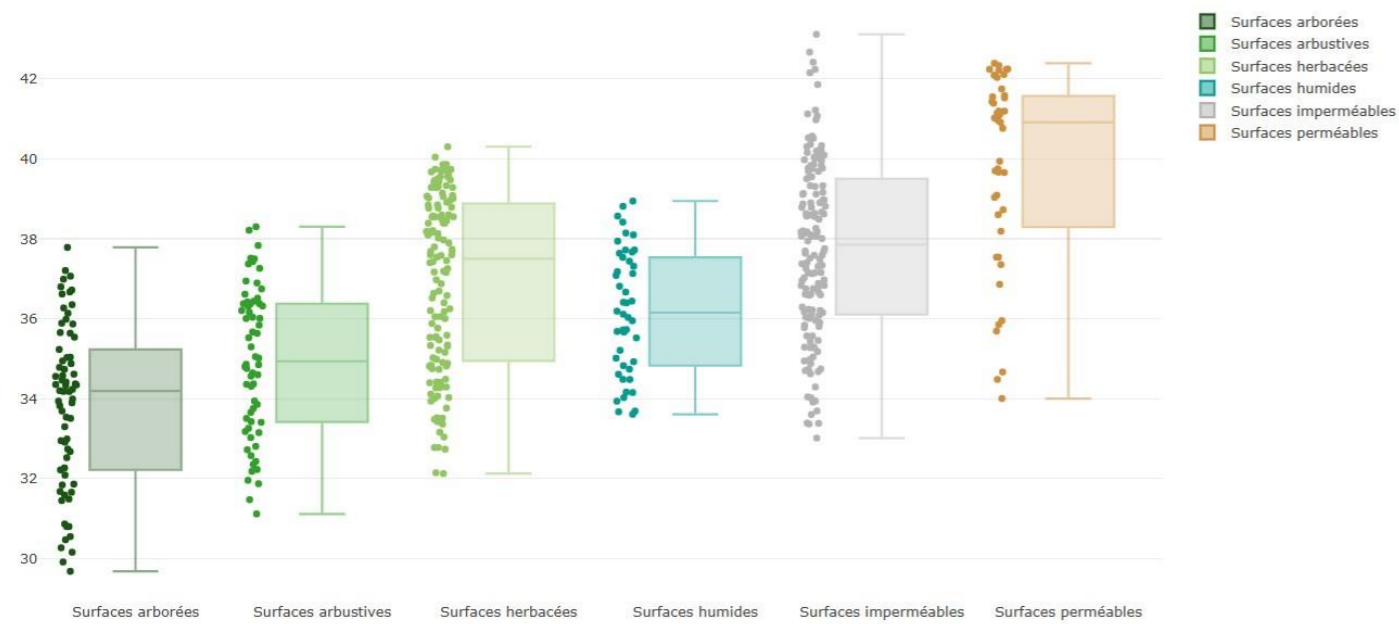
Les températures sont calculées via le module **SOLWEIG – Outdoor Thermal Comfort** de UMEP à partir des données suivantes :

- ▶ Altimétrie du site
- ▶ Emprise et hauteur des bâtiments
- ▶ Localisation et hauteur des arbres
- ▶ Conditions météorologiques sur 24h
- ▶ Occupation du sol
- ▶ Ombrage sur 24h

5.1. Température diurne

La **température moyenne radiante (T_{mrt})** évalue le confort thermique en prenant en compte la température de l'air, l'humidité et le rayonnement. C'est une représentation numérique de la façon dont les êtres humains subissent le rayonnement. Elle est évaluée en degrés Celsius.

Figure 27 – Température moyenne radiante diurne à l'horizon 2100 – Données de référence



Ces graphiques permettent d'apprécier les températures modélisées en journée par type d'occupation du sol, en considérant la valeur médiane, minimale, maximale ainsi que la distribution des valeurs du jeu de données de référence.

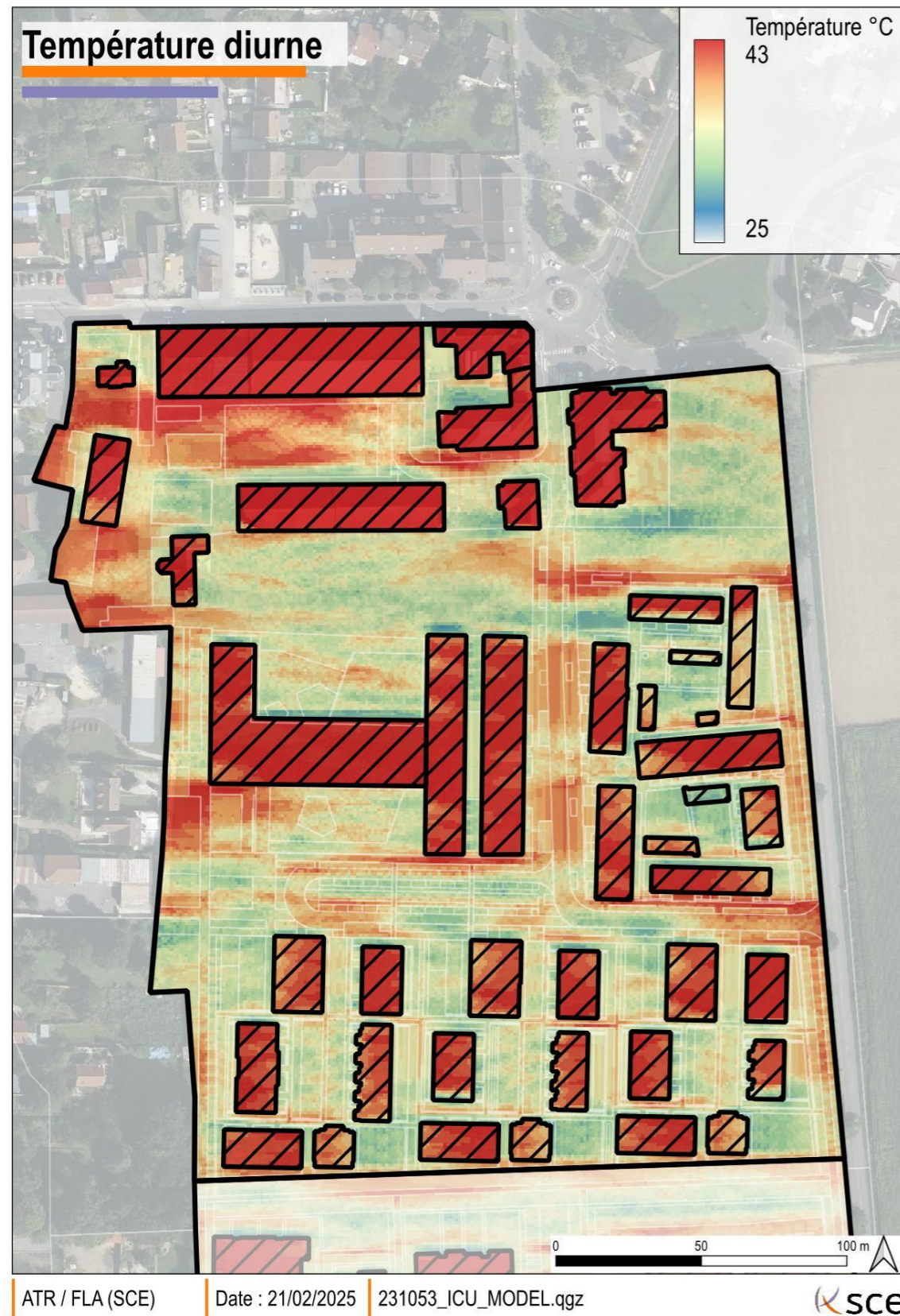
On observe une bonne corrélation entre la présence de végétation et la température ressentie. Les arbres et les arbustes favorisent le rafraîchissement dans ces conditions caniculaires, entre 30 et 38°C. Les surfaces imperméables et les surfaces perméables sont davantage soumises aux fortes chaleurs, entre 33 et 43 °C.

Les surfaces en herbe présentent des températures intermédiaires, selon la présence d'arbres (32°C) ou la proximité aux surfaces artificialisées (40°C). Les noues ont des valeurs plus resserrées, entre 34 et 39°C.

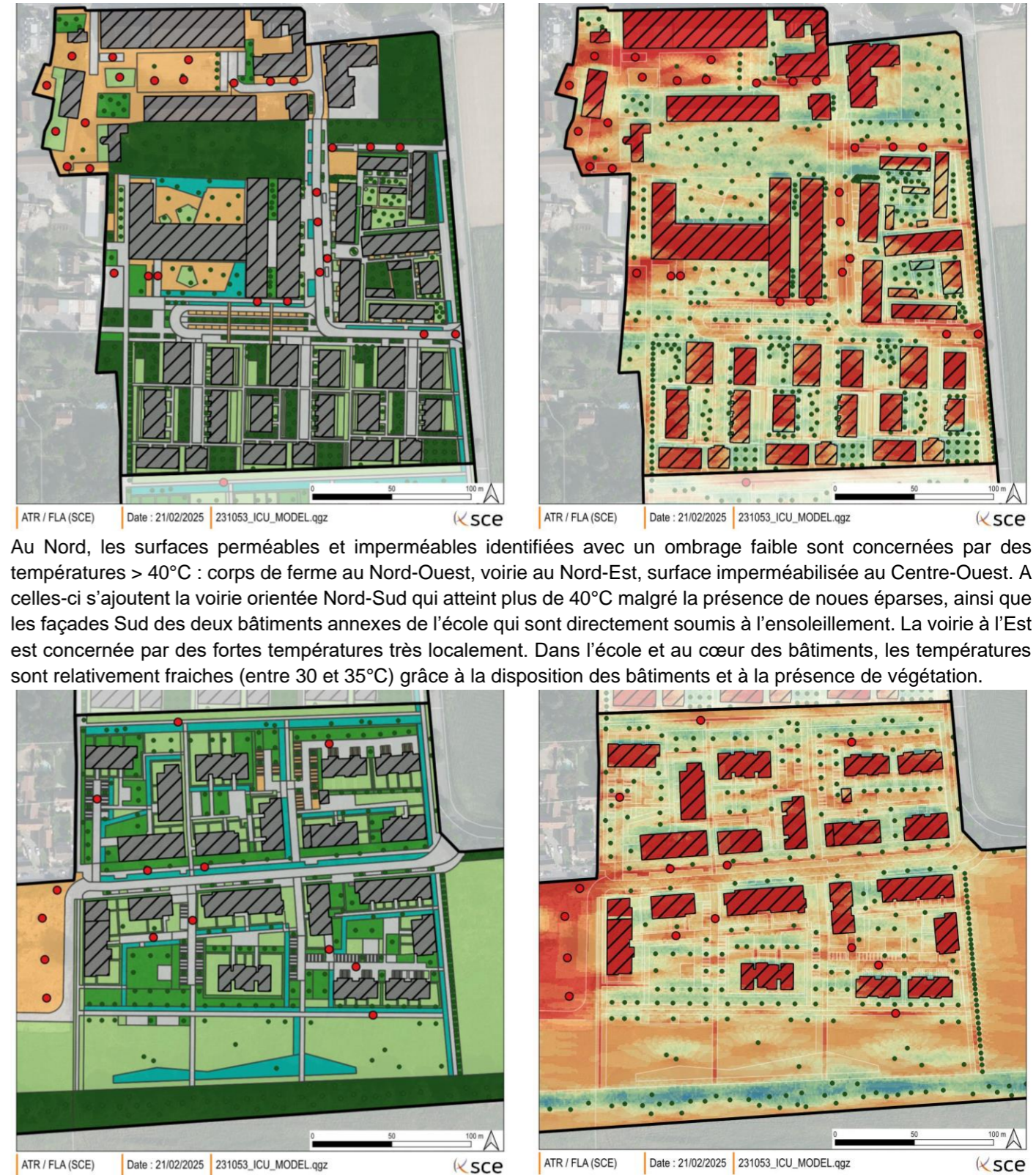
Figure 28 – Température moyenne radiante diurne à l'horizon 2100



Figure 29 – Température moyenne radiante diurne à l'horizon 2100 – OAP 5 Nord



Avec une température mesurée à l'ombre par Météo France de 32,5°C, la température moyenne modélisée sur l'OAP 5 Nord est de 35,5°C, selon une distribution entre 28°C et 43°C.

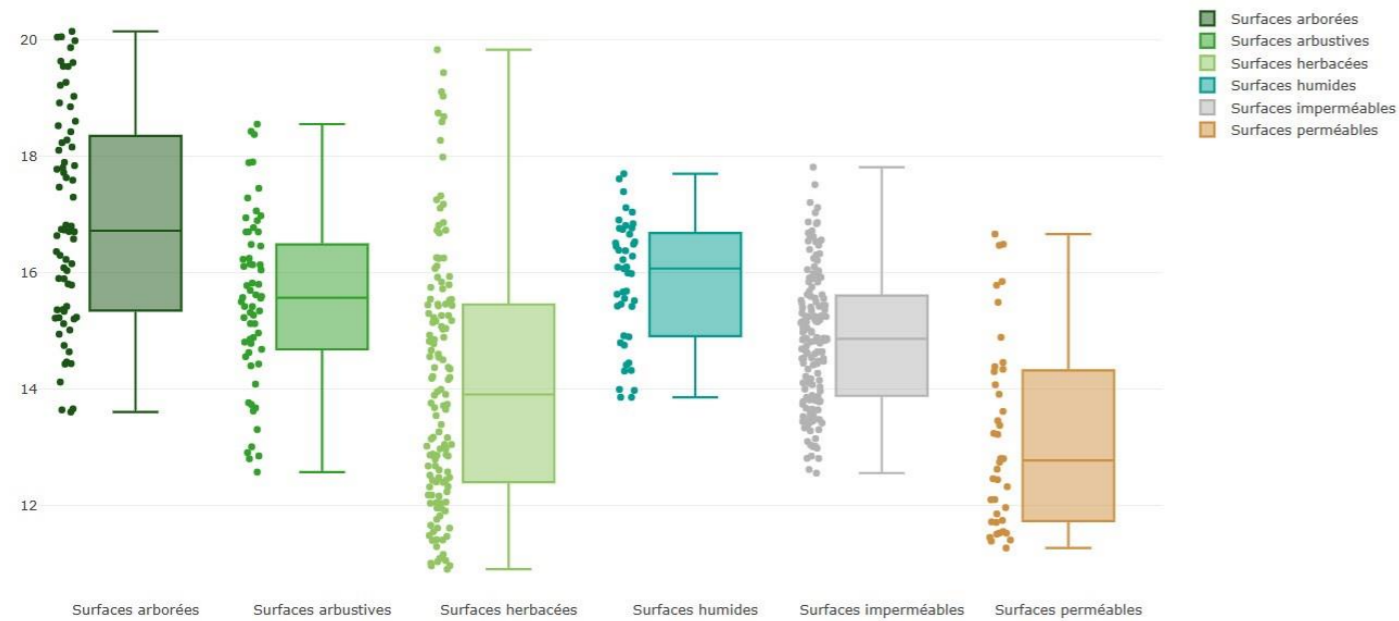


Au Nord, les surfaces perméables et imperméables identifiées avec un ombrage faible sont concernées par des températures > 40°C : corps de ferme au Nord-Ouest, voirie au Nord-Est, surface imperméabilisée au Centre-Ouest. A celles-ci s'ajoutent la voirie orientée Nord-Sud qui atteint plus de 40°C malgré la présence de noues éparses, ainsi que les façades Sud des deux bâtiments annexes de l'école qui sont directement soumis à l'ensoleillement. La voirie à l'Est est concernée par des fortes températures très localement. Dans l'école et au cœur des bâtiments, les températures sont relativement fraîches (entre 30 et 35°C) grâce à la disposition des bâtiments et à la présence de végétation.

Sur les axes Est-ouest, les noues favorisent par leur caractère humide le rafraîchissement des voiries identifiées précédemment avec un faible taux d'ombrage, en limitant les températures entre 35 et 40°C. La bande enherbée qui longe la voirie orientée d'Est en Ouest est cependant soumise à des températures élevées et l'état de la végétation risque de se dégrader au cours de l'été si elle n'est pas ombragée ou entretenue. Au cœur des bâtiments, plusieurs zones imperméables dépassent des températures > 40°C. Enfin, les deux zones au Sud-Est et au Sud-Ouest sont effectivement très exposées aux fortes chaleurs liées à l'absence de végétation arborée ou arbustive.

5.2. Température nocturne

Figure 30 – Température moyenne radiante nocturne à l'horizon 2100 – Données de référence



L'analyse des températures nocturnes révèle un comportement différent des types d'occupation du sol en comparaison avec les températures diurnes. **La végétation arborée et arbustive présente une certaine inertie thermique, avec des températures nocturnes entre 13 et 20°C qui sont plus élevées que les autres surfaces.** Les surfaces perméables et les surfaces imperméables sont globalement plus fraîches la nuit, entre 10 et 18 °C.

Les surfaces imperméables et les zones très proches des bâtiments sont cependant plus chaudes que les autres surfaces perméables, du fait d'une certaine accumulation de la chaleur en journée.

La cartographie ci-dessous présentent les températures nocturnes sur le site d'étude.

Figure 31 – Température moyenne radiante nocturne à l'horizon 2100

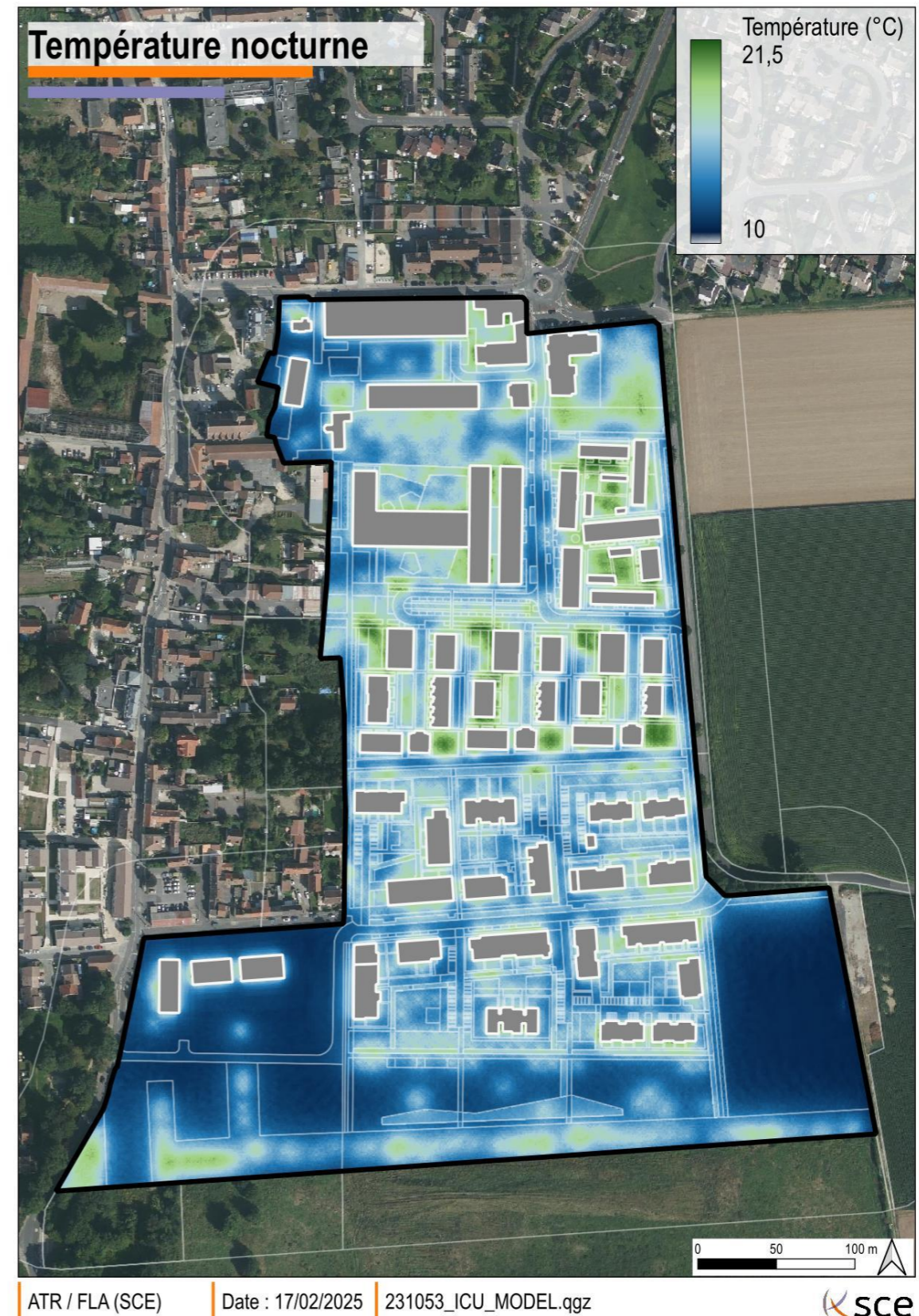
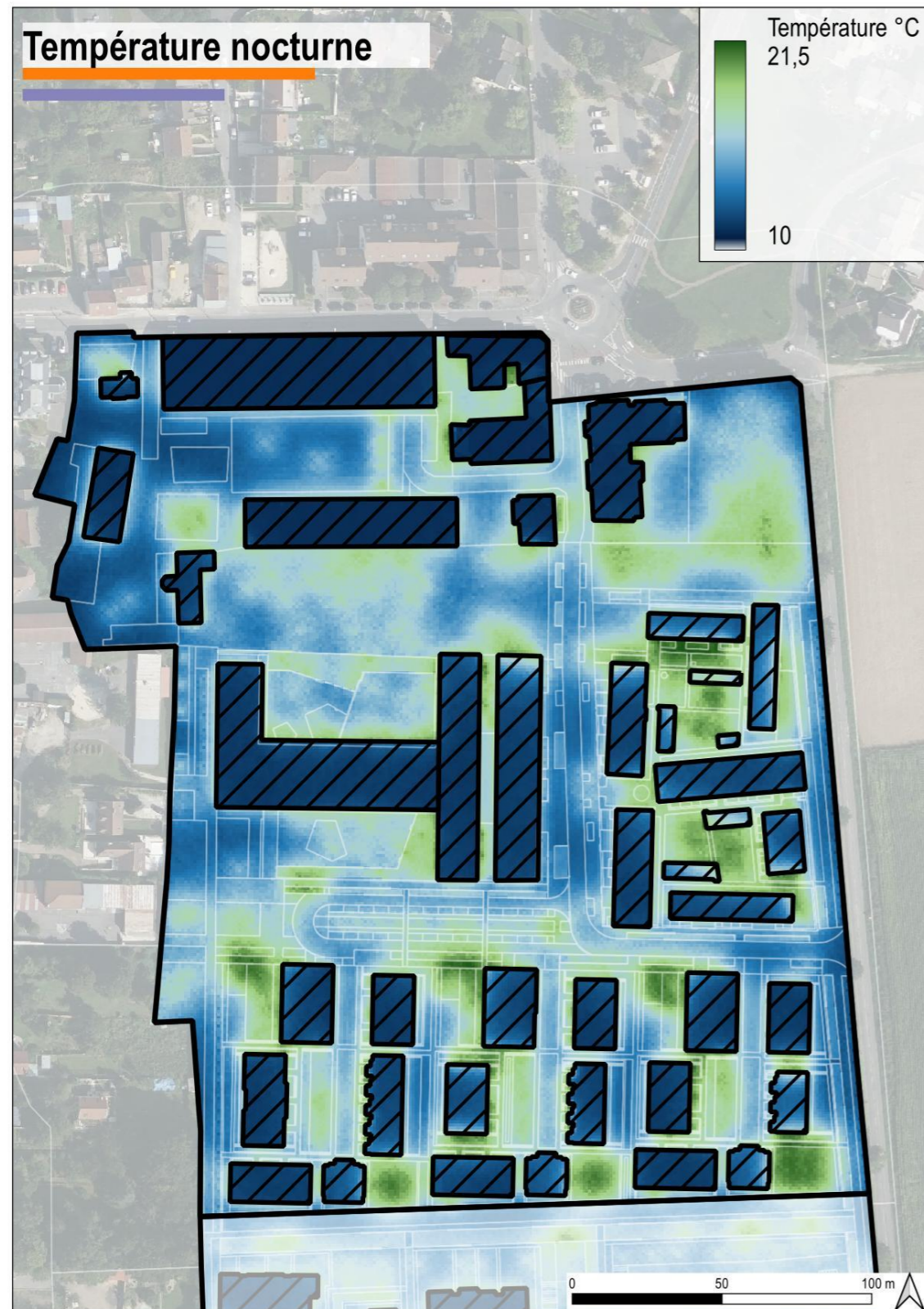


Figure 32 – Température moyenne radiante nocturne à l’horizon 2100 – OAP 5 Nord



ATR / FLA (SCE) | Date : 21/02/2025 | 231053_ICU_MODEL.qgz |

Avec une température mesurée à 18,3°C par Météo France, la température nocturne modélisée sur l’OAP 5 Nord est de 16,1°C, avec des valeurs entre 10°C et 21,5°C. Les arbres regroupés en massifs sont les zones les plus chaudes.

6. Préconisations

6.1. Mesures de rafraîchissement

A partir de plusieurs sources bibliographiques, SCE présente ci-dessous quelques mesures qui contribuent au rafraîchissement urbain. Parmi cette liste non exhaustive, plusieurs mesures sont déjà envisagées sur le site.

6.1.1. Cours oasis

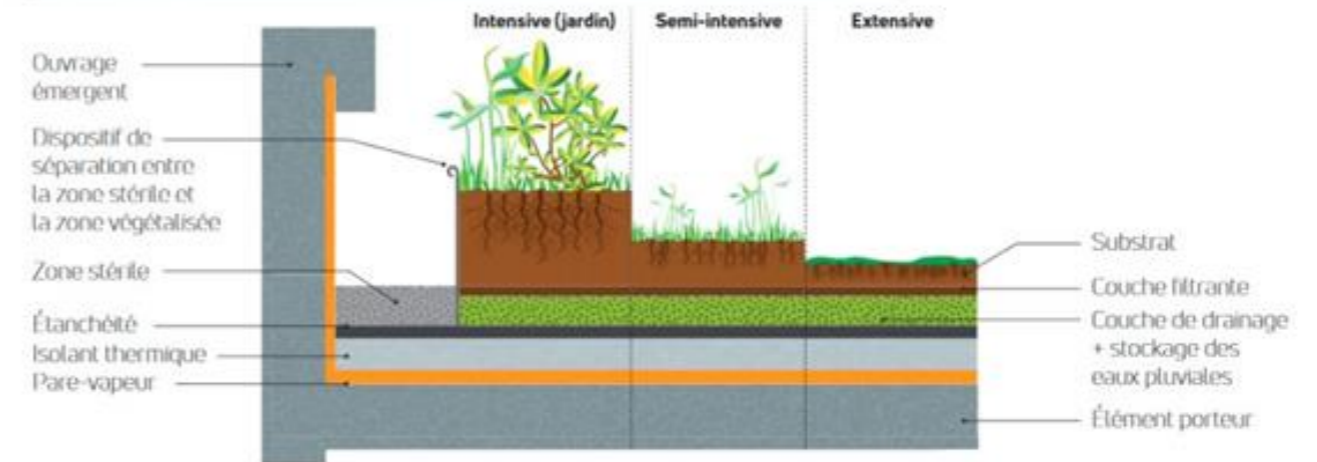
CARACTÉRISTIQUES D’UNE COUR OASIS



Pour accompagner les sols perméables et la végétation herbacée et arbustive, les **arbres de grande taille** favorisent le confort thermique par l’ombre projetée au sol, par l’absorption de certaines longueurs d’ondes et par l’évapotranspiration. Des **points d’eau** localisés peuvent également être créés pour favoriser le confort thermique des usagers et participer au maintien de l’humidité de la végétation.

6.1.2. Toitures végétalisées

REPRÉSENTATION DES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION D’UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE

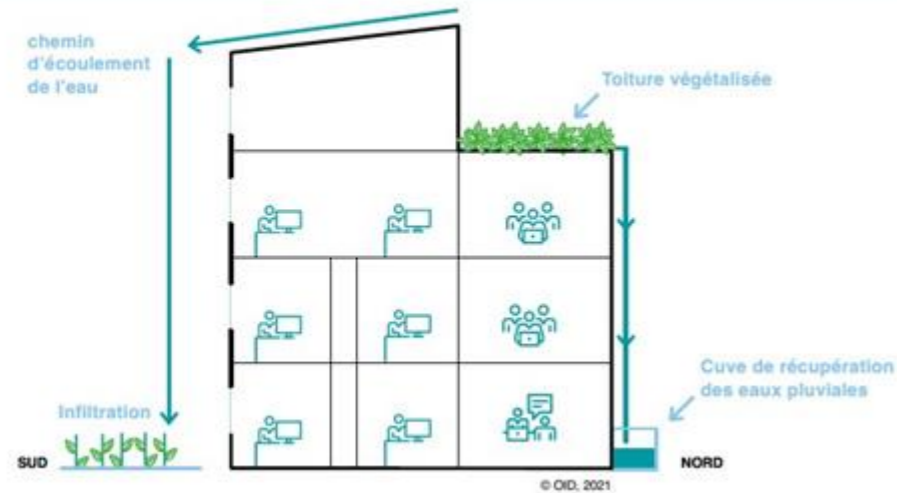


Source : Adopta (2019)

La végétalisation des toitures permet de limiter efficacement les îlots de chaleurs. Différents niveaux de végétation sont possibles selon la robustesse des éléments structurels du bâtiment, l'entretien envisagé et les conditions d'accès. Ces toitures peuvent devenir des zones de fraîcheur et des surfaces vivrières à travers des jardins potagers.

6.1.3. Ecoulement des eaux pluviales

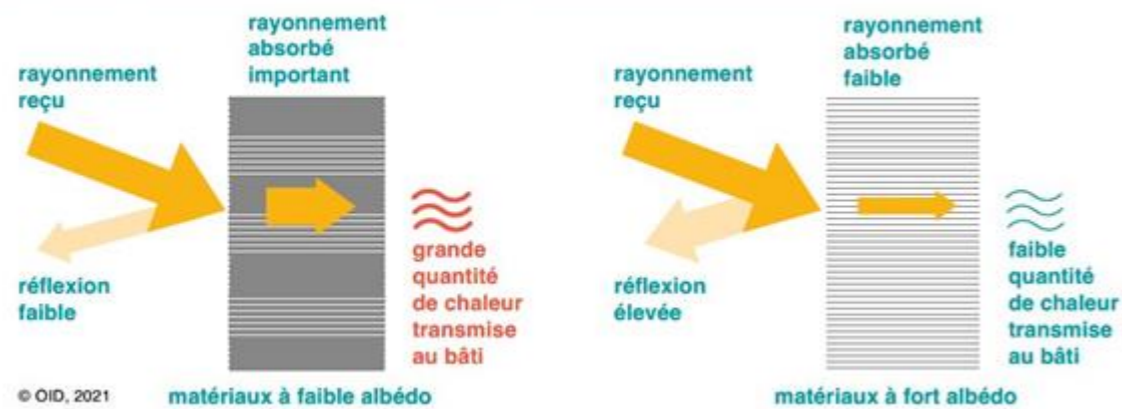
SCHÉMA HYDRAULIQUE DE L'ÉCOULEMENT DES EAUX PLUVIALES ET DES POINTS D'INFILTRATION SUR LE BÂTIMENT



L'écoulement des eaux pluviales peut également être pensé lors de l'aménagement des toitures pour récupérer les eaux pluviales au Nord des bâtiments et alimenter les surfaces végétalisées au Sud par infiltration.

6.1.4. Matériaux et couleurs des revêtements

ILLUSTRATION DES PROPRIÉTÉS RÉFLÉCHISSANTES DES REVÊTEMENTS DE MURS ET DE TOITS À FORT ALBÉDO



Le choix des matériaux et de la couleur des revêtements à fort albédo, et donc un fort pouvoir réfléchissant, permet également de limiter la pénétration de la chaleur dans le bâtiment.

6.1.5. Alignement d'arbres le long des voiries



Les alignements d'arbres en voirie jouent un rôle efficace dans le rafraîchissement des axes de communication, malgré la présence de surfaces imperméables au sol.

6.1.6. Points d'eau

Des points d'eau peuvent localement rafraîchir les espaces artificialisés, par un système de brumisation, par un accès à l'eau potable, ou éventuellement par la création de miroirs d'eau comme à Nantes, Montpellier, Bordeaux, Metz...



6.1.7. Structures d'ombrages

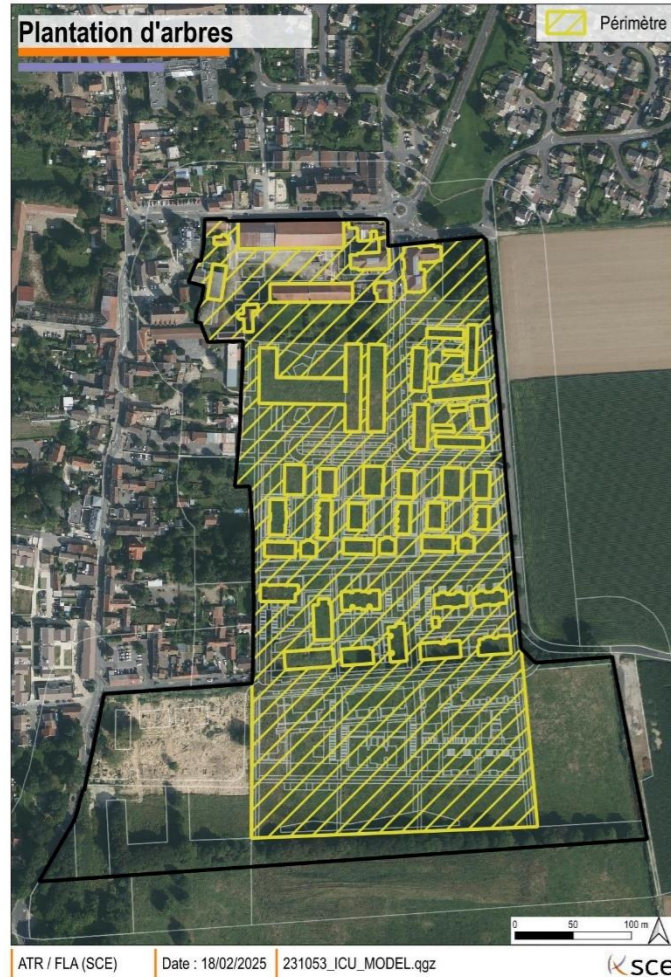


Des aménagements ombragés peuvent également être mis en place pendant la période estivale, sous la forme de pergolas, de voiles d'ombrage ou autres ombrières.

6.2. Modélisation de la plantation d'arbres supplémentaires

Le module TreePlanter de UMEP propose de modéliser l'emplacement le plus favorable pour planter des arbres et limiter les fortes chaleurs de la cartographie des températures diurnes.

Figure 33 – Périmètre de la plantation modélisée d'arbres supplémentaires



La zone de plantation est présentée sur la carte ci-contre. Elle concerne les secteurs OAP 5 Nord et au OAP 5 Sud pour évaluer les efforts de végétation à l'échelle du site du Haras. Elle exclue cependant les deux zones au Sud-Est et au Sud-Ouest qui sont peu concernées par les habitations.

La modélisation est réalisée avec 60 arbres supplémentaires, caractérisés par une hauteur de 12m et un diamètre de houppier de 6m.

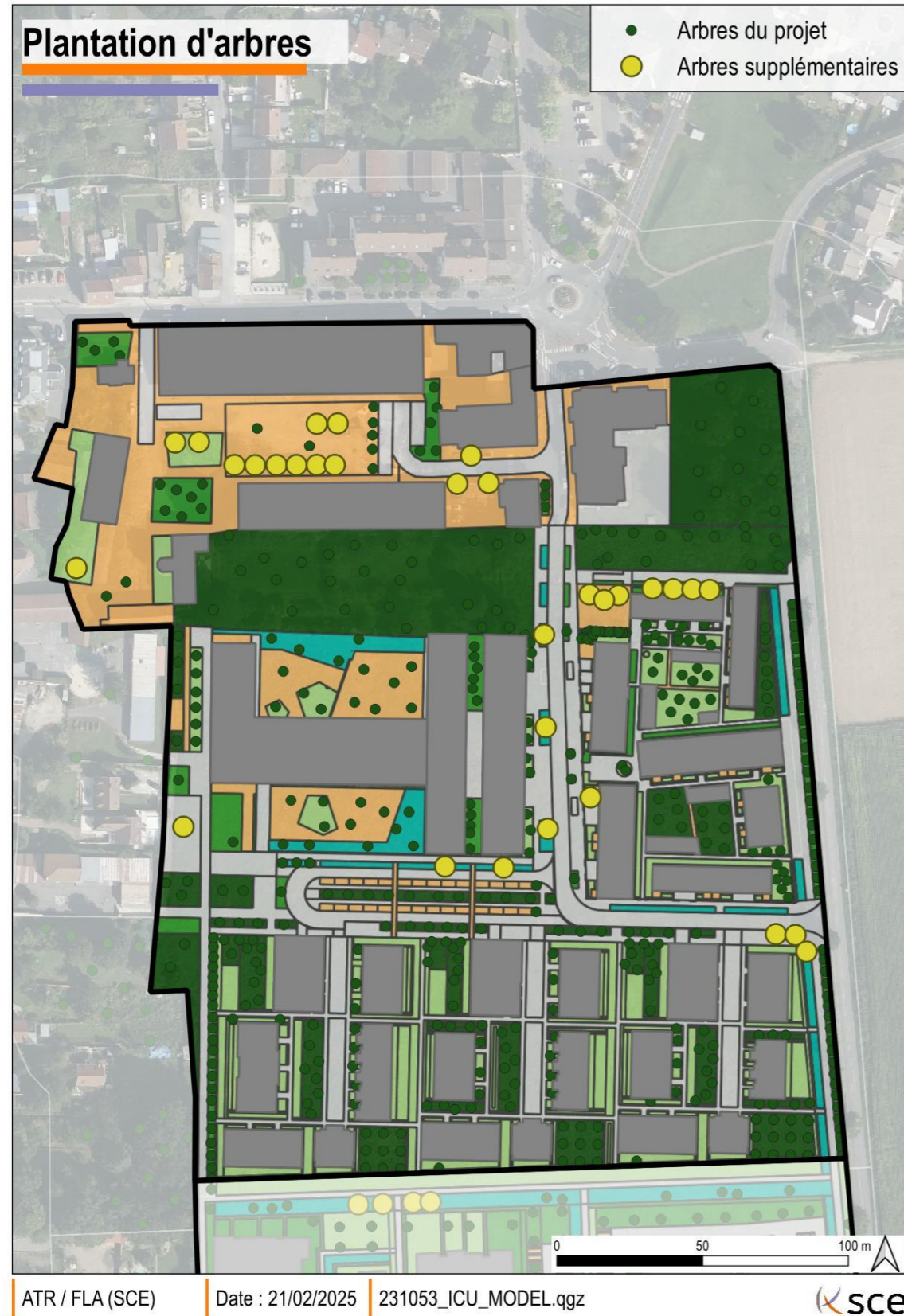
Les arbres modélisés sont ensuite ajustés manuellement selon l'occupation du sol du projet.

Les arbres supplémentaires sont disposés à quelques mètres au Sud des points les plus chauds, dans les surfaces perméables, les surfaces enherbées et dans les noues.

Figure 34 – Plantation modélisée d'arbres supplémentaires



Figure 35 – Plantation modélisée d'arbres supplémentaires – OAP 5 Nord



7. Modélisation des températures - Arbres supplémentaires

Pour estimer l'impact des 60 arbres plantés à proximité des points les plus chauds du site, la modélisation des températures est relancée dans les mêmes conditions que la modélisation précédente. Les cartes suivantes présentent les ombres pour la journée du 13 Août et les températures diurnes à partir de ce scénario « 60 arbres ».

D'un point de vue statistique, le tableau ci-dessous présente les valeurs médianes, minimales et maximales sur le périmètre de la zone de plantation théorique. Ces soixante arbres jouent un rôle de rafraîchissement localisé sans impact significatif sur la température à l'échelle du site, puisque la variation de température moyenne est de 0,4°C (1%).

	Modélisation sans plantation supplémentaire	Modélisation avec plantation supplémentaire
Valeur médiane	36,6°C	36,2
Valeur minimale	29,0	28,9
Valeur maximale	43,7	43,6

7.1. Comparaison des ombres

Figure 36 – Comparaison des ombres avec 60 arbres supplémentaires

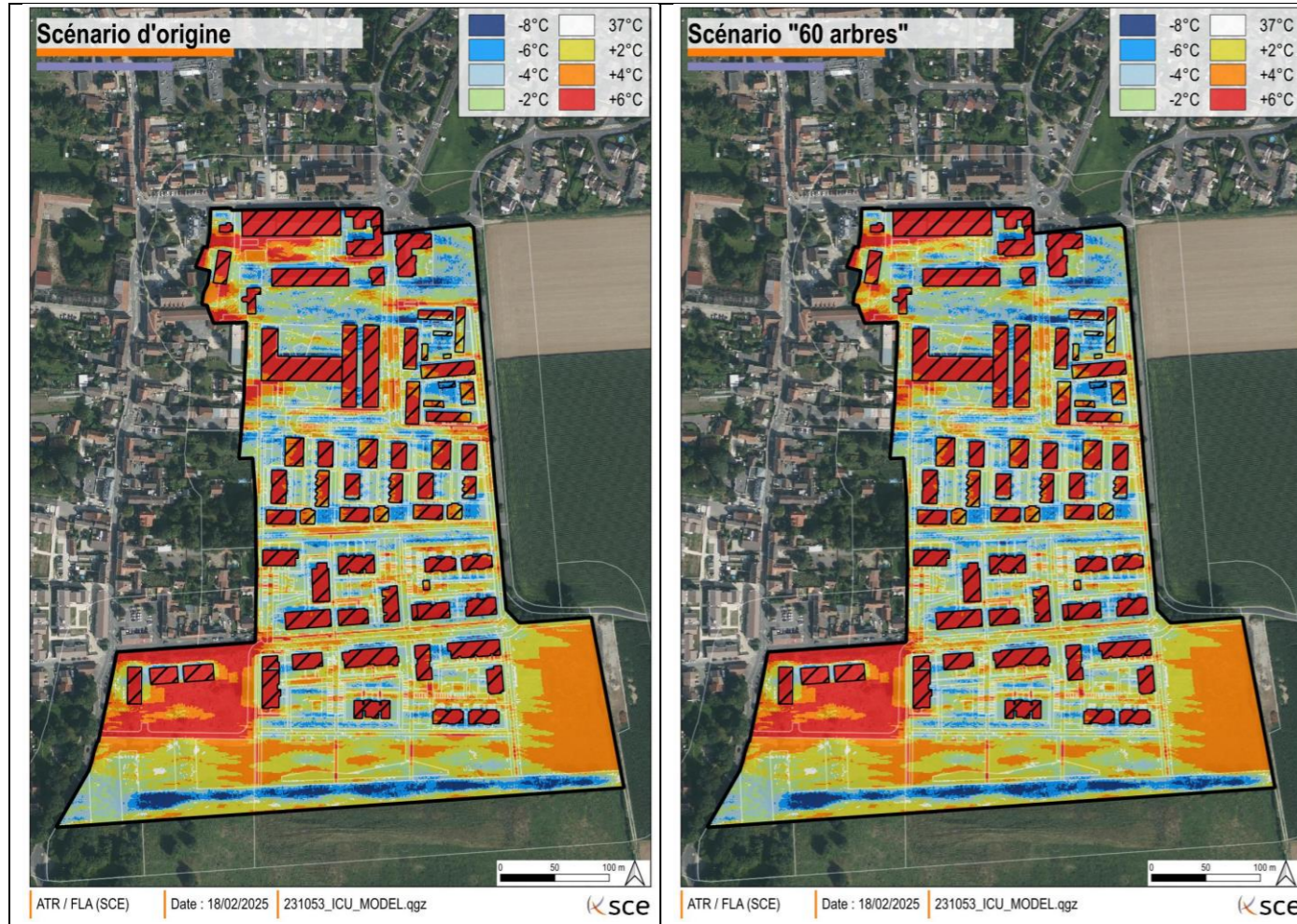


Les arbres supplémentaires renforcent l'ombrage sur une distance de 10 à 25 mètres selon l'heure de la journée. Les ombres concernent notamment la zone au Nord-Ouest du site (10 arbres ajoutés) et les voiries orientées Est-Ouest.

L'ombrage est plus difficile à mettre en œuvre pour les voiries orientées Nord-Sud, à moins de prévoir un aménagement plus conséquent comme une allée centrale pour accueillir une série d'arbres disposés en ligne.

7.2. Comparaison des températures diurnes

Figure 37 – Comparaison des températures relatives avec 60 arbres supplémentaires



Les cartes relatives représentent les écarts entre la température modélisée et la température moyenne à l'échelle du site. La plantation de 60 arbres supplémentaires permet l'effacement de certaines zones de chaleur (en rouge), avec des températures chaudes plus limitées voire des températures devenues plus fraîches que la température moyenne.

La carte suivante présente les écarts entre les deux modélisations. Des écarts de -2°C à -8°C sont localement observés avec la plantation d'arbres supplémentaires. En cohérence avec les ombres, le rafraîchissement est plus important au Nord-Ouest du site, notamment par la disposition des arbres en massif, ainsi que sur les voiries orientées Est-Ouest.

La plantation d'arbres supplémentaires fait partie des solutions de rafraîchissement local, notamment pour protéger des espaces en sol nu, certaines façades Sud de bâtiments et certaines voiries imperméables.

Figure 38 – Ecart de températures entre les deux scénarios

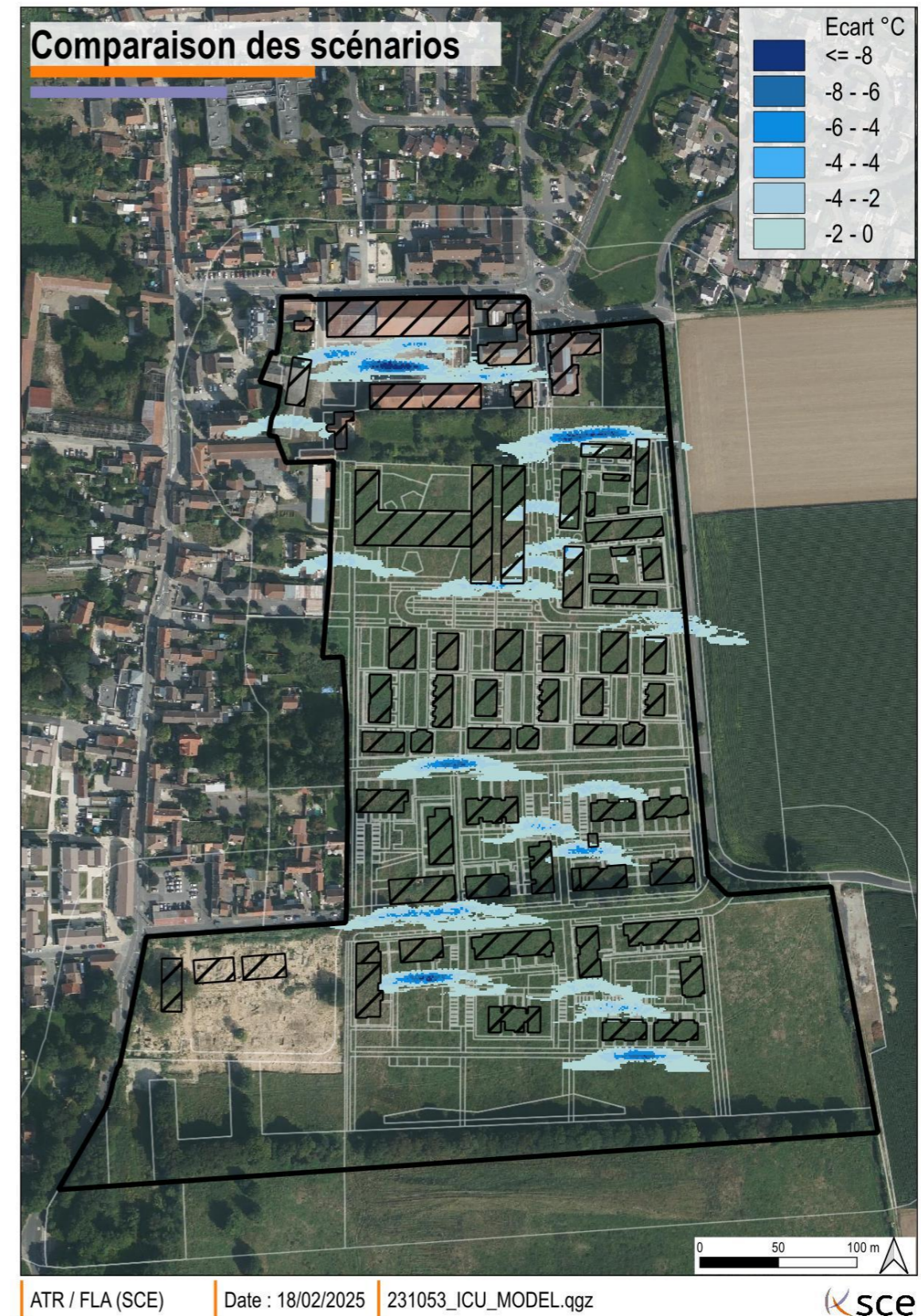


Figure 39 – Ecart de températures entre les deux scénarios – OAP 5



8. Conclusion

Au regard des données climatiques passées et futures, la modélisation des îlots de chaleur urbain est réalisée en considérant les conditions météorologiques exceptionnelles de l'été caniculaire de 2022 comme faisant partie des conditions régulières envisagées à l'horizon 2100.

La modélisation des ombres, des températures diurnes et des températures nocturnes montre que le site est aménagé de façon à limiter de façon considérable les zones de forte chaleur, avec une température moyenne de l'OAP 5 Nord de 35,5°C et des températures entre 28 et 43°C (valeur mesurée à l'ombre par Météo France à 32,5°C).

La cour de l'école est particulièrement bien protégée des fortes chaleurs, avec des températures entre 33,5 et 36,5°C. Les cœurs des bâtiments sont également propices à des températures relativement fraîches.

Les éléments principaux qui favorisent le rafraîchissement du site sont :

- ▶ la forme des bâtiments, structurés en îlots,
- ▶ les surfaces herbacées, arbustives et arborées,
- ▶ les surfaces plus humides permises par les noues,
- ▶ les surfaces perméables limitées et bordées de surfaces arbustives, de surfaces herbacées et de noues.

Dans cette étude, SCE présente différentes solutions pour limiter le réchauffement, parmi lesquelles certaines sont temporaires (tonnelles, voiles d'ombrage) et d'autres sont plus pérennes (toitures végétalisées, gestion des eaux pluviales, points d'eau...). Parmi celles-ci, certaines sont déjà envisagées par le maître d'ouvrage et ne sont pas incluses dans cette modélisation, qui se veut donc maximaliste.

Sur le secteur OAP 5 Nord, 4 zones sont concernées par des risques de forte chaleur dans l'état actuel du projet :

- ▶ Au Nord-Ouest, le corps de ferme présente de grandes surfaces en sol nu avec seulement une dizaine d'arbres plantés. Des températures > 40°C sont à envisager et un effort de végétalisation semble nécessaire.
- ▶ Les voiries orientées Est-Ouest peuvent présenter localement des températures élevées. La plantation de quelques arbres devrait permettre de limiter ces points chauds.
- ▶ La voirie centrale orientée Nord-Sud est également exposée aux fortes chaleurs. La plantation d'arbres dans les espaces en herbe existants semble peu efficace au regard de la modélisation. Un alignement d'une série d'arbres, disposés dans une allée centrale, semblerait être plus efficace pour limiter les températures élevées.
- ▶ L'espace imperméable au Centre-Ouest (future zone de jeux) est également un point chaud. La végétalisation de cet espace et l'installation de solutions d'ombrage et de points d'eau pourra être nécessaire pour assurer le confort thermique des habitants.

Dans cette étude, SCE a souhaité simuler la plantation de 60 arbres supplémentaires pour favoriser le rafraîchissement des points les plus chauds. Il convient de noter que les arbres produisent une ombre portée au sol, mais aussi une limitation du rayonnement par l'absorption de certaines longueurs d'onde et la production d'humidité par évapotranspiration. Ces arbres, à condition qu'ils soient adaptés aux conditions climatiques futures et qu'ils soient maintenus en bonne santé, font partie des solutions les plus efficaces pour limiter les îlots de chaleur. La plantation modélisée permet effectivement un rafraîchissement localisé de -2 à -8°C.



sce

Aménagement
& environnement

www.sce.fr

GROUPE KERAN