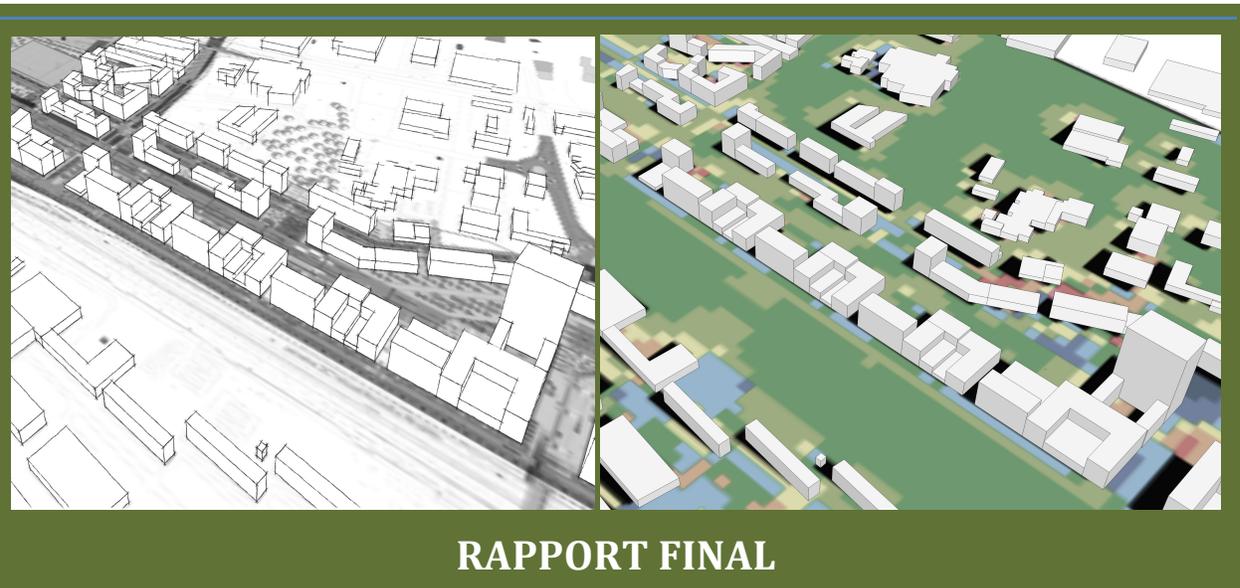




IFU

Ilots de Fraicheur Urbains



Toulouse, France

Juillet 2015

SOMMAIRE

RESUME	4
ABSTRACT	5
1. CADRE ET GESTION DU PROJET	6
1.1. EQUIPE	6
1.2. PLATEFORME D’ECHANGE	6
1.3. COMMUNICATIONS.....	7
2. PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE DU PROJET	8
2.1. UN CONTEXTE DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE.....	8
2.2. L’ILOT DE CHALEUR URBAIN	8
2.3. CAUSES DU PROBLEME	9
2.3.1. <i>Matériaux et revêtements</i>	10
2.3.2. <i>Forme urbaine</i>	11
2.3.3. <i>Couvert naturel (espaces d’eau et espaces verts)</i>	11
2.3.4. <i>Emissions de chaleur anthropique (réseaux de transports, équipements du bâtiment et industries)</i>	12
2.4. IMPACTS DES ILOTS DE CHALEUR URBAINS	13
2.5. UN CHAMPS DE CONNAISSANCES PEU INTEGRE AUX PRATIQUES.....	13
3. OBJECTIFS	15
4. METHODE	15
4.1. LA ZAC MONTAUDRAN : CONTEXTE, CONTRAINTES ET OPPORTUNITES DU PROJET.....	16
4.1.1. <i>Le contexte environnant naturel et construit</i>	17
4.1.2. <i>Les espaces verts et les espaces d’eau de la ZAC</i>	21
4.1.3. <i>Les contraintes et les opportunités de projet</i>	23
4.2. MESURES AEROPORTEES SUR LA ZAC MONTAUDRAN	25
4.3. UNE DEMARCHE HYBRIDE BASEE SUR LES FICHES LEVIERS D’ACTION ET LES SCENARIOS REFERENTS.....	29
4.4. ELABORATION DE SCENARIOS REFERENTIELS	31
4.4.1. <i>Une double approche entre recherche et pratique</i>	31
4.4.2. <i>Mise au point des scénarios d’aménagement</i>	32
4.4.3. <i>Scénarios sélectionnés</i>	33
4.5. UNE ETUDE PAR SIMULATION NUMERIQUE	34
4.5.1. <i>Le choix d’un outil de référence</i>	35
4.5.2. <i>ENVI-met : simulation microclimatique et du confort du piéton</i>	36
4.5.3. <i>Interprétation, génération et évaluation automatiques de données</i>	44

4.6. METHODE D'ESTIMATION DES VARIATIONS DES CHARGES THERMIQUES DES BATIMENTS LIEES AUX DIFFERENTS SCENARI	46
4.6.1. Recensement des différentes charges à prendre en compte	46
4.6.2. Hypothèses de calcul et traduction pour les bâtiments du projet	47
4.6.3. Mise en œuvre de cette méthode	48
5. RESULTATS	50
5.1. IMPACT DU PROJET INTEGRALE DE LA ZAC SUR LE MICROCLIMAT	50
5.2. INFLUENCE DES VARIANTES DU PROJET SUR LE MICROCLIMAT	57
5.2.1. Le microclimat du cas de base : projet initial de la « Place centrale »	57
5.2.2. L'effet des variantes sur la température de l'air	58
5.2.3. Comparaison entre variantes pour la « Place centrale » sur l'humidité de l'air	61
5.2.4. Comparaison entre variantes pour la « Place centrale » sur la vitesse du vent	62
5.2.5. Comparaison entre variantes pour la « Place centrale » sur la température radiante	63
5.2.6. Le microclimat du cas de base : projet initial du « Parc Sud »	66
5.2.7. L'effet des variantes pour le « Parc Sud » sur la température de l'air	67
5.2.8. Comparaison entre variantes pour le « Parc Sud » sur l'humidité de l'air	69
5.2.9. Comparaison entre variantes pour le « Parc Sud » sur la vitesse du vent	70
5.2.10. Comparaison entre variantes pour le « Parc Sud » sur la température radiante	71
5.3. ITINERAIRES DES PIETONS ET CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR	74
5.3.1. La mobilité et les itinéraires dans la ZAC Montaudran	74
5.3.2. Le conditions de confort thermique sur la piste de la ZAC	77
5.4. ESTIMATION DE L'IMPACT ENERGETIQUE DES BATIMENTS	91
5.5. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	93
6. CONCLUSION	94
7. BIBLIOGRAPHIE	96
ANNEXE 1 : TYPOLOGIES VEGETALES DANS LA ZAC	99
ANNEXE 2 : FICHES LEVIERS D'ACTION	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Résumé

Les villes concentrent aujourd'hui plus de la moitié de la population à l'échelle du globe, plus de 80% à l'échelle des pays industrialisés dont la France. Les enjeux urbains sont nombreux et souvent conflictuels. Le développement urbain généralisé est accompagné et contribue largement à un changement climatique accéléré à l'échelle de l'humanité. Ses effets sur la consommation énergétique, sur le confort environnemental et sur la santé publique sont plus prégnants dans ces grandes métropoles. Ceci oblige à intégrer dès la conception des projets, une analyse des dispositifs d'atténuation de ces phénomènes et de travailler sur une adaptabilité des espaces urbains. Pour répondre à ces enjeux, plusieurs pistes d'actions ont été menées et analysées dans le cadre du projet « Ilots de Fraicheur Urbains (IFU) ». Ce projet vise à améliorer les connaissances pour répondre à la préoccupation grandissante d'atténuation des risques de surchauffes liés au changement climatique et l'effet d'îlot chaleur urbain. Il vise plus précisément à comparer de manière simplifiée et synthétique, différentes stratégies bioclimatiques d'adaptation en saison chaude qui se décident au démarrage de la conception des projets urbains, paysagers et architecturaux. Le terrain d'étude est un projet urbain phare de Toulouse Métropole, la ZAC Montaudran Aerospace, à l'intérieur du périmètre du projet Plaine Campus, récent lauréat de l'appel d'offres ÉCOCITÉS. Pour atteindre ces objectifs, cinq étapes méthodologiques principales ont été établies : (1) Evaluation des contraintes et des opportunités du plan d'aménagement urbain proposé par les aménageurs pour la ZAC Montaudran à Toulouse ; (2) Définition des hypothèses d'étude à partir d'une démarche transversale de travail ; (3) Formulation d'un ensemble référentiel de variantes du projet basée sur les directives de la maîtrise d'ouvrage et les mesures d'adaptation microclimatique; (4) Modélisation microclimatique et analyse du confort thermique des piétons virtuels du projet urbain initialement proposé et de ses variantes référentielles ; (5) Calcul et analyse comparative de l'impact de l'ensemble des scénarii microclimatiques sur la charge de climatisation des bâtiments. Les résultats de ce travail ont montré une influence importante des espaces d'eau et de la densité végétale sur l'atténuation des îlots de chaleur urbains, notamment dans la journée. Une augmentation de la densité d'arbres plantés le long de l'ancienne piste a permis de créer une trame végétale qui abrite les piétons contre la chaleur en été, réduisant drastiquement les effets locaux d'îlots de chaleur. Les bassins d'eau avec fontaines associés à la distribution du vent dominant dans la trame urbaine ont mis en avant une propagation très étendue de l'îlot de fraicheur urbain.

Abstract

Cities currently concentrate more than half of the world population and around 80% in developed countries such as in France. Such concentration of people along with their different activities has produced major stress on the natural and built environment. The urbanization models are marked by important changes in the natural surfaces and in the built morphology, which have altered radiation, thermal, moisture and aerodynamic properties of these environments, leading to a new human induced climate. This urban climate has affected environmental quality of spaces, leading to human heat stress, particularly in summer conditions, and a significant increase of energy demand in buildings. This intensive urbanization process brings us to face new challenges of adapting existing and new urban areas to a progressive and local climate change, which requires integrating decisive measures right from the first stages of the design process. One of the first airmail services in the world, the Aeropostale, was located in the Montaudran airport in Toulouse-France. This landmark and its surroundings will be refurbished and transformed into a mixed-used urban site, the Aerospace valley, with residential buildings, commercial, sportive, educational and cultural activities. This new district has been recently planned based mostly on patrimonial and functional rules. The UCI project (from "Urban Cool Islands") is a national French research project that has discussed procedures aiming at incorporating a set of reasoned measures of local climate adaptation to this new urban area that will be set as landmark reference. This research aims at analysing and comparing different adapted and resilient urban design strategies to provide support for their application in the Montaudran district plan, focusing on mitigating urban heat island effects in summer season conditions. Two main methodological steps were undertaken: (1) the initial urban plan was assessed relating a set of well-known energy-related parameters of the urban morphology and microclimate analysis; (2) a set of variations to adapt the initial plan was undertaken based on the local plan major guidelines and on main climate adapting measures. Results pointed to a major influence of the water bodies and vegetation density on the mitigation of urban heat islands, notably in daytime. The increase of vegetation density all along the ancient airport runway allowed creating an important urban cool island for pedestrian walk, reducing drastically local heat islands effects.

1. Cadre et gestion du projet

Thème	Évaluation de dispositifs de rafraîchissement urbains
Axe thématique	Evaluation du potentiel d'économie d'énergie grâce aux dispositifs de rafraichissement urbains
Intitulé du projet	Ilots de Fraicheur Urbains
Acronyme	IFU
Durée	2 ans
Partenariats	ENSA Toulouse - INSA Toulouse - ONERA – Toulouse Métropole

1.1. Equipe

Coordonateur : Marion Bonhomme

Auteurs	Marion Bonhomme Serge Faraut Tathiane Martins Frédéric Bonneaud Charlotte Michel	LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture), ENSA de Toulouse
	Luc Adolphe Stéphane Ginestet	LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité de la Construction, INSA de Toulouse)
	Rosa Oltra Carrio	ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales), Toulouse

1.2. Plateforme d'échange

Le pilotage du projet s'est structuré autour de deux actions : (1) la tenue de réunions mensuelles réunissant tout ou partie de l'équipe de recherche ; (2) la mise en place d'une plateforme d'échange réservée aux membres du projet sur le site internet du LRA :

<http://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/projets/ifu>

The screenshot shows the website interface for the IFU project. At the top, there are logos for ENSA Toulouse and the LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture). A navigation menu includes 'Accueil', 'Publications', 'Informations pratiques', 'Mode d'emploi', and 'Suivi de la mise à jour'. The main content area is titled 'Projets' and lists several project categories: ACCLIMAT, AEROPORTS_AIRSPACES, BARRAGES, CANAC, CapaCités, CIAM4, and CIEUTAT. To the right, there is a section for 'Réunions' (Meetings) with a list of meeting minutes, including 'Réunion du 24/03/2014' and 'Réunion du 15/04/2014', each with a 'Compte rendu' (minutes) link. The page also features a search bar and various action buttons like 'Voir', 'Modifier', and 'Partager'.

Figure 1 : plateforme d'échange IFU avec les comptes rendus de réunion.

1.3. Communications

Plusieurs communications dans des colloques internationaux avec comité de lecture ont été réalisées autour du projet IFU :

- Présentation de la notion d'îlot de fraicheur urbain et du projet IFU dans le cadre de la conférence « Tassili » qui s'est tenue le 9 décembre 2012 à l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger.
- Présentation du projet IFU le 13 septembre 2013 à l'Agence d'urbanisme et d'aménagement de Toulouse (AUAT), dans le cadre d'une journée d'échanges organisée par l'Institut de la ville (Université de Toulouse & Toulouse Métropole).
- Article « The Urban Cool Islands project, a case study crossing research and practice » accepté et présenté lors de la conférence ISUF 2014 (the 21st International Seminar on Urban Form) qui a eu lieu à Porto du 3 au 6 juillet 2014.
- Présentation du projet IFU par Toulouse Métropole dans le cadre du programme POPSU en octobre 2014.
- Article « Impact of spatial and spectral resolutions on the classification of urban areas » qui sera présenté lors de la conférence JURSE, du 30 mars au 1er avril 2015, Lausanne (Suisse).
- Présentation de l'état d'avancement du Projet IFU dans le cadre d'une journée d'échanges organisée par l'Institut de la ville et Toulouse Métropole.
- Présentation « Ilots de Fraicheur Urbains : Quels dispositifs pour atténuer les effets des ilots de chaleur urbains en période estivale pour la ZAC Montaudran à Toulouse ? » dans le cadre de la « Semaine du Développement Durable » organisée par le CREPS Toulouse le 4 juin 2015.
- Article « Creating Urban Cool Islands effects for summer season in Toulouse new area: urban microclimate adaptation » à la 9^{ème} conférence ICUC, juillet 2015 à Toulouse (France).
- Article « Impact of spatial and spectral resolutions on the classification of urban areas à la 9^{ème} conférence ICUC, juillet 2015 à Toulouse (France).

Deux publications dans des revues internationales (Sustainable Cities and Society, Building and Environment) sont en cours de préparation.

2. Problématique et contexte du projet

2.1. Un contexte de réchauffement climatique

Les projections climatiques du groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) font apparaître une augmentation possible de la température moyenne de l'atmosphère terrestre de 1,1 à 6,4 °C d'ici à la fin du siècle (GIEC, Pachauri, & Reisinger, 2008).

Dans les climats tempérés, ce réchauffement sera très probablement accompagné de perturbations météorologiques importantes. En particulier, l'étude que Météo-France a menée sur la ville de Paris avec le modèle ARPEGE met en évidence une intensification des épisodes caniculaires d'ici à 2100, quel que soit le scénario du GIEC considéré (Koukou-Arnaud, Lemonsu, & Desplat, 2011).

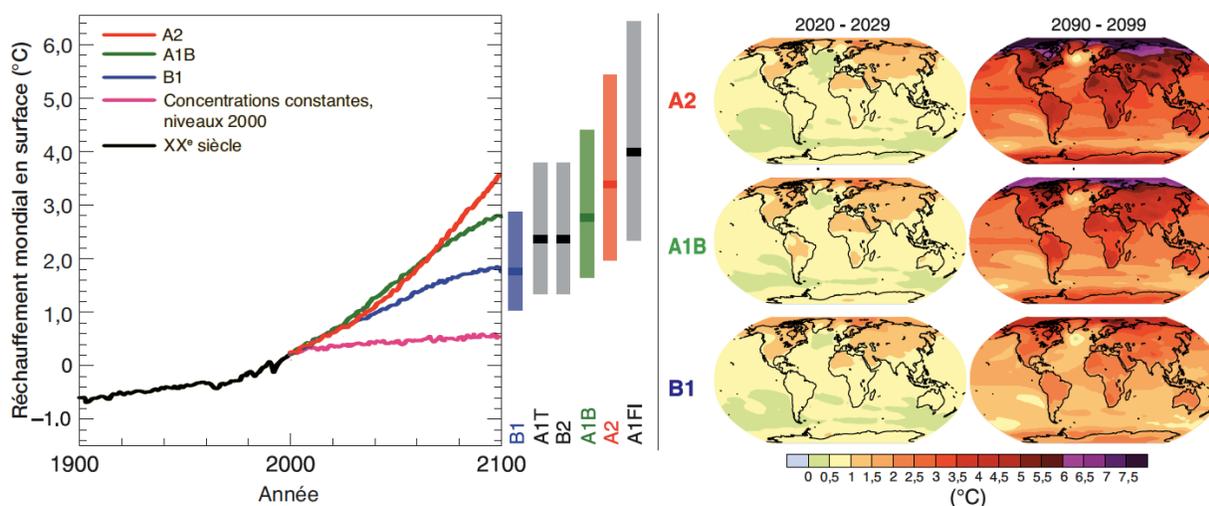


Figure 2 : Projections du GIEC relatives au réchauffement à la surface du globe selon plusieurs scénarios (GIEC et al., 2008).

2.2. L'îlot de chaleur urbain

Parallèlement à ces phénomènes, les villes connaissent un microclimat, connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain, qui va accentuer le réchauffement climatique et aggraver les épisodes de canicules. En effet, en raison de leur morphologie, de leurs matériaux, de leurs activités, etc. les villes présentent souvent des températures moyennes plus élevées que les températures en périphérie ou à la campagne (voir Figure 3).

Ces écarts de température peuvent aller de 2°C pour une ville de 1000 habitants à 12°C pour une mégapole de plusieurs millions d'habitants (écarts maximum estivaux) (Oke, 1988). L'îlot de chaleur urbain est ainsi défini comme l'écart de température entre une ville et la campagne environnante. On mesure essentiellement ces écarts la nuit, ce qui signifie que les tissus urbains emmagasinent de la chaleur durant la journée mais ne la libèrent que très peu durant la nuit contrairement aux zones rurales (Pigeon, Lemonsu, Masson, & Hidalgo, 2008).

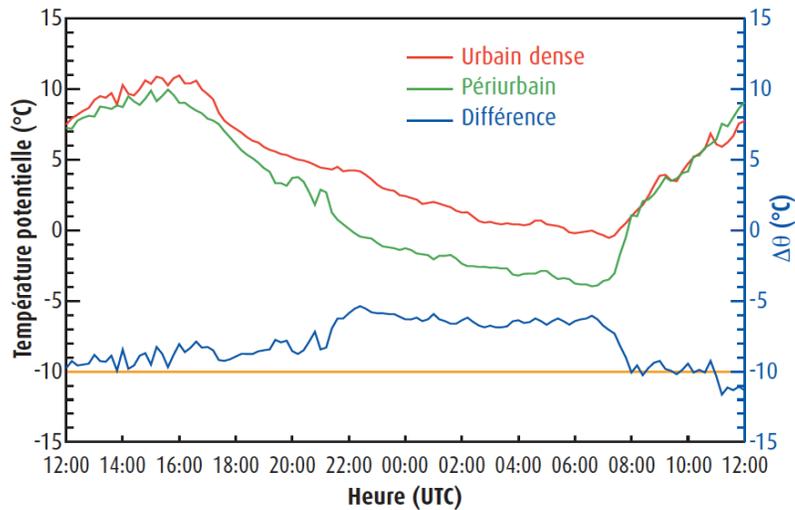


Figure 3 : Évolution de la température en deux points de Toulouse, le 25 février 2005 (Pigeon et al., 2008).

2.3. Causes du problème

La Figure 4 expose l'ensemble des facteurs qui influencent la formation et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Certains, d'origine météorologique ou géographique, ne peuvent pas être influencés par la planification urbaine. Il existe cependant une série de facteurs, dont font partie l'architecture et l'aménagement urbain, qui ont une influence sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

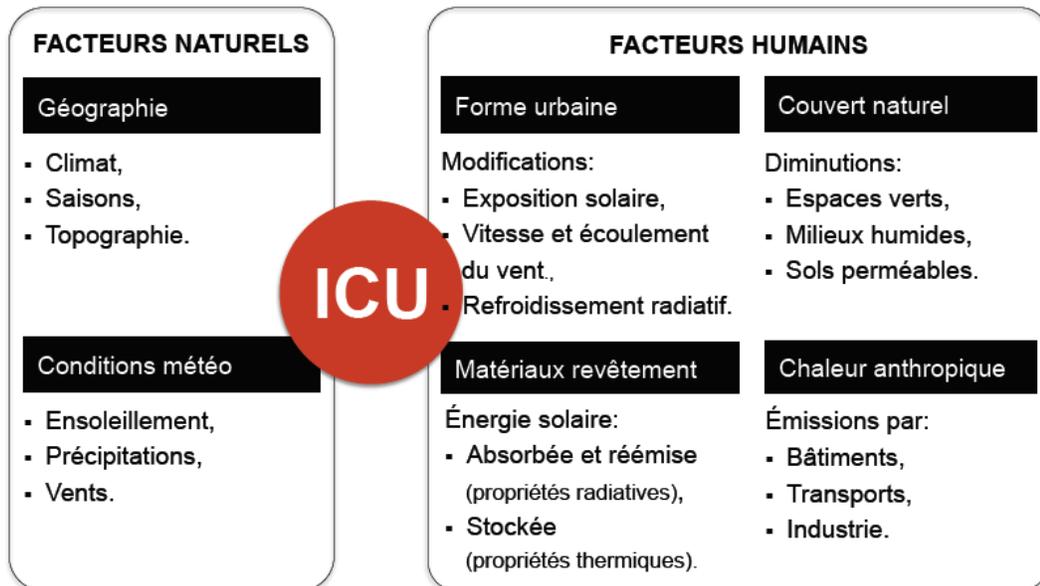


Figure 4 : Principaux facteurs et différentes échelles influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Dubois, 2014).

2.3.1. Matériaux et revêtements

Le premier phénomène influençant le bilan radiatif est lié à la matérialité de la ville. De manière générale, les propriétés thermiques des matériaux leur permettent de stocker la chaleur durant la journée et de la restituer la nuit. Cette restitution nocturne est la principale cause de la différence de température entre la ville et la campagne la nuit. La capacité des matériaux urbains à capter la chaleur et à la restituer pendant la nuit est caractérisée par différentes grandeurs :

- L'albédo [sans unité] correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire reçue par une surface. Il permet donc de quantifier la part de rayonnement absorbée et transformée en chaleur.
- L'émissivité [sans unité] correspond au rapport entre le rayonnement infrarouge émis par une surface et le maximum théorique de rayonnement infrarouge par un corps noir à même température.
- La capacité thermique [Joule/kilogramme.Kelvin] est la quantité de chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son poids. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un Kelvin la température d'un kilogramme du matériau.
- La conductivité thermique [Watt/(Mètre.Kelvin)] quantifie l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur.
- La diffusivité thermique [Mètre carré/Seconde] caractérise la rapidité avec laquelle la chaleur est transférée à travers un matériau. Elle va dépendre de la capacité thermique et de la conductivité thermique d'un matériau. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur a atteint une face d'un mur et le moment où elle atteint l'autre face sera important.
- L'effusivité thermique [Joule/Kelvin/mètre carré/seconde] caractérise la rapidité avec laquelle la chaleur est absorbée dans un matériau. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement.
- Les quatre dernières grandeurs permettent de caractériser l'inertie c'est-à-dire la capacité d'un matériau à accumuler la chaleur et à la restituer dans le temps.

Pour résumer, deux caractéristiques thermiques des matériaux sont à retenir pour leur influence sur l'îlot de chaleur urbain : l'albédo et l'inertie. Tout d'abord, l'albédo des matériaux urbains est globalement plus faible que celui des matériaux que l'on trouve à la campagne. Ces matériaux « montent » donc en température de manière plus importante, ce qui contribue à la création d'un îlot de chaleur urbain (Prado & Ferreira, 2005). De plus, l'inertie des matériaux urbains est plus élevée, ils absorbent donc la chaleur pour la restituer en période nocturne, empêchant le rafraîchissement de la ville (Liébard & De Herde, 2005).

2.3.2. Forme urbaine

Le deuxième paramètre influant le bilan radiatif concerne les ombres que font les bâtiments sur les espaces extérieurs et qui limitent la montée en température des matériaux. Ces ombres seront d'autant plus importantes que le prospect du tissu urbain est élevé (Adolphe et al., 2002). L'orientation des rues aura également une importance particulière.

Le troisième facteur, également lié à la géométrie urbaine, concerne le piégeage radiatif (voir Figure 5). Ce phénomène désigne le fait que dans une forme urbaine à fort prospect, les rayons solaires vont subir de multiples réflexions et vont réchauffer les surfaces qui composent la rue avant de ressortir partiellement vers l'atmosphère. La température à l'intérieur de la rue canyon s'en trouvera donc augmentée. Les rayons infrarouges émanant des matériaux urbains chauffés sont piégés de la même manière (Colombert, 2008b).

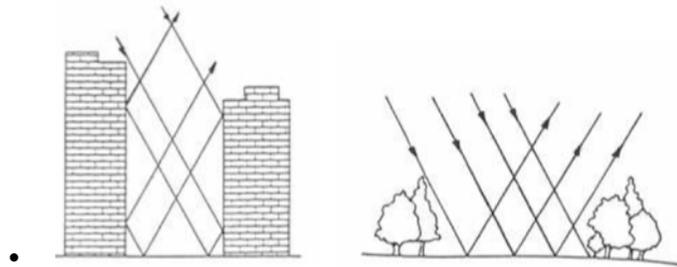


Figure 5 : Illustration du piégeage radiatif (Griffiths, 1976)

Parmi les facteurs liés au tissu urbain, on peut également citer l'orientation des rues et des ilots urbains par rapport aux vents dominants qui vont influencer la vitesse et la turbulence du vent (Sacre, 1983). Nakamura et Oke ont également montré qu'il existe un lien entre la vitesse du vent à l'intérieur et au-dessus d'une rue canyon (Nakamura & Oke, 1988) : le vent à l'intérieur de la rue est ralenti, sa direction est modifiée et des flux turbulents sont générés. Ce lien est largement influencé par l'orientation de la rue par rapport au vent et par le prospect de la rue. Dans le cas d'un tissu traditionnel dense aux rues sinueuses, les vents seront donc ralentis et la chaleur de la ville ne sera pas aisément dispersée.

2.3.3. Couvert naturel (espaces d'eau et espaces verts)

La modification de l'évapotranspiration en milieu urbain est liée d'une part à une diminution de la part du végétal par rapport aux milieux ruraux, et d'autre part à une imperméabilisation du sol.

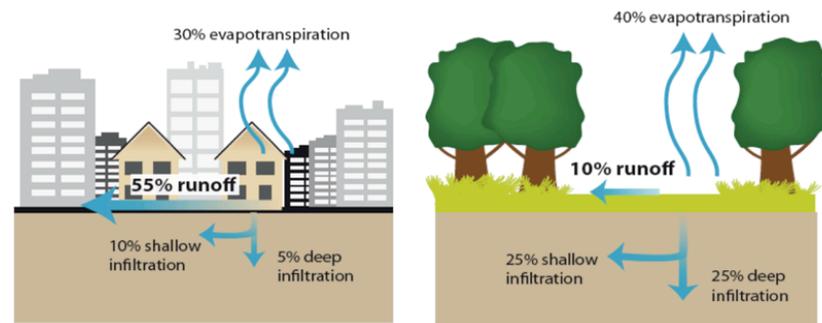


Figure 6 : Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain (United States Environmental Protection Agency, 2008).

Les végétaux sont en effet capables de puiser l'eau du sol pour la restituer sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère (transpiration). Ainsi, ils contribuent à la modification du taux d'humidité de l'air dans le milieu (Musy, 2005). En milieu urbain, moins d'espaces sont laissés au végétal, ce qui a pour conséquence de réduire l'humidité de l'air. Notons cependant que cette évapotranspiration est essentiellement liée à l'irrigation des végétaux. Des arbres mal irrigués (en situation de stress hydrique) auront même tendance à limiter le rafraîchissement de la ville en piégeant le rayonnement solaire infrarouge (Gill, Handley, Ennos, & Pauleit, 2007).

Cette réduction de l'humidité de l'air est accentuée par l'imperméabilisation de la ville. En effet, en milieu urbain, la pluie ruisselle sur les toitures et les voiries (partiellement) imperméables pour être très rapidement évacuée vers les réseaux d'eaux pluviales. Le sol contient donc peu d'eau ce qui réduit l'évaporation (United States Environmental Protection Agency, 2008).

Or cette diminution de l'humidité s'accompagne d'une augmentation des températures. En effet, le changement de phase de l'eau par évaporation s'accompagne d'une absorption de chaleur. Ainsi, lors d'une averse estivale fournissant cinq millimètres d'eau par mètre carré, huit fois moins d'eau s'évaporent en milieu urbain qu'en milieu rural dans les vingt-quatre heures suivantes. La différence de quantité de chaleur empruntée à l'environnement correspond à 2,5 kWh/m² en vingt-quatre heures, soit un peu plus du double de la chaleur résultant des activités humaines en été (Dettwiller, 1978).

2.3.4. Emissions de chaleur anthropique (réseaux de transports, équipements du bâtiment et industries)

En milieu urbain, où se concentrent les activités humaines, on note, de fait, une augmentation des rejets de chaleur anthropique liés au chauffage, à la climatisation, aux transports et aux activités industrielles.

Ces flux de chaleur anthropique varient d'une ville à l'autre : Oke a pu mettre en exergue des valeurs annuelles allant de 3 W/m² à 117 W/m² (Oke, 1987). Si la quantité de ces rejets dépend du climat (Montréal possède une des plus fortes quantités de rejets anthropiques), elle

dépend également beaucoup de la densité bâtie et de population (Colombert, 2008a; Oke, 1987; Ringenbach, 2004).

En conclusion, et comme le montrent de nombreuses études, les centres villes denses - qui concentrent de grandes quantités de bâtiments, de matériaux et d'activités et qui laissent moins d'espaces à la végétation et aux plans d'eau - sont plus touchés par l'effet d'îlot de chaleur urbain (Pigeon et al., 2008).

2.4. Impacts des îlots de chaleur urbains

Les conséquences de l'îlot de chaleur urbain restent difficiles à prévoir, et très variables selon les climats. A Paris par exemple, les consommations de climatisation augmentent en raison de cette montée en température mais les consommations de chauffage diminuent dans des proportions généralement plus importantes (Kounkou-Arnaud et al., 2011). D'un point de vue énergétique, il est donc difficile de trancher entre réduction des consommations de chauffage et augmentation des consommations de climatisation, en particulier dans un contexte de changement climatique.

Parmi les conséquences de l'effet d'îlot de chaleur urbain on peut également citer la réduction de l'efficacité des modes de rafraîchissement passifs, la pollution atmosphérique, l'augmentation de l'inconfort, et les risques importants pour la santé humaine et la biodiversité (Colombert, 2008b).

2.5. Un champs de connaissances peu intégré aux pratiques

Les questions de l'atténuation et de l'adaptation des villes au changement climatique se posent avec ambivalence dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement (Molina, 2012). Cette ambivalence résulte de plusieurs paramètres.

D'une part, la climatologie urbaine est un champ relativement récent et complexe. Si l'étude du climat trouve ses origines très tôt dans l'histoire des sciences, ce n'est qu'à partir des années 1930 que la climatologie urbaine va apparaître, pour se développer quelques dizaines d'années après avec la généralisation des outils informatiques de modélisation et de la télédétection (Colombert, Salagnac, Morand, & Diab, 2012). La conséquence est que cette discipline est accompagnée d'un certain nombre d'incertitudes :

- Incertitudes sur le changement climatique en lui-même et les impacts qu'il pourrait avoir. Par exemple, l'élévation de température prévue à l'échelle mondiale par les scientifiques du GIEC varie de + 1,1°C à +6,4°C selon le scénario (GIEC et al., 2008). A l'échelle d'une ville, cela peut influencer grandement les choix de conception urbaine.
- Incertitudes sur les effets du changement climatique sur la ville. Par exemple, comme on l'a vu précédemment, il n'est pas certain que le réchauffement climatique ne

s'accompagne pas dans certains pays comme la France d'un gain important en terme de consommations de chauffage (Smith & Levermore, 2008).

- Incertitudes sur les dispositifs d'atténuation et d'adaptation, notamment à l'échelle urbaine.

Ces incertitudes sont un frein à la transmission des savoirs et savoir-faire vers la sphère des décideurs et des praticiens. Ainsi, la climatologie urbaine et le rôle qu'elle peut jouer sur les consommations d'énergie à l'échelle de la ville demeurent peu connus des praticiens et de fait, peu pris en compte dans leurs décisions.

La climatologie urbaine et ses applications en énergétique urbaine sont donc un champ encore en structuration, et cette structuration prend du temps. Malgré cela, il est demandé aux acteurs de l'urbanisme d'agir dans l'urgence pour atteindre des objectifs de réduction des gaz à effet de serre.

Parmi les freins à la prise en compte du changement climatique dans les politiques urbaines, il faut rajouter le pessimisme qui est perçu dès que l'on parle d'adaptation au changement climatique (Colombert, 2012). En effet, contrairement à l'atténuation qui peut être valorisée d'un point de vue politique, l'adaptation planifiée est perçue par une partie des décideurs comme un renoncement, engendrant des actions coûteuses aux bénéfices potentiels incertains.

3. Objectifs

Le projet *Ilots de Fraicheur Urbains* (IFU) vise à améliorer les connaissances pour répondre à la préoccupation grandissante d'atténuation des risques de surchauffes liées au changement climatique et à l'effet d'îlot de chaleur urbain. Il vise plus précisément à comparer de manière simplifiée et synthétique, différentes stratégies « bioclimatiques » d'adaptation en saison chaude qui se décident au démarrage de la conception des projets urbains, paysagers et architecturaux.

Du point de vue physique, le projet IFU se base sur l'amélioration du rafraîchissement naturel des îlots urbains, par la prise en compte ou l'optimisation des propriétés hygrothermiques in-situ : effets de masques du bâti, de la couverture végétale, de la présence d'eau, des matériaux d'aménagements et d'enveloppes...

Le terrain d'étude est un projet urbain phare de Toulouse Métropole, la ZAC Montaudran Aerospace, à l'intérieur du périmètre du projet Plaine Campus, récent lauréat de l'appel d'offres ÉCOCITÉS. Cette ZAC propose différents bâtiments et aménagements urbains le long de la piste mythique de décollage des avions de l'Aéropostale. Sur ce lieu, nous mettrons en œuvre une approche innovante qui visera à croiser des méthodes d'analyse multi-échelles (mesures spectrales aéroportées, mesures in situ, simulation des échanges hygro-thermiques, des phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle des espaces publics et simulations thermiques à l'échelle des bâtiments) et une analyse multicritère, afin de produire une aide à la décision attendue par le maître d'ouvrage, la communauté urbaine Toulouse-Métropole. »

4. Méthode

Pour atteindre ces objectifs, cinq étapes méthodologiques principales ont été mises en œuvre :

- (1) Evaluation et discussion du plan d'aménagement urbain proposé par les praticiens pour la ZAC Montaudran à Toulouse concernant les opportunités et les contraintes du projet vers l'intégration des dispositifs d'adaptation climatique en situation d'été;
- (2) Définition des hypothèses d'étude à partir d'une démarche transversale de travail au carrefour des savoir-faire bioclimatiques pour la conception urbaine et les potentialités existantes du site et du projet en cours;
- (3) Formulation d'un ensemble référentiel de variantes du projet basée sur les directives de la maîtrise d'ouvrage et sur les mesures d'adaptation microclimatique relevées dans la littérature ;

- (4) Modélisation et analyse microclimatique du projet urbain initialement proposé et de l'ensemble référentiel de variantes;
- (5) Calcul et analyse comparative de l'impact de l'ensemble des scénarii microclimatiques sur la charge de climatisation des bâtiments.

4.1. La ZAC Montaudran : contexte, contraintes et opportunités du projet

Les travaux conduits dans le projet IFU s'intègrent à la réalité d'un projet urbain d'envergure : le projet « Toulouse Montaudran Aerospace » mené par la société d'économie mixte d'aménagement Oppidea, elle-même missionnée par la communauté urbaine Toulouse Métropole, concessionnaire de la ZAC. Ce quartier nouveau se situe en lieu et place de l'aérodrome historique de Montaudran et prend place autour d'une piste d'environ 1,8 km de long et 30m de large rendue célèbre par les pionniers de l'aviation civile, du temps de l'aéropostale (1917 à 1933) (Figure 7). C'était aussi l'ancien site de production des usines Latécoère spécialisées dans la construction d'avions militaires.

Ce projet d'aménagement s'inscrit comme un élément structurant dans le développement de l'agglomération Toulousaine qui affiche aujourd'hui une volonté forte de se rapprocher, en termes de dynamisme et de rayonnement économique, industriel et culturel, des grandes métropoles européennes. Aussi, ce projet de quartier de plus de 56 ha, au Sud-Est de Toulouse, et aux portes de l'université Paul-Sabatier dont il se veut la continuité, a pour but de constituer l'un des plus grands campus scientifiques en Europe, recréant un lien fort entre le domaine de la recherche, des universités et des entreprises. La maîtrise d'ouvrage annonce une ambition forte concernant l'empreinte environnementale du projet tant sur le plan des déplacements (transports en commun et modes doux favorisés), de l'énergie (programmes économes en énergie, récupération de l'énergie émise par les supercalculateurs de l'espace Clément-Ader dans un réseau de chaleur), de la biodiversité (trame verte importante et choix d'espèces adaptées), de la gestion des eaux de pluie (favoriser les zones humides propices à la biodiversité), de la conception bioclimatique des bâtiments, de la mise en place d'énergies renouvelables, etc.



Figure 7 : Le site de Montaudran Aerospace et l'ancienne piste d'atterrissage.

4.1.1. Le contexte environnant naturel et construit

Le site de la ZAC est situé au Sud-Est de la ville de Toulouse à environ 6km du centre-ville et équidistant du site de l'aéroport de Blagnac (Figure 8). Il est longé par le boulevard périphérique toulousain (A620 et A61). La ZAC Toulouse Montaudran est située sur l'emprise de l'ancien aérodrome Air France. Ce site reste le dernier espace constructible de grande envergure à l'intérieur de l'espace déjà urbanisé de Toulouse.

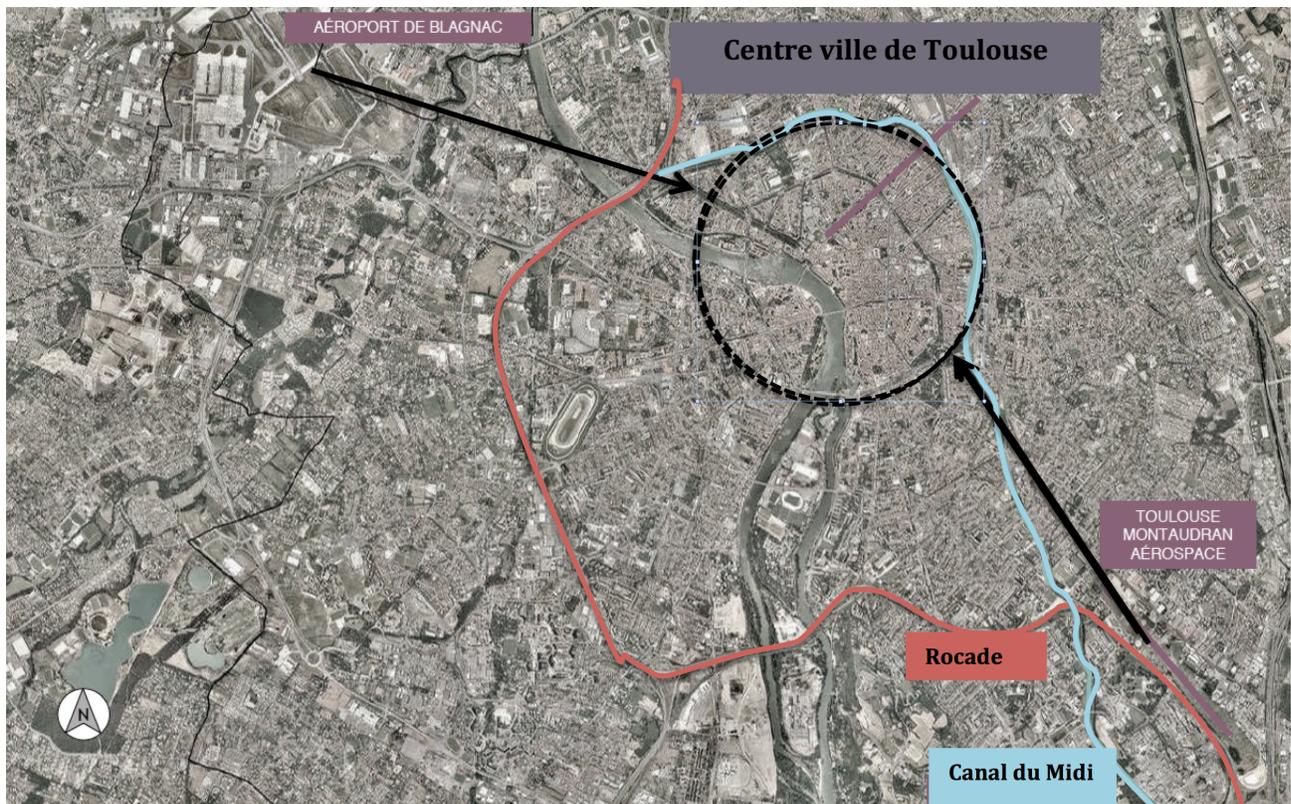


Figure 8 : Situation de la ZAC Montaudran dans le site urbain de Toulouse.

La ZAC Toulouse Montaudran Aerospace permettra le développement d'un nouveau quartier

de ville situé entre : 1/ les quartiers d'habitation de Montaudran, de l'Ormeaux et de Gonin; 2/ des parcelles à vocation économique avec pour certaines un déclin d'activité ; 3/ et le Campus universitaire de Rangueil.

Le projet s'inscrit dans un ensemble de projets d'aménagement regroupés sous le nom de Plaine-Campus englobant le campus universitaire, la ZAC Malepère- Marcaissonne et la ZAC Toulouse Montaudran Aerospace.

Le bâti existant est constitué : 1/ Au nord-est par la zone d'activités déjà existante (ZA Montaudran). Cette zone accueille de nombreuses entreprises. Elle est, en partie, séparée de l'espace Toulouse Montaudran Aérospace par la voie ferrée ; 2/ Au sud-ouest par le complexe scientifique et universitaire de Rangueil, accueillant des unités de recherche telles que CNRS, CNES, des écoles d'enseignement supérieur (ENAC, ISAE, ENSICA...), des entreprises. Cette zone est séparée de l'espace Toulouse Montaudran Aérospace par le périphérique ouest toulousain (Figure 9).

Ainsi la zone est marquée par les infrastructures :

- la présence de grands axes routiers : la rocade (A620) qui borde le sud-est du site sur toute sa longueur, soit entre les échangeurs de Lespinet et du Palays qui se trouvent à chacune de ses extrémités et la future Liaison Multimodale Sud-Est (LMSE) en cours de construction ;
- la présence de la voie SNCF qui passe à proximité.\ ;
- le quartier Toulouse Montaudran Aérospace qui jouera donc le rôle d'entrée de ville sur le Sud-Est toulousain.

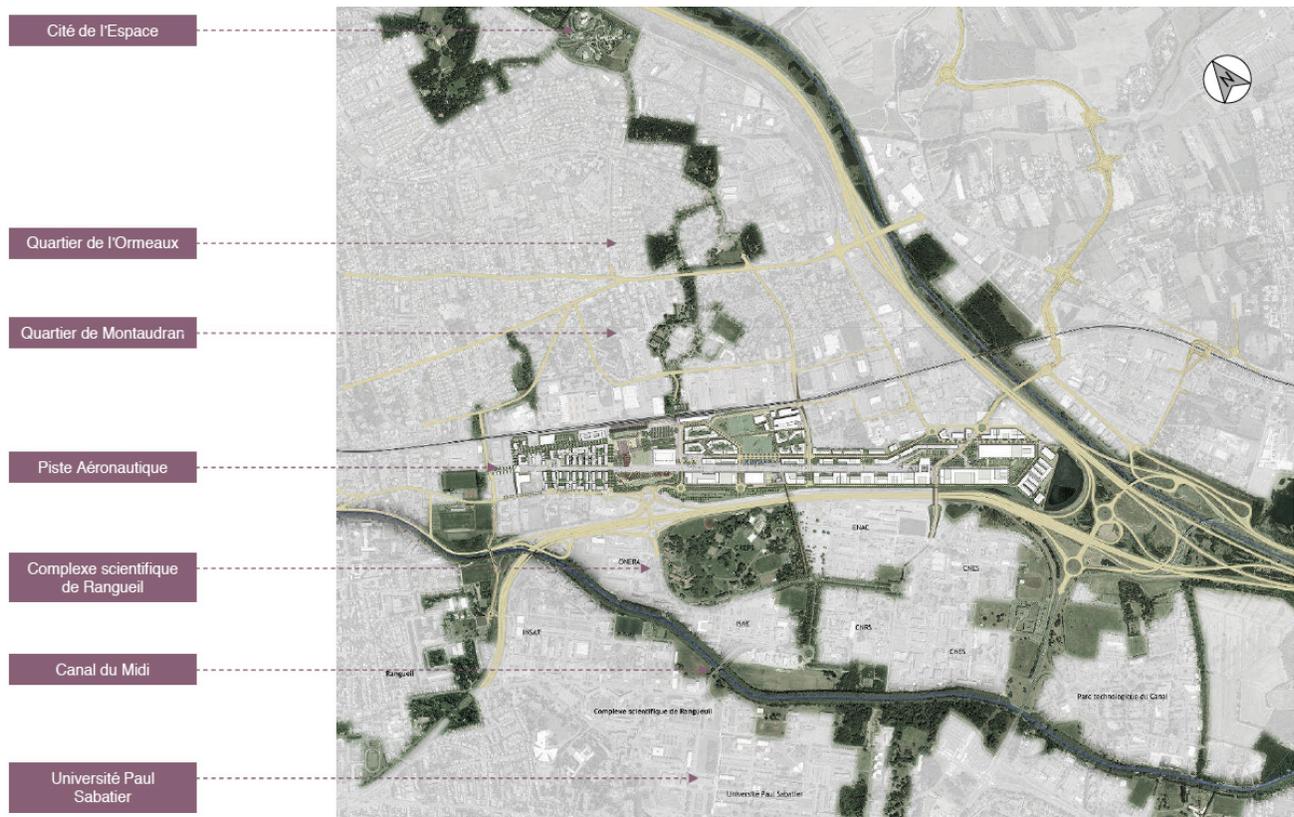


Figure 9: plan d'aménagement urbain avec les environnements proches de la ZAC de Montaudran.

Le projet urbain s'organise autour de la piste historique de Montaudran, il s'agit de la piste des pionniers de l'aéropostale au nord, encadrée par le nouveau quartier de logements de la ZAC St-Exupéry, prolongée vers le sud par Air France d'où décollaient les premiers avions Airbus qui ont fait la renommée internationale de Toulouse.

La ZAC comprendra différents équipements culturels, de recherche et d'espaces publics structurants, certains étant déjà construits.

Les préconisations relatives à l'aménagement des espaces extérieurs de ce quartier seront adaptées à la construction d'un quartier mixte, de bureaux, d'activités, de laboratoires de recherches technologiques, d'équipements publics culturels et sportifs (Figure 10) mais également de bâtiments d'habitation situés à proximité de grandes infrastructures routières et ferroviaires.



Figure 10 : perspective du projet de la ZAC, ses environnements et ses principaux équipements.

Il accueillera 355 000 m² de SHON globale destinés à accueillir plusieurs usages (Figure 11) :

- 50 000 m² dédiés à la recherche ;
- 20 000 m² de commerces ;
- 190 000 m² destiné aux activités tertiaires ;
- 80 000 m² d'habitats ;
- 15 000 m² d'espaces publics.

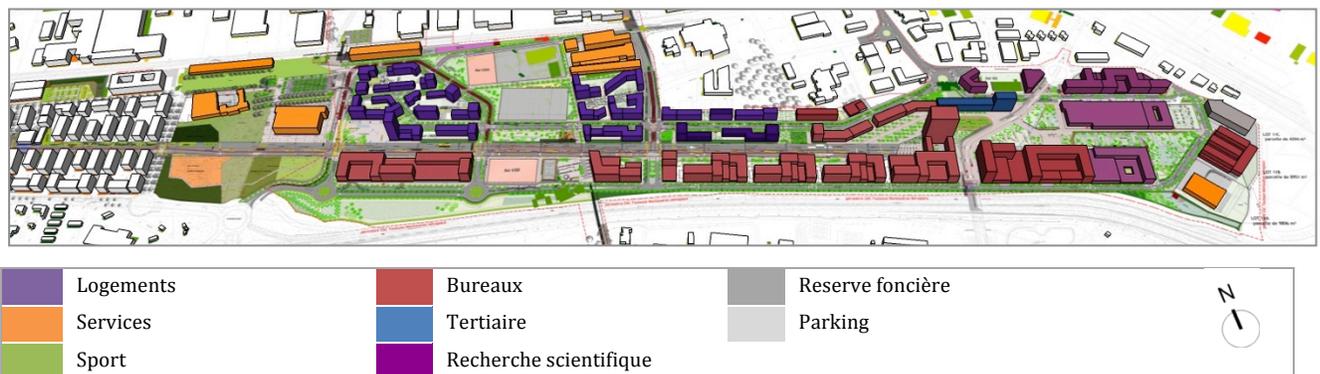


Figure 11 : plan d'aménagement urbain avec usages et environnement proche de la ZAC de Montaudran.

La ZAC comprendra différents équipements culturels, de recherche et d'espaces publics structurants, certains étant déjà construits.

Au nord :

- l'espace Mémoire de l'Aéropostale,
- la halle du conservatoire des mécaniques (en construction),
- la place centrale, cœur de ville du projet avec des commerces, des logements sociaux, privés, étudiants, des équipements publics,

Au sud, le campus avec :

- l'Espace Clément Ader de l'Université Fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées (livré en octobre 2014) qui réunit départements universitaires, écoles et laboratoires toulousains œuvrant dans le domaine du Génie Mécanique,
- l'Institut de Recherche Technologique « espace et systèmes embarqués » réunissant entreprises majeures, PME-PMI et universitaires,
- la Plateforme Fahrenheit qui accueillera 250 ingénieurs thermiciens,
- la Maison de la formation qui regroupera l'ensemble des formations (IUT, Université Paul Sabatier, INSA et ISAE) en mécanique et matériaux appliqués à l'aéronautique et au spatial.

4.1.2. Les espaces verts et les espaces d'eau de la ZAC

Pour le projet de ZAC Montaudran, une surface végétalisée (plantée et enherbée) d'environ 30ha a été prévue, soit 40% de toute la surface de projet (Figure 12).

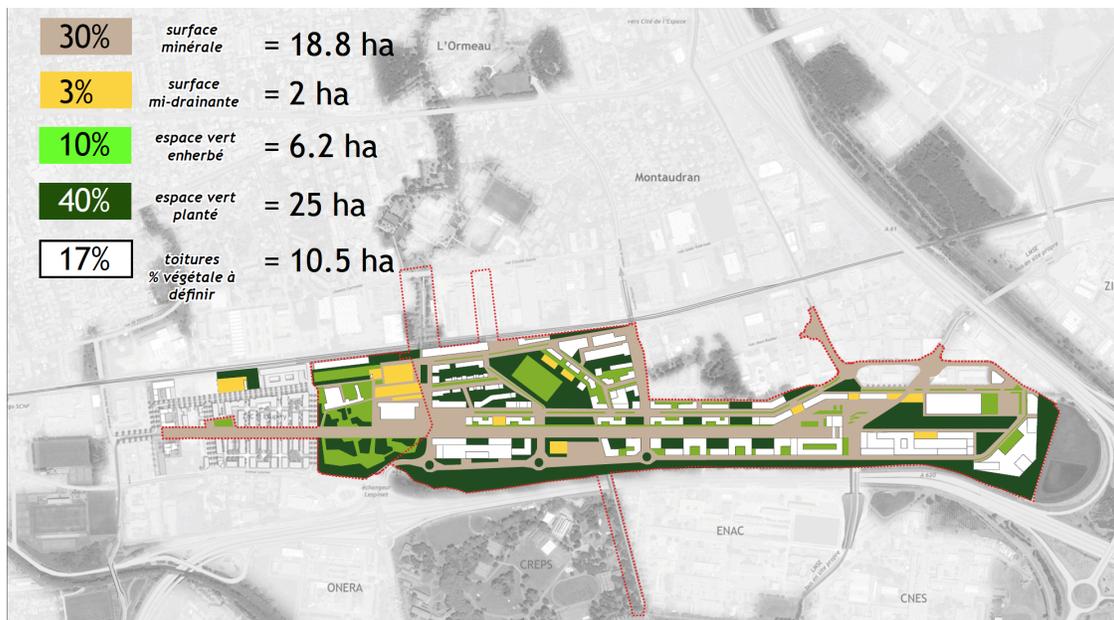


Figure 12 : plan d'aménagement des espaces verts pour la ZAC.

Les typologies végétales ont été déterminées par la maîtrise d'ouvrage, aménageurs et paysagiste en fonction :

- du Site : l'étude d'impact préalable à l'aménagement a permis de déterminer la flore spontanée et les groupements végétaux de référence pour une colonisation naturelle des espaces. Les résultats de cette étude ont été complétés par un repérage botanique d'espaces aménagés dans et autour de l'agglomération Toulousaine permettant de déterminer une palette d'essences locales au site qui soient adaptées aux conditions climatiques et agro-pédologiques du site. Le choix des essences végétales devra toujours se faire de façon à assurer une bonne adéquation entre les caractéristiques du site de plantation (luminosité, niveau de la nappe phréatique, exposition aux vents) et les exigences écologiques des espèces ;
- du projet : l'histoire du site au travers de la Compagnie Générale Aéropostale tout comme la présence des ateliers des Machines sur le long de la piste a déterminé la sélection de certaines essences « exotiques » vis-à-vis d'une flore endogène ;
- de la typologie déterminée par la ville de Toulouse : chaque espace à aménager sur le site est associé à un code « typologique » qui détermine la palette végétale associée (Figure 13). Une liste plus complète de toutes les essences végétales prévues dans le projet et considérées dans cette étude est présentée en Annexe 1.



Figure 13 : plan d'aménagement des espaces verts et spécifications des essences.

Quant aux espaces d'eau prévus, la ZAC a été dessinée pour limiter très fortement les rejets d'eaux pluviales en dehors de son périmètre. Les eaux pluviales doivent être drainées en plusieurs lieux afin d'être traitées et infiltrées. L'ambition de ce projet a été de faire du ruissellement un moteur de biodiversité afin de constituer une trame végétale plus pérenne et

de qualité (c'est à dire ?). En fonction de la qualité des sols et d'une pente quasi nulle, le principe de récupération des eaux pluviales est de constituer plusieurs bassins versants qui captent, drainent et infiltrent. Le site est structuré en 11 bassins versants de taille moyenne de 4 hectares reliés à un réseau de noues et à des bassins d'infiltrations pour récupérer les eaux de ruissellement et de toiture (Figure 14). Le principe est de pouvoir conserver sur le site le volume d'eau équivalent à une pluie trentennale sur 24 heures. Au-delà de cet évènement, les bassins débordent vers des bassins capables de gérer une pluie centennale. Les eaux des parcelles privées, toitures comprises, sont régulées en suivant les prescriptions du PLU. Les études en cours pourront imposer une gestion majeure avec un débit de fuite maximum de 10lt/sec/ha. L'excédent sera géré sur l'espace public.

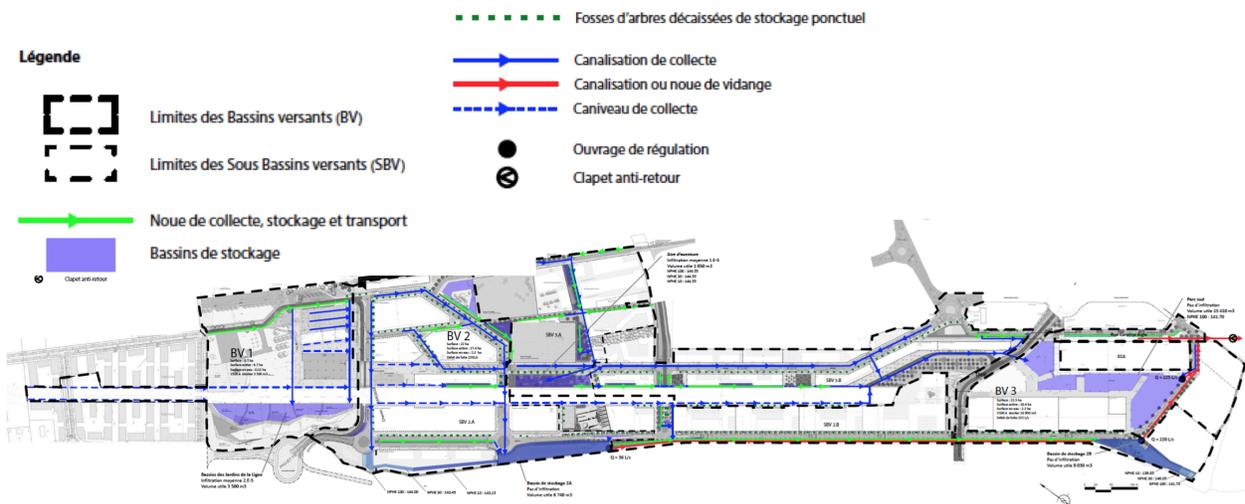


Figure 14 : plan d'aménagement des espaces d'infiltration et récupérations des eaux dans la ZAC.

4.1.3. Les contraintes et les opportunités de projet

A la lecture du projet et au travers des échanges menés avec la maîtrise d'ouvrage, la ZAC présente de nombreux points d'accroche pour envisager des dispositifs de réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Sur le volet *végétation et eau* :

- le projet de ZAC présente une grande surface d'espaces verts (densité bâtie brute de 0,63 relativement faible pour de tels projets), et une présence importante d'espèces arbustives et sylvicoles, au regard de la surface totale de la zone, qui permet d'envisager d'utiliser la végétation pour ces effets d'ombrage et d'évapotranspiration ;
- le projet de ZAC s'inscrit dans un réseau plus large d'espaces verts en lien avec les territoires adjacents qui pourrait éventuellement permettre de valoriser plus largement le rôle de la végétation sur le microclimat d'une zone élargie (e.g. campus universitaire, ZAC, etc.) ;
- le projet de ZAC affiche une volonté de capter les eaux pluviales dans un système de noues et d'étangs pour écrêter les effets des crues, réorienter l'eau sur les espaces

perméables là où la qualité du sol permet d'alimenter la nappe sans risque (faible pollution, perméabilité, etc.) ;

- le projet de ZAC affiche la volonté d'innover dans le traitement des eaux pluviales polluées (voirie, sol pollué) par l'action épurative d'une végétation spécifique. Ce dispositif de zones humides peut faciliter une participation au rafraîchissement local du microclimat urbain (e.g. stockage de l'eau, etc.) ;
- Une autre piste a été évoquée par la maîtrise d'ouvrage : équipé le site de fontaines d'eau, de miroirs d'eau ou de brumisateurs...

Sur le volet matériaux et isolation des bâtiments :

- la possibilité d'utiliser des matériaux clairs sur les bâtiments et la voirie publique (e.g. trottoirs, pistes cyclables) ;
- la possibilité de limiter le rayonnement nocturne des bâtiments (inertie thermique), en isolant les bâtiments par l'extérieur.

Sur le volet climatisation et énergie solaire :

- la limitation des usages des appareils de climatisation via une boucle collective de froid et une réflexion en cours sur des typologies spécifiques d'espaces de commerces (e.g. patios) ;
- la pause de panneaux solaires sur des toitures qui peut permettre un effet d'ombrage, si les panneaux ne sont pas intégrés aux toitures, et la production d'énergie solaire locale pouvant limiter la consommation électrique.

Sur le volet forme urbaine :

- une organisation urbaine le long de la piste historique de l'aéropostale dans l'axe des vents dominants qui peut favoriser un rafraîchissement en été.

Le projet présente aussi des contraintes :

- une forme tout en longueur, qui demande de planifier des zones de rafraîchissement locales du microclimat urbain tout au long de l'axe et d'anticiper les effets des espaces environnant (proximité au sud avec un réseau autoroutier large : 2 fois 2 voies et échangeur) ;
- une piste centrale en bitume sombre qui va créer une surchauffe en été ;
- une surface de commerces et services dans lesquelles la limitation de la climatisation est difficile pour des raisons commerciales.

Ces différents points ont aidé à sélectionner les différents scénarios explorés dans cette recherche (voir sous-chapitre 4.3).

4.2. Mesures aéroportées sur la ZAC Montaudran

Le premier rapport de synthèse du projet IFU avait mis en avant la complexité de la mesure des propriétés radiatives et la difficulté à constituer des sources de données exploitables. Nous avons donc fait le choix de nous concentrer sur le niveau de finesse adapté, pour réaliser des classifications de matériaux urbains en fonction de leurs propriétés radiatives. Cela nous semblait en effet un préalable nécessaire à des campagnes de mesures couteuses.

En collaboration avec l'ONERA, une mission intitulée « impact de la résolution spatiale et spectrale sur la classification des matériaux urbains » a donc été lancée au LRA.

L'objectif de l'étude est de comparer les résolutions de 4 types d'images (aériennes ou satellitaires), afin de déterminer l'impact de leur résolution sur l'identification de différents matériaux urbains.

Tableau 1 : Type d'images pouvant être utilisées pour la classification des matériaux urbains en fonction de leur propriétés radiatives.

		Instrument	Domaine spectral	N° bandes	Résolution spatiale
S A T E L L I T E	M U L T I S P E C T R A L	 Pléiades	0,4 μm – 1,0 μm (VNIR)	4 + 1 panchromatique	2,8 m (0,7 m bande panchromatique)
		 SENTINEL2	0.4 μm – 2.5 μm (VNIR+SWIR)	13	10 m, 12 m, 20 m, 60 m
	H Y P E R S P E C T R A L	HYPXIM	0.4 μm – 2.5 μm (VNIR+SWIR)	Hyper + 1 panchromatique	8 m (1,8 m bande panchromatique)
A V I O N		 HySpex	0.4 μm – 2.5 μm (VNIR+SWIR)	416	0,8 m pour le VNIR 1,6 m pour le SWIR

Nous avons choisi de travailler avec des images aéroportées HySpex de la campagne UMBRA sur Toulouse (Octobre 2012). Ces images correspondent en effet à la résolution spatiale et spectrale la plus fine. Elles ont donc été utilisées pour construire des vues aériennes de la ZAC de Montaudran correspondant aux autres types d'images pouvant être habituellement utilisées pour classifier des matériaux urbains en fonction de leurs propriétés radiatives.



Figure 15 : Images aéroportées HySpex de la campagne UMBRA sur la ZAC de Montaudran

Tableau 2 : Reconstitution des résolutions spatiales et spectrales d'autres types d'images à partir des images aéroportées HySpex

	N° Bandes	Résolution spatiale (m)
PLEIADES_1.6m	4	1.6
SENTINEL2_1.6m	9	1.6
Hyper_1.6m	245	1.6
SENTINEL2_9.6m	9	9,6
Hyper_8m	245	8

En utilisant ces images, nous avons ensuite réalisé une classification des matériaux urbains présents sur la zone de Montaudran (avant la construction de la ZAC). La méthode de classification utilisée est SVM et permet d'identifier 5 groupes de matériaux présentant des propriétés radiatives similaires :

- Voiries
- Toiture en tuile
- Toiture en métal
- Autre type de toiture
- Végétation
- Ombre
- Sol nu

4.2.1. Les mesures obtenues

Tableau 3 : Comparaison des précisions des différentes classifications en fonction de la classification.

	Coefficient Kappa	Précision globale
Hyper_1.6m	0,74	77,5 %
SENTINEL2_9.6m	0,71	75,9 %
SENTINEL2_1.6m	0,67	72,0 %
Hyper_8m	0,67	71,6 %
PLEIADES_1.6m	0.67	71.6 %

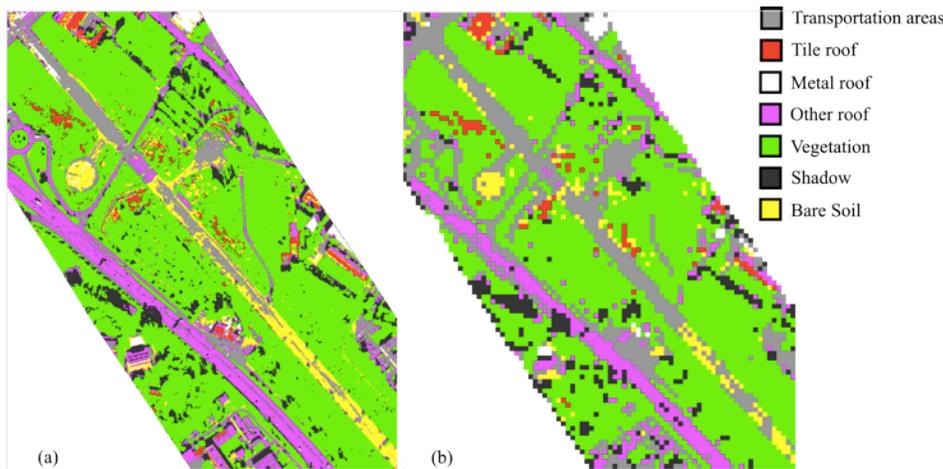


Figure 16 : Classification utilisant des images : (a) SENTINEL2_1.6m et (b) SENTINEL2_9.6m

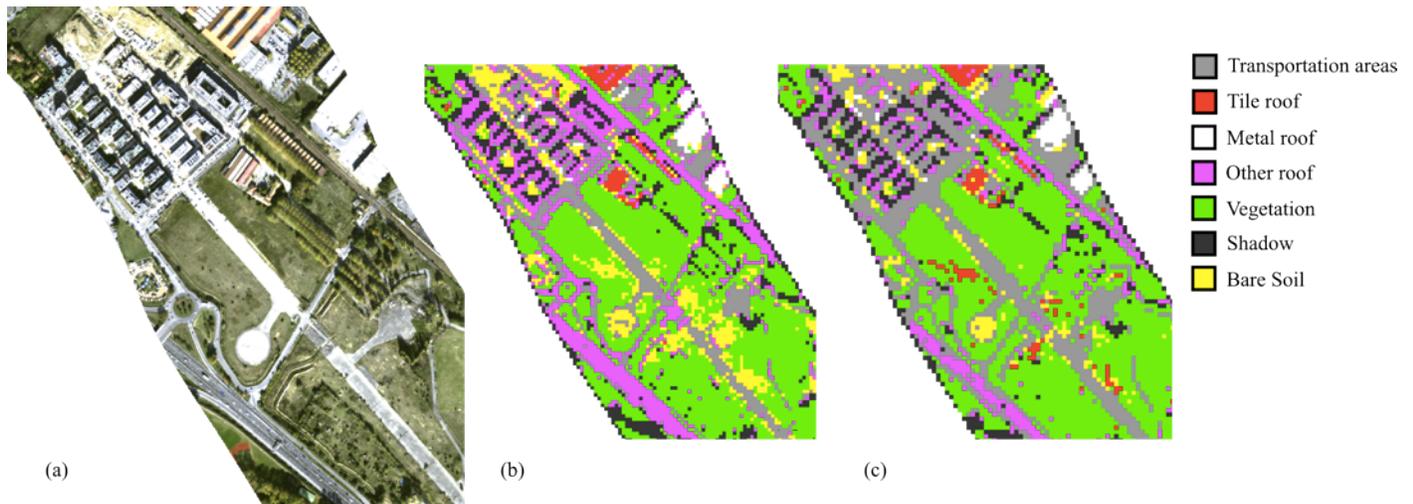


Figure 17 : (a) Vue aérienne de la zone. Classification utilisant des images : (b) Hyper_8m et (c) SENTINEL2_9.6m

L'analyse des résultats montre l'importance de la résolution spectrale. En effet, les images utilisant uniquement les longueurs d'ondes visibles et proche infra rouge (VNIR – entre 0,4 μm et 1,0 μm de longueur d'onde) ne sont pas suffisantes pour obtenir une classification correcte. Il est nécessaire d'avoir recours à des mesures intégrant également les infrarouges de courte longueur d'onde (SWIR - entre 1,0 μm et 2,5 μm de longueur d'onde).

Par ailleurs, ces résultats démontrent qu'une faible résolution spatiale peut être compensée par une plus grande richesse spectrale.

Au delà de ces résultats, cette étude nous a également permis de nous assurer que nous pouvions utiliser les valeurs usuelles d'albédo et d'émissivité pour les simulations microclimatiques de la ZAC de Montaudran. Les simulations initiales présentées utilisent donc les valeurs données par les bases de données de l'ONERA.

4.3. Une démarche hybride basée sur les fiches leviers d'action et les scénarios référents

Dans le cadre du projet IFU, nous avons développé une méthode permettant de faciliter le transfert des savoirs de la recherche vers les praticiens.

Pour cela, par une approche d'abord descendante (top-down), nous avons tenté de synthétiser et de vulgariser les savoirs des chercheurs sur les principaux facteurs influençant l'intensité de l'îlot de chaleur, dans des documents synthétiques que nous avons baptisé « fiches leviers d'action » (voir Annexe 2).

Dans une approche montante (bottom-up), nous avons présenté ces fiches leviers d'action à la maîtrise d'ouvrage et à l'aménageur, lors de plusieurs réunions de travail, pour déterminer avec eux le champ des « possibles » sur la ZAC Montaudran, que nous avons structuré dans des scénarii référentiels.

Nous avons ensuite simulé ces scénarii référentiels grâce à l'outil de modélisation thermo-hygro-aéraulique ENVI-met.

En effet, à partir des connaissances acquises dans une vaste revue de littérature dans le domaine du climat urbain et plus particulièrement sur les causes et les effets de l'îlot de chaleur urbain, nous avons élaboré un ensemble de fiches synthèse qui permet la vulgarisation des connaissances scientifiques et la présentation schématique du lien Climat-Ville-Energie. Nous nous sommes ici concentrés sur les leviers d'action potentiels permettant de réduire l'impact de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Nous avons ainsi proposé 13 fiches, regroupées selon les 4 principaux facteurs influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain :

Tableau 4 : Principaux facteurs influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

Matériaux	Forme urbaine	Couvert naturel	Émission de chaleur anthropique
<ul style="list-style-type: none"> • Revêtements urbains • Isolation / inertie 	<ul style="list-style-type: none"> • Densité • Prospect • Emprise au sol / Compacité • Protections solaires • Ventilation / Vents 	<ul style="list-style-type: none"> • Surfaces végétalisées • Hydrologie urbaine • Espaces en eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Climatisation • Usages • Capteurs solaires

Ces fiches sont divisées en quatre parties :

- une partie « généralités et définition » qui définit le levier d'action.

- une partie « valeurs de référence » qui donne des exemples concrets d'aménagement en rapport avec le levier d'action.
- une partie « impacts microclimatiques » qui explique comment le levier d'action peut agir sur le rafraîchissement urbain.
- une partie « interactions » qui renseigne principalement sur l'impact du levier d'action sur les consommations énergétiques

Ces fiches sont conçues pour permettre un temps d'échange, une discussion sur les marges de manœuvre dont dispose les acteurs sur le projet urbain. Elles sont limitées à une page recto-verso pour rester accessibles à un public non spécialisé.

Une partie schématique et synthétique en début de page résume le potentiel d'action de chaque levier sur l'îlot de chaleur urbain (flèche graduée de couleur verte), les effets négatifs (panneau attention) potentiellement induits par ce même levier. De plus, nous présentons un indicateur qui permet de mieux cibler et comprendre la variable énoncée (encadré gris).



Figure 18 : Partie schématique des fiches leviers d'action

Figure 19 : Trame des fiches « leviers d'action »

Les discussions générées lors de rencontres entre chercheurs et aménageurs autour de ces fiches ont fortement contribué à la formulation des hypothèses et des variantes référentielles du projet d'urbanisme présentées dans la suite de la recherche.

L'annexe 2 présente en détails ces fiches leviers d'action.

4.4. Elaboration de scénarios référentiels

4.4.1. Une double approche entre recherche et pratique

Notre approche a pour objectif de combiner les savoirs issus de la recherche et les pratiques des professionnels de l'urbanisme. Elle se fait donc en deux temps :

1. Évaluer les besoins / attentes / contraintes des praticiens pour déterminer les leviers d'actions envisageables parmi ceux qui ont été mis en avant par la revue de littérature.
2. Modéliser et évaluer les impacts de ses leviers sur le microclimat du site de Montaudran.

La première phase a été réalisée au cours d'une série de réunions de travail qui ont eu lieu entre février 2014 et mai 2015, en réunissant les acteurs du projet :

- *le maître d'ouvrage* : Toulouse Métropole,
- *l'aménageur* : Oppidéa
- *deux des partenaires du projet IFU* : le LRA et le LMDC

Ces réunions ont fait apparaître un ensemble de préoccupations qui sont présentées dans l'encadré ci-dessous, extraites du compte rendu de la réunion du 23 juillet 2014 et de la réunion du 12 mai 2015. Ces préoccupations représentent cependant un nombre de variantes / simulations trop élevé, au regard du temps de calcul nécessaire à tout logiciel de modélisation microclimatique. Nous avons donc sélectionné les scénarios les plus impactant en regard de l'étude bibliographique.

Mesures d'adaptations envisagées par la maîtrise d'ouvrage

Végétation :

- Impact de la végétalisation de la piste et des places
- Impact de la végétalisation des toitures et façades
- Impact de la végétalisation des cœurs d'îlot et des « quinconces ».
- Impact des terrains de sport synthétiques
- Noues avec de la végétation basse ou haute

Eau :

- Impact du parc humide (eau et végétation)
- Impact du stockage de l'eau pour l'irrigation (bassins ouverts et non étanches ou volumes de stockage fermés)
- Impact de dispositifs type miroir d'eau, fontaines ou brumisateurs

Formes urbaines :

- Impact de différentes configurations urbaines (variation du prospect, présences de patios)

Matériaux :

- Impact de différents matériaux dans les espaces publics
- Impact de différents matériaux de voirie
- Impact de différents matériaux de façade
- Revêtements de toiture contraints par la volonté d'équiper 50% des bâtiments de panneaux solaires.
- Revêtements synthétiques sur des aires de jeux (place St Exupéry) aux abords de la piste.

4.4.2. Mise au point des scénarios d'aménagement

L'objectif de cette recherche est de proposer des solutions d'aménagement permettant de créer des îlots de fraîcheur en période de canicule adaptées au projet de la ZAC en cours et aux conditions climatiques (climat tempéré) de Toulouse.

Nous entendons par là que les leviers d'action ne sont pas destinés à être appliqués à l'ensemble de la ZAC (ce qui serait trop coûteux), mais uniquement à un nombre limité d'espaces où les enjeux de confort thermique et d'impact sur la consommation énergétique peuvent être centraux surtout dans cette période estivale de canicule. Nous avons donc choisi d'étudier tout d'abord les espaces ayant un potentiel fort d'usage en été : les places, parcs, jardins et logements, ainsi que leurs abords.

Ces espaces ont été identifiés, suite aux réunions de travail évoquées précédemment, comme suit :

- les places de la ZAC de Montaudran (la place centrale et les parcs de récréation et sport),
- les cœurs d'îlot dans les zones accueillant des logements (les logements n'étant pas équipés de climatisation, les conditions hygrothermiques à l'extérieur du bâtiment sont primordiales pour le confort d'été).
- Le parc humide au Sud de la ZAC.

Il a donc été décidé de limiter les simulations à deux « zooms » : la Place Centrale et le Parc Sud où se trouvent les espaces collectifs représentatifs de la ZAC. Plusieurs scénarios seront testés sur une même zone de manière à ce que leurs impacts relatifs puissent être comparés.

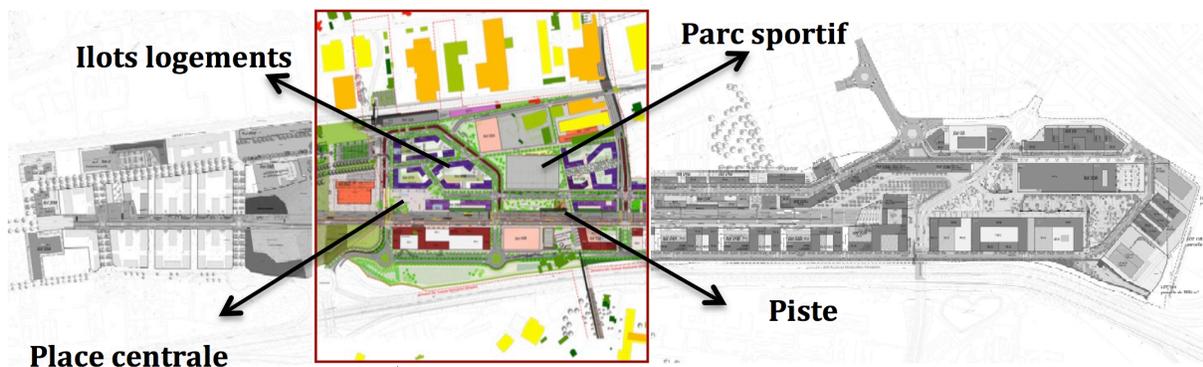


Figure 20 : Zone de simulation prioritaire sur la ZAC : la "Place Centrale".

Le parc humide assure plusieurs fonctions dans la zone Sud de la ZAC ; c'est un espace public majeur, lieu de rencontres entre la LMSE et la boucle du ring, entre l'ECA et la Maison de la Formation/IRT ; c'est un espace de stockage des eaux pluviales des bâtiments limitrophes ; il gère les eaux de voiries du ring ; et, enfin, il enrichit la biodiversité de la ZAC (aspects évoqués par la maîtrise d'ouvrage).

Le parc comprend un espace minéral (béton, granit, bois) qui concentre différents programmes: aires de détente, emmarchements, sport occasionnel, accès aux passerelles et au parc. Il assure la transition avec la partie végétale du parc. Son nivellement participera aussi à la gestion des eaux.

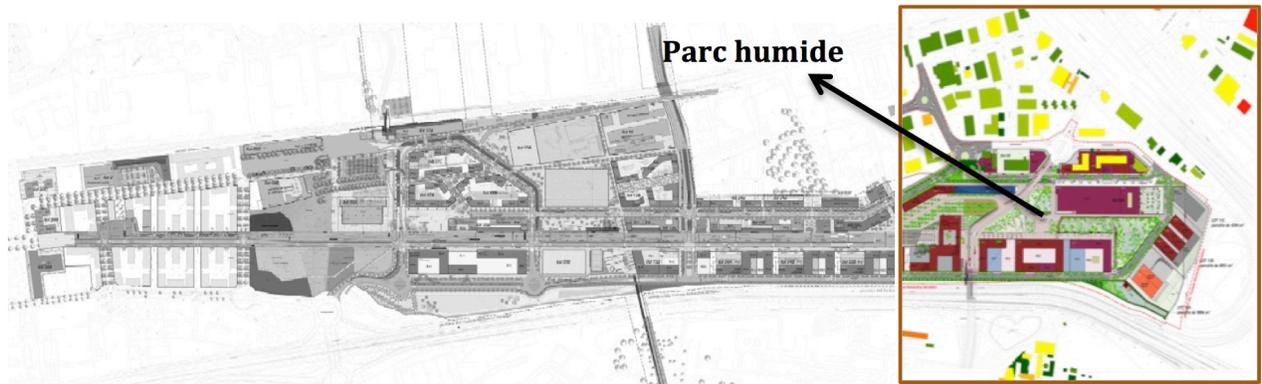


Figure 21 : Deuxième zone d'intérêt pour les simulations sur la ZAC : "le Parc Sud"

4.4.3. Scénarios sélectionnés

Sur chaque « zoom » nous testerons 4 grands types de dispositifs qui correspondent aux leviers d'action qui ont été identifiés comme impactant lors de la phase précédente de l'étude :

- Scénario *Bleu* : bassins d'eau avec fontaine dans les places ou parc de récréations et à proximité de la piste emblématique de la ZAC;
- Scénario *Vert* : densité végétale plus importante ;
- Scénario *Prospect* : prospect deux fois plus important que dans le projet initial ;
- Scénario *Blanc* : revêtements plus clairs que dans le projet initial (albédo plus fort).

Ces scénarios seront discutés plus en détail par la suite (chapitre 5).

4.5. Une étude par simulation numérique

Rappel de l'objectif du projet de recherche : nous cherchons à tester des alternatives d'aménagement urbain pour atténuer les effets d'îlot de chaleur urbain dans le futur quartier de Montaudran à Toulouse, ces effets influençant à la fois le **confort hygrothermique des piétons** et la **demande énergétique des bâtiments**. Ces alternatives concernent la forme urbaine, les matériaux de surface urbaine, et les surfaces naturelles (eau et végétation).

Étant donné la non-linéarité et la complexité des phénomènes du système climato-énergétique urbain d'une part, et les différentes échelles d'analyse impliquées d'autre part, il s'est avéré indispensable de tester un certain nombre d'outils de modélisation numérique dynamique du projet proposé à Montaudran, afin de permettre des analyses comparatives du potentiel relatif des différents leviers d'action possibles.

Notre échelle d'étude dans ce projet est l'échelle microclimatique. Elle correspond à une échelle spatiale horizontale de quelques centaines de mètres, et une échelle verticale correspondant à la sous-couche de rugosité. L'échelle temporelle est l'échelle horaire sur une journée d'été.

Cependant, la modélisation fine du microclimat et des échanges d'énergie avec le bâti est aujourd'hui confrontée à quelques difficultés majeures.

Le développement de plateformes de simulation basées sur la CFD (*Computer Fluid Dynamics*), multi-échelles et intégrant l'étude de phénomènes couplés, permet de répondre à la complexité des interactions physiques entre les variables de différentes natures, en résolvant des équations fondamentales dans toutes les mailles d'un domaine discrétisé, et couplant les équations traitant des échanges énergétiques entre les domaines fluides et les frontières solides. La difficulté principale de ce type de modèles est leur complexité, le temps de calcul, et le fait qu'il est difficile de réaliser à la fois une simulation microclimatique et une simulation énergétique du bâtiment, puisque, d'une part, les échelles spatio-temporelles sont différentes, d'autre part, le bâtiment est un système fermé alors que l'espace urbain est un système ouvert.

Enfin, l'usage de ces outils passe par une modélisation géométrique de l'environnement urbain. Une modélisation fidèle des flux échangés nécessite un couplage supplémentaire entre thermique interne et externe qui complexifie la résolution de la procédure numérique. Ainsi, des hypothèses simplificatrices et une physique appropriée sont requises pour aborder ces phénomènes. Des précautions doivent ainsi être prises pour obtenir des résultats cohérents.

Afin de répondre aux objectifs mentionnés précédemment, nous mettons en place dans cette étape de la modélisation numérique du projet, deux parties relativement indépendantes et complémentaires : (1) les simulations microclimatiques du projet original et des scénarios proposés, et, (2) les simulations énergétiques de l'impact de ces propositions sur la consommation d'énergie électrique en été.

4.5.1. Le choix d'un outil de référence

Une vaste gamme d'outils de simulation numérique est proposée aujourd'hui dans le cadre de la modélisation urbaine. Parmi ceux qui permettent le calcul du climat modifié par la présence de la ville, nous trouvons cependant un nombre très limité de modèles pouvant reproduire, avec un degré suffisant de précision, toute la complexité du système climatique urbain : calcul simultané et interactif du bilan radiatif, thermique, hydrique, aéraulique à plusieurs échelles, et en tenant compte des transferts entre l'air, la végétation, les bâtiments, et le sol.

Nous avons initialement réalisé une recherche sur les outils existants permettant de couvrir le plus largement possible l'ensemble des phénomènes climatiques et énergétiques. Dans un premier temps, nous avons retenu deux modèles numériques plus amplement employés dans le contexte actuel de la recherche et qui ont pu être comparés ou validés par des données réels : Solène-microclimat et ENVI-met 4.

Solène-microclimat permet de simuler le bilan radiatif et l'écoulement de l'air ainsi que les échanges convectifs et thermique à l'échelle du quartier et l'impact de cet environnement sur le confort extérieur et la consommation énergétique des bâtiments.

Un des points forts de Solène-microclimat est la possibilité de traiter des géométries urbaines « réelles » et pas seulement des formes comprises dans une grille. La prise en compte de l'inertie thermique des surfaces est également un atout.

Cependant, il ne tient pas en compte du bilan hydrique dans le bilan énergétique à l'échelle urbaine. Il ne considère que l'effet énergétique de l'évapotranspiration à l'échelle du bâtiment (par la présence des dispositifs tel que des façades vertes et des bassins d'eau placés contre les bâtiments).

Un autre inconvénient, qui a posé problème pour son application dans le projet IFU, est que le logiciel Solène-microclimat est actuellement en cours de réingénierie, et la partie correspondant aux calculs microclimatiques n'est pas encore complètement intégrée.

A l'instar de Solène-microclimat, **ENVI-met** permet de tester des hypothèses d'aménagement urbain et leur impact sur le microclimat, mais en intégrant une gamme plus complète de phénomènes physiques. Le modèle inclut le calcul de l'écoulement de l'air entre les bâtiments, l'impact de la végétation et des surfaces d'eau dans le microclimat, les échanges entre les surfaces du sol et les murs des bâtiments, la bioclimatologie ainsi que la dispersion des polluants. Toutefois, deux importants inconvénients s'imposent à l'heure actuelle : le logiciel ne permet pas encore le calcul énergétique des bâtiments, et le temps de calcul est extrêmement prohibitif (typiquement plus d'une douzaine de jours de simulation pour une journée type avec un calculateur puissant).

Malgré ces inconvénients, ENVI-met demeure aujourd'hui le seul logiciel permettant une simulation microclimatique réaliste à l'échelle du quartier. Cependant, pour pouvoir arriver jusqu'à un calcul estimatif de la consommation énergétique des bâtiments, nous avons jugé raisonnable d'intégrer un calcul simplifié permettant à partir des sorties des simulations microclimatiques obtenus avec ENVI-met, d'évaluer un écart de charges entre les différents scénarii.

4.5.2. ENVI-met : simulation microclimatique et du confort du piéton

ENVI-met est un modèle microclimatique en trois dimensions qui permet la simulation des interactions entre surface, plan et atmosphère dans le milieu urbain. Il permet de modéliser une scène urbaine à une résolution spatiale ajustable entre 0,5m et 10m (dans une grille allant jusqu'à 250 x 250), et une résolution temporelle minimale de 5 secondes (BRUSE, 2009).

Le modèle ENVI-met est composé de quatre principaux systèmes : sol, végétation, atmosphère et bâtiment.

Concernant **le sol**, ENVI-met permet de modéliser différents profils de sol et différentes surfaces en utilisant des sols naturels ou des matériaux artificiels pour chaque cellule/pixel de la grille. Pour les sols naturels, les transferts de chaleur et de vapeur d'eau sont pris en compte tandis que seul le transfert de chaleur est considéré pour les sols minéralisés. La température de surface du sol est calculée à partir du flux radiatif net, le flux turbulent de chaleur et de vapeur, et la conduction de chaleur dans le sol à la surface. L'albédo du sol naturel est déterminé par le modèle lui-même, en fonction de l'angle solaire incidente et de la quantité de l'eau dans la couche supérieure du sol.

Concernant **la végétation**, le logiciel permet la modélisation en 3 dimensions des arbres de différentes formes et de différentes distributions spatiales des feuilles. Chaque cellule de la grille de végétation a sa propre énergie et son bilan de masse. Pour le calcul des ombres portées, la végétation est traitée comme un milieu turbide et le coefficient d'atténuation est fonction du chemin optique du rayon solaire au travers de la canopée et de la densité de surface de la feuille (LAD). Cependant, l'atténuation du rayonnement diffus par la végétation n'est pas encore prise en compte.

Les équations de Navier-Stokes avec le modèle de turbulence standard ($E - \epsilon$) sont utilisés dans le système **atmosphère** pour estimer la turbulence et le champ d'écoulement aérodynamique.

Les principaux paramètres d'entrée pour une simulation ENVI-met comprennent : les données météorologiques, les profils d'humidité et de température initiale du sol, les structures et les propriétés des surfaces de sol, de la végétation et des bâtiments. Le modèle incorpore également la fonction «forçage simple» permettant de simuler différentes conditions météorologiques en forçant le modèle avec un profil de météo défini par l'utilisateur à un intervalle horaire. Les variables météorologiques personnalisables incluent le rayonnement

solaire direct et diffus incident, le rayonnement de grande longueur d'onde vers le bas, la concentration de fond de particules/gaz, ainsi que des profils verticaux (en 1D) des paramètres atmosphériques (tels que la température de l'air, humidité spécifique, la vitesse du vent et sa direction).

Ces profils météorologiques verticaux (à partir de la surface du sol jusqu'à 2500 m de hauteur) sont utilisés comme limites d'entrée latérale et supérieure du modèle principal (en 3D). Généralement, les informations du profil de l'atmosphère sont obtenues à partir d'observation type radiosondage. Toutefois, si ces informations ne sont pas disponibles, les données d'observation de la station météorologique au niveau du sol peuvent être interpolées temporellement et spatialement pour générer le profil complet en 1D. Les méthodes d'interpolation sont utilisées à partir d'un certain nombre d'hypothèses classiques: l'hypothèse de la stratification de l'atmosphère neutre est utilisée pour le profil de température d'air (température potentielle constante pour tous les niveaux) ; une simple interpolation logarithmique est appliquée pour le calcul du profil vertical du vent ; la direction du vent est maintenue constante à tous les niveaux ; le profil de l'humidité de l'atmosphère est interpolé linéairement, selon les données observées au niveau du sol et l'humidité spécifique d'entrée à 2500 m au-dessus du sol.

a) La Température Physiologique Equivalente (PET)

Pour compléter les analyses microclimatiques en vue de répondre à l'objectif initial de favoriser le confort thermique extérieur, nous évaluons la Température Physiologique Équivalente (*Physiological Equivalent Temperature* ou PET) à partir de données simulées. La PET est un indice de confort thermique basé sur un modèle d'équilibre énergétique humain qui intègre la température de la peau, du corps, le taux de transpiration et la température des vêtements, la dernière étant considérée comme une variable auxiliaire. Elle est basée sur le modèle à deux nœuds, proposé par Gagge et al. (1971), qui a été compilé et étendu par Hoppe (1999).

Nous pouvons la définir comme la température de l'air pour laquelle, dans une configuration intérieure typique (sans vent et sans rayonnement solaire), le bilan de chaleur du corps humain est équilibré avec la même température à l'intérieur du corps et sur la peau que pour de conditions extérieures complexes (HOPPE, 1999).

A partir d'une campagne de mesures et des enquêtes auprès d'un certain nombre de piétons, Matzarakis et Mayer (1996) ont établi une échelle des températures physiologiques (PET) pour les climats tempérés, basée une situation donnée, comme nous le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : intervalles de Température Physiologique Equivalente pour les différentes perceptions thermiques humaines et différentes degrés de stress physiologique; pour un métabolisme de 80W et pour une résistance vestimentaire de 0,9 clo (Matzarakis et Mayer, 1996).

PET	Perception thermique	Degré de stress physiologique
4°C	Très froid	Stress extrême dû au froid
8°C	Froid	Stress fort dû au froid
13°C	Frais	Stress modéré dû au froid
18°C	Légèrement frais	Stress léger dû au frais
23°C	Confort	Pas de stress thermique
29°C	Légèrement tiède	Stress léger dû à la chaleur
35°C	Tiède	Stress modéré dû à la chaleur
41°C	Chaud	Stress fort dû à la chaleur
	Très chaud	Stress extrême dû à la chaleur

b) Les conditions initiales et limites du modèle

La dernière version du projet de la ZAC Montaudran proposée par Oppidea et Toulouse Métropole a été mise à notre disposition pour les analyses climatiques et énergétiques. Ces données comprenaient le plan masse avec la géométrie (plan et hauteur) et quelques spécifications des matériaux des surfaces urbaines. Pour compléter ces données, il a fallu initialement intégrer les scènes urbaines autour de la future ZAC, afin de simuler les effets climatiques liés à la présence de la ville existante. Le projet a ainsi été complété avec les quartiers environnants à partir de la base de données BD-TOPO IGN (Figure 11).

Pour pouvoir initier les calculs (dynamiques) microclimatiques, une des sous-étapes méthodologiques les plus importantes vise à définir les conditions climatiques aux limites du modèle.

Comme on a pu le constater lors de la description du contexte d'implantation du projet urbain, dans le chapitre précédent, la ZAC de Montaudran est située à une distance équivalente du centre-ville de Toulouse, que l'aéroport de Blagnac, et, de ce fait, présente des conditions morpho-climatiques similaires. C'est pourquoi nous avons jugé tout à fait acceptable de considérer les données météorologiques enregistrées à Blagnac comme les données climatiques d'entrée de notre modèle numérique sur ENVI-met. Les données météorologiques horaires pour **la journée du 21 juin** (solstice d'été) ont été considérées pour l'analyse (Figure 22).

Ainsi que décrit précédemment, ENVI-met permet un forçage climatique simple, avec la température et l'humidité de l'air. Pour la vitesse et la direction du vent, nous considérons une vitesse moyenne observée par la station météorologique au niveau du sol qui est interpolée temporellement et spatialement pour le profil complet 1D (conditions imposées aux limites latérale et supérieure du modèle 3D) pour la journée concernée. Une simple interpolation logarithmique est appliquée pour le calcul du profil vertical du vent jusqu'à 2500m au-dessus du sol ; la direction du vent est maintenue constante à tous les niveaux.

Par ailleurs, nous avons tenu compte de la température et de l’humidité à l’intérieur du sol à plusieurs niveaux de profondeur. Ces données ont également été obtenues auprès de Météo France.

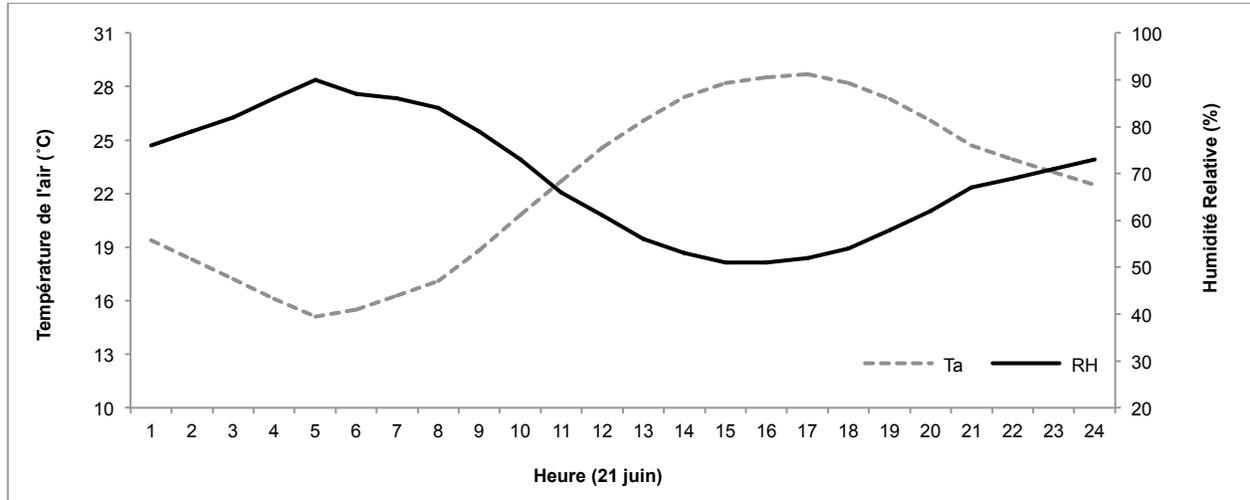


Figure 22 : Données météorologiques de température et d’humidité de l’air à Toulouse/Blagnac pour la journée d’été du 21 juin (METEOFrance, 2014).

c) La modélisation des essences végétales sur ENVI-met

Il nous a été possible de croiser les données du projet sur la future végétalisation de la ZAC, avec les bases de données végétales disponibles sur ENVI-met. Une recherche sur l’ensemble de caractéristiques jugées indispensables quant à la performance du végétal sur la mitigation des effets de l’îlot de chaleur a été réalisée sur les essences prévues dans le projet par les aménageurs, comme nous avons vu précédemment.

A partir de ces informations, nous avons listé et associé par équivalence, les espèces végétales de la ZAC avec les espèces modélisées sur ENVI-met (Figure 23). La présentation complète de cette étude est disponible en Annexe 1.

ZAC projet	Situation dans la ZAC	Nom commun	Feuillage	Port	Couronne	Système racinaire	Humidité sol	Croissance	Photo	Equivalents ENVI-met
Acer Ginnala		Erable de Mandchourie	Caduc. 5 à 10cm	3 à 5m	arrondi	superficiel, racines fines et nombreuses	Sec	rapide		Acer Negundo (Ash-leaved Maple)
Acer Monspessulanum		Erable de Montpellier	Feuille 3 à 6 cm	5 à 6 m. max : 15m	Arrondi et diffus	Traçant		Assez longue		Acer campestre (Field Maple)
Acer Palmatum "fireglow"		Erable du Japon	Caduc. Feuille 5 à 10 cm	3 m	Étalé	Superficiel et étalé		Lente		Acer campestre (Field Maple) - (Feldahorn)

Figure 23 : Caractéristiques de quelques espèces végétales prévues dans le projet de la ZAC et leurs équivalents modélisés dans ENVI-met.

3. Les scénarios et les résolutions spatiales d'étude

La modélisation géométrique d'un morceau de ville sur ENVI-met est faite à la main par la saisie de pixels (x, y et z). Les dimensions de ces pixels peuvent être ajustables entre 0.5m et 10m, dans une maille de « x, y et z » colonnes, dans la limite de 250 colonnes pour les axes « x » et « y » et 30 colonnes pour l'axe « z » (Figure 24).

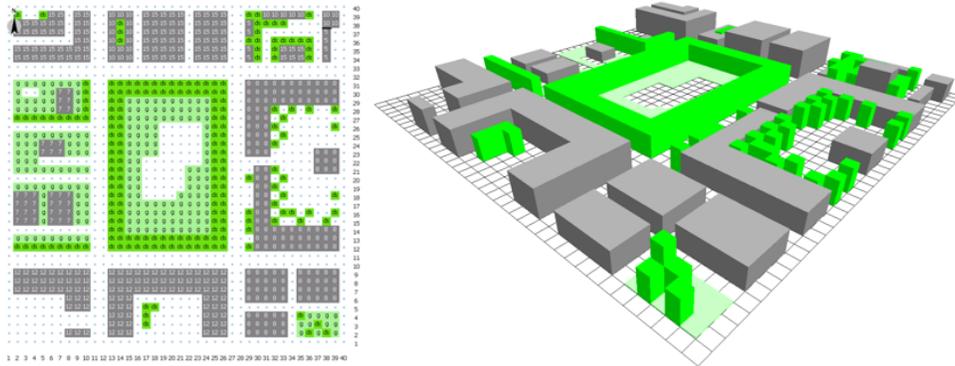


Figure 24 : Exemple de saisie de la géométrie urbaine et de la végétation par pixel sur ENVI-met.

Nous avons testé deux possibilités de mailles.

Étant données les dimensions du projet de la ZAC, de 2160m x 630m, comme nous le montre la Figure 25, la modélisation numérique de sa géométrie, y compris de ses environs proches, a impliqué un choix judicieux du pas de la grille d'analyse.

Dans un premier temps, nous avons défini une maille de 240 x 70 x 26 pixels dont chaque pixel correspondait à une résolution réduite, de 9m x 9m x 3m. Ce choix initial a permis de faire « rentrer » toute la géométrie correspondant au périmètre urbain de la ZAC et de ses abords et d'analyser la globalité du projet, mais avec une géométrie relativement « grossière » (Figure 26).

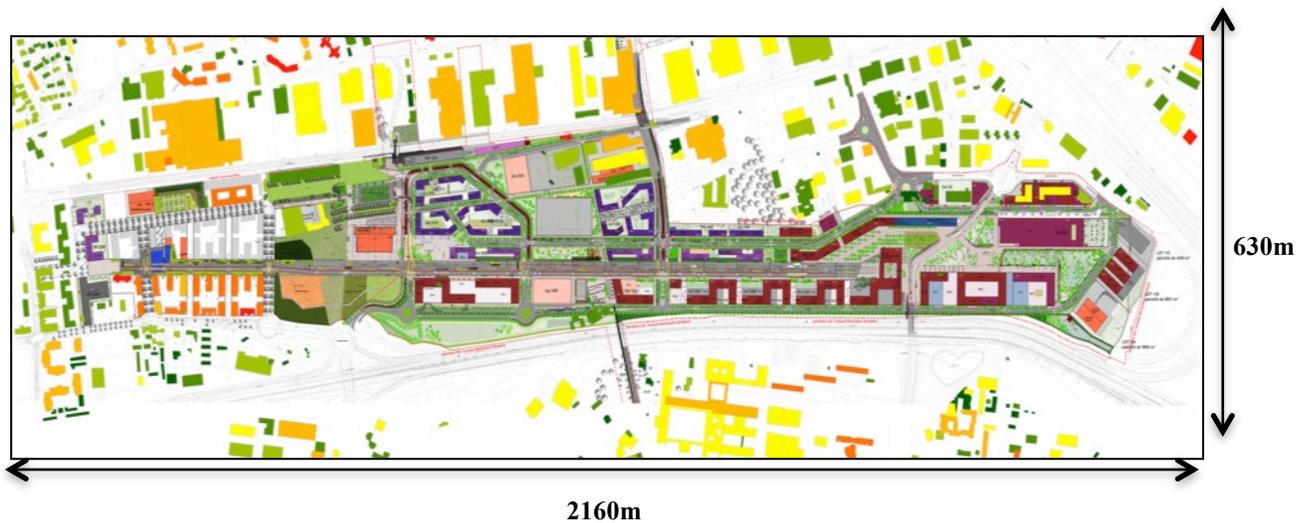


Figure 25 : le plan horizontal du projet de la ZAC Montaudran et de ses abords.

Cette première approche nous a permis de comprendre les principaux effets générés par la géométrie et les surfaces du projet et d'identifier les ilots de chaleur et de fraîcheur potentiels. Les avantages et les inconvénients de cette approche sont présentés par la suite ainsi que les analyses de quelques résultats obtenus.

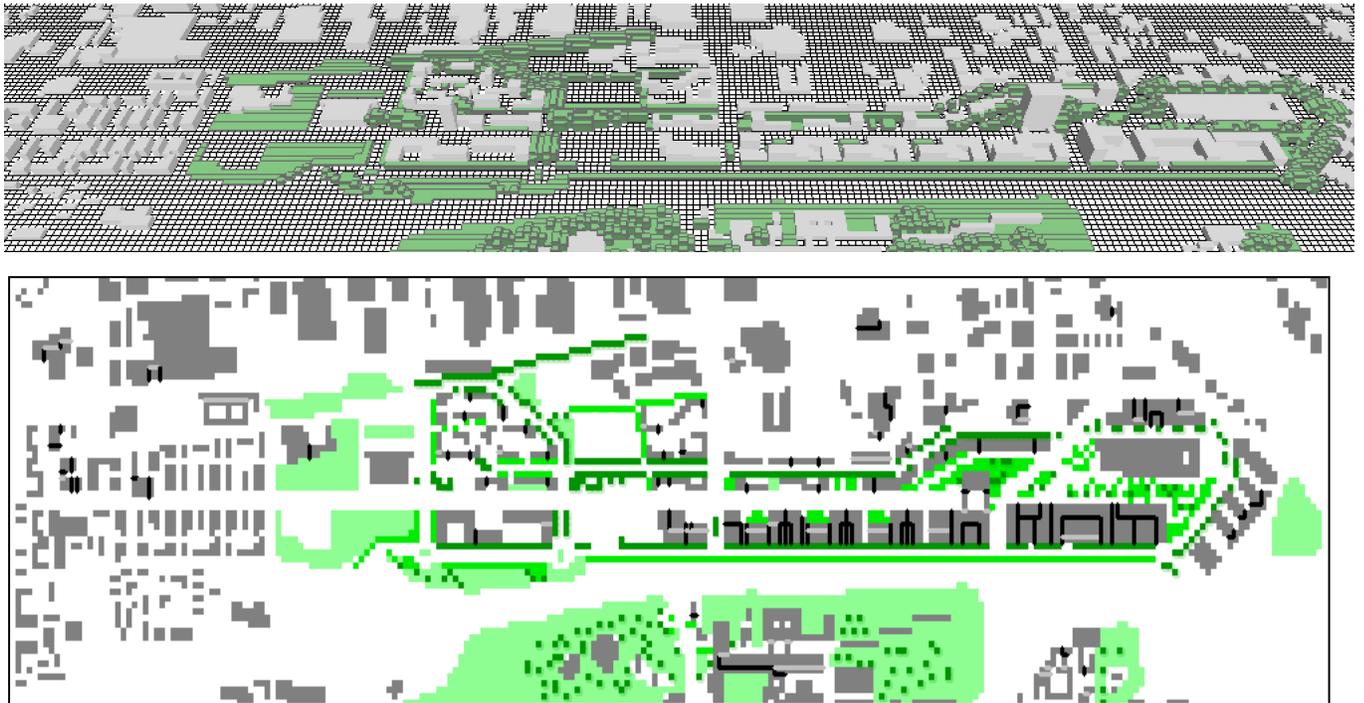


Figure 26 : le modèle du plan horizontal du projet de ZAC Montaudran et ses abords dans le domaine d'ENVI-met.

Dans un second temps, nous avons « zoomé » sur des zones de la ZAC correspondant à des espaces publics représentatifs où, par exemple, les effets du microclimat pourraient avoir un impact significatif sur le confort thermique du piéton. La maille comprenait 240 x 240 x 26 colonnes, mais avec des pixels de 3m, correspondant à une taille totale de 690m x 690m x 90m (Figure 27), donc une résolution trois fois plus importante que la maille précédente. Cela a permis également de tester plusieurs scénarios sur une même zone, avec plus de précision concernant la géométrie et la distribution des éléments (les arbres et les surfaces) dans la maille, de manière à ce que leurs impacts relatifs puissent être comparés.

Pour travailler les alternatives d'aménagement, les scénarios ont été générés à partir des leviers d'actions identifiés comme impactant lors de la phase d'étude bibliographique et de discussions autour des fiches leviers d'action (voir Annexe 2). Les scénarios évalués sont les suivants. Nous les avons d'abord appliqués à la zone de la Place Centrale au sein de la ZAC (Figure 28) :

Les scénarios de projets urbains à étudier pour la zone de la « Place Centrale »:

- Scénario Place initial (Base)
- Scénario Bleu : bassin d'eau (avec fontaine) plus ou moins proche de la piste, plus ou moins compact
- Scénario Vert : densité végétale plus importante (densité du projet initial x 1,5)
- Scénario Prospect : prospect deux fois plus important que dans le projet initial
- Scénario Blanc : revêtement plus clair que dans le projet initial (albédo plus fort sur les façades bâties)



Figure 27 : Partie de la ZAC autour de la Place Centrale (à gauche) et modèle créé à l'aide d'ENVI-met (à droite).

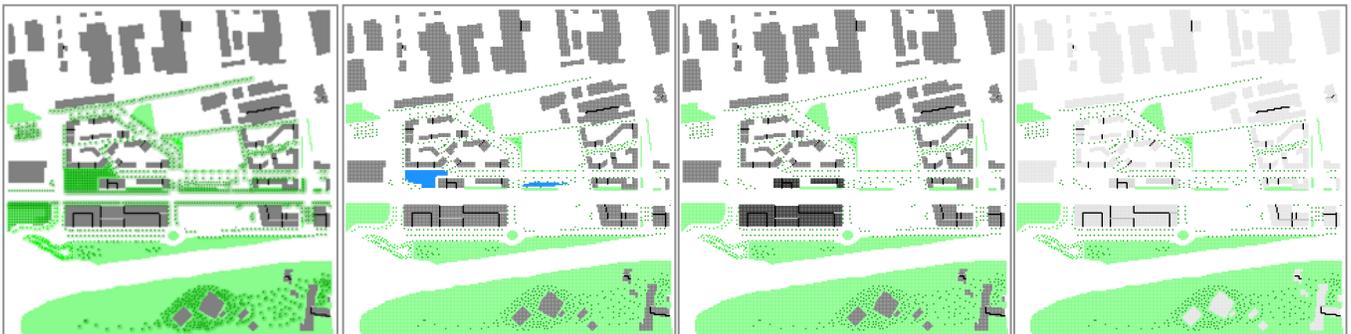


Figure 28 : les scénarios proposés pour la ZAC intégrant les différents dispositifs.
De gauche à droite : les scénarios vert, bleu, prospect et blanc.

Une deuxième partie de la ZAC est apparue comme intéressante à étudier pour la maîtrise d'ouvrage, lors d'une présentation et discussion des résultats partiels obtenus pour l'ensemble des simulations de la "Place Centrale" (réunion en mars 2015). Nous avons ainsi choisi de tester sur le "Parc Sud" de la ZAC (Figure 29), certains dispositifs ayant eu un impact plus prépondérant lors du premier jeu de simulations. Dans cette zone du projet, il est déjà prévu des dispositifs tels que des bassins d'eau et un nombre significatif de végétaux.

Nous avons donc évalué plus précisément cette zone telle qu'elle est prévue et également trois scénarii contrastés, comme nous montre l'encadré ci-dessous et la Figure 30.

Les scénarios de projets urbains à étudier pour la zone du « Parc Sud»:

- Scénario Sud initial (Base)
- Scénario Bleu : bassins existants plus larges et ajout de bassins supplémentaires (Forum)
- Scénario Vert : densité végétale deux fois plus importante
- Scénario Blanc : revêtements plus clairs que dans le projet initial (albédo plus fort sur toutes les surfaces).

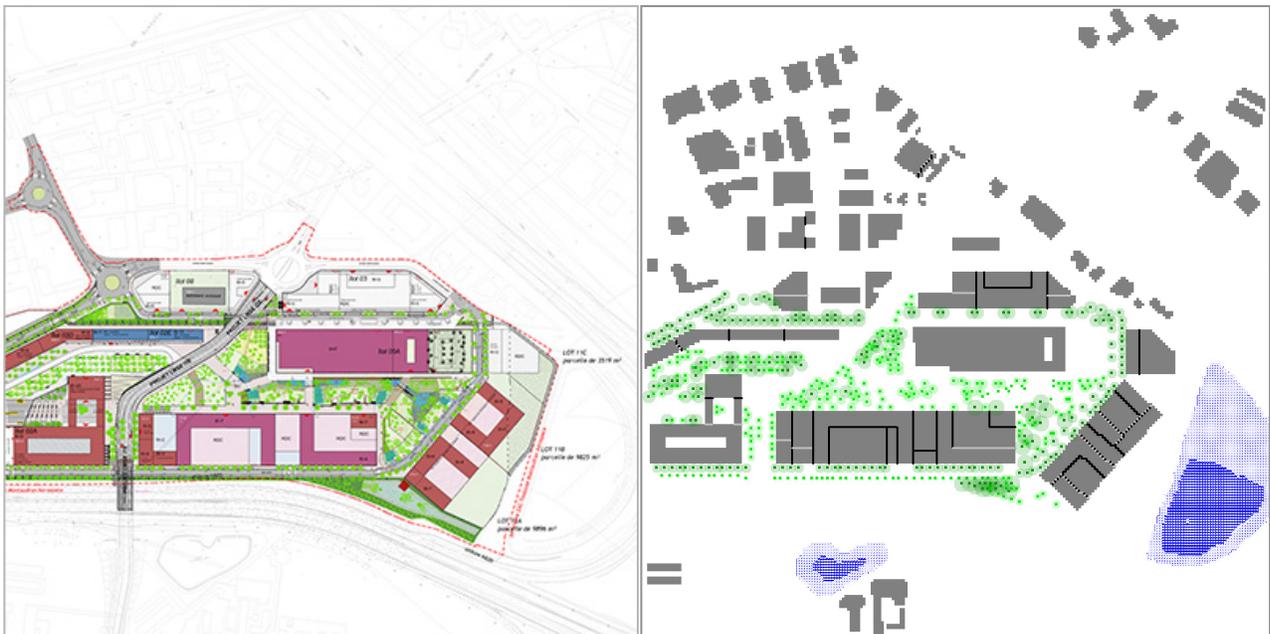


Figure 29 : morceau de la ZAC centré sur le Parc Sud (à gauche) et modèle créé à l'aide d'ENVI-met (à droite).

La variante « Verte » propose une végétalisation encore plus importante du Parc humide et plus étendue sur toute la ZAC. Une densité d'arbres plantée deux fois plus importante a été proposée dans ce scénario.

La variante « Bleue » propose deux nouveaux bassins avec fontaine autour du Forum (Figure 30) ainsi que des bassins plus étendus pour ceux déjà prévus.

La variante « Blanche » propose enfin des revêtements bien plus clairs pour toutes les surfaces des bâtiments ainsi que pour le sol. Un albédo de 0,8 pour les façades des bâtiments et un albédo de 0,5 pour l'ensemble du sol.

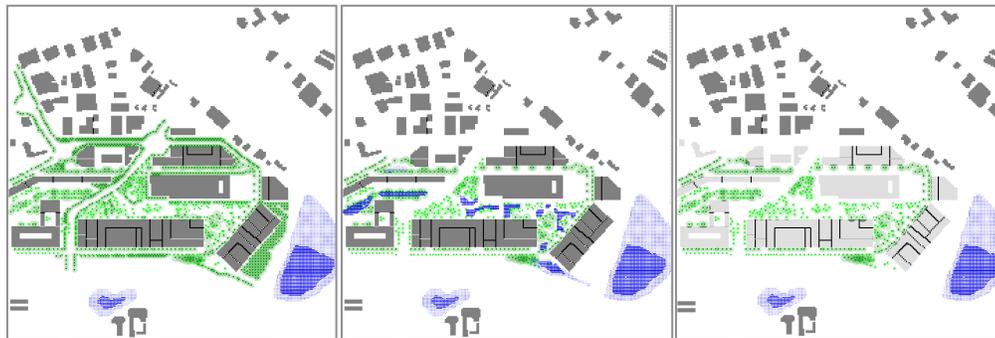


Figure 30 : les scénarios proposés pour la ZAC intégrant les différents dispositifs.
De gauche à droite : les scénarios vert, bleu et blanc.

4.5.3. Interprétation, génération et évaluation automatiques de données

A partir des résultats des simulations, ENVI-met permet d'extraire des cartes microclimatiques par heure et par variable climatique, grâce à une application créée à cet effet, baptisée « Leonardo ». Néanmoins, le processus d'extraction des données sur « Leonardo » peut être extrêmement lent et très peu pertinent pour les analyses envisagées dans ce travail, dans la mesure où on ne s'intéresse pas aux valeurs individuellement des scénarii, mais aux écarts relatifs entre eux et le projet initial.

Afin de pouvoir traiter de manière efficace et automatique le volume très important de résultats de simulation obtenus (environ 250 Mo de données), une chaîne d'outils d'extraction et de traitement des données a été développée et mise en œuvre par le LRA. Elle est basée sur le développement de bibliothèques de lecture des fichiers de simulation (données d'entrées) et des différents formats de fichiers de résultats des simulations (caractéristiques physiques de l'atmosphère, thermiques des bâtiments, physiologiques,...) en langage Python (Figure 31).

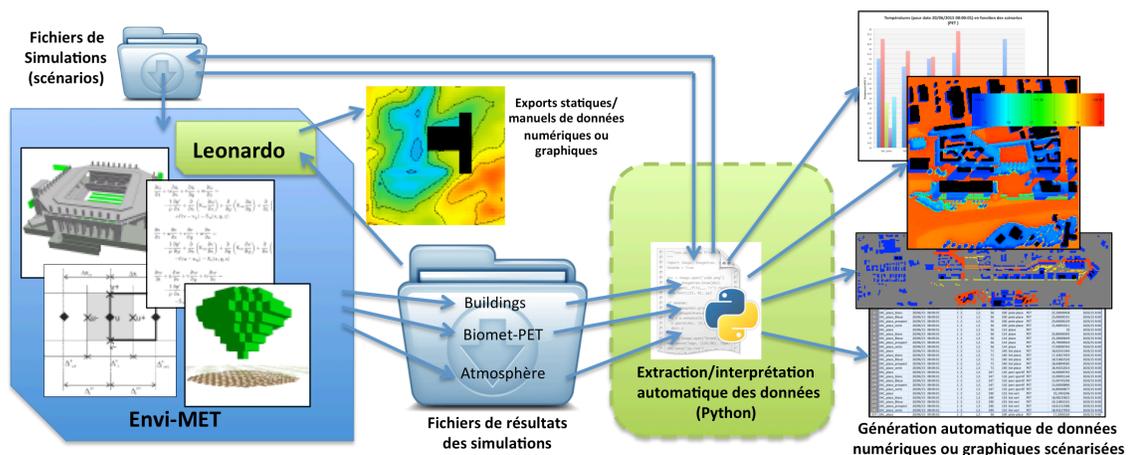


Figure 31 : Illustration schématique du processus d'extraction et traitement des données des simulations.

Elle facilite l'interprétation de ces résultats en proposant des fonctionnalités spécifiques mettant mieux en évidence les caractéristiques liées à l'analyse microclimatique et du confort thermique. Parmi ces fonctionnalités, sont proposés :

- l'extraction/agrégation pour des périodes temporelles déterminées (pas de temps, journée complète, heures spécifiques ...) avec échelle de variation/représentation commune (même échelle), assemblage spatial d'ensembles de simulations distinctes mais géoréférencées (pour augmenter l'étendue de la zone globale de simulation grâce à plusieurs simulations séparées) et ayant des références d'échelles communes (Figure 32),

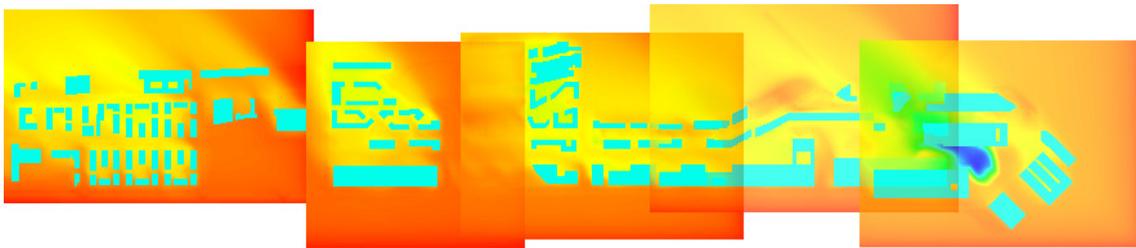


Figure 32 : exemple d'assemblage géoréférencé automatique pour les premières simulations.

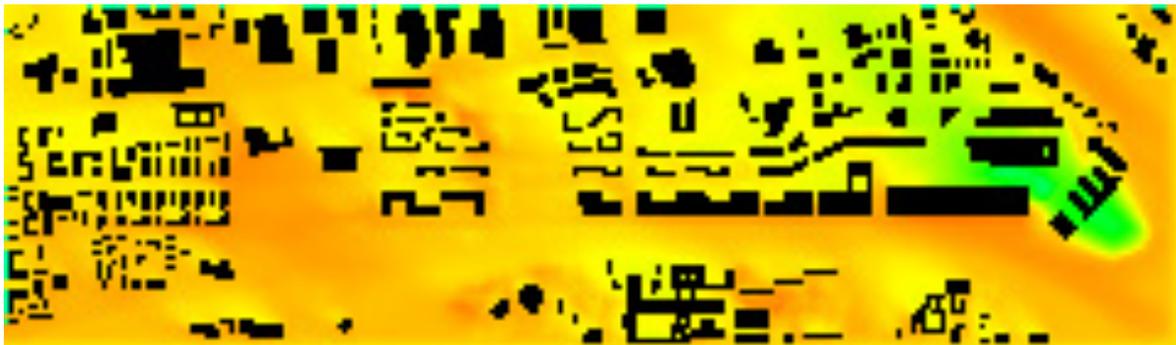


Figure 33 : exemple de carte microclimatique obtenue automatiquement par la méthode d'extraction des résultats mis en œuvre.

- une analyse quantitative (calcul des valeurs minimales, maximales, moyennes,...) aux différentes échelles,
- l'extraction automatique de valeurs de variables en des points caractéristiques (ponctuels, selon un itinéraire,...),
- la consolidation de données (fichiers CSV) et création (semi-)automatique de courbes pour chacune des variables ou emplacement étudiés,
- le calcul de cartes des écarts de valeurs de variables par rapport à un scénario de référence (impacts sur le rafraîchissement, le réchauffement,...) (Figure 33),
- le calcul d'indicateurs énergétiques simplifiés à partir des valeurs de températures de surface des bâtiments (charges de climatisation,...),

- l'extraction de représentations graphiques évoluées (animation 2D, modélisation 3D,...).

A terme, il est également envisagé de pouvoir générer de nouveaux scénarios de simulations en modifiant automatiquement les caractéristiques de certains éléments de l'environnement du projet (modifications des prospects, densification de la végétation,...).

4.6. Méthode d'estimation des variations des charges thermiques des bâtiments liées aux différents scénarii

Afin d'estimer l'impact des différents scénarii sur les charges de climatisation des bâtiments de la ZAC, nous avons procédé à un recensement des origines de ces charges à partir de méthodes classiques (ASHRAE, AICVF, Costic, Carrier, etc.), que nous avons ensuite adaptées aux données disponibles à la sortie de nos simulations ENVI-Met v3. La version du logiciel utilisée pour cette étude ne nous a pas permis d'avoir accès directement aux modifications de charges de ces bâtiments. L'utilisation de Citysim couplée à ENVI-Met n'a pas non plus été possible (incompatibilité entre données, formats d'échanges, données manquantes...).

4.6.1. Recensement des différentes charges à prendre en compte

Les méthodes usuelles de calcul des charges distinguent toutes les mêmes typologies de charges thermiques appliquées aux bâtiments.

a) Apports par les parois

Parois opaques : conduction ET rayonnement solaire

Parois vitrées : conduction ET rayonnement solaire

b) Charges internes : Occupants ; Process ; Eclairage ; Charges liées au renouvellement d'air

Dans le cas du projet IFU, nous cherchons à évaluer le différentiel de charges (écart relatif) entre le cas de base et les scénarios étudiés. Ainsi, il est possible de considérer, en première approximation, que certaines charges ne seront pas modifiées par les scénarii envisagés (occupation, process, rayonnement solaire, etc.). Il paraît alors pertinent de ne conserver que :

Apports par les parois

Parois opaques : conduction

Parois vitrées : conduction

Charges liées au renouvellement d'air

4.6.2. Hypothèses de calcul et traduction pour les bâtiments du projet

a) Paramètres thermophysiques

Les coefficients de transfert de chaleur des différentes parois ne sont pas connus en détail pour l'ensemble des bâtiments de la ZAC. Ces bâtiments (bureaux, logements, etc.) étant neufs ou à construire, nous avons retenu les coefficients U ayant un ordre de grandeur conforme aux bâtiments BBC (de niveau RT2012, celle-ci n'ayant pas à proprement parler d'exigence sur ces valeurs).

Ainsi, nous avons retenu :

Paroi opaque verticale : $U = 0,2 \text{ m}^2.K/W$

Paroi opaque horizontale : $U = 0,13 \text{ m}^2.K/W$

Vitrage : $U = 1,5 \text{ m}^2.K/W$

b) Géométrie

La géométrie des bâtiments (dimensions des parallélépipèdes) est connue, ce qui nous permet d'estimer les surfaces d'échange. Le détail des surfaces vitrées n'est pas connu actuellement pour tous les bâtiments du projet. Nous avons donc utilisé un ratio pour estimer la surface vitrée.

c) Conditions aux limites

Pour évaluer ces charges, nous disposons en sortie d'Envi-MET de la température de surface des parois extérieures de chaque bâtiment. Le coefficient de transmission thermique U de chaque paroi est alors modifié de la façon suivante : ayant accès directement à une température de surface, la résistance thermique de la paroi est donc recalculée pour prendre en compte le fait que l'échange superficiel h_e n'a pas à être prise en compte.

La température intérieure, elle, est supposée constante à 25°C.

d) Apports par renouvellement d'air

Dans les bâtiments récents, les apports (ou déperditions en hiver) par renouvellement d'air occupent une part très importante dans le bilan thermique. Leur calcul est basé sur le premier principe de la thermodynamique (bilan sensible uniquement). Le débit de ventilation utilisé est basé sur un ratio de 20 m³/h par personne présente dans les bâtiments.

e) Inertie thermique

N'ayant pas accès à l'ensemble des données pour la ZAC (ni même pour une partie de cette ZAC), il était extrêmement difficile de prendre en compte correctement les effets d'inertie. Le

choix a été fait de travailler en régime permanent, de ne pas prendre ne compte les phénomènes d'intermittence (pour les bureaux par exemple). Même si cette approche mériterait d'être améliorée à l'avenir, plusieurs éléments doivent être relevés :

L'objectif ici était d'effectuer une estimation de la variation des charges et non un calcul absolu.

Certains logiciels de calcul thermique des bâtiments développés pour des climats chauds (comme NEST par exemple) ont fait le choix de ne pas traiter l'inertie thermique (calcul statique). Les comparaisons des sorties de ces logiciels avec les données issues de la procédure BESTET donnent de très bons résultats, pour des temps de calcul relativement courts.

Quelques pistes existent pour améliorer cette prise en compte de l'inertie thermique.

D'une part, la méthode de calcul des charges de l'AICVF propose la notion de température extérieure virtuelle qui permet (en modifiant le coefficient de transmission U des parois comme indiqué par l'AICVF dans la méthode) d'intégrer à la fois le flux solaire et les effets d'inertie. Cette température est définie comme une température fictive dont l'écart avec la température intérieure occasionne le même flux que celui dû à l'ensoleillement et à l'inertie de la paroi.

D'autre part, [Gros, 2014 et 2015] qui ? propose une méthode d'évaluation de la demande énergétique d'un quartier basée sur un modèle utilisant la méthode des facteurs de pondération prenant en compte l'ensemble des gains et les effets d'inertie. Comme dans cette étude, différents scénarii sont aussi testés, les résultats traduits en kWh/m² ou degrés-jours.

4.6.3. Mise en œuvre de cette méthode

Extraction des sorties d'ENVI-met en termes de classes de surfaces de façades par températures de surface.

Grâce aux méthodes d'extraction automatique de valeurs de variables mises en œuvre sur les fichiers de sortie d'ENVI-met par le LRA, nous avons pu obtenir les valeurs des températures de surface de toutes les façades et toitures du projet. Nous avons regroupé ces valeurs en classes équivalentes (correspondant typiquement à une plage de températures de 1°C).

Estimation des transmissions thermiques par classes (titre ?).

Pour chacune des classes de température de parois, nous avons estimé la valeur des gains thermiques, à partir du produit du coefficient U corrigé, par la surface de la classe i concernée et par la différence de température entre la température de surface de la classe i et la température de consigne intérieure retenue (ici 25°C), par la formule :

$$\boxed{Gains_i = U_c * S_i * (T_{s_i} - T_c)} \quad \text{(Equation 1)}$$

Calcul des transmissions thermiques totales par scénario.

Pour chaque scénario, nous avons sommé l'ensemble des gains (comptés positivement) sur l'ensemble des classes, pour obtenir les transmissions thermiques totales.

$$\boxed{Gains = \sum_i Gains_i} \quad \text{(Equation 2)}$$

Cette approche qui peut sembler très simplifiée par rapport à la finesse que l'on peut obtenir avec les outils traditionnels du thermicien bâtiment, basés sur des modélisation dynamiques multizones, reste toutefois compatible avec nos hypothèses de travail : échelle du quartier plutôt que du bâtiment ; informations non connues au stade de la programmation de la ZAC sur les matériaux qui seront utilisés dans les bâtiments de la ZAC, et leur répartition (taux de vitrage, par exemple) ; recherche de valeurs relatives robustes (comparaisons entre variantes), plutôt que valeurs absolues (charges thermiques horaires) ; calcul des charges à l'échelle de la journée, plutôt que de l'heure...

Les résultats de la partie *charges thermiques des bâtiments* sont présentés dans le chapitre 5-4.

5. Résultats

5.1. Impact du projet intégrale de la ZAC sur le microclimat

Pour permettre des analyses comparatives entre le climat produit dans les différentes zones du nouveau quartier urbanisé de la ZAC et les données climatiques de zones moins urbanisées (tel que les données obtenues pour Blagnac), nous avons choisi quelques points remarquables dans le projet. Cinq points ont ainsi été choisis : (1) la place centrale, (2) l'ancienne piste d'atterrissage de l'aéropostale, sous influence de la place centrale, (3) un îlot plus fermé et végétalisé proposé par le projet, (4) la piste d'atterrissage plus au centre de la ZAC et, (5) la zone sud du projet où se trouve une zone humide comportant un bassin d'eau existant. Une illustration des points analysés, pour lesquels les résultats climatiques ont été extraits, est présentée ci-dessous (Figure 34).

La Figure 34 illustre également une importante caractéristique de la forme bâtie des points examinés : le facteur de vue du ciel (FVC). Nous pouvons remarquer, par exemple, que « l'îlot vert » présente une forme bâtie relativement plus enclouée que « la zone humide ». Cela nous permettra, parmi d'autres paramètres de la forme, de comprendre l'influence de certains dispositifs sur les modifications microclimatiques entraînées.

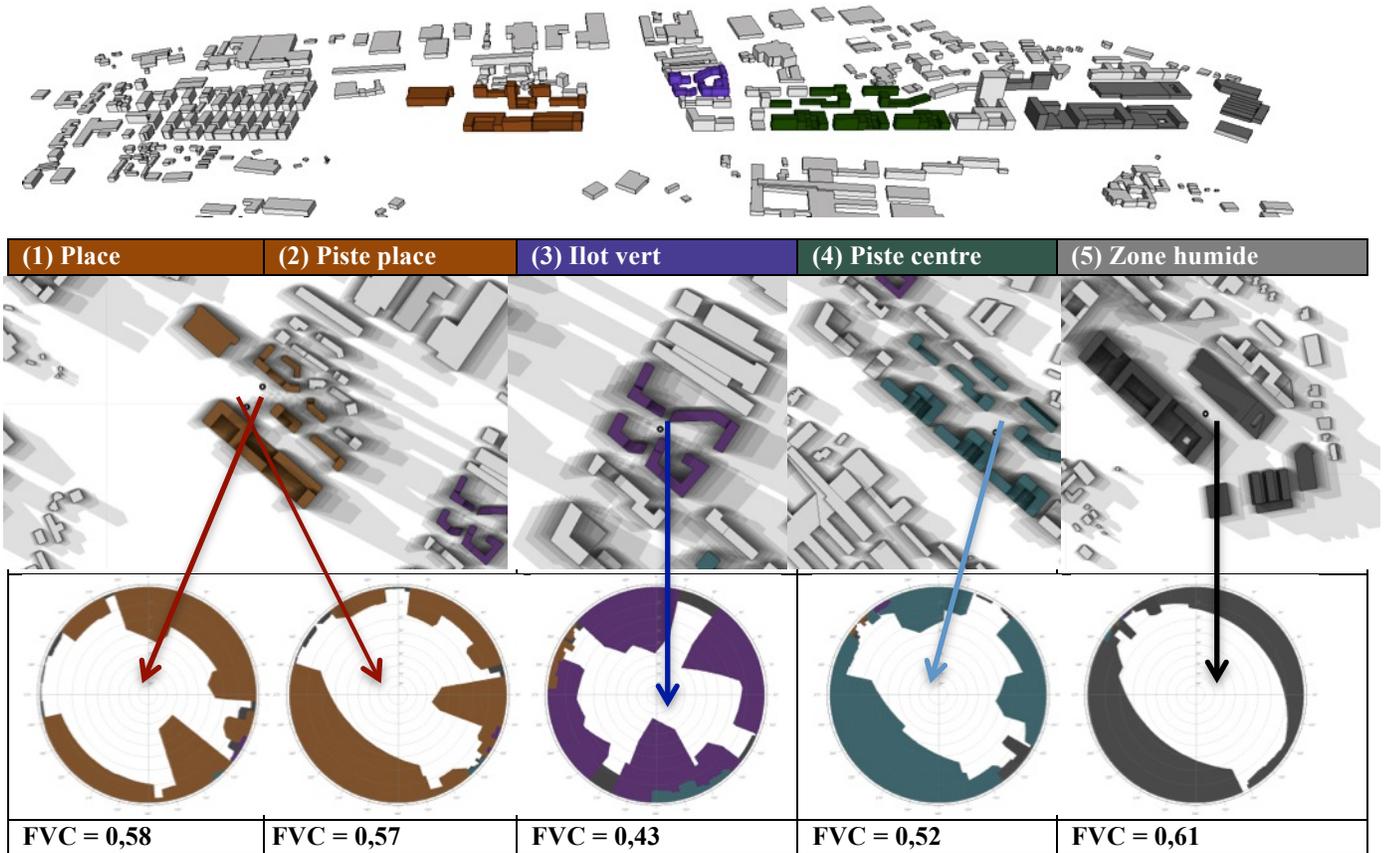


Figure 34 : Cinq points choisis dans la grille d’analyse du projet de ZAC pour extraction des résultats microclimatiques et le Facteurs de Vue du Ciel (FVC) correspondant.

A partir des résultats obtenus pour chaque pixel de notre grille d’analyse, il nous a été possible de générer des rendus graphiques, par heure et par variable climatique (température de l’air, humidité relative, température moyenne radiante, vitesse du vent, etc.). Cela nous a permis de comprendre l’évolution spatiale et temporelle des phénomènes climatiques.

Ensuite, à partir des points choisis, nous avons pu comparer les valeurs obtenues au droit de chaque pixel et les données météo (Figure 35).

Pour illustrer cette approche, nous pouvons analyser quelques sorties graphiques pour la distribution spatiale et temporelle des valeurs de température de l’air dans le projet de la ZAC (Figure 36). On peut remarquer une hétérogénéité importante de la température tout le long de la journée. Cependant, un écart plus fort entre les températures minimales et maximales peut être vérifié dans les heures les plus chaudes (entre 12h et 18h). Dans la nuit, à partir de 21h, il est possible de vérifier de façon plus remarquable l’effet de l’îlot de chaleur urbain avec des températures plus élevées, par exemple, sur l’ancienne piste d’atterrissage qui conserve une surface en goudron dans le projet. D’autre part, nous pouvons également remarquer un important effet de l’îlot de fraicheur induit par la présence d’un bassin d’eau et d’une densité végétale plus importante.

Résultats simulation - Température de l'air (°C)

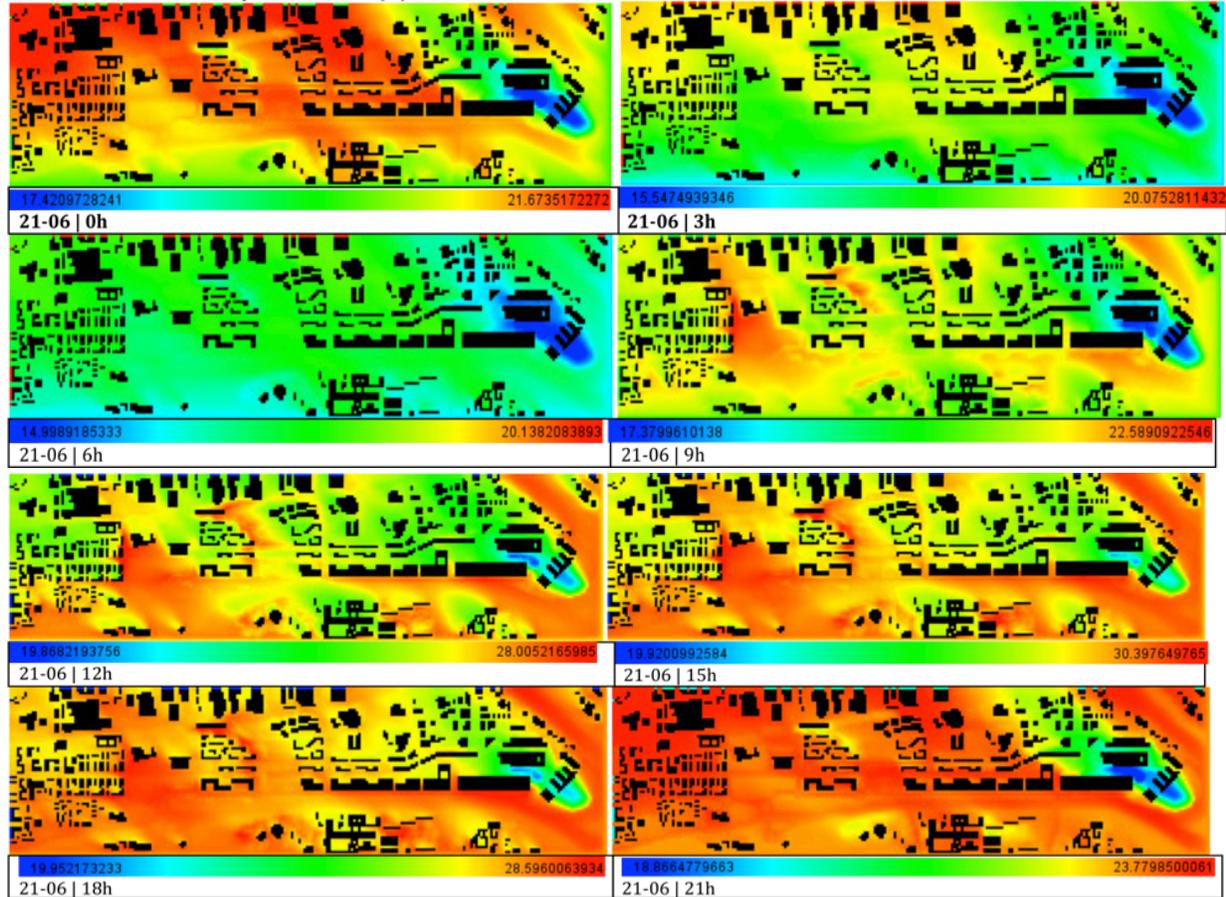


Figure 35 : Distribution spatiale de la température de l'air entre 0h et 21h pour sur l'ensemble du projet de la ZAC.

Dans le graphique présenté ci-dessous, toujours pour la même variable climatique, nous pouvons mettre davantage en évidence l'effet de l'îlot de chaleur sur tous les points examinés, par rapport aux données météo, sauf dans la « zone humide ». En début de journée, les températures sur tous les points sont moins importantes que celle enregistrée dans la campagne (météo), de part l'effet des ombres portées et des masques solaires produits par la présence de la masse bâtie, et la nuit, les températures sont plus élevées pour les points urbains (quand la masse thermique de la structure urbaine restitue la chaleur reçue pendant la journée). Plus la vue de ciel est importante, plus cette chaleur accumulée pourra être facilement dissipée.

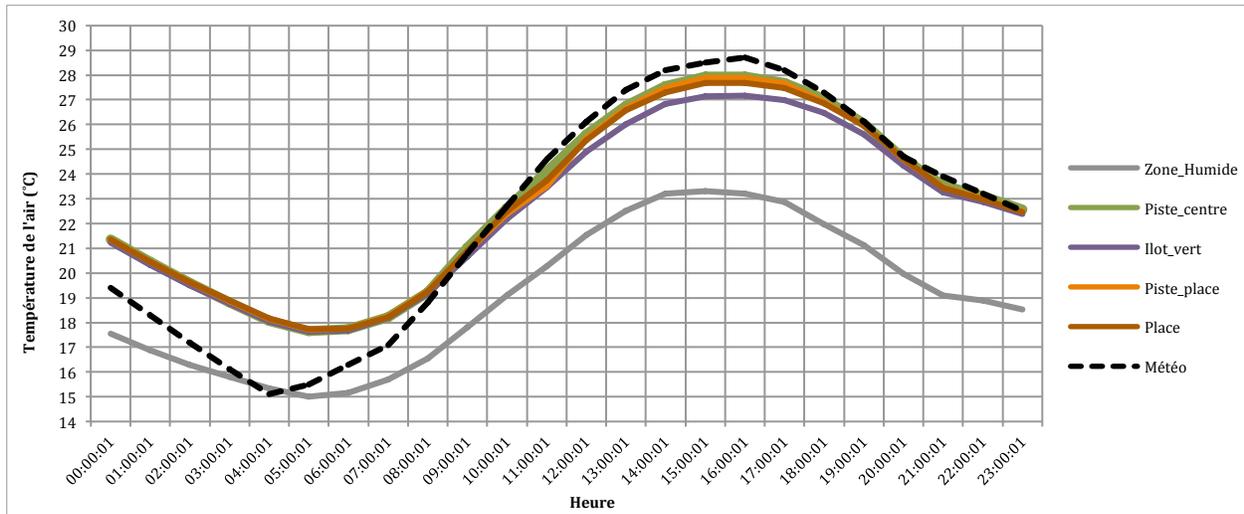


Figure 36 : Variations de températures de l'air pour les différents points examinés dans la grille de la ZAC.

En ce qui concerne l'humidité relative de l'air, nous pouvons remarquer une certaine homogénéité spatiale dans l'ensemble du projet, sauf dans le parc humide situé au sud de la ZAC. La présence de bassins d'eau avec fontaines dans la zone humide et le bassin de stockage existant en dehors de la ZAC a produit un important et ample effet d'îlot de fraîcheur localement et également étendu en aval du vent dominant considéré, vers le nord-est de la ZAC (Figure 37). Comme prévu, nous pouvons toutefois vérifier une hétérogénéité temporelle importante de cette variable. A partir de 21h et durant toute la nuit jusqu'à 9h du matin (remarque : les fontaines fonctionnent aussi la nuit ?), le taux d'humidité relative est de l'ordre de 20% plus important que dans journée.

Pour les points choisis précédemment, si on les compare avec les données obtenues pour la météo locale, il est possible de constater une importante réduction de la quantité d'eau dans l'air (de l'ordre de 20% pour la nuit et de 6% pour la journée) pour tous les points de la ZAC, sauf le point placé sur le parc humide (Figure 38).

Malgré une densité végétale importante au cœur d'un îlot de logements « îlot vert » le point qui y est situé ne présente pas une augmentation sensible, que l'on pourrait attendre.

Nous pouvons conclure à cette étape que l'effet de rafraîchissement induit par le bassin d'eau est largement plus significatif que l'effet de la végétation.

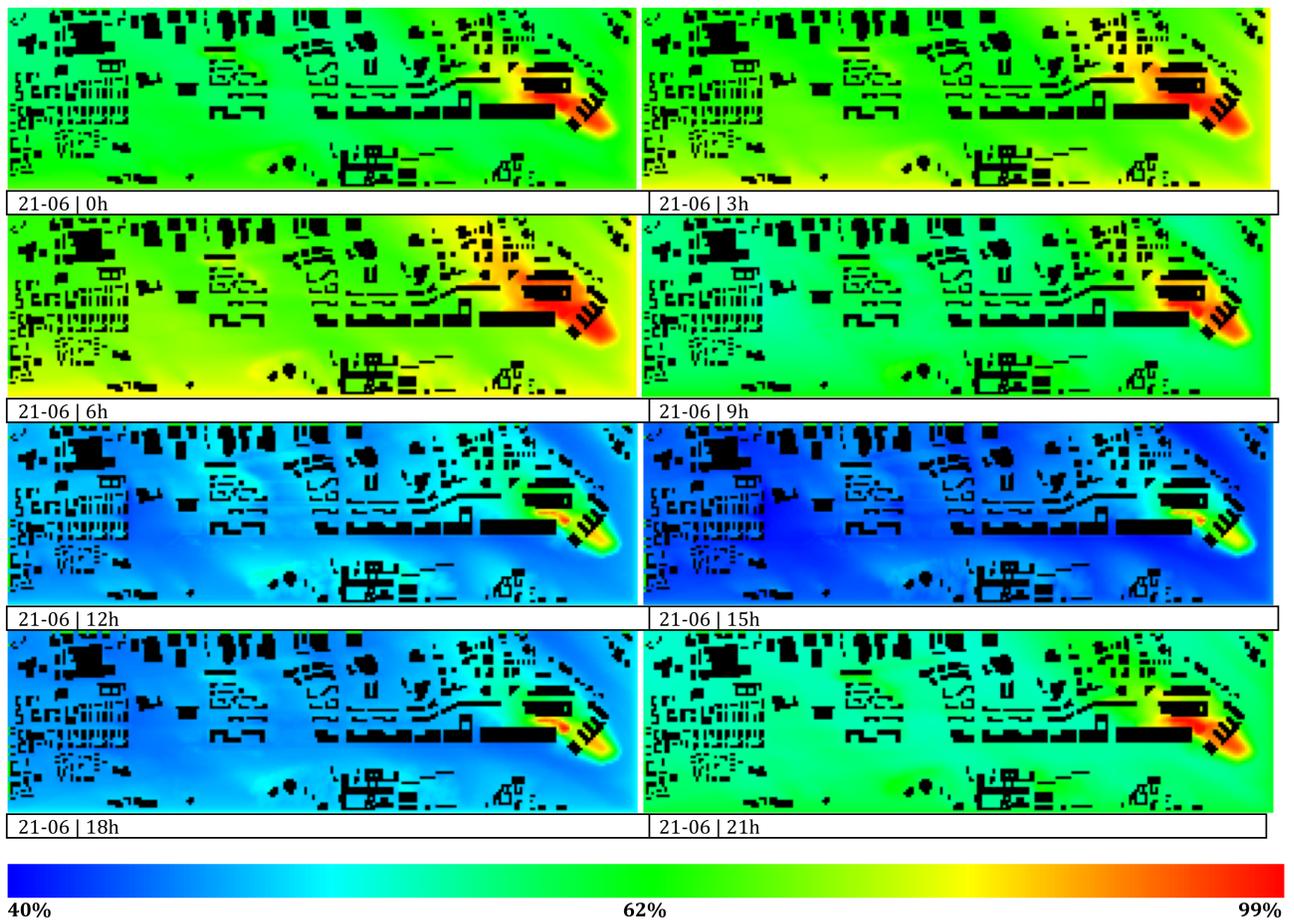


Figure 37 : Distribution spatiale de l'humidité relative de l'air entre 0h et 21h pour sur l'ensemble du projet de ZAC.

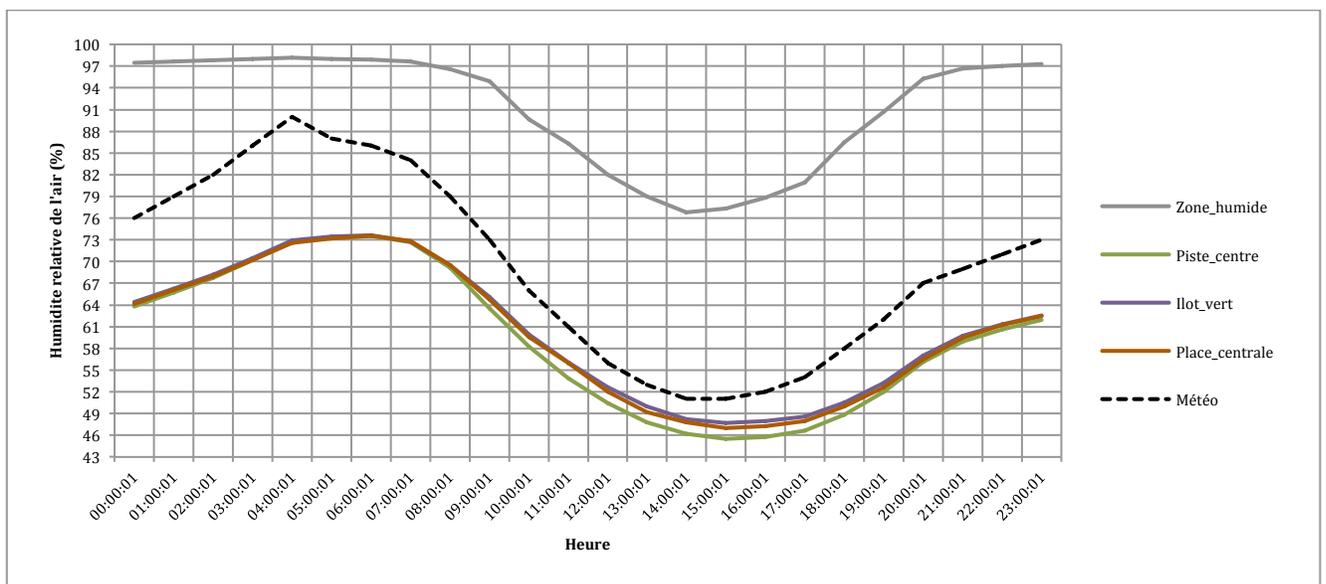


Figure 38 : comparatif des taux d'humidité relative de l'air pour les différents points examinés dans la grille de la ZAC.

La température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et la température radiante moyenne sont les variables climatiques qui, associées à un certain nombre de variables personnelles (métabolisme, résistance des vêtements, âge, poids, taille, etc.), vont définir ce qu'on appelle la Température Physiologique Equivalente (ou la PET).

Les cartes ci-après (Figure 39) présentent la PET pour un piéton dit « standard¹ » qui circulerait sur tous les points de la ZAC. Ces cartes indiquent une distribution spatiale et temporelle de la PET, sur toute la journée du 21 Juin.

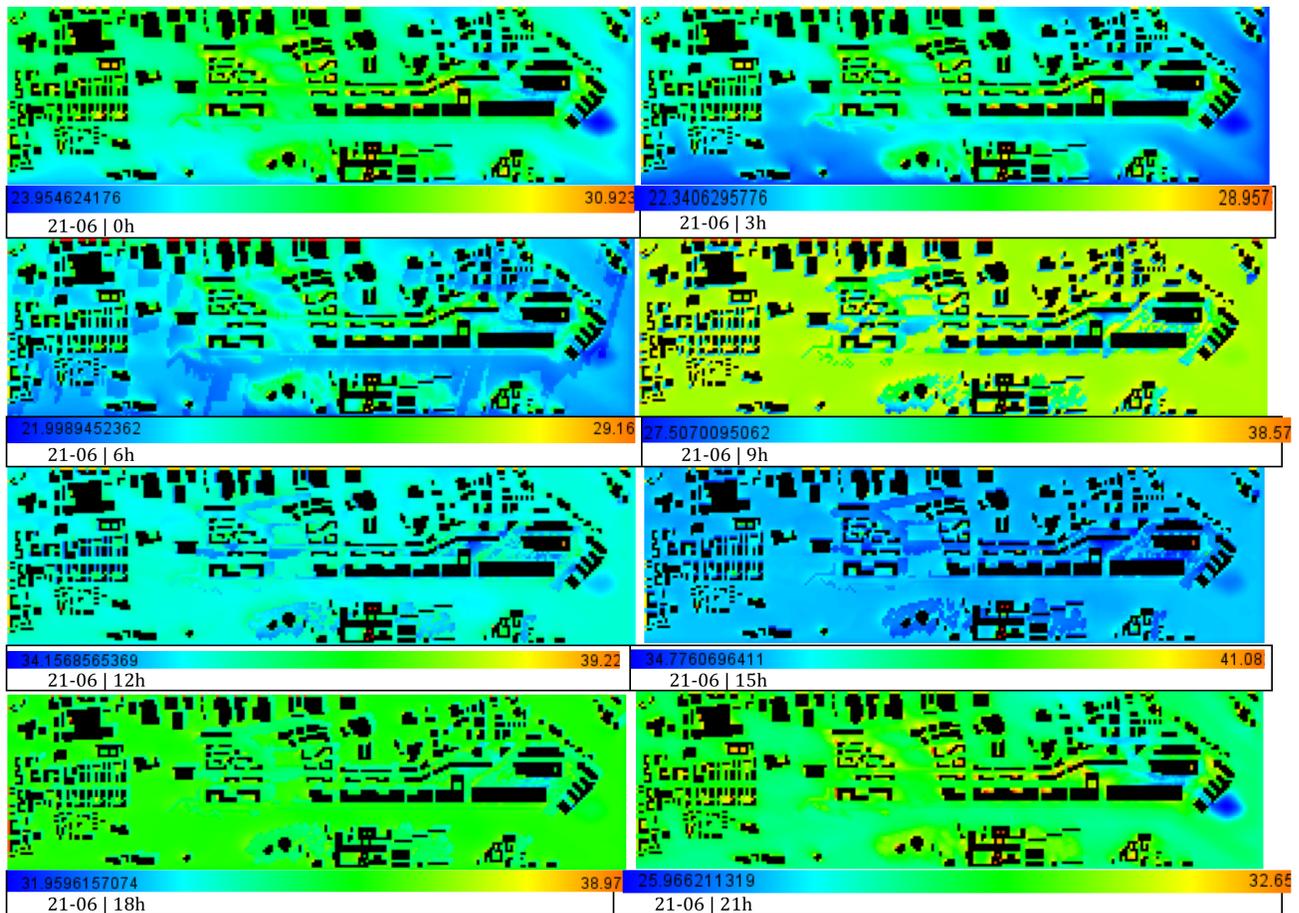


Figure 39 : Distribution spatiale de la Température Physiologique Equivalente (PET) dans les différents points de la ZAC.

Nous pouvons remarquer une certaine hétérogénéité spatiale de la PET dans l'ensemble du projet pour presque toutes les heures de la journée, sauf entre 18h et 21h. Pendant la journée, entre 9h et 18h, il est possible de remarquer que sur les points du projet étant relativement protégés des rayons direct du soleil, soit par la présence de la structure urbaine elle-même, soit par les arbres plantés, les piétons ressentent des températures plus fraîches que dans les alentours de la ZAC. Cet écart pouvant atteindre 7°C maximum. Comme attendu, il est

¹ D'une taille de 1,7m, d'un poids de 70kg, avec un métabolisme de 0,8, et portant une tenue de résistance 0,5.

également possible de constater l'effet inverse le soir et la nuit. Les structures urbaines ayant stocké une charge importante de chaleur le long de la journée, et la décharge de cette chaleur étant plus difficile en milieu urbain plus dense que dans les zones moins urbanisées, les températures ressenties dans la ZAC sont bien plus importantes que dans les alentours.

Nous pouvons remarquer donc l'effet important de l'ombre portée par certains bâtiments à certaines heures de la journée, qui associé au mouvement de l'air produit une impression de refroidissement significatif chez les usagers.

Nous remarquons également ici, l'effet prépondérant des bassins d'eau avec fontaines dans la zone humide et le bassin de stockage existant en dehors de la ZAC. Ce dispositif permet d'atténuer la chaleur journalière de manière significative tout au long de la journée (Figure 39). L'écart de la PET entre une zone sous influence de ce dispositif et une autre zone, peut atteindre 5°C maximum.

La simulation de l'ensemble du projet de la ZAC a été possible à une très basse résolution. Nous avons pu ainsi extraire des informations très utiles sur le comportement de certaines configurations urbaines proposées, notamment sur la distribution spatiale des phénomènes climatiques.

Cependant, à cette résolution, un certain nombre de contraintes liées à la précision de la géométrie et la description de la végétation se posent. Avec des pixels de 9m, nous trouvons beaucoup d'imprécision pour les détails inférieurs à 9m, ainsi que des imprécisions considérables pour les bâtiments non-orthogonaux. Par ailleurs, le nombre de végétaux reste très limité à la taille des pixels de la grille.

Pour faire face à ces contraintes et étant donné que l'effet microclimatique des îlots de chaleur urbains reste très local, nous avons décidé de ne travailler nos scénarios que sur des zones du quartier comprenant des espaces publics représentatifs.

Dans la suite, nous présentons donc la procédure et détaillons les scénarii élaborés à partir des propositions initiales du projet de la ZAC.

5.2. Influence des variantes du projet sur le microclimat

Afin de comprendre l'influence des dispositifs mis en place pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur dans la ZAC, nous avons décidé d'analyser ici des cartes microclimatiques du projet initial (cas de base) suivi par des cartes microclimatiques présentant respectivement l'écart de température, d'humidité, de vitesse du vent et de température radiante entre une variante considérée et le cas de base. L'écart de température (Eq.1) et de chaque variable climatique est calculé pour chaque grille (ou pixel) de la maille.

$$\Delta T = T_{\text{variante}} - T_{\text{projet}} \quad \text{[Equation 3]}$$

Les effets de l'îlot de chaleur urbain peuvent survenir toute l'année au cours de la journée ou de la nuit, en fonction des configurations de l'espace urbain bâti et non-bâti. Les différences de température entre l'aire urbaine et une zone rurale sont souvent plus importantes la nuit par ciel clair, étant donné que les zones rurales peuvent se rafraîchir plus rapidement dans la nuit que les villes, qui ont tendance à piéger dans leurs structures (routes et bâti) une grande partie de la chaleur « stockée » dans la journée.

Pour cela, et pour ne pas être trop exhaustif, nous présentons des cartes pour deux heures contrastées de la journée afin de discuter de l'effet de chaleur / fraicheur urbain journalière et nocturne de ces dispositifs, en établissant aussi un lien avec les usages et les structures urbaines prévues.

Dans une première sous-étape (chapitre 5.2.1), nous présentons le cas de « Place centrale » et ses quatre variantes (variante « blanche », « Bleue », « prospect » et « verte »). Dans une seconde sous-étape, nous présentons le cas de la zone du « Parc Sud » de la ZAC. Pour cela, nous examinons le projet initial (cas de base Parc sud) et trois variantes. La variable Prospect n'a pas été retenue dans l'ensemble de variantes dans cette étape pour deux raisons principales : les marges de manœuvre étaient très limitées et l'implantation des bâtiments trop éloignés les uns des autres pour pouvoir considérer qu'une augmentation de la hauteur bâtie puisse produire des changements pertinents au niveau du prospect.

5.2.1. Le microclimat du cas de base : projet initial de la « Place centrale »

Dans ces résultats nous pouvons vérifier les mêmes phénomènes que dans les résultats pour l'ensemble de la ZAC, présentés précédemment, mais avec plus de détails et précision. Le plan d'aménagement de la ZAC présente une certaine hétérogénéité spatiale de la température jour et nuit. Les températures de l'air les plus élevées ont été obtenues sur les chaussées recouvertes d'enrobé autour des blocs résidentiels et le parc sportif (Figure 40). Il est possible de constater l'effet combiné de la minéralisation du sol et de l'absence des masques solaires,

en particulier autour du parc sportif. Des températures plus basses peuvent être vérifiées à l'intérieur des îlots résidentiels, en raison du faible facteur de vue du ciel local et des effets de masques solaires. Comme prévu, l'effet est inversé au cours de la nuit (Figure 40).

Comme on peut l'observer dans la Figure 40, l'ancienne piste d'atterrissage, les îlots de logements et la place centrale, créent d'importants îlots de chaleur dans le cas de base (projet initial).

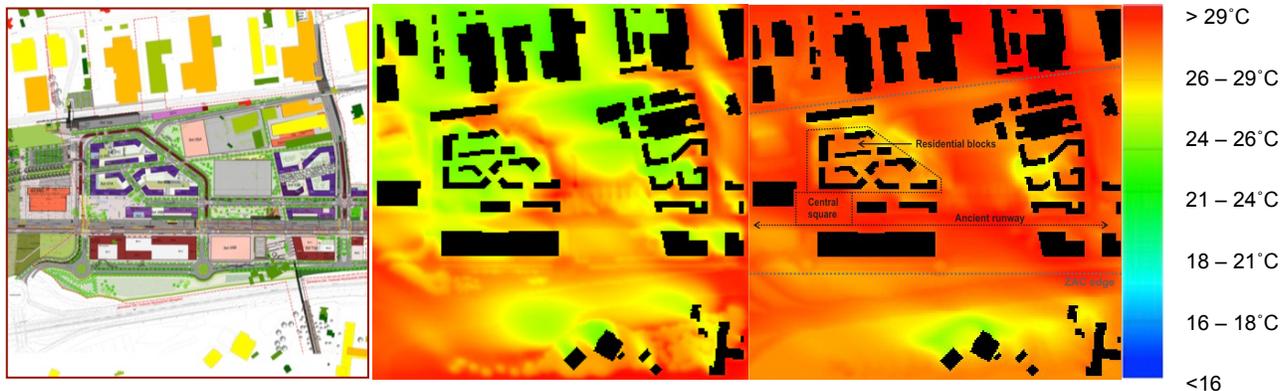


Figure 40 : Plan original de la ZAC et distribution spatiale de la température de l'air jour, à midi (gauche) et nuit, à minuit (droite).

5.2.2. L'effet des variantes sur la température de l'air

a) Scénario « Blanc » pour la Place centrale

Comme il est possible de le constater sur les figures ci-dessous, la variante « Blanche » avec des surfaces des bâtiments (façades et toitures) à fort albédo, peut générer des nuits un peu plus fraîches que dans le cas de référence, mais en revanche, des journées qui sont un peu plus chaudes (voir Figure 21), notamment autour des bâtiments avec un faible FVC entouré par des surfaces à faible albédo (tels que l'enrobé ou le béton foncé). Cela est dû au fait que le rayonnement solaire rentrant reste piégé dans ces types de configurations urbaines.

Contrairement à ce qu'on pourrait attendre, l'emploi des toitures et des façades de couleurs plus claires (*cool roofs*) ne représente pas toujours une stratégie optimale dans le but de créer des îlots de fraîcheur urbains, en ce qui concerne la température de l'air. La forme urbaine ainsi que le type de matériaux de sol, doivent être également considérés. Dans le cas particulier de ce projet, la chaussée à revêtement clair n'était pas initialement une possibilité pour les aménageurs (ceci dû au surcôt que cela peut représenter). Toutefois, les surfaces claires des bâtiments peuvent jouer un rôle important dans la réduction des charges thermiques.

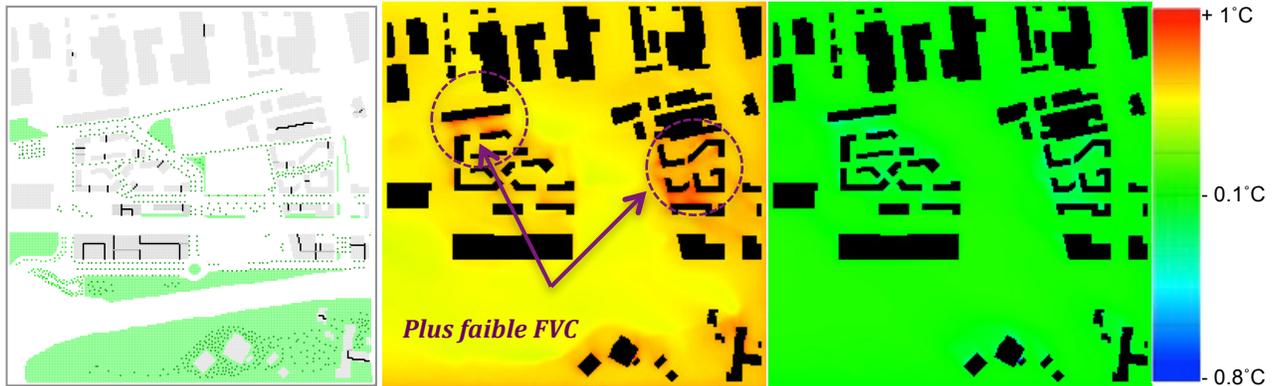


Figure 41 : Plan de la variante « blanche » (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « blanc » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

b) Scénario « Bleu » pour la Place centrale

La mise en place de deux grandes fontaines d'eau (une située sur la place centrale et l'autre au bord inférieur du parc sportif) a permis la création de deux importants ilots de fraicheur urbains, jour comme nuit. Les écarts ponctuels de température avec le projet original peuvent atteindre 6°C. On peut également remarquer une extension de l'effet d'ilot de fraicheur induit par ce dispositif, notamment en aval du vent et à une distance importante. La réduction de la température de l'air local peut atteindre 2°C sur la zone en aval du vent (Figure 22). Cette analyse pourrait amener à des recommandations, comme de prévoir un bassin ou un miroir d'eau dans la cour des ilots semi-ouverts qui pourraient également être plus ouverts aux vents dominants, en étendant la fraicheur aux espaces qui ont potentiellement tendance à piéger de la chaleur le long de la journée.

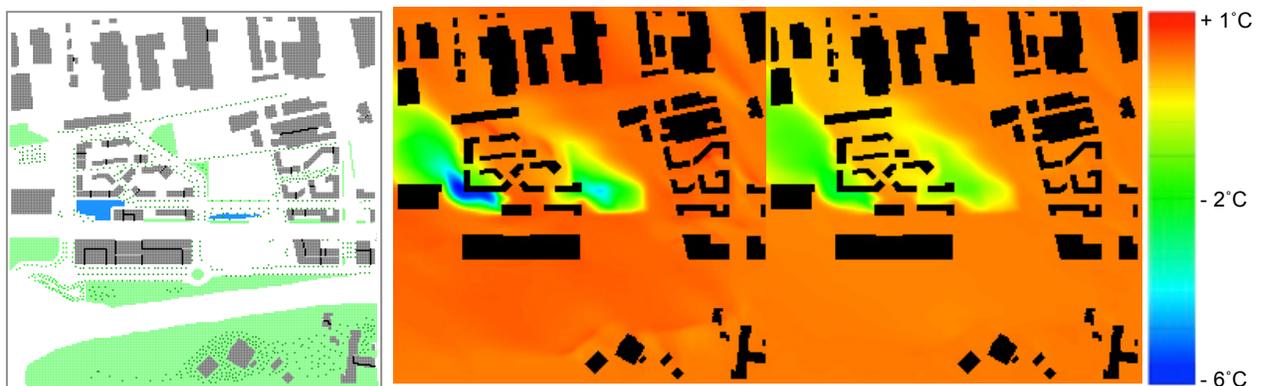


Figure 42 : Plan de la variante « bleue » (gauche) et les cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « bleu » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

c) Scénario « Prospect » pour la Place centrale

Pour le scénario « prospect », nous avons obtenu des écarts de température d'air variables, positifs et négatifs, très ponctuels autour des bâtiments par rapport au scénario de référence. Nous avons pu constater une homogénéité spatiale importante de la température de l'air, de

jour comme de nuit. Cela peut être expliqué par la forme d'implantation des bâtiments qui ne constitue pas réellement une vraie rue canyon, pouvant jouer un rôle décisif dans la mitigation de la chaleur durant la journée, à cause de l'effet faible des masques solaires dans cette zone de la ZAC (Figure 23).

De manière similaire au scénario « Blanc », la variation ponctuelle de la hauteur des bâtiments (tel que prévue par les aménageurs de la ZAC) sans prendre en compte l'implantation et la contiguïté de la forme urbaine, ne représente pas toujours une solution performante, à la fois pour réduire les effets de l'ICU, de jour, et pour induire la création d'îlots de fraîcheur, de nuit. Comme nous pouvons le voir sur les cartes ci-dessous, la non-contiguïté des bâtiments au bord de l'ancienne piste d'atterrissage permet que les surfaces chauffent relativement tôt dans la journée, produisant un effet d'îlot de chaleur local.

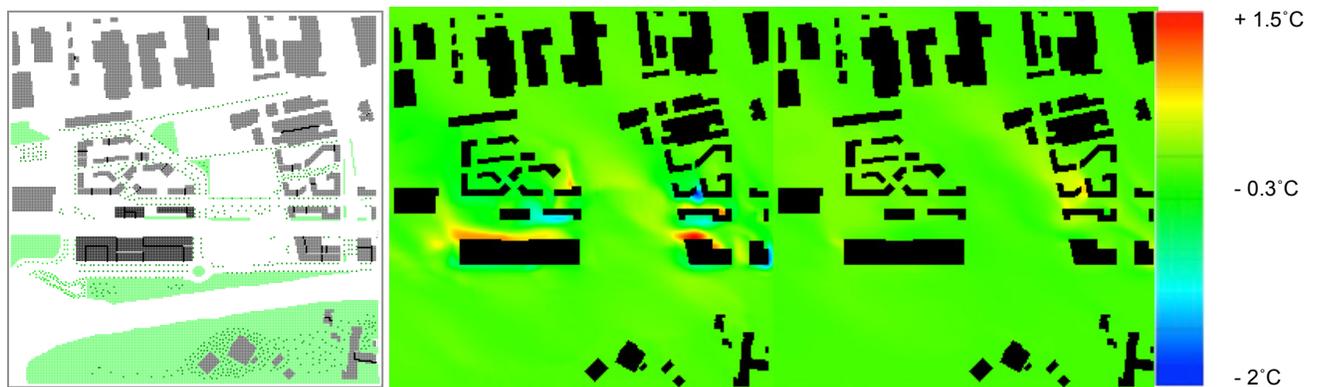


Figure 43 : Plan de la variante « prospect » (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « prospect » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

d) Scénario « Vert » pour la Place centrale

Pour cette variante, nous avons proposé une trame verte deux fois plus dense que dans le projet initial, particulièrement le long de la piste d'atterrissage et sur la place centrale. Comme nous pouvons le remarquer sur les cartes présentées ci-dessous (Figure 24), ce dispositif a induit des écarts importants en réduisant la température de l'air localement de manière importante la journée, et très peu la nuit.

En comparant les cartes de température de l'air pour le scénario vert et le projet initial, il est possible de constater un effet de rafraîchissement ponctuel avec une zone d'extension plus réduite par rapport à ce que l'on a pu voir avec la présence du dispositif bassin d'eau. L'îlot de fraîcheur induit par la présence d'une densité végétale plus dense peut être observé par la tâche en bleu sombre et bleu clair dans les cartes pendant la nuit (ce qui représente une réduction d'environ 1,0°C par rapport au projet de base). Nous avons obtenu également des températures plus fraîches autour de l'espace public correspondant au parc sportif prévu dans la ZAC (ce qui représente une réduction d'environ 1,5°C par rapport au projet initial).

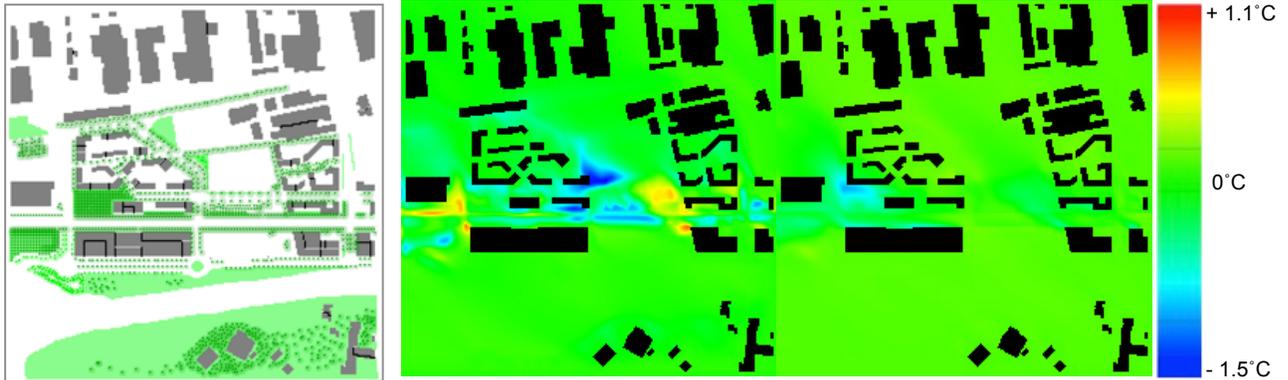


Figure 44 : Plan de la variante « verte » (gauche) et les cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « vert » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

5.2.3. Comparaison entre variantes pour la « Place centrale » sur l'humidité de l'air

Les résultats exposés ci-après représentent la distribution spatiale de l'écart d'humidité spécifique (en g/kg) entre chacune des variantes du projet de la ZAC et le cas de base lui-même. Les cartes présentent la quantité de grammes d'eau par kg d'air sec, la nuit (à minuit).

Comme prévu, les variantes « verte » et « bleue » (à gauche) sont les scénarios du projet produisant les valeurs d'humidité de l'air les plus élevées parmi les quatre variantes étudiées. On peut remarquer l'effet des fontaines avec une augmentation locale allant jusqu'à 1.4 g/kg d'eau dans l'air. On peut également remarquer une extension de l'effet d'ilot d'humidité induit par le dispositif fontaine d'eau comme par la trame verte, notamment en aval par rapport au vent.

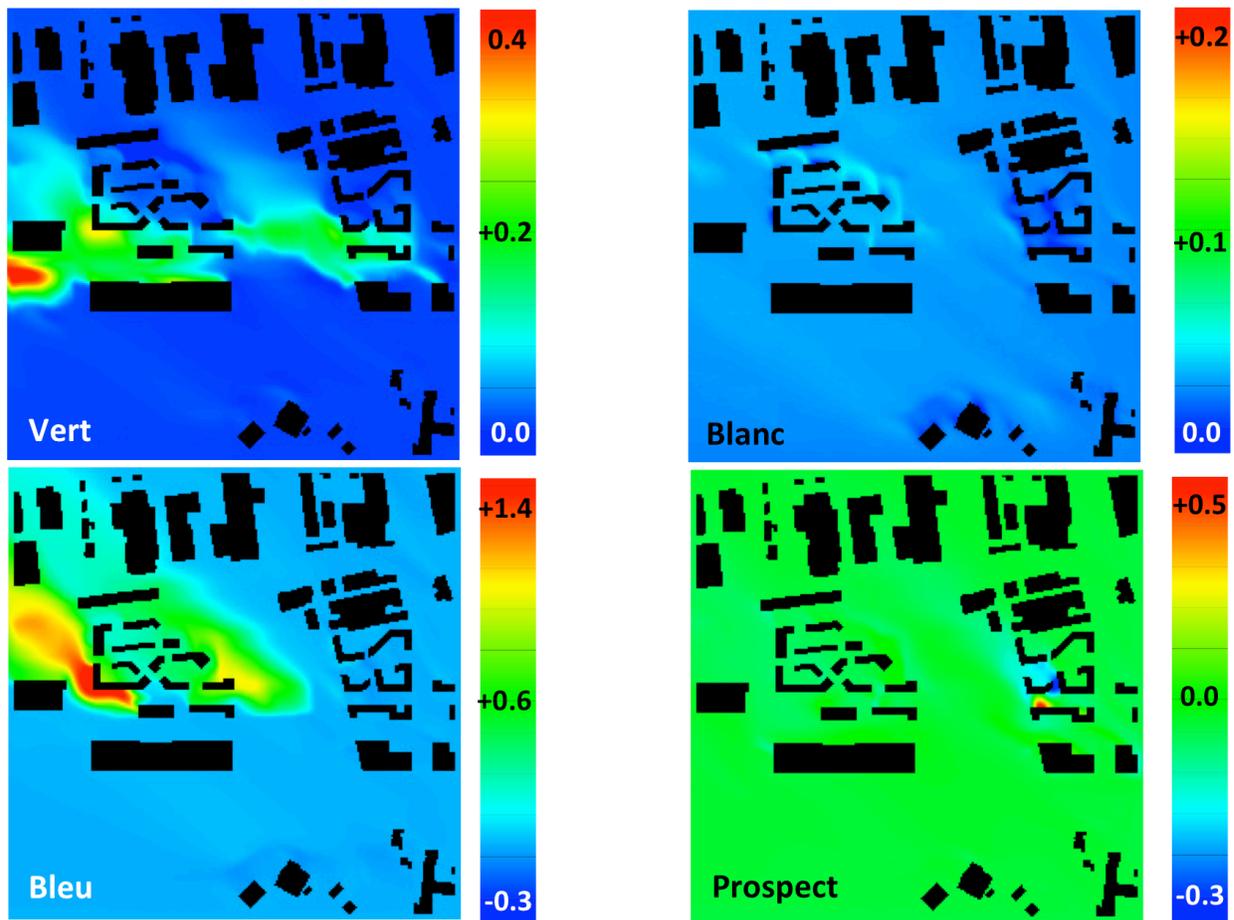


Figure 45 : Ecart de l'humidité spécifique entre les quatre variantes et le projet initial, pour la nuit.

5.2.4. Comparaison entre variantes pour la « Place centrale » sur la vitesse du vent

Si on s'intéresse à l'analyse des effets aérauliques, on peut observer que le dispositif qui induit le plus de modification dans le profil de vitesses du vent est le scénario ayant un prospect moyen deux fois plus élevé que les autres. Sur les cartes présentées ci-dessous, avec la vitesse de vent (m/s) pour une heure de la journée (à midi), nous pouvons remarquer que la variante « prospect » produit une accélération moyenne de 0,5 m/s au niveau de la piste d'atterrissage, dû à l'effet Venturi à cet endroit. L'augmentation de la vitesse pourrait être beaucoup plus importante, toutefois la largeur importante du « canyon » constitué par la piste, réduit cet effet.

Nous avons pu remarquer également un effet inverse important de ralentissement du vent sur la variante « verte ». Sur certains endroits de la piste, nous avons obtenu une réduction allant jusqu'à 2 m/s par rapport au projet original sans arbres sur la piste, dû à la rugosité produite par les rangées d'arbres. Cet effet pourrait devenir un atout en hiver, vu que la piste est un couloir à vent potentiel, orienté nord-sud.

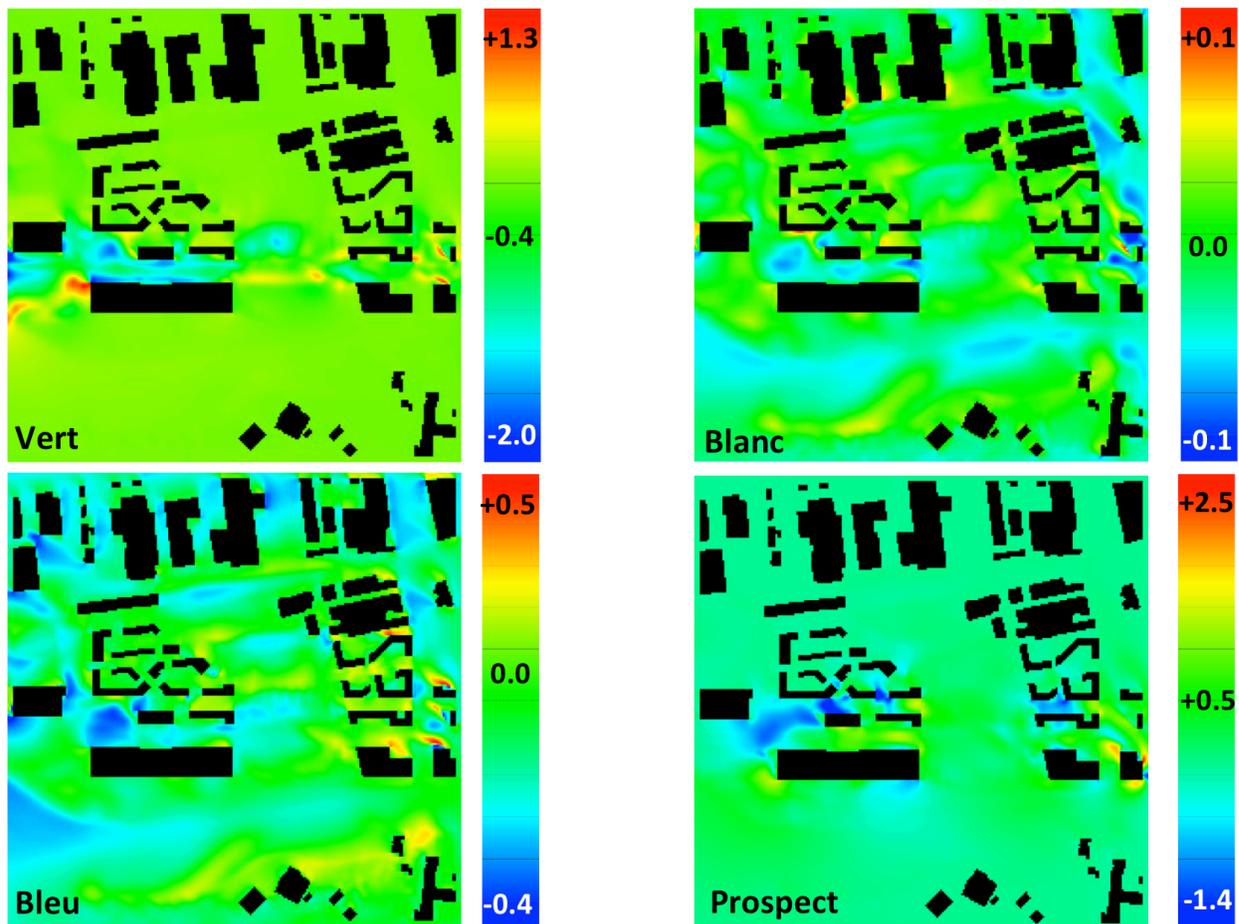


Figure 46 : Ecart de vitesse de vent entre les quatre variantes et le projet initial, pour le jour (à midi).

5.2.5. Comparaison entre variantes pour la « Place centrale » sur la température radiante

Pour compléter l'étude des variables climatiques, nous intégrons aussi l'écart de chaleur radiante entre les objets de la scène urbaine, dans l'étude du comportement des scénarios référentiels. La température radiante moyenne permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Et, c'est également une des variables les plus importantes pour la définition du confort thermique extérieur, comme nous allons le voir ultérieurement dans le chapitre suivant.

Afin de mieux cerner les analyses quant à cette variable climatique, nous exposons ici un cadre comparatif des écarts entre les scénarios et le projet initial pour le jour et aussi pour la nuit. Comme nous le voyons sur les cartes ci-dessous, l'influence des dispositifs étudiés peut présenter des effets contradictoires entre les deux heures de la journée. Par exemple, si l'on s'intéresse au cas de la variante « prospect », nous trouvons des ilots ponctuels de fraîcheur dans la journée dus à l'ombre portée par les bâtiments les plus hauts sur la piste (Figure 27, en bas et à gauche), et un effet ponctuellement inverse la nuit (Figure 28).

Dans le cas de cette variante, un effet d'ombrage important se produit pendant la journée, ce qui génère des températures moyennes radiantes plus faibles. Or, deux effets collatéraux peuvent s'imposer : le piégeage radiatif à l'intérieur du canyon avec des températures de l'air plus importantes pendant la nuit (l'îlot de chaleur) et un courant d'air indésirable en période hivernale.

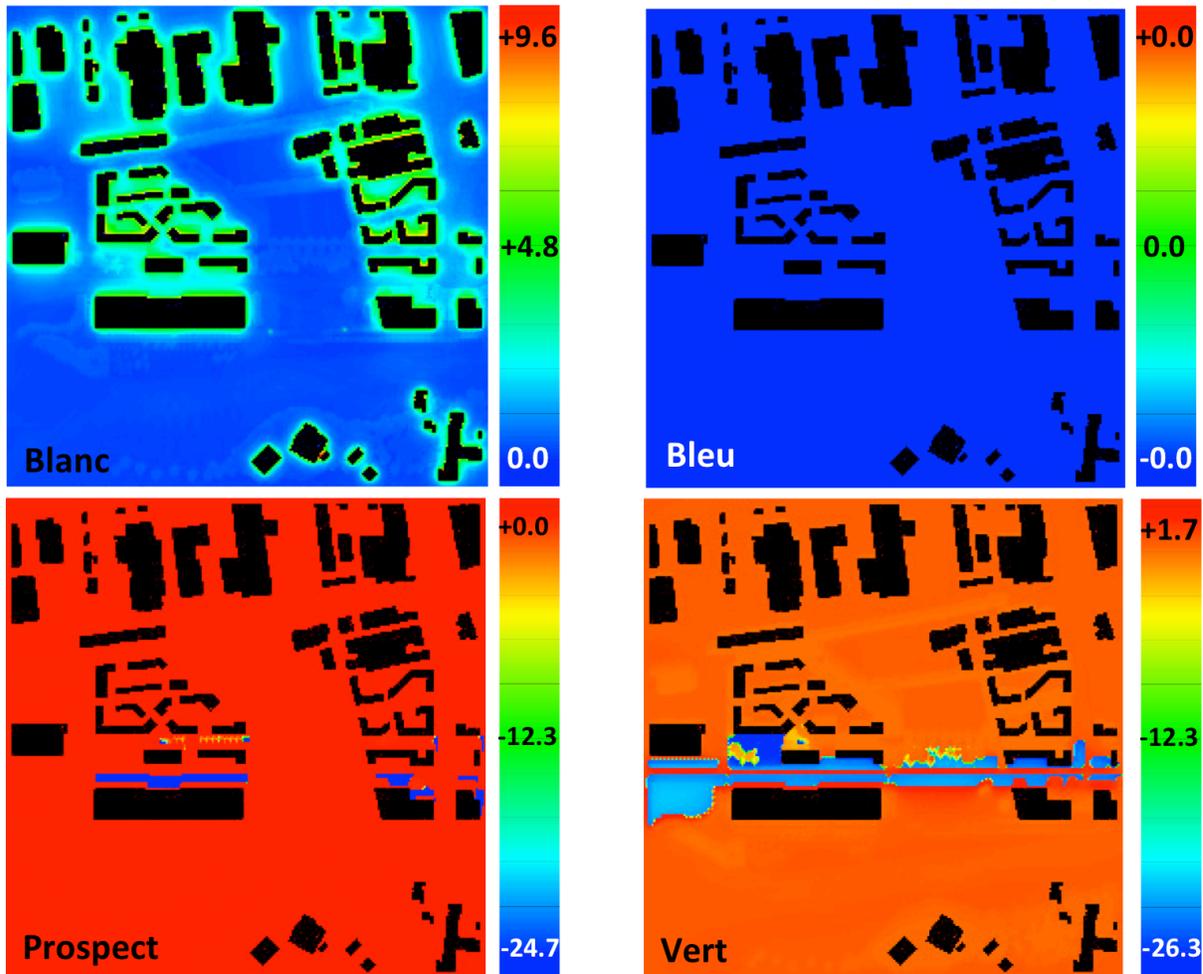


Figure 47 : Ecart de température radiante moyenne entre les quatre variantes et le projet initial, pour le jour.

De façon similaire, la variante « verte » offre des journées plus fraîches du point de vue de la chaleur radiante, mais aussi des nuits plus chaudes localement dans les espaces situés sous et autour des arbres. Toutefois, l'alignement des arbres étant régulier et étendu, l'écart par rapport au cas de base est plus important que pour la variante « prospect ». A midi, sous la protection des arbres sur la piste, la température radiante peut être réduite de 26°C ponctuellement, par rapport au projet initial sans l'alignement. Nous rappelons aussi, que ces données ont été calculées pour une hauteur de 1.5m par rapport au sol, afin de comprendre les effets au niveau des usagers. Ce qui permet aussi d'observer ces effets sous les arbres.

De la même manière que pour la structure verticale des bâtiments dans une ville, la chaleur reste potentiellement piégée la nuit, les arbres absorberont beaucoup de chaleur radiante pendant la journée, notamment ceux plantés sur un milieu très minéralisé. La différence réside essentiellement sur d'autres caractéristiques, par exemple l'effet de l'évapotranspiration des éléments végétaux, qui contrairement à la variante « prospect », peut jouer un rôle crucial sur la mitigation de la chaleur.

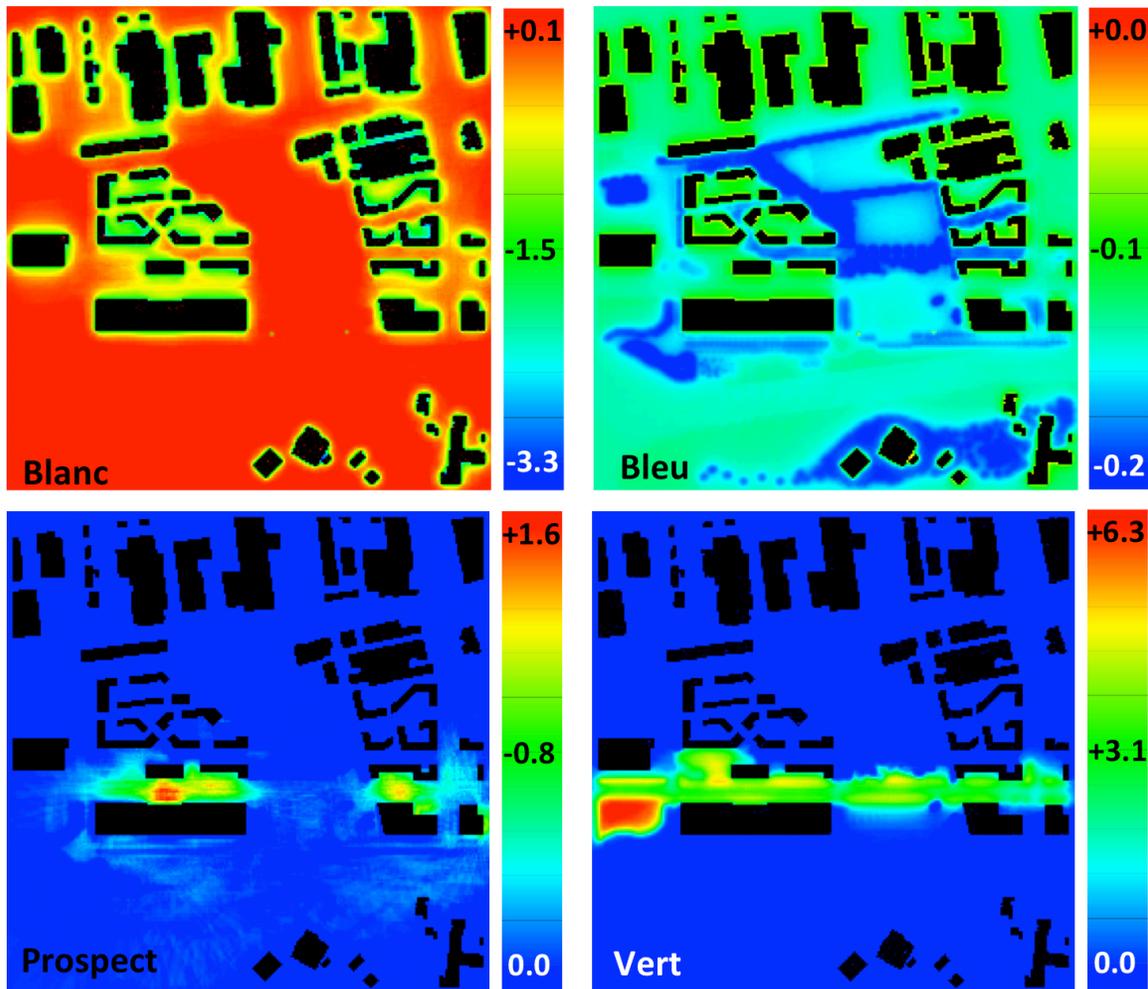


Figure 48 : Ecart de la température radiante moyenne entre les quatre variantes et le projet initial, pour la nuit.

La variante « blanche » présente pour sa part un comportement attendu. Si pour la température de l'air, l'effet de ce dispositif semblait être plutôt négligeable, du point de vue de la température radiante son influence est ici plus probante. Nous pouvons vérifier, toutefois, que l'écart le plus significatif ne se trouve que dans l'environnement immédiat des bâtiments, avec évidemment des températures radiantes moins importantes que pour le projet comportant des bâtiments avec un albédo moyen plus faible. Dans la journée, les échanges radiatifs sont intensifiés avec les surfaces bâties plus réfléchissantes. Cela produit des ilots de chaleur localement plus importants que dans le scénario de base. Inversement, la nuit, la

chaleur pouvant être dissipée plus facilement par ces surfaces, nous trouvons des températures radiantes plus faibles que pour le projet initial, cet écart pouvant aller jusqu'à 3°C maximum.

Nous avons examiné ici l'effet isolé sur chaque variable climatique, afin d'avoir un aperçu sur la manière dont chaque dispositif pour chaque variante agit ou contribue à la mitigation des ICU. Cela nous aidera par la suite à comprendre les résultats trouvés pour la température physiologique calculée pour un piéton qui circule dans le quartier.

5.2.6. Le microclimat du cas de base : projet initial du « Parc Sud »

Dans ces résultats nous pouvons vérifier qu'il existe une grande hétérogénéité spatiale des températures jour et nuit. Pendant la journée, les températures de l'air sont beaucoup plus élevées tout autour de la ZAC, où se trouve la rocade toulousaine (Figure 49). Nous y trouvons des températures d'air supérieures à 30°C. Il est possible de confirmer l'effet combiné de la minéralisation du sol et de l'absence de masques solaires comme intensificateur de l'effet d'îlot de chaleur diurne, comme nous pouvons le voir dans le périmètre de la ZAC qui est entouré par des très larges surfaces couvertes d'enrobé. Ces résultats mettent en évidence les conditions que les bâtiments aux abords sud de la ZAC devront subir pendant cette saison (Figure 49).

A l'inverse, à l'intérieur de la ZAC, nous trouvons des températures bien plus basses dans la journée, d'une part, en raison d'un plus faible facteur de vue du ciel local qui vient protéger partiellement les surfaces urbaines de la radiation solaire directe et, d'autre part, en raison de la présence d'un certain nombre de bassins et de la végétation déjà prévue sur le projet (Figure 49). Vers 15h de l'après-midi, les températures à l'intérieur de la ZAC peuvent être 5°C plus faibles qu'à l'extérieur de son périmètre.

Dans la journée, il est aussi possible de remarquer l'effet de fraîcheur apporté par le bassin de stockage d'eau pluviale déjà existant au Sud-Ouest en dehors de la ZAC (Figure 49).

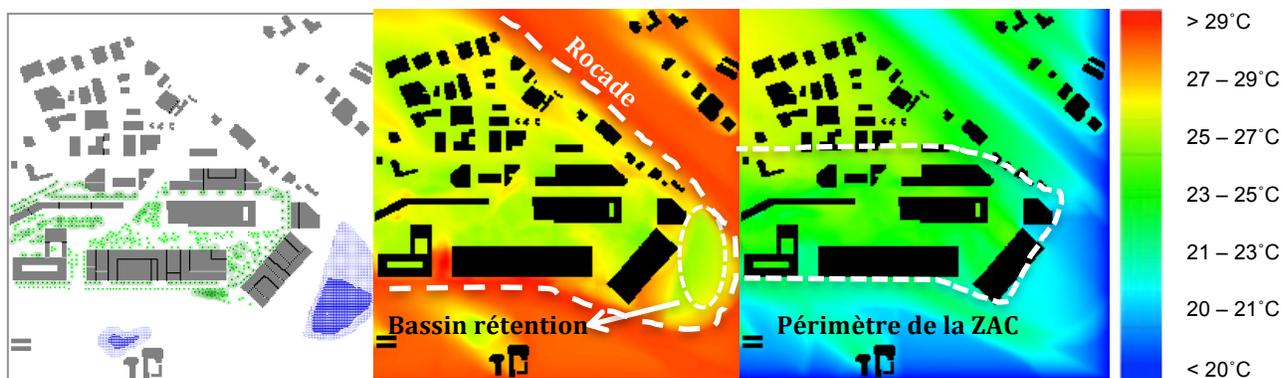


Figure 49 : plan original de la ZAC et distribution spatiale de la température de l'air jour (gauche) et nuit (droite).

L'effet inverse peut être mis en évidence la nuit. La température de l'air dans le périmètre extérieur à la ZAC est beaucoup plus faible la nuit : malgré la forte minéralisation du sol, toute la chaleur accumulée dans la journée peut être dissipée relativement facilement à cause d'une forte ouverture au ciel de la structure qui entoure les bâtiments. L'écart entre la ZAC et la zone à l'extérieur de son périmètre peut atteindre également 5°C.

A partir de cette référence, nous allons par la suite, comparer les résultats obtenus pour le projet initial aux résultats des variantes référentielles

5.2.7. L'effet des variantes pour le « Parc Sud » sur la température de l'air

a) Scénario « Blanc » pour le Parc sud

Pour cette variante Sud dite « Blanche », nous avons considéré non seulement les surfaces des bâtiments comme étant à fort albédo, mais également pratiquement toutes les surfaces du sol de la ZAC à cet endroit, sauf la piste (fin de piste). Il est possible de remarquer que cela peut générer des journées et des nuits un peu plus fraîches (jusqu'à -0.3°C) par rapport au cas de référence (voir Figure 50). Les différences sont nulles au niveau du parc humide car les caractéristiques sont identiques (revêtement du sol et présence de végétation). Le changement de la voirie à l'intérieur de la ZAC amène proportionnellement une réduction de -0.2°C dans la journée (Figure 50).

Nous pouvons confirmer que l'influence de ce dispositif dans le but d'atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbaine, en ce qui concerne la température de l'air, n'est pas très marquant, même si on a intégré aussi un fort albédo au niveau des revêtements de sol. Toutefois, les surfaces claires du sol et des bâtiments peuvent jouer un rôle important dans la réduction des charges thermiques à l'intérieur.



Figure 50 : plan de la variante « blanche » (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « blanc » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

b) Scénario « Bleu » pour le Parc sud

La mise en place de plusieurs petits bassins supplémentaires dotés des fontaines d'eau au niveau du parc humide et également au niveau du Forum a permis la création d'îlots de

fraicheur urbains ponctuellement, jour comme nuit. Les écarts ponctuels de température avec le projet original peuvent atteindre 2°C. On peut également remarquer une extension de l'effet d'îlot de fraîcheur induit par ce dispositif, autour des bassins, notamment en aval du vent (Figure 51). Les écarts trouvés sont sensiblement moins importants que dans le cas de la variante bleue pour la « Place centrale ». Ceci est dû au fait que des nombreux espaces d'eau sont déjà prévus dans le projet initial ou sont déjà existants dans le site autour du périmètre de la ZAC. Le projet présente des conditions déjà très favorables à l'atténuation de l'effet d'ICU.

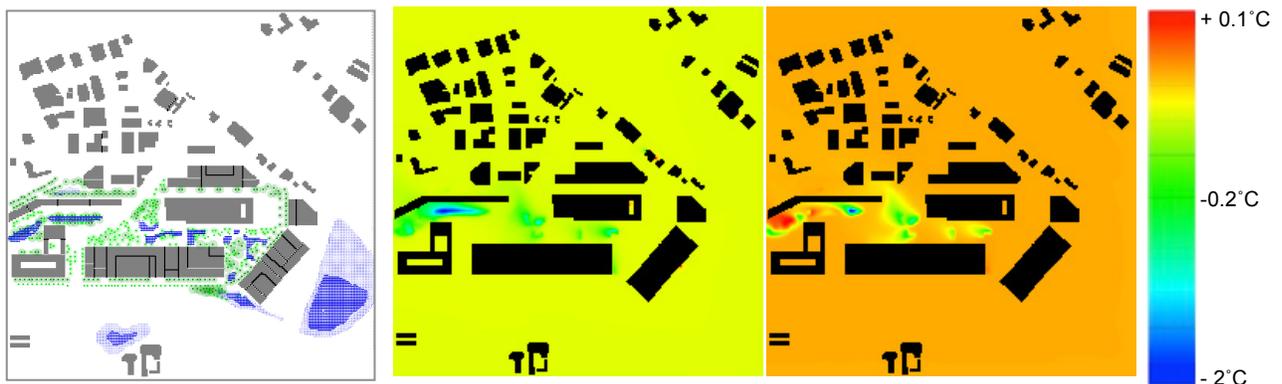


Figure 51 : plan de la variante « bleue » (gauche) et les cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « bleu » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

d) Scénario « Vert » pour le Parc sud

Pour cette variante, nous avons proposé une trame verte trois fois plus dense que dans le projet initial. Des rangées d'arbres ont été ajoutées autour des bâtiments à proximité des surfaces d'enrobé de la rocade (sur le pourtour de la ZAC). Comme nous pouvons le remarquer sur les cartes présentées ci-dessous (Figure 52), ce dispositif a induit des écarts relativement importants dans ces zones, en réduisant la température de l'air localement dans la journée. Nous pouvons vérifier que l'écart ponctuel de température de l'air juste derrière les derniers bâtiments de la ZAC tout au sud peut atteindre -1.3°C aux heures les plus chaudes d'une journée typique d'été. L'îlot de fraîcheur induit par la présence d'une densité végétale plus dense peut être observé par la tâche (bleu sombre et bleu clair) dans les cartes pendant le jour et la nuit (ce qui représente une réduction d'environ 1.0°C par rapport au projet de base).

Cette étude peut suggérer une plus forte distribution spatiale de la végétalisation sur la ZAC, actuellement concentrée juste sur les places et parcs. Nous pouvons indiquer également la prévision d'une trame verte (d'arbres locaux à grand port et résistants, tel les platanes) le long du périmètre de la ZAC touchant la rocade, de manière à protéger les bâtiments à la fois de la chaleur intense produite par ces surfaces dans la journée, et à la fois des bruits du trafic (réduction faible du bruit du trafic par le feuillage, mais création de nouveaux bruits – vents

dans le feuillage, bruit des oiseaux-, et surtout effet psychologique par masquage visuel des sources de bruit.

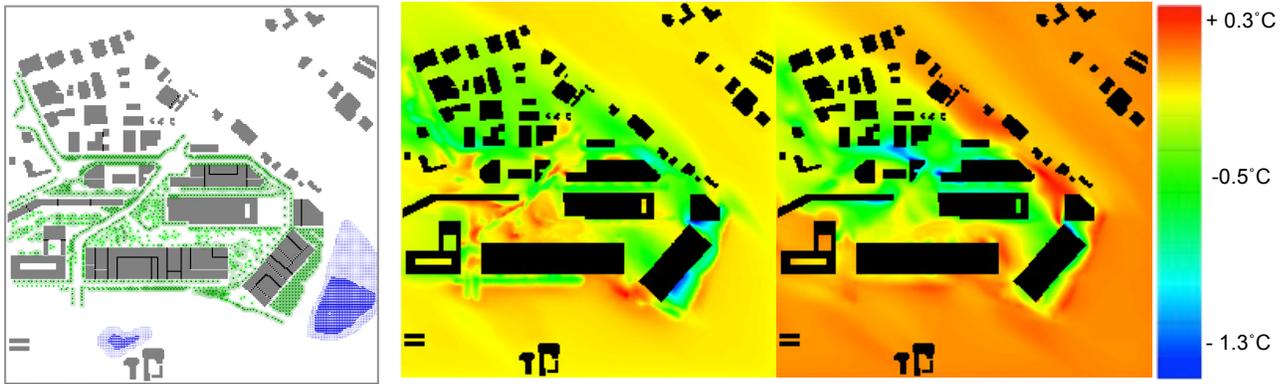


Figure 52 : Plan de la variante « verte » (gauche) et les cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario « vert » et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).

5.2.8. Comparaison entre variantes pour le « Parc Sud » sur l'humidité de l'air

Les résultats présentés ci-après montrent la distribution spatiale de l'écart d'humidité spécifique (en g/kg) entre chacune des variantes du projet de la zone « Parc sud » et le cas de base lui-même. Les cartes présentent la quantité de grammes d'eau par kg d'air sec, la nuit (à minuit).

Comme prévu, les variantes « verte » et « bleue » sont les scénarios du projet produisant les humidités de l'air les plus importantes parmi les variantes étudiées. On peut remarquer l'effet des arbres avec une augmentation locale allant jusqu'à 0.3 g/kg d'eau dans l'air par évapotranspiration, ainsi que l'effet ponctuel d'îlot d'humidité induit par le dispositif *fontaine d'eau* qui a été élargi dans le scénario « Bleu » sur le parc humide (Figure 53). Toutefois, nous rappelons, qu'étant donné les bassins déjà existants et prévus dans le projet de la ZAC dans cette zone, l'écart entre ce projet et la variante « Bleue » est beaucoup moins important que l'écart produit pour le cas de la Place centrale.

Nous illustrons ici également une quatrième variante qui comprend l'effet des trois variantes combinées. Comme il est possible de l'observer dans la Figure 53 ci-dessous, l'écart d'humidité spécifique de cette variante est très proche de la variante « Verte », car pour cette variable climatique la variante « verte » est celle qui apporte le changement le plus significatif par rapport au projet original. Nous pouvons aussi remarquer une augmentation ponctuelle très importante derrière l'immeuble situé contre la rocade (comme l'indique la Figure correspondante). A cet endroit, un certain nombre d'arbres à port moyen a été introduit à la place de l'herbe qui avait été prévue initialement.

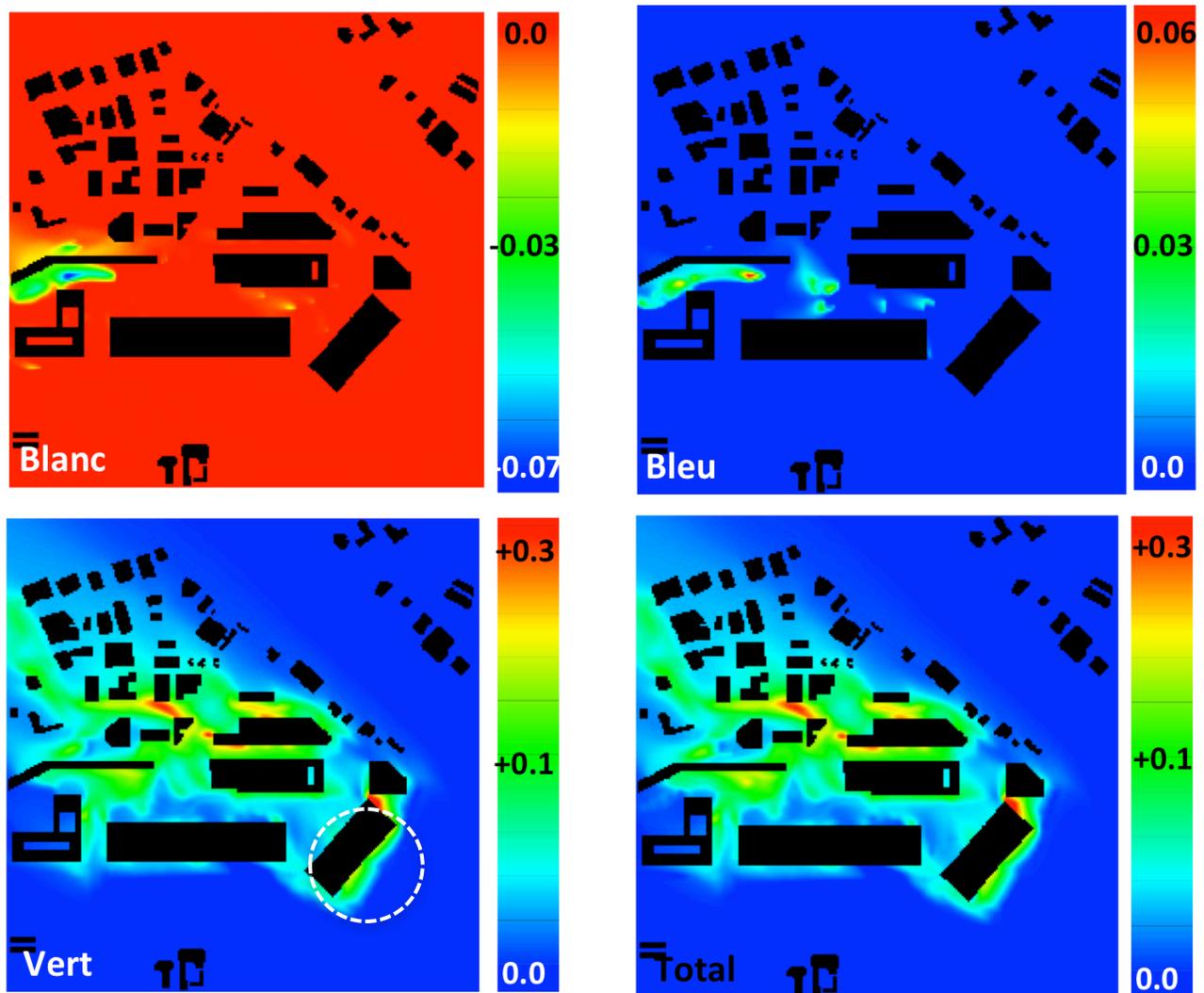


Figure 53 : Ecart de l'humidité spécifique entre les quatre variantes et le projet initial, pour la nuit.

5.2.9. Comparaison entre variantes pour le « Parc Sud » sur la vitesse du vent

En ce qui concerne les effets aérauliques, on peut observer que le dispositif qui induit le plus de modification dans le profil de vitesse du vent est le scénario « vert ». Sur les cartes présentées ci-dessous (Figure 54), pour une heure de la journée (à 15h), nous pouvons remarquer que cette variante produit une réduction moyenne importante de la vitesse du vent de 2.4 m/s au niveau des rues qui ont été largement arborisées par rapport au projet de base. Cela est dû à l'effet de rugosité créé par les rangées d'arbres à cet endroit. Le ralentissement de la vitesse du vent pourrait être beaucoup moins important si la largeur ou le prospect des rues étaient moins importants. Cet effet peut devenir un atout en hiver, surtout pour les rues orienté nord-sud qui peuvent devenir des couloirs à vent potentiels.

Pour les autres variantes, les modifications de la vitesse du vent, par rapport au projet base, sont quasi-nulles.

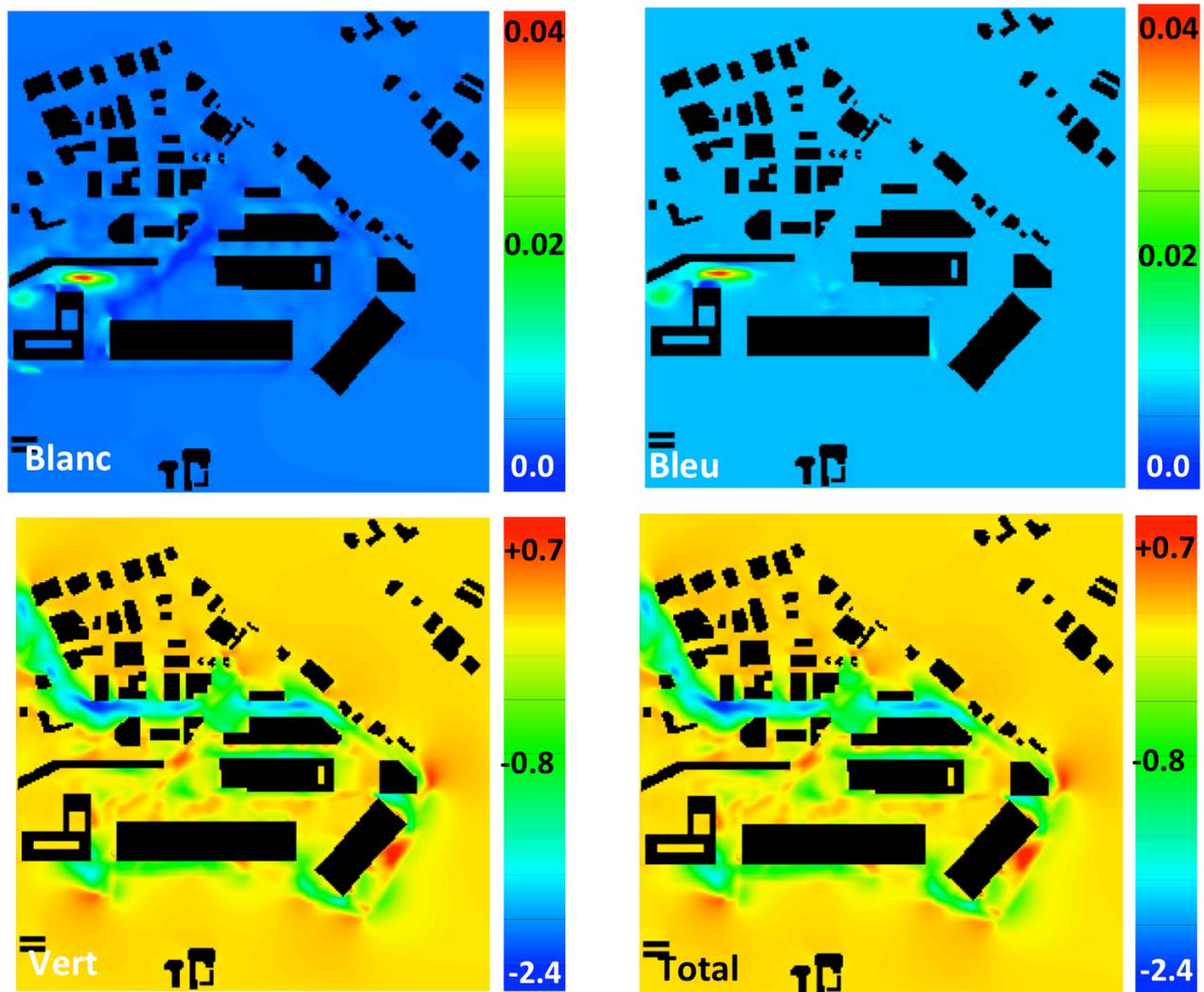


Figure 54 : Ecart de vitesse de vent entre les quatre variantes et le projet initial, pour le jour (à midi).

5.2.10. Comparaison entre variantes pour le « Parc Sud » sur la température radiante

Pour la température moyenne radiante, nous présentons ci-après les cartes de l'ensemble de variantes pour le jour (Figure 55) et la nuit (Figure 56). Comme nous pouvons le remarquer sur ces cartes, l'influence des dispositifs étudiés peut présenter des effets contradictoires entre les deux heures de la journée. Par exemple, si l'on s'intéresse au cas de la variante « blanche » (fort albédo des surfaces), nous constatons un effet tout à fait prévisible, dans la journée. La chaleur radiante arrivant sur les structures bâties est majoritairement réfléchi et cet effet participe au réchauffement de l'air environnant les masses construites (Figure 55). Dans la journée, les échanges radiatifs sont intensifiés avec des surfaces bâties plus réfléchissantes. L'impact en terme d'ICU n'est très peu pertinent, sauf quand dans le cas du seul patio prévu ou quand le facteur de vue du ciel est très faible. Parallèlement, la nuit (Figure 56), ce dispositif permet une réduction allant jusqu'à 0.4°C par rapport au projet initial, en créant des ilots ponctuels de fraîcheur tout autour de ces mêmes bâtiments.

Il est intéressant de vérifier l'effet de la végétation. Là où nous trouvons des taches bleues (sur les cartes correspondantes aux variantes « verte » et « total »), cela correspond aux arbres qui ont été ajoutés par rapport au projet initial. Au niveau du parc humide, nous trouvons très peu d'écart, évidemment. En revanche, nous pouvons confirmer l'effet très prégnant de l'ombre portée par les arbres plantés en alignement le long de toutes les rues de la ZAC et contre les bâtiments sur le périmètre de la ZAC. L'écart en température radiante peut atteindre 16°C dans la journée, ce qui est considérable en terme de confort ressenti. L'inverse peut se produire la nuit par effet du piégeage radiatif sous la canopée des arbres. Vers 3h du matin, un écart positif entre 3 et 6°C de température radiante moyenne peut s'imposer.

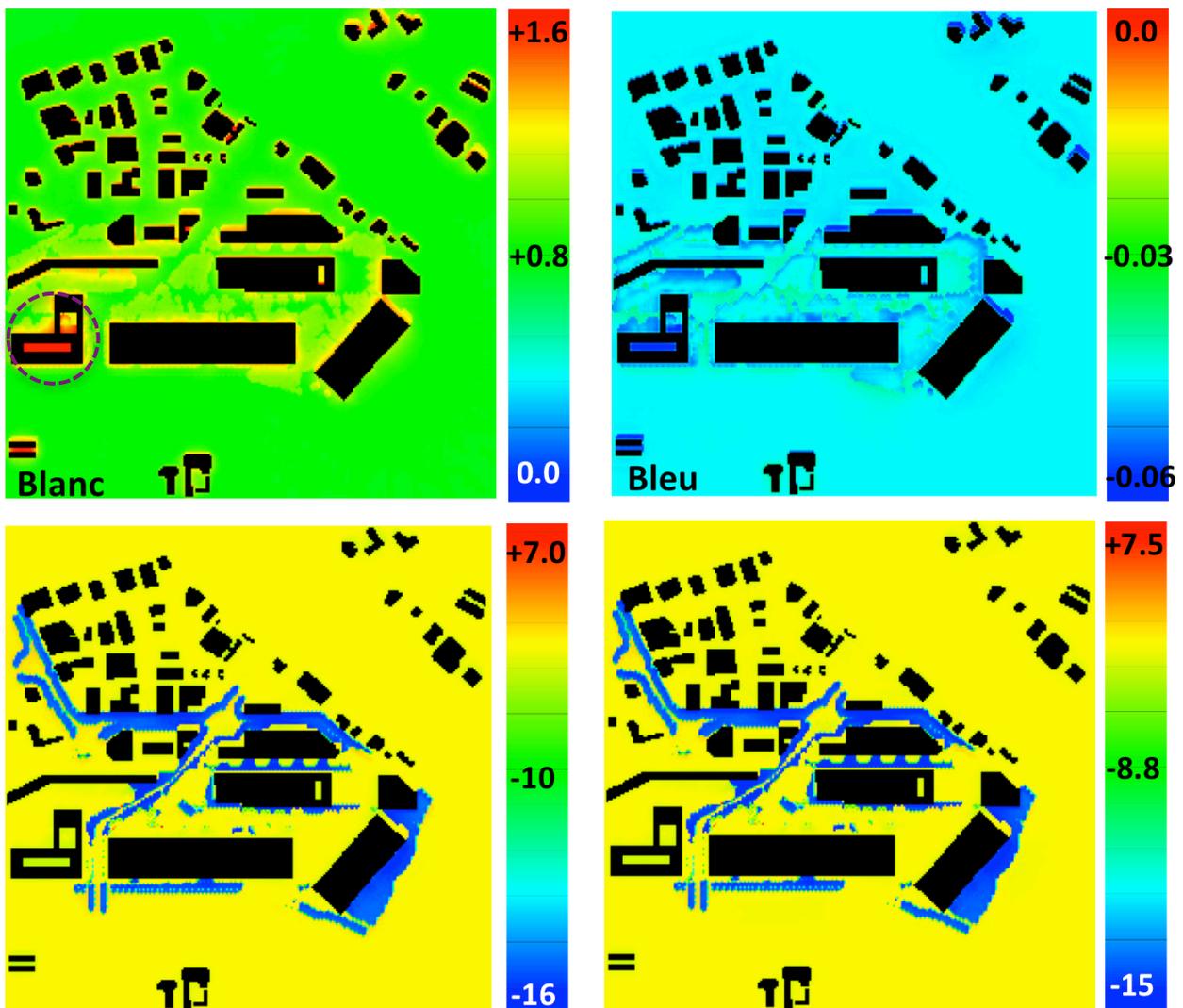


Figure 55 : Ecart de température radiante moyenne entre les quatre variantes et le projet initial, pour le jour.

Nous rappelons aussi, que ces données ont été calculées pour une hauteur de 1.5m par rapport au sol, afin de centrer les effets sur le niveau des usagers. Ce qui permet aussi d'observer ces effets sous les arbres.

De la même manière que pour la structure verticale des bâtiments dans une ville, la chaleur reste potentiellement piégée la nuit, les arbres absorberont beaucoup de chaleur radiante pendant la journée, notamment ceux plantés sur un milieu très minéralisé. La différence réside essentiellement sur d'autres caractéristiques, par exemple l'effet de l'évapotranspiration des éléments végétaux, qui contrairement à la variante « prospect », présentée précédemment peut jouer un rôle crucial sur la mitigation de la chaleur.

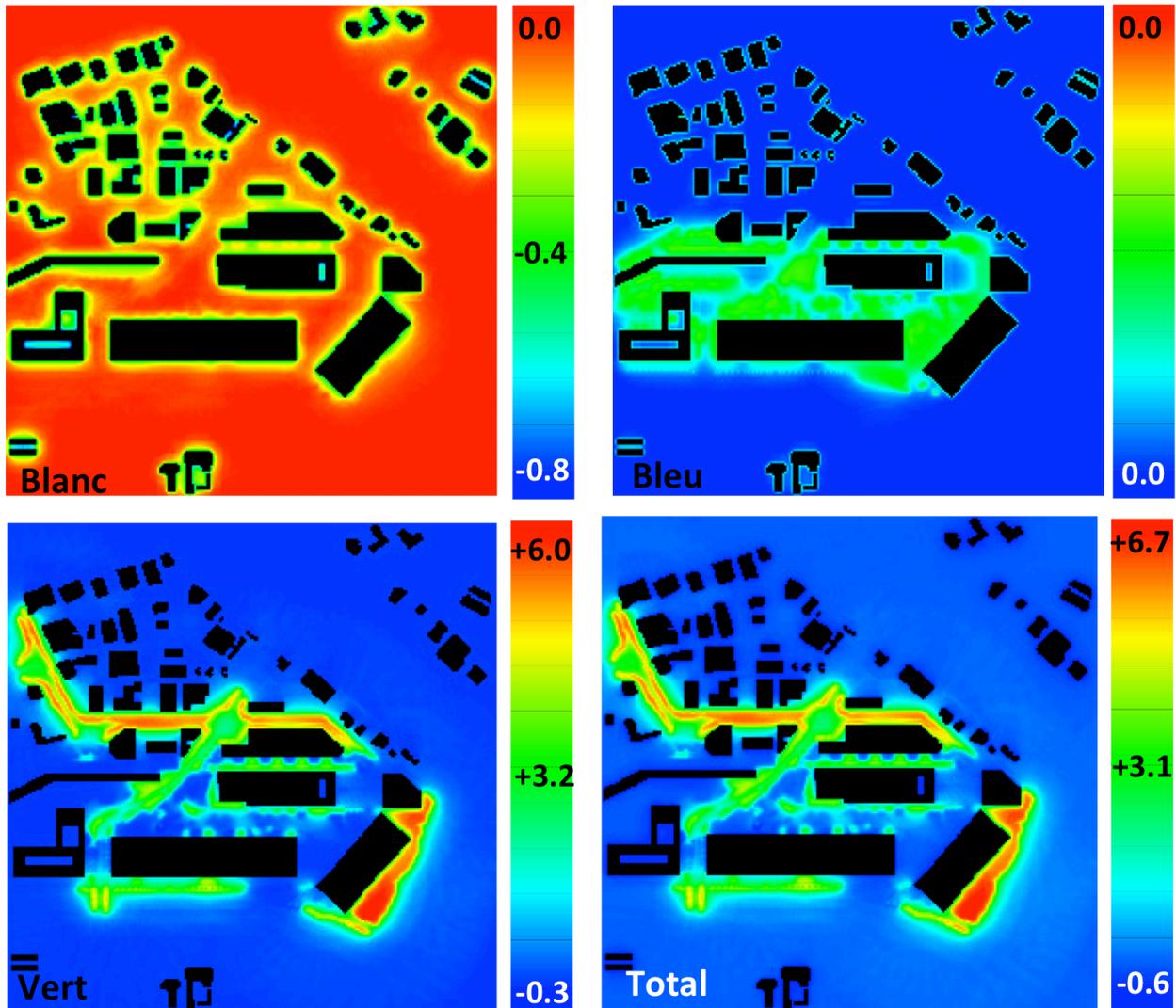


Figure 56 : Ecart de la température radiante moyenne entre les quatre variantes et le projet initial, pour la nuit.

Nous avons examiné ici l'effet isolé sur chaque variable climatique, afin d'avoir un aperçu sur la manière dont chaque dispositif pour chaque variante agit ou contribue à la mitigation des ICU. Cela nous aidera par la suite à comprendre les résultats trouvés pour la température physiologique calculée pour un piéton qui circule dans le quartier.

5.3. Itinéraires des piétons et confort thermique extérieur

Les espaces extérieurs sont très importants pour les villes durables parce qu'ils doivent encourager et accueillir la circulation des piétons, des vélos, des activités de plein air, ainsi que contribuer au dynamisme et à l'urbanité. Dans un contexte de changement climatique, des espaces extérieurs qui permettent une expérience agréable en terme de confort thermique pour leurs piétons peuvent effectivement améliorer la qualité de la vie urbaine. Encourager la population à fréquenter les rues et les espaces extérieurs sera bénéfique pour les villes de différents points de vue, physiques, environnementaux, économiques et sociaux (Hakim et al., 1998; Hass-Klau, 1993; Jacobs, 1972; Whyte, 1988).

Parmi les nombreux facteurs qui déterminent la qualité des espaces extérieurs, le microclimat urbain joue un rôle prégnant. Contrairement aux conducteurs de voitures, les piétons sont directement exposés à leur environnement immédiat en termes de variations de l'ensoleillement et de l'ombre, des changements de vitesse de vent et d'autres variables. Ainsi, la perception du confort thermique est fortement influencée par le microclimat local. Et le microclimat influence les décisions sur l'opportunité d'utiliser l'espace.

Dans cette étape, nous construisons les analyses du microclimat de la ZAC et les dispositifs de rafraîchissement proposés en lien avec le plan de mobilité local pour les piétons et les vélos.

L'influence du confort thermique sur les activités de plein-air est une question complexe, renvoyant à des aspects climatiques et comportementaux. Ici, nous nous intéressons à une analyse simplifiée des conditions de confort thermique (à partir du calcul de la Température Physiologique Equivalente – PET, mentionnée auparavant) estimées pour certains itinéraires à l'intérieur de la ZAC, afin d'en tirer des propositions pour les aménageurs du projet urbain en cours.

Cela nous permettra également d'avoir des mesures ponctuelles sur un trajet qui sera plus fréquenté par les piétons et les vélos, en tenant en compte du passé thermique de l'usager d'un parcours.

Nous allons initialement présenter brièvement les itinéraires piétons et vélos proposés par les aménageurs de la ZAC et ensuite, nous exposerons les résultats pour la Température Physiologique Equivalente calculée pour l'ensemble de la partie de la ZAC étudiée et pour le parcours indiqué.

5.3.1. La mobilité et les itinéraires dans la ZAC Montaudran

Le projet de la ZAC Montaudran prévoit un réseau de circulation qui permet la continuité des déplacements cycles déjà existants et favorise l'accès aux transports en commun par des cheminements piétons et cycles en accès direct.

A partir du plan-masse et des usages prévus dans le projet, nous avons choisi trois liaisons jugées capitales dans l'analyse du confort thermique du piéton : le cheminement qui relie la

Gare à la *Place Centrale* ; le cheminement qui relie la *Place Centrale* au *Forum*, par l'ancienne piste d'atterrissage ; et, enfin, le cheminement qui relie la *Place Centrale* au *Parc Sportif* (Figure 57).

Ces cheminements correspondent aux déplacements potentiellement les plus utilisés à pied et surtout en saison d'été. Le parc central-sud et le sud de la zone est plutôt destiné aux activités ayant une fréquentation hors vacances scolaires. La piste est un des objets le plus critiques du point de vue du confort thermique extérieur étant donné ses dimensions assez monumentales et son caractère patrimonial avec des caractéristiques physiques devant être conservées.

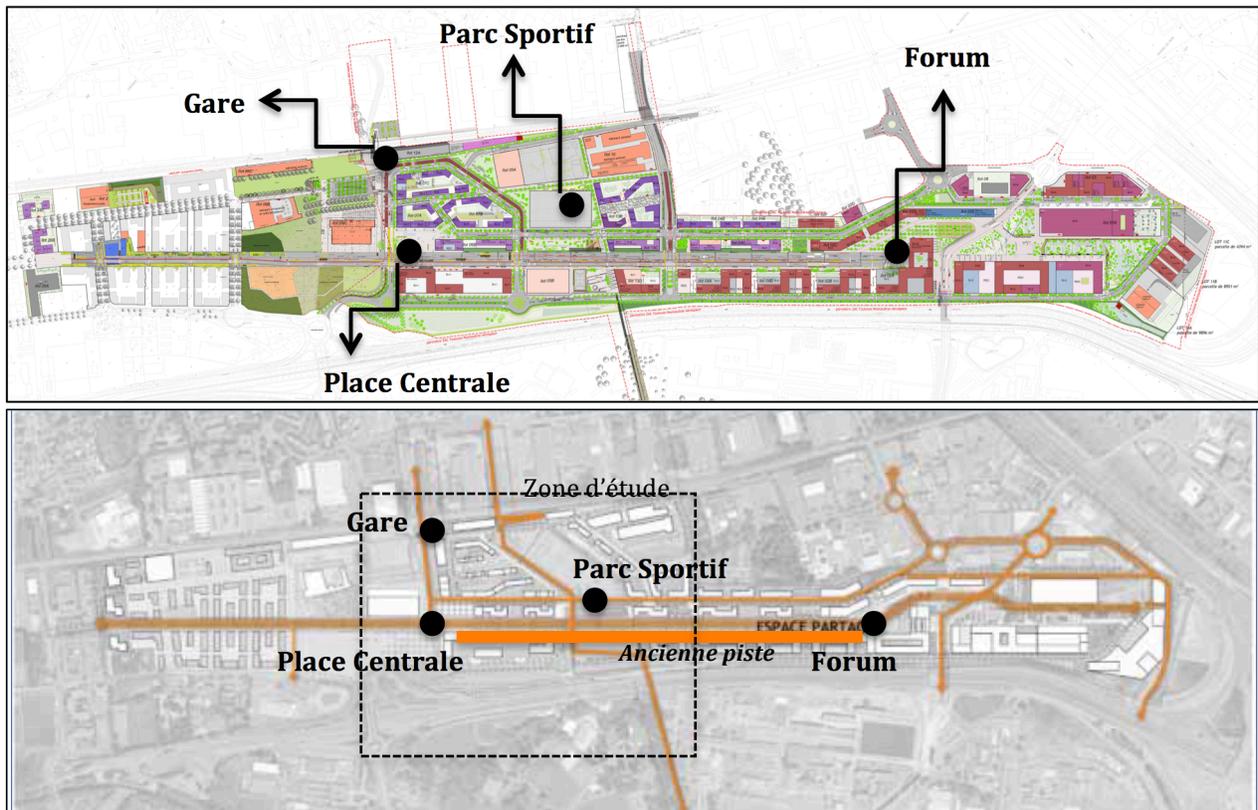


Figure 57 : itinéraires piétons et vélos prévus pour la ZAC Montaudran.

Un scénario simple de marche relativement courte distance est simulé pour illustrer l'idée de suivi d'une condition thermique transitoire d'une personne, alors qu'il/elle se promène dans l'environnement urbain de la ZAC.

A l'intérieur de la même zone d'intérêt pour cette étude, le point d'origine, le point de destination et le parcours sont aussi indiqués dans la Figure 58. Le chemin d'accès à la Place Centrale du Forum est d'environ 600 m le long sur la piste ; le chemin entre la Place Centrale et le Parc Sportif est d'environ 400 m et, entre la Gare et la Place Centrale, d'environ 200 m avec différentes conditions d'ombrage et d'ensoleillement.

Afin d'effectuer les analyses, les diverses conditions de confort thermique d'un piéton ont été observées. Le suivi de la condition thermique de ce piéton est caractérisé par un homme dit « standard », de 35 ans, 1.75 m, 75 kg, 1.2 m/s vitesse de marche, une résistance vestimentaire de 0,9 Clo, et un métabolisme de 0,8. La personne est définie initialement comme ayant une température du corps (T_{core}) de 36.8°C et une température de la peau (T_{skin}) de 33.7°C, comme un état neutre.

Rappel des trois itinéraires choisis dans cette étude :

A – B : Itinéraire entre la gare et la place centrale

C – D : Itinéraire entre la Place centrale et le Forum (par l'ancienne piste)

E – F : Itinéraire entre la Place centrale et le Parc sportif

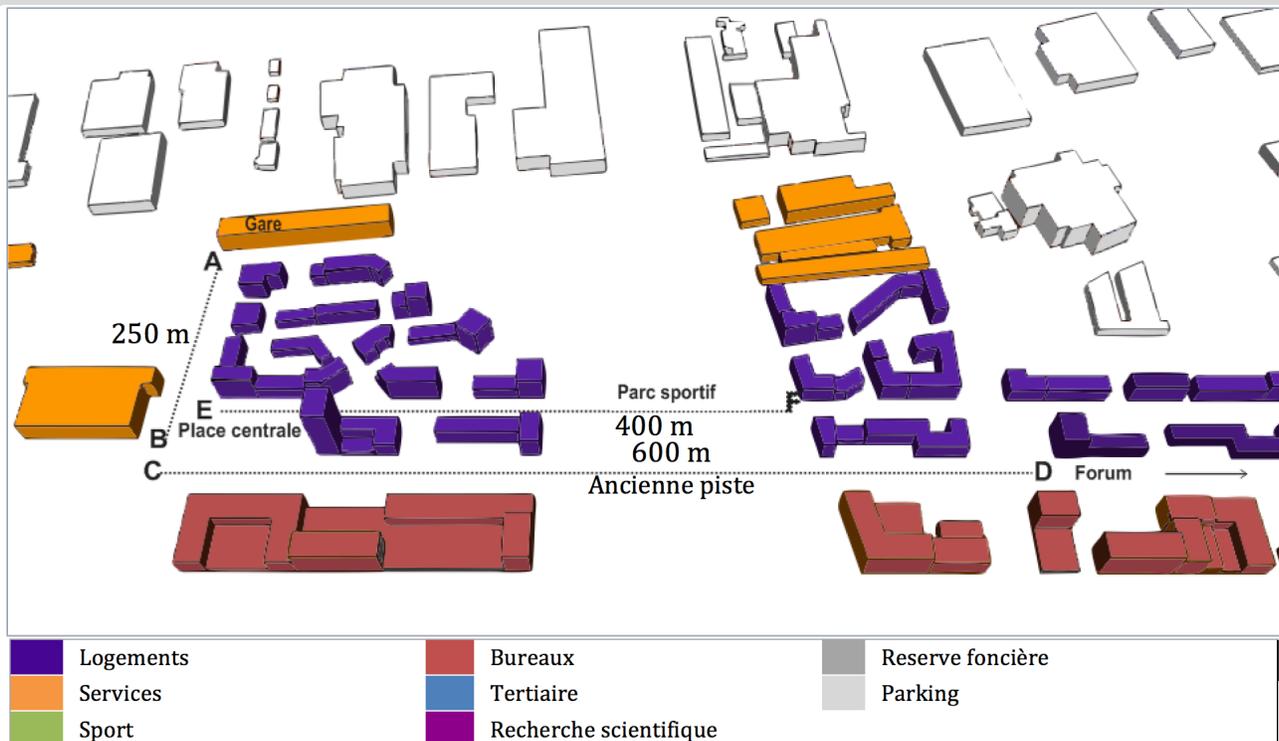


Figure 58 : itinéraires étudiés.

5.3.2. Le conditions de confort thermique sur la piste de la ZAC

Avant de passer aux analyses sur notre zone d'étude, analysée à plus haute résolution, nous avons analysé initialement un parcours intégral d'un piéton sur l'ancienne piste, dans le but d'avoir déjà une idée des conditions prévues dans le projet initial.

a) Itinéraire de bus sur la piste – ZAC intégrale

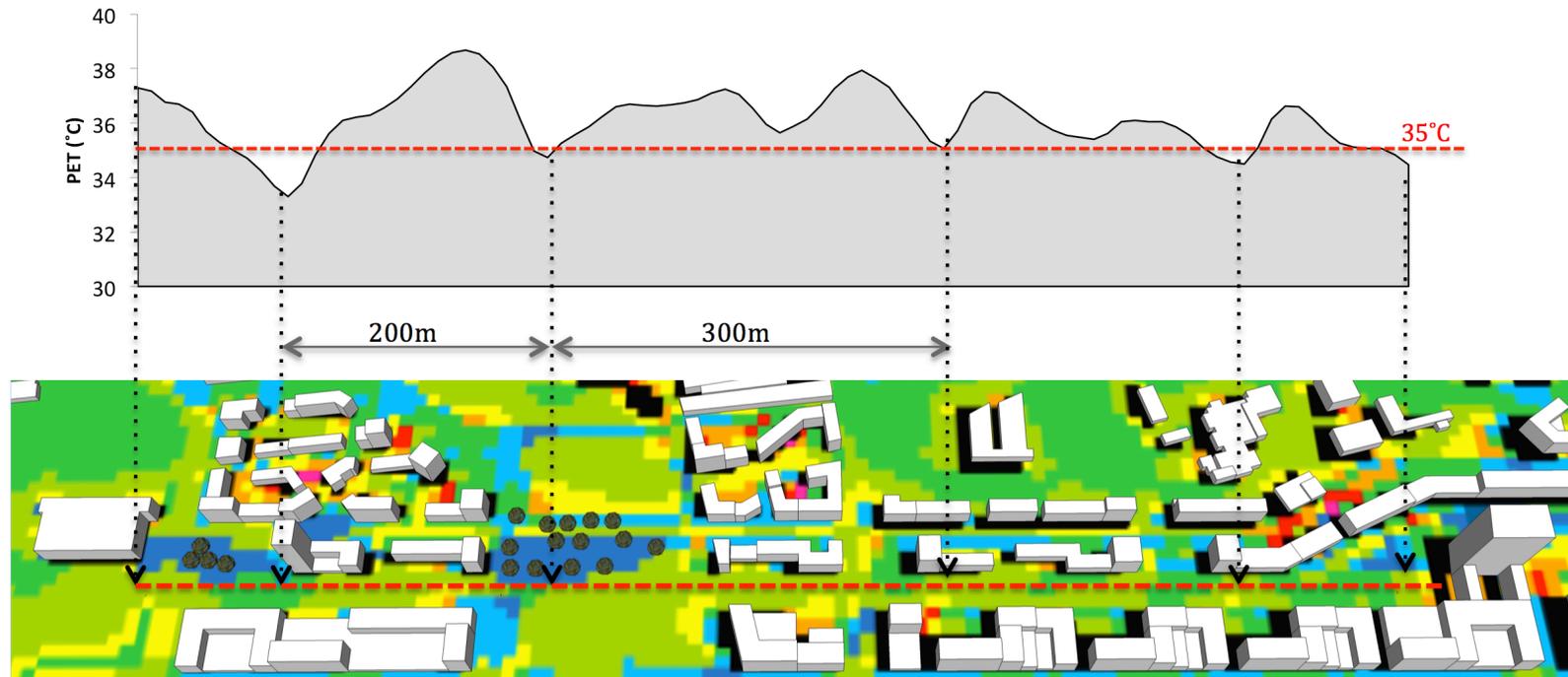


Figure 59 : graphique et carte de la Température Physiologique Equivalente avec itinéraire sur piste.

La Figure 59 ci-dessus présente une carte correspondant à la distribution spatiale de la Température Physiologique Equivalente (PET), pour une heure de la journée (à midi) et pour une partie du projet de la ZAC qui entoure l'ancienne piste. En-dessus de cette carte nous présentons un graphique avec le profil de la PET pour l'itinéraire sur piste côté Est. Sur le graphique, nous illustrons un seuil pour la PET. Au-delà de 35°C le piéton est soumis à une condition de stress thermique important.

A partir de ces résultats, nous pouvons vérifier que malgré quelques situations ponctuelles où le piéton retrouve une condition modérée de confort thermique, l'itinéraire du projet initial sur la célèbre piste reste globalement très aride.

Les îlots de chaleur urbain obtenus sur la piste pendant la journée peuvent être associés à certains choix d'aménagement qui sont décisifs, tel que le facteur de vue du ciel qui peut être lié à la densité bâtie, la distance entre les bâtiments, le prospect, la présence des végétaux, des espaces d'eau, etc. Le seul îlot de fraîcheur indiqué par une PET d'environ 33°C trouvé sur cet itinéraire, comme nous le montre la Figure 31, se situe sous l'ombre portée de la grande tour isolée du projet.

b) Itinéraire sur piste – scénario de base

Dans cette étape nous entamons les analyses du projet à une résolution plus fine, en nous limitant à la zone d'intérêt dans cette étude. Dans ce premier cas, nous nous intéressons au scénario de base. Les résultats sont présentés également à 12h.

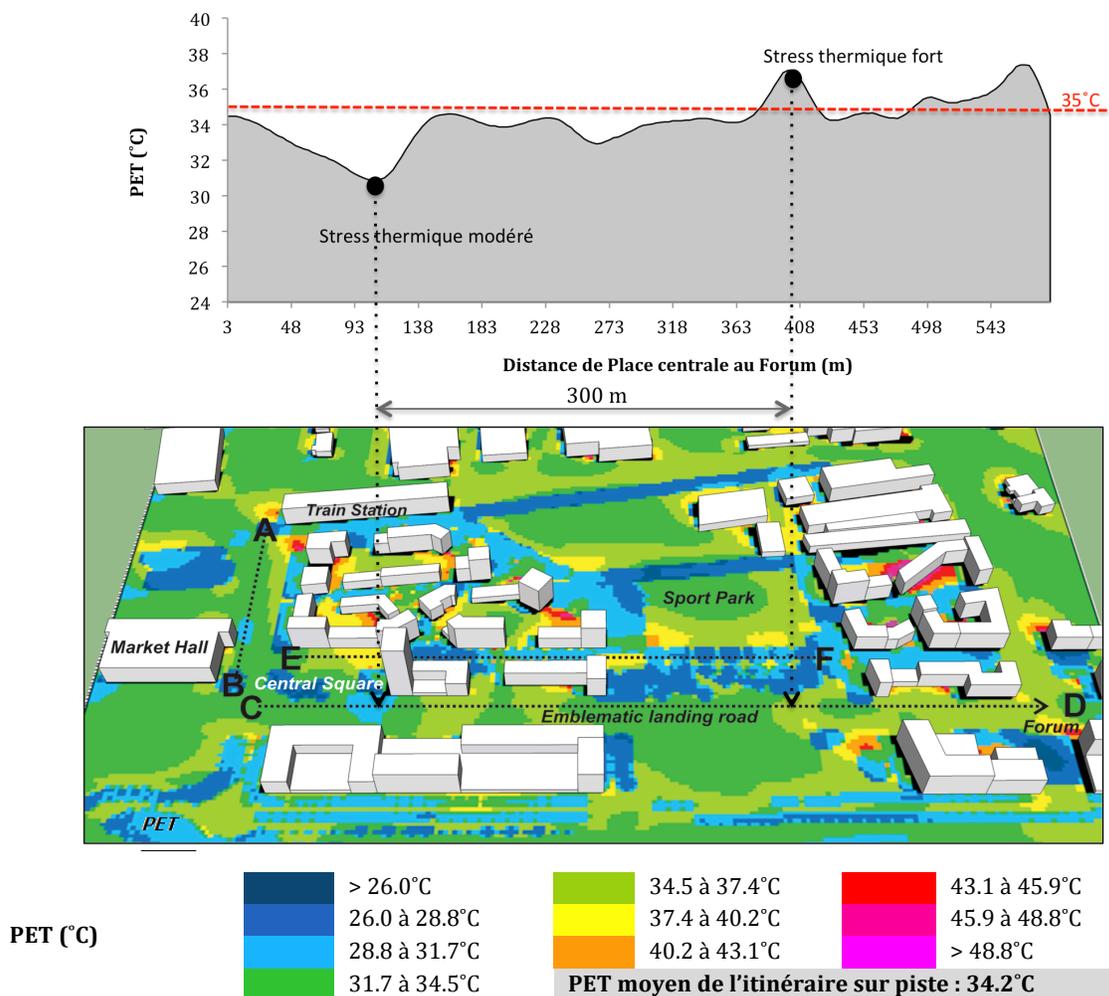


Figure 60 : graphique et carte de la Température Physiologique Equivalente pour le scénario de base.

A partir des données de la Figure 60, nous constatons que la moyenne de la PET sur cet itinéraire est visiblement moins importante que dans la projection de la carte à basse résolution (Figure 59). Il est possible toutefois de remarquer les mêmes comportements associés par exemple à l'effet des ombres portées qui permettent de protéger les piétons ponctuellement lors de son passage autour des bâtiments de grande hauteur. Puisque la piste est dépourvue d'autres éléments pouvant créer de l'ombre ou de la fraîcheur, les conditions thermiques des piétons passant par cet itinéraire ne sont pas très favorables.

Les graphiques des Figure 61 et Figure 62 ci-après nous présentent la PET pour les deux autres cheminements prévus. Sur ces graphiques il est possible de remarquer très clairement l'effet ponctuel de l'ombre portée par les arbres qui font chuter la température physiologique de l'utilisateur de 34°C à 26°C. Par contre, comme dans le cas de la Figure 59, dans son trajet de la Gare vers la Place Centrale, pendant trois quarts du parcours, le piéton subit une condition de stress thermique important.

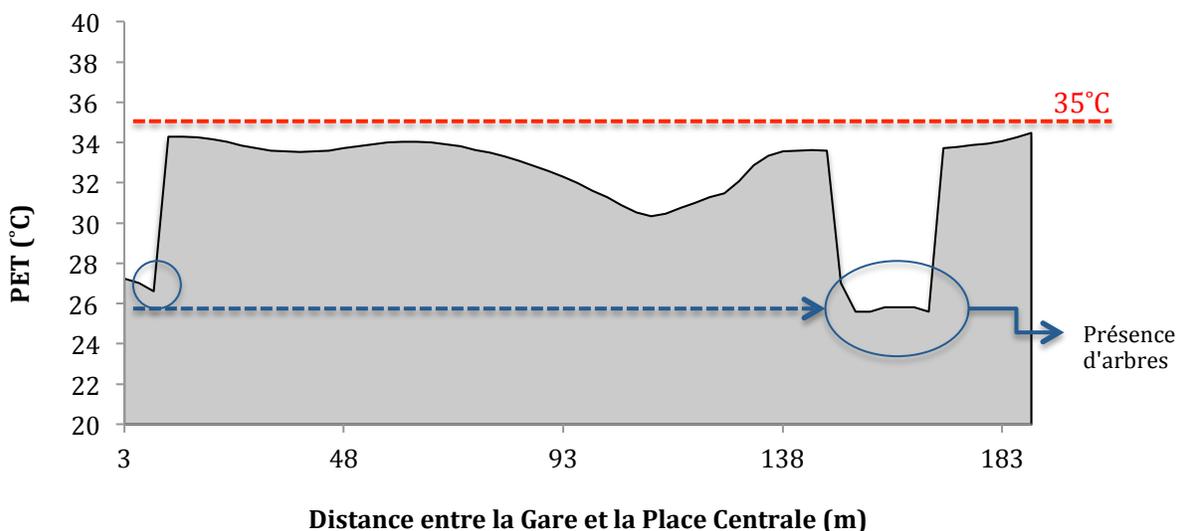


Figure 61 : graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Gare (A) à la Place Centrale (B) pour le scénario de base.

Le cheminement qui amène le piéton de la Place au Parc des sports, est marqué par un début de trajet remarquablement chaud sur la Place Centrale, avec une PET qui peut atteindre 39°C et exposer le piéton à une condition de stress thermique très important. Malgré l'importance de la Place Centrale comme lieu collectif de loisir et de permanence dans ce projet de la ZAC, cela a été initialement prévu comme un équipement assez ouvert et aride, avec une forte ouverture au ciel, complètement minéralisé et avec très peu d'arbres. Comme on peut le voir sur ces simulations, les conditions de confort thermique n'étant pas très favorable, cela peut conduire à ce que les usagers ne cherchent pas à rester longtemps dans ces espaces en saison chaude. Quand le piéton quitte la Place et qu'il passe sous l'ombre portée d'arbres d'alignement prévus sur la voie qui le conduit jusqu'au Parc Sportif, on peut remarquer sur le

graphique (Figure 62) que sa température physiologique chute à ce moment de 38°C à 26°C. Le profil thermique de cet itinéraire, comme nous montre le graphique ci-dessous, est très parlant, dans la mesure où il montre clairement les différents passages du piéton sous l'ombre portée à la fois des arbres et de certains bâtiments, et l'absence d'ombre. Cela nous informe sur les dispositions à prendre concernant l'espacement des arbres et le choix des essences. Dans cette voie, l'alignement de « *Betula utilis* » (une espèce d'arbre à port petit à moyen et de surface foliaire relativement faible – voir Annexe 1) espacés de 6m ne permet pas d'assurer une certaine régularité de l'ombre portée et ne permet pas non plus de garantir une régularité en terme de confort thermique. En même temps, cette régularité n'est peut-être pas nécessaire, vu que la moyenne du parcours hors la Place Centrale reste à un niveau toutefois acceptable.

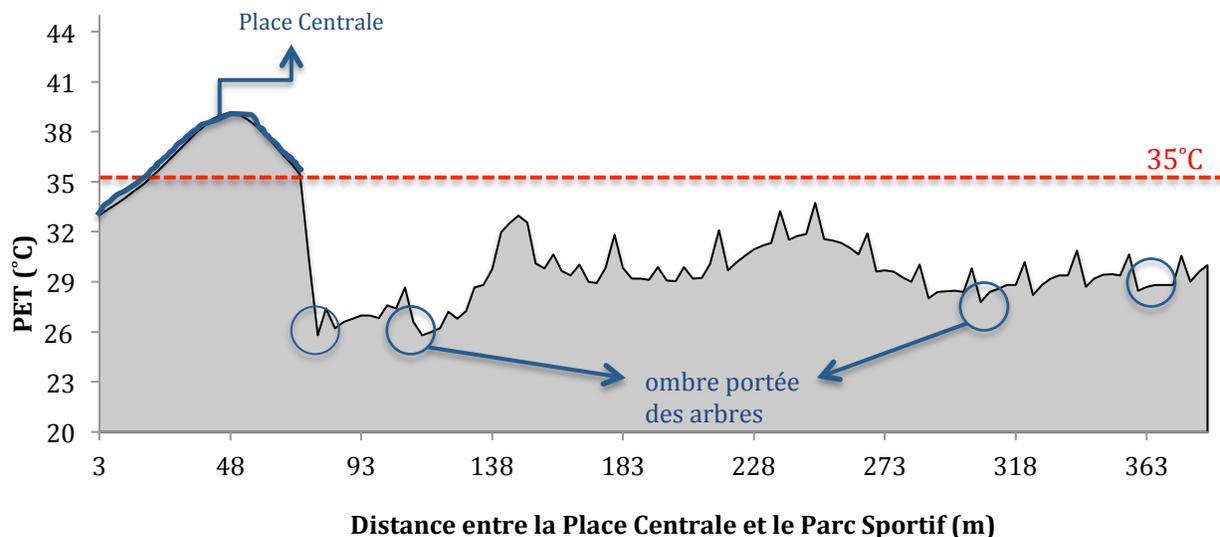


Figure 62 : graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Place Centrale (A) au Parc Sportif (B) pour le scénario de base.

c) Itinéraire sur piste – scénario « blanc »

Dans ce scénario, le piéton marche sur le même itinéraire sur la piste (de la Place vers le Forum), mais exposé à une différence importante : toutes les surfaces des bâtiments sont à fort albédo (albédo de 0.9). Les autres caractéristiques du projet demeurent identiques.

La Figure 63 synthétise les résultats obtenus pour ce scénario. Comme nous pouvons le remarquer, le profil des températures physiologiques sur les divers points du trajet est proche du scénario de base, néanmoins il présente sur tous les passages à proximité des bâtiments, à l'Est de la piste, des PET nettement plus fortes. La moyenne de tout le trajet est d'environ 1°C plus importante que dans le scénario de base et le piéton est exposé quasiment sur tout son parcours à une condition de stress thermique très important.

Cela peut être expliqué par le fait que toute l'énergie radiante arrivant sur la ZAC est réfléchi (à 90%) par toutes ces surfaces bâties à revêtements très clair directement sur l'environnement urbain et les usagers de l'espace ou encore réfléchi par les autres bâtiments également à très fort albédo, en intensifiant la température radiante ressentie par le piéton.

Le pic d'inconfort se trouve, comme dans le scénario de base, lié à la condition que le piéton est très peu protégé par les éléments de la ville ou les éléments végétaux faisant ombre à la radiation solaire directe.

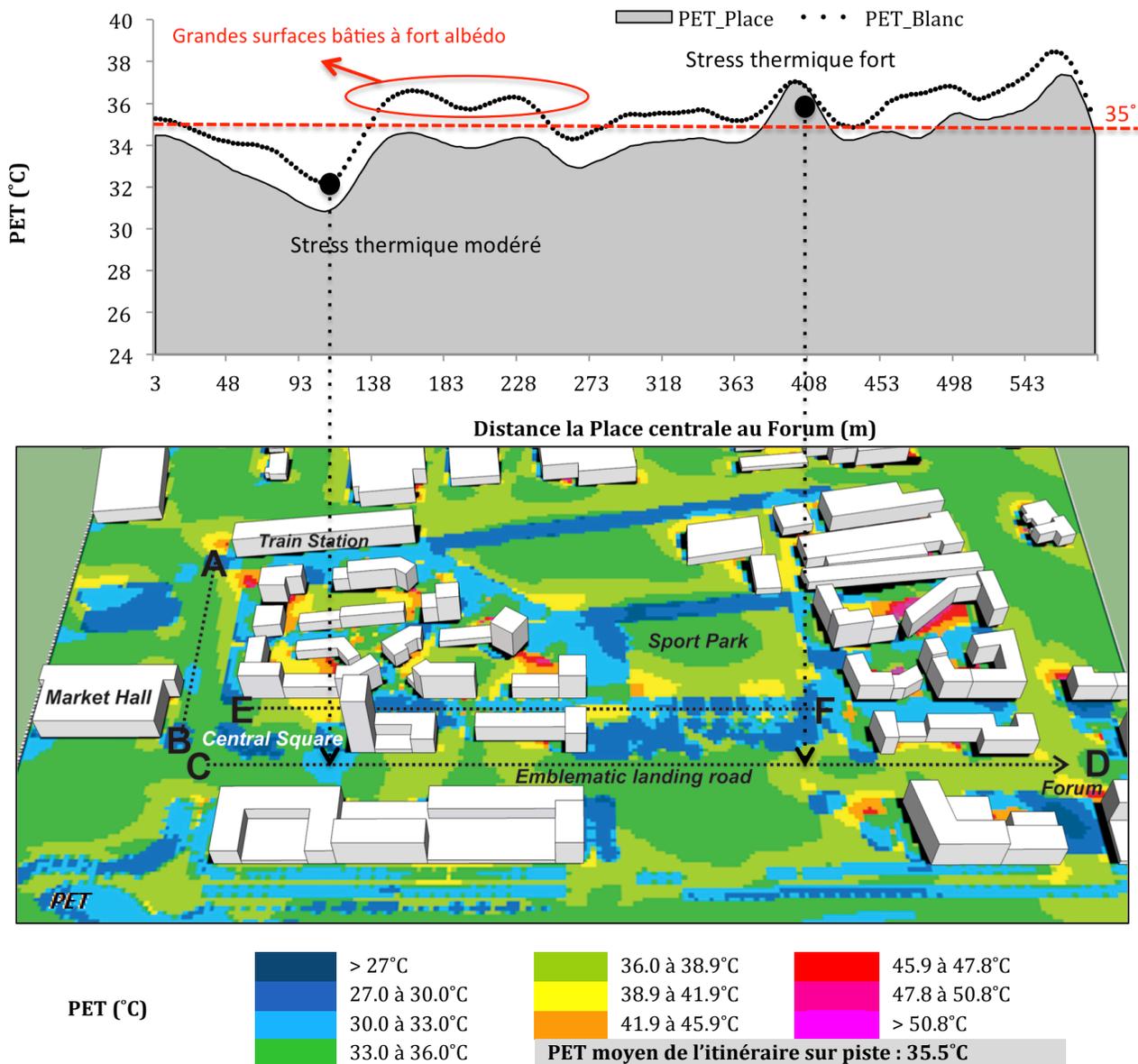


Figure 63 : Graphique et carte de la Température Physiologique Equivalente pour le scénario « Blanc ».

Un profil de température physiologique très similaire au cas de base sur l'itinéraire de la Gare vers la Place Centrale a été trouvé pour le scénario « Blanc ». Si la forme du profil est la même, la moyenne de la PET est plus élevée tout le long sur ce scénario (Figure 64).

Le même comportement est trouvé pour le troisième itinéraire étudié, celui qui amène l'utilisateur de la Place vers le Parc sportif. Toutefois, nous pouvons remarquer une hausse encore plus significative au niveau de la Place Centrale où la PET s'élève à plus de 41°C, 2°C de plus que le scénario de base (Figure 65).

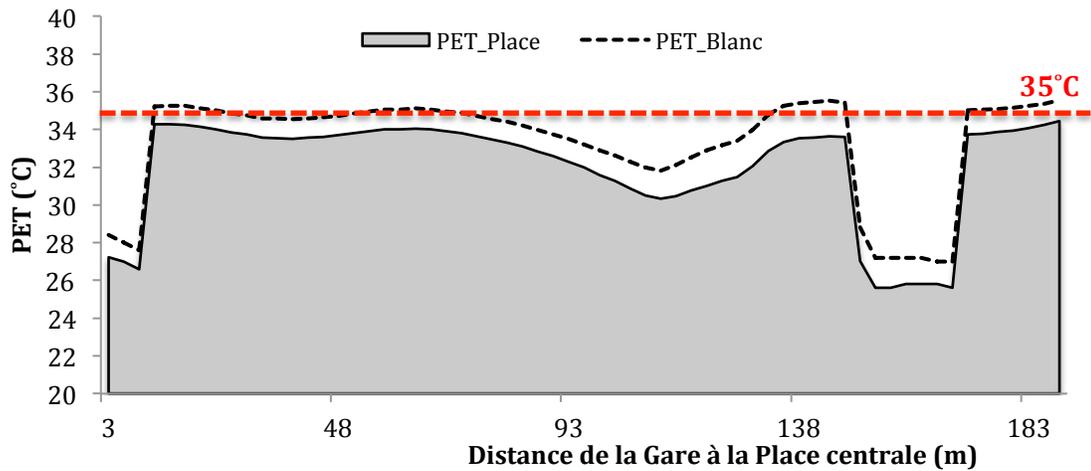


Figure 64 : Graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Gare (A) à la Place Centrale (B) pour le scénario Base et « Blanc ».

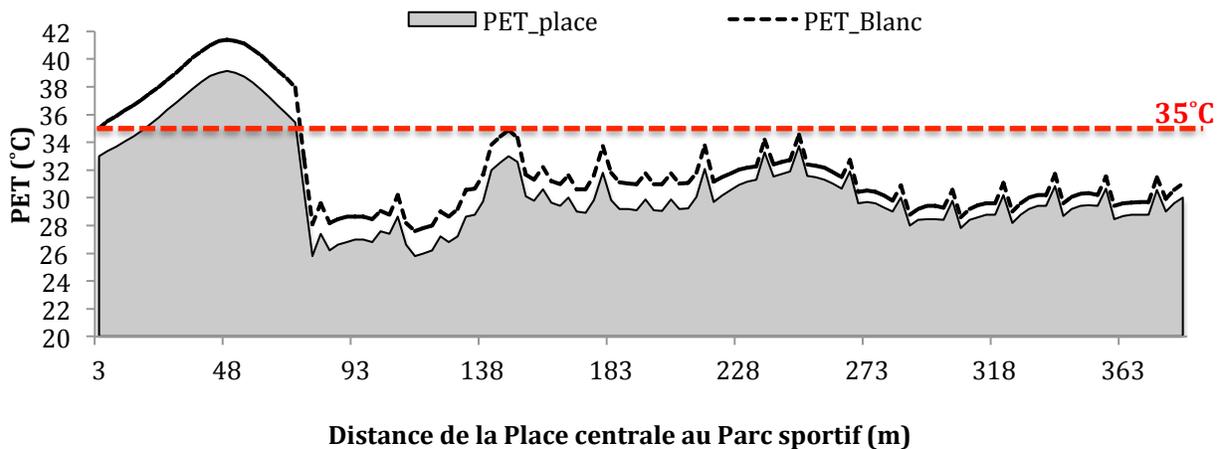


Figure 65 : graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Place Centrale au Parc Sportif pour le scénario de base et « Blanc ».

d) Itinéraire sur piste – scénario « vert »

Dans ce scénario, le piéton marche de la Place vers le Forum à l’abri de deux alignements d’arbres de port moyen sur les deux extrémités latérales de la piste. Une densité plus importante des végétaux a été considérée sur tous les espaces verts prévus dans le projet. Nous avons ajouté également un nombre important d’arbres en bosquet sur la Place Centrale, considérée très aride dans le projet initial. Les autres caractéristiques du projet demeurent identiques.

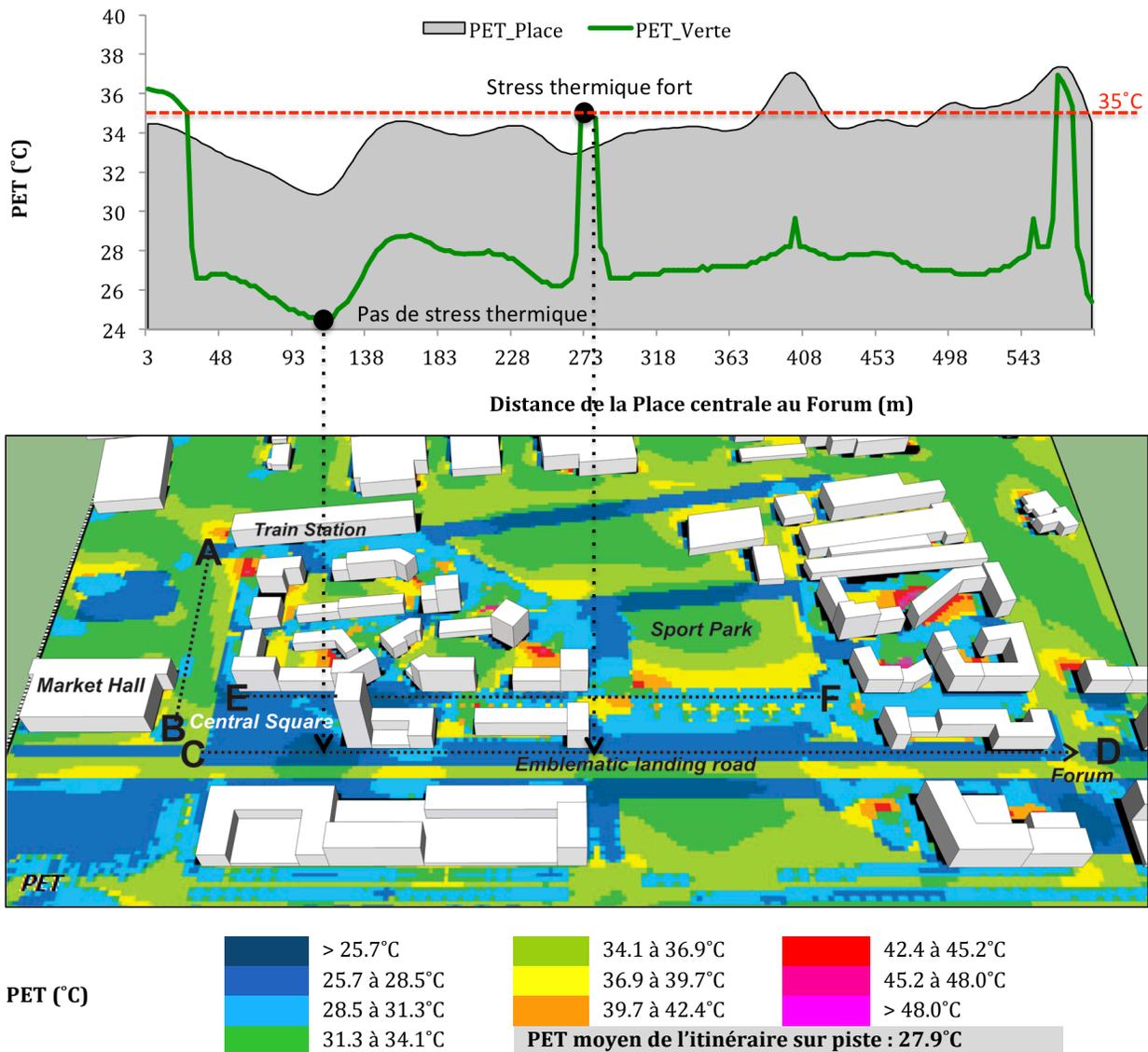


Figure 66 : graphique et carte de la Température Physiologique Equivalente pour le scénario « Vert ».

La Figure 66 synthétise les résultats obtenus pour ce scénario. Comme nous pouvons le remarquer, le profil des températures physiologiques sur les divers points du trajet est bien loin du scénario de base, présentant des PET nettement plus faibles. La moyenne de tout le trajet est d’environ 6°C plus faible que dans le scénario de base et 7 ° plus faible que dans le

scénario « Blanc ». Le piéton est exposé quasiment sur tout son parcours à une perception thermique très favorable, à l'exception d'un passage très ponctuel au moment où le piéton traverse une rue de la ZAC et passe de l'ombre au soleil, comme nous le montre la Figure 66. Ce que démontre l'important impact de la température radiante parmi toutes les variables climatiques sur la définition de la PET et, dans cette étude le rôle capital de l'ombre portée par les arbres sur la création des îlots de fraîcheur urbains.

Sur le trajet qui amène le piéton de la Gare à la Place, la condition de confort reste pratiquement la même que dans le scénario de base (Figure 67). Pour l'itinéraire « Place-Parc Sportif », nous pouvons vérifier l'influence remarquable de la présence des végétaux sur la Place au début du trajet. Une réduction de d'environ 10°C dans la température physiologique du piéton peut être soulignée quand il marche sur le projet initialement proposé et sur le scénario plus « Vert ».

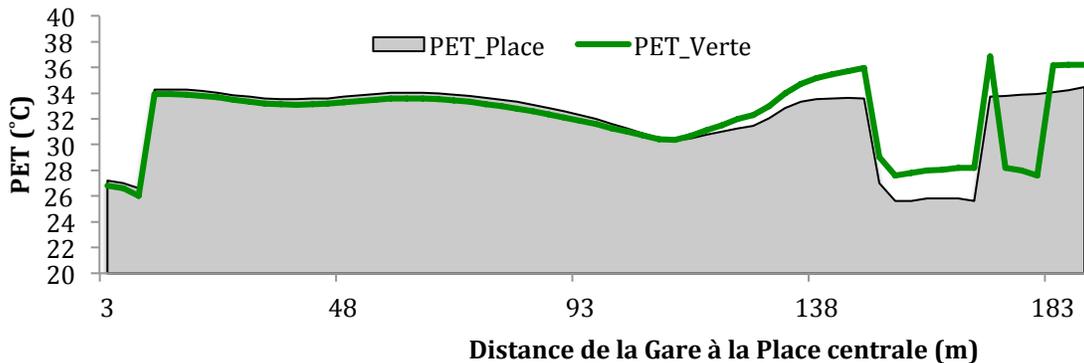


Figure 67 : Graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Gare (A) à la Place Centrale (B) pour le scénario Base et « Vert ».

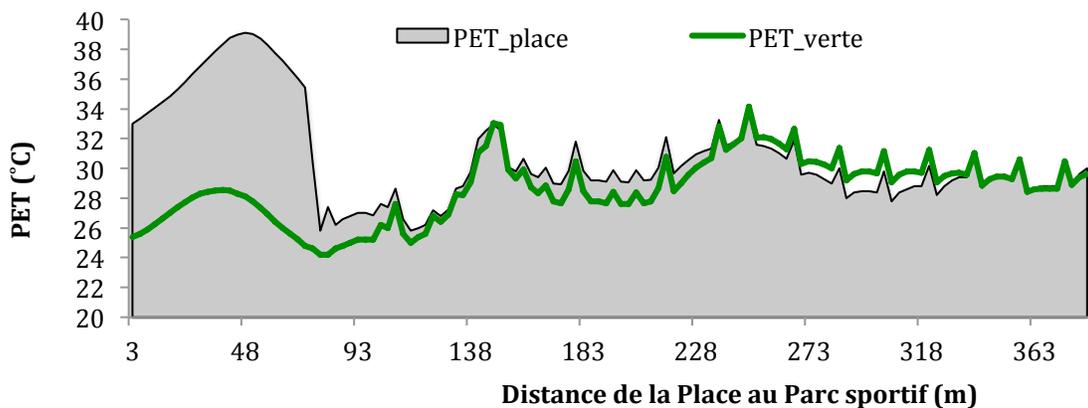


Figure 68 : Graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Place Centrale au Parc Sportif pour le scénario de base et « Vert ».

e) Itinéraire sur piste – scénario « prospect »

Dans ce scénario, le piéton marche de la Place vers le Forum sur la piste ayant un prospect deux fois plus élevé que dans le projet initial. Les autres caractéristiques du projet demeurent identiques.

Ce dispositif aura une influence en fonction de l'heure de la journée. Dans le cas étudié, vers midi, le piéton éprouve un itinéraire dans la limite du stress thermique modéré, toutefois sous des conditions moyennement plus favorables que dans le scénario de base. Cela peut être expliqué par la présence de l'ombre portée par les bâtiments qui entourent la piste qui est plus importante que dans le projet initial.

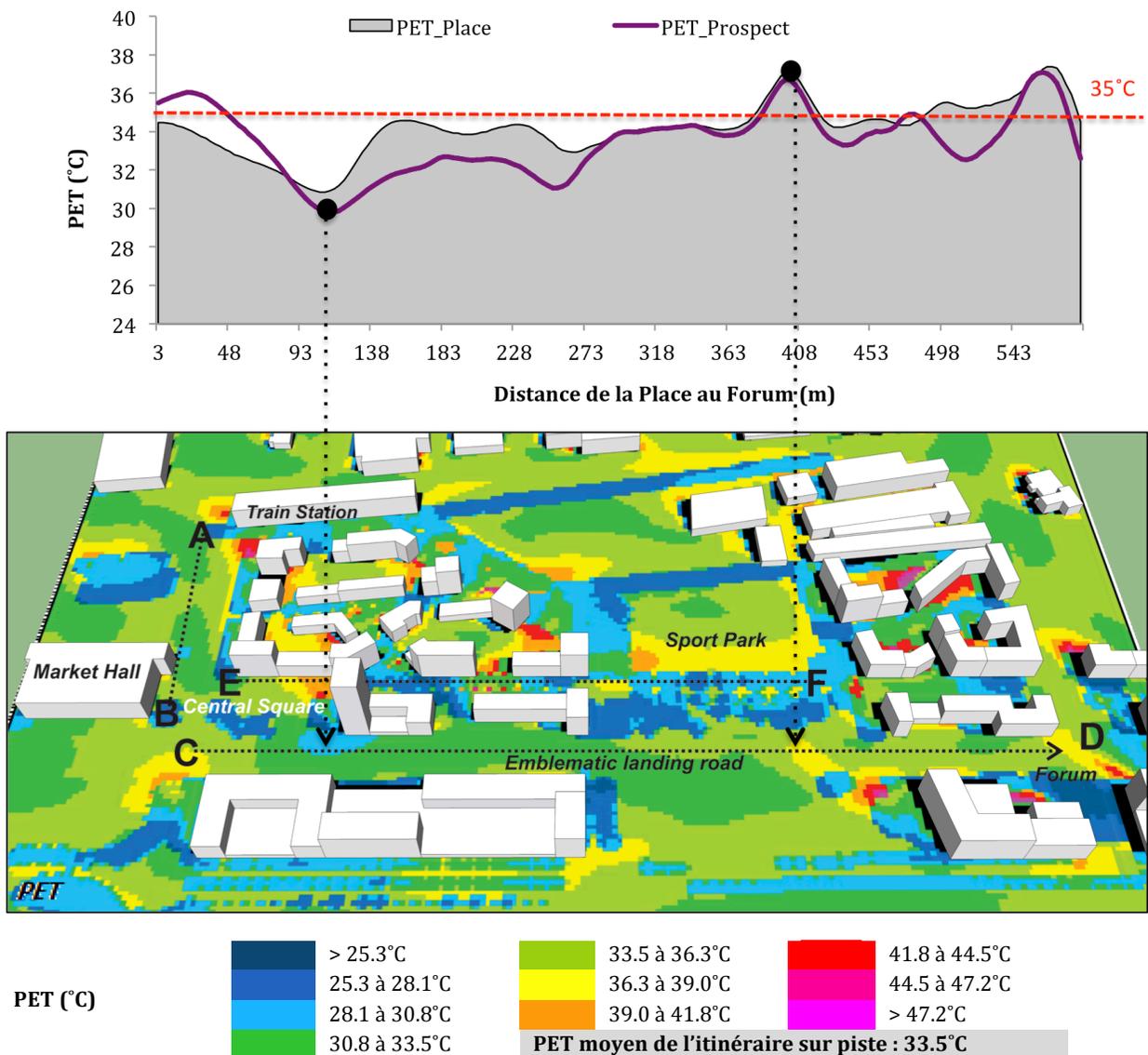


Figure 69 : Graphique et carte de la Température Physiologique Equivalente pour le scénario « Prospect ».

Sur les deux autres itinéraires, l'influence de ce dispositif est moins importante étant donné qu'il n'a été mis en place que sur le niveau de la piste (Figure 70 et Figure 71). Il est possible de remarquer que pour le trajet « Place-Parc Sportif », les PET peuvent être légèrement plus importantes. Cela peut être expliqué par deux effets distincts : a) l'orientation : les bâtiments à plus grande hauteur qui participent contribution à la piste ; b) le prospect encore plus élevé que sur certains points de ce trajet contribuera à ce que la chaleur cumulée s'échappe plus difficilement.

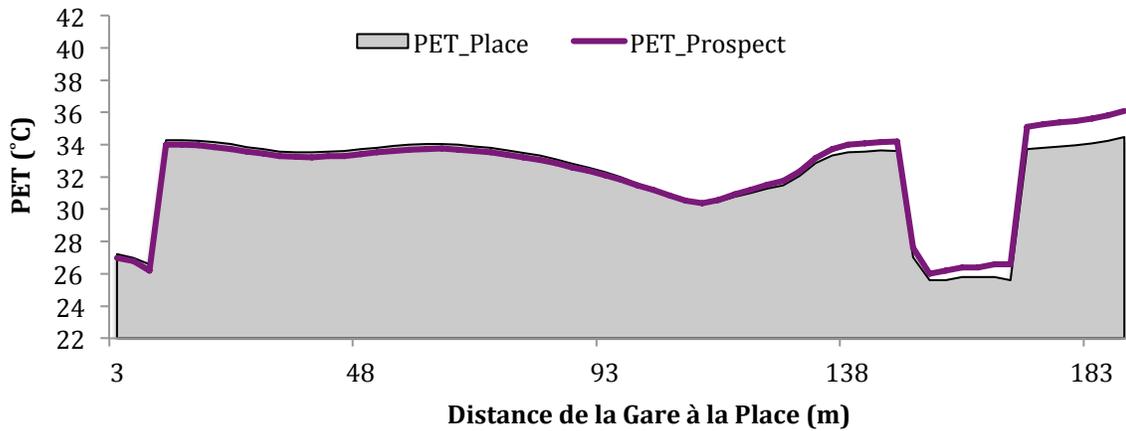


Figure 70: Graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Gare à la Place Centrale pour le scénario de base et « Prospect».

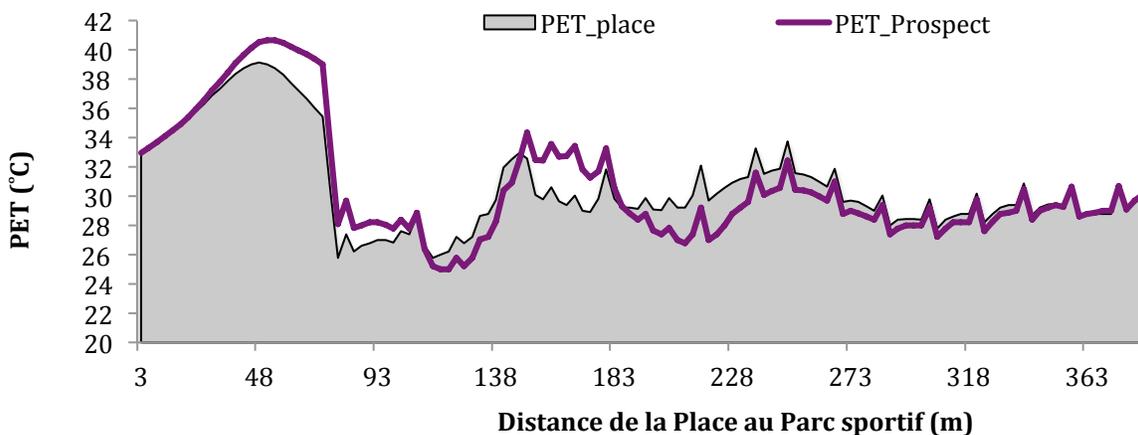


Figure 71 : Graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Place Centrale au Parc Sportif pour le scénario de base et « Prospect».

f) Itinéraire sur piste – scénario « Bleu »

Au niveau de l’itinéraire sur la piste, les bassins avec fontaine prévus sur la Place et le parc de récréation n’apportent pas d’influence significative sur la température physiologique équivalente des usagers (Figure 72). Comme nous avons vu précédemment, ces dispositifs vont avoir un impact très ponctuellement où ils sont placés et aussi en aval du vent. La PET moyenne sur ce trajet reste très proche des PET obtenues pour le scénario initial.

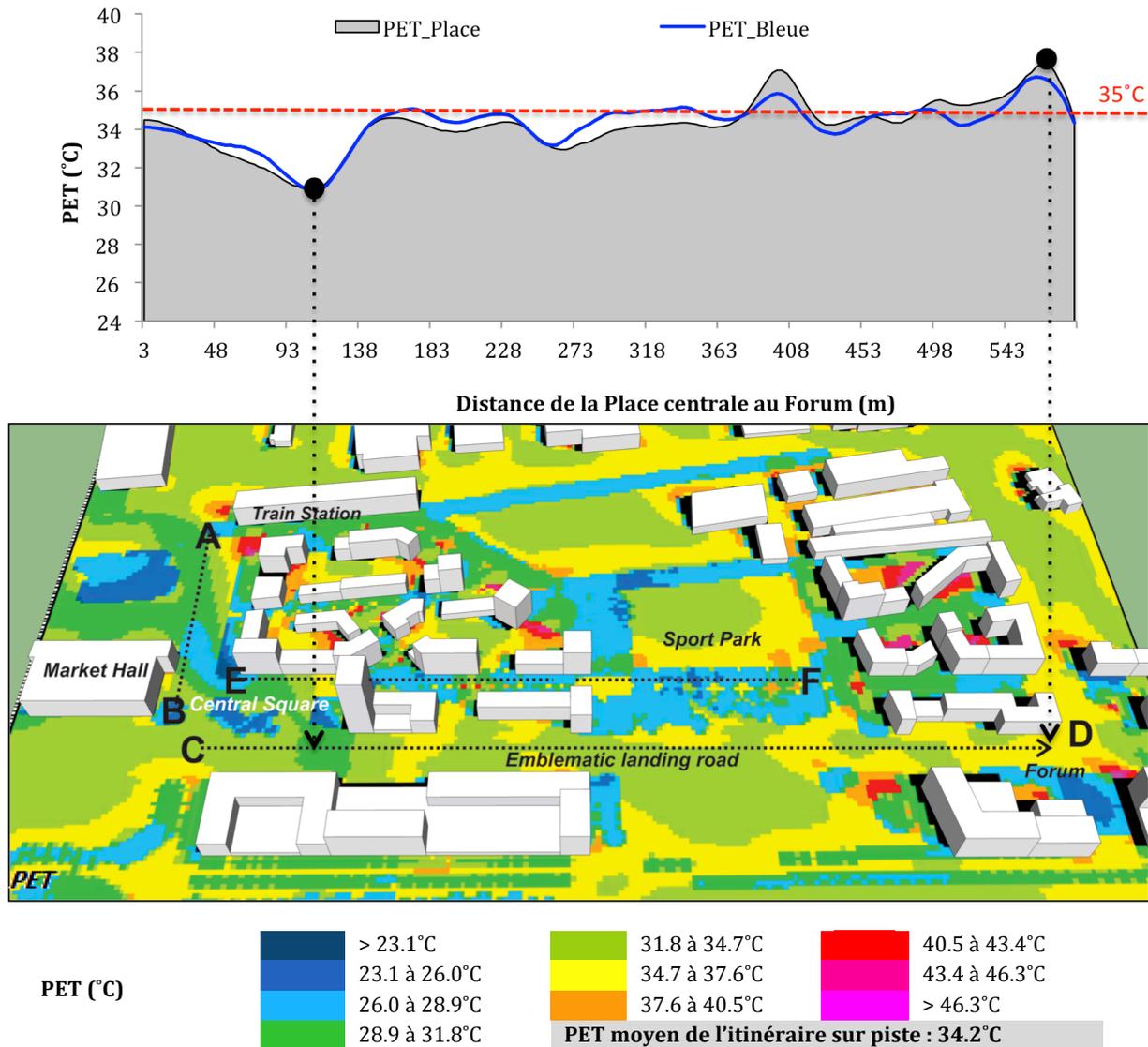


Figure 72 : graphique et carte de la Température Physiologique Equivalente pour le scénario « Bleu ».

Néanmoins, il est intéressant de vérifier l’impact remarquable de ce dispositif associé aux vents dominants. L’extension de l’influence d’un bassin situé au niveau de la Place centrale permet, par exemple, de créer des ilots de fraicheur urbains pratiquement sur tout le trajet qui amène l’usager de la Gare à la Place centrale. Une réduction allant jusqu’à 3°C peut être obtenue dans ce scénario par rapport au projet initial. Cela ne permet pas toutefois de réduire

la PET pour que le piéton jouisse d'une condition de confort thermique, car la température moyenne radiante joue encore un rôle capital dans ce but. Si elle était associée à l'ombre portée des arbres, l'influence de ce dispositif pourrait participer de façon décisive à la création des IFUs.

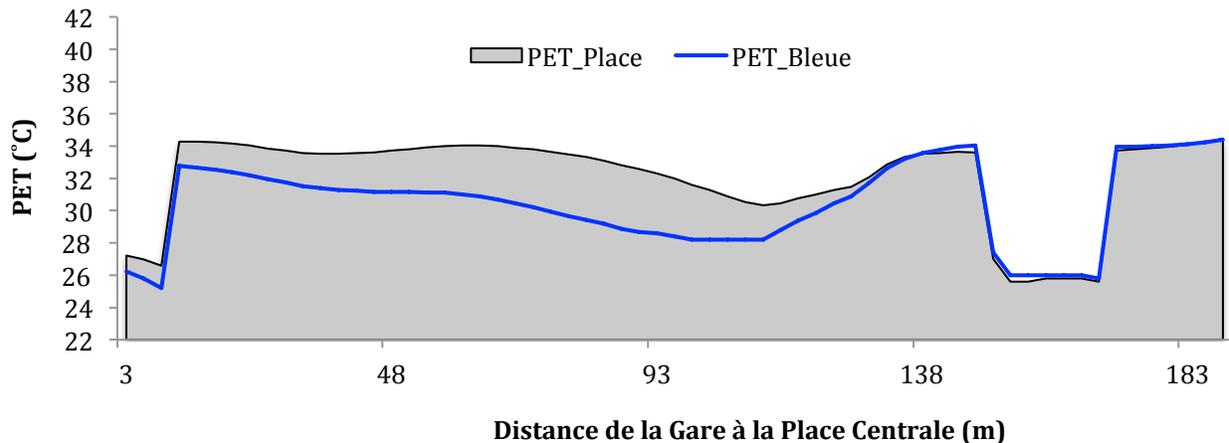


Figure 73: graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Gare à la Place Centrale pour le scénario de base et « Bleu».

Si on s'intéresse à l'itinéraire de la rue derrière la piste correspondant au trajet « Place-Parc sportif », nous pouvons aussi vérifier la pertinence de ces bassins en tant que dispositifs de rafraîchissement (Figure 74). Les PET sont remarquablement plus faibles sur tous les passages en aval des bassins (au début du trajet sur la Place centrale et sur le niveau du Parc sportif).

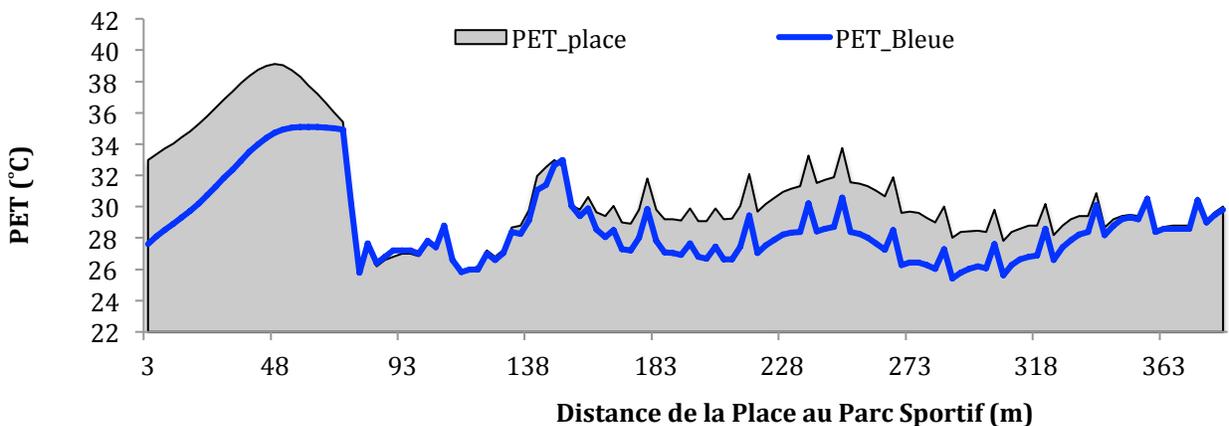


Figure 74 : graphique de la Température Physiologique Equivalente pour l'itinéraire de la Place Centrale au Parc Sportif pour le scénario de base et « Bleu».

g) Comparaison des itinéraires entre scénarios

A titre de comparaison et de synthèse des données présentées, nous avons tracé simultanément l'ensemble des résultats obtenus pour chacun des itinéraires (Figure 75, Figure 76 et Figure 77).

Nous pouvons remarquer que la présence du dispositif végétal apporte une réduction très sensible de la température physiologique de l’usager. Un écart type important sur toutes les variantes a pu être identifié au moment où le piéton passe sous les arbres prévus dans le projet ou dans les variantes. Cela est dû d’une part à l’effet de l’évapotranspiration des plantes qui permet d’humidifier l’air très sec d’une journée typique d’été. Cette augmentation de l’humidité s’accompagne d’une réduction des températures, surtout de par l’effet de masque solaire qui permet d’abriter le piéton contre l’énergie solaire radiante. Cette augmentation de l’humidité s’accompagne d’une réduction des températures.

Sur la célèbre piste, la condition la plus proche de l’idéale de confort thermique extérieur sur tout le trajet est apportée remarquablement par la présence de rangées d’arbres et également par la présence ponctuelle d’un prospect plus important que prévu sur le projet initial. Globalement, nous avons pu voir que les caractéristiques de la piste, notamment sa largeur et la faible contiguïté des bâtiments qui l’entourent, font que l’effet du prospect n’est pas très efficace de façon uniforme sur tout le trajet et sur toutes les heures de la journée par rapport aux autres variantes étudiées. Nous pouvons remarquer très fortement l’effet ponctuel des masques solaires. Quand l’usager sort de l’abri des arbres, sa température ressentie peut s’élever de l’ordre de 10°C.

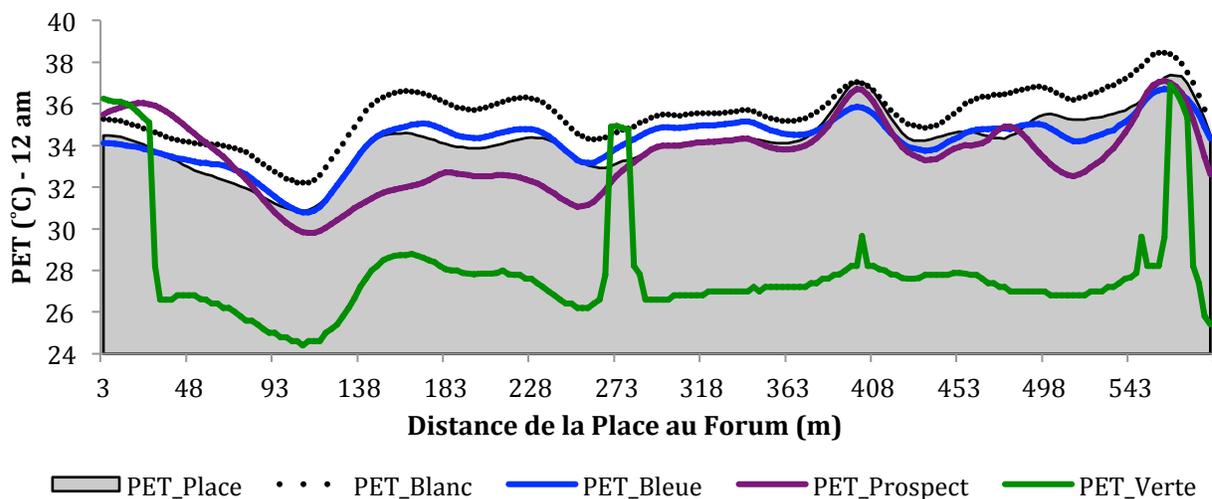


Figure 75 : graphique comparatif pour la Température Physiologique Equivalente obtenue pour l’itinéraire sur Piste pour les cinq scénarii étudiés.

Pour le parcours qui amène le piéton de la Gare vers la Place centrale, nous pouvons vérifier l’effet étendu du bassin d’eau en aval du vent prévu sur la Place centrale. Malgré l’influence importante de ce dispositif pour la réduction de la température ressentie par le piéton, l’effet sur le ressenti ne permet pas au piéton d’atteindre une condition de confort thermique idéale, notamment quand on la compare à la condition apportée par la présence des arbres.

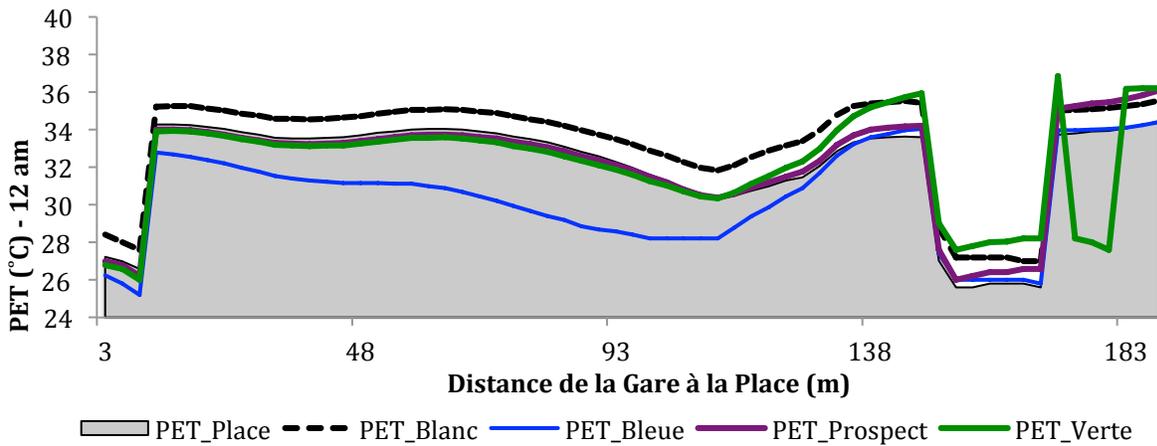


Figure 76 : graphique comparatif pour la Température Physiologique Equivalente obtenue pour l'itinéraire entre la Gare et la Place Centrale pour les cinq scénarii étudiés.

Pour le parcours qui amène le piéton de la Place Centrale au Parc sportif, il est possible de remarquer l'effet isolé et également l'effet associé des variantes «Bleu et Vert». Individuellement ces variantes ont globalement les moyennes de la PET les plus faibles, dû à la présence de l'eau au niveau du parc sportif et d'une densité importante d'arbres sur la place centrale. Si nous regardons l'effet individuel de ces dispositifs au niveau de la Place centrale (la présence d'un grand bassin avec fontaine ou une densité d'arbres très importante), il est possible d'observer l'influence plus importante de la variante « Verte » sur la création d'un IFU local au détriment de la variante « Bleue » et des deux autres variantes. L'effet de l'ombre portée par les arbres joue un rôle plus capital pour le confort thermique extérieur du piéton que l'effet isolé de l'eau. Plus loin, sur ce même trajet, au niveau du parc sportif où se trouve des rangées d'arbres déjà prévues dans le projet initial (donc présentes dans tous les scénarios), la présence d'un bassin/fontaine associée à l'ombre portée des arbres, fait que les températures physiologique sont les plus proches du confort théorique des piétons (Figure 77). La variante « Bleue » est donc plus performante sur l'ensemble des scénarii.

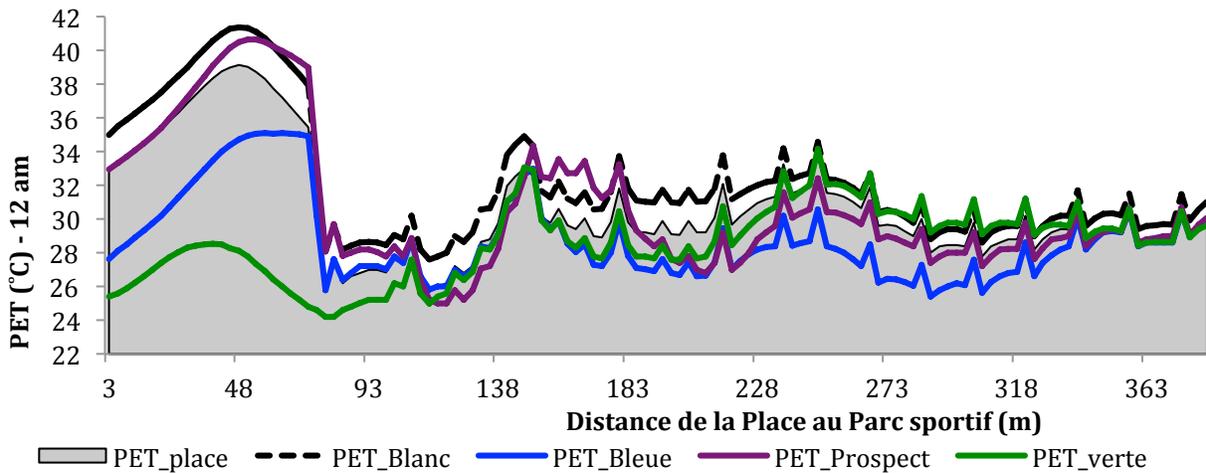


Figure 77 : graphique comparatif pour la Température Physiologique Equivalente obtenue pour l’itinéraire entre la Place Centrale et le Parc sportif pour les cinq scénarii étudiés.

5.4. Estimation de l’impact énergétique des bâtiments

Nous nous intéressons ici à l’ensemble des bâtiments qui jouxtent la Place Centrale, et comparons les charges journalières de climatisation de ces bâtiments entre le projet de base et les différents scénarii retenus.

Rappelons que l’on travaille avec un modèle très simplifié qui ne tient pas compte, par exemple, des effets de l’inertie thermique des bâtiments, mais dont la précision est compatible avec les hypothèses retenues : échelle du quartier plutôt que du bâtiment ; informations non connues au stade de la programmation de la ZAC sur les matériaux qui seront utilisés dans les bâtiments de la ZAC, et leur répartition (taux de vitrage, par exemple) ; recherche de valeurs relatives robustes (comparaisons entre variantes), plutôt que valeurs absolues (charges thermiques horaires) ; calcul des charges à l’échelle de la journée, plutôt que de l’heure...

Ces charges sont évaluées à partir de l’évaluation des classes de températures surfaces de façades extraites d’ENVI-met.

Les écarts entre les variantes et le projet sont relativement faibles, surtout sur une seule journée (Figure 78).

A priori, les variantes « Bleue » et « Verte » sont les plus favorables à la réduction de la charge de climatisation des bâtiments de la ZAC situés autour de la Place centrale (Figure 78).

Toutefois, pour la variante « Prospect » et « Blanche » il est très difficile de conclure, de par les implications d’autres variables exogènes, tel que l’écartement entre bâtiment et la contiguïté

pour le « Prospect » et les revêtements du sol pour la variante « Blanche ». Et surtout dans la mesure où il existe des effets contraires entre jour et nuit (Figure 79).

La variante « blanche » est caractérisée par des charges de climatisation plus importantes car les bâtiments font face à d'autres bâtiments, ce qui va chauffer l'air entre les façades des bâtiments et augmenter les températures de surface. Par contre, la nuit, n'ayant pas absorbé la chaleur (fort albédo), l'air chaud se dissipe plus facilement, en faisant chauffer moins les murs. Les charges sont donc plus faibles la nuit (Figure 79).

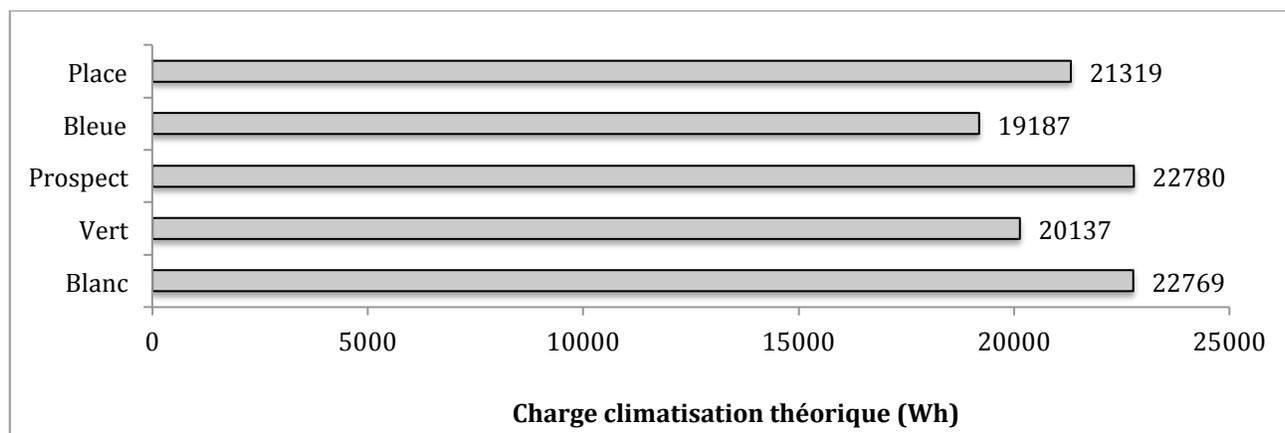


Figure 78 : Charge de climatisation théorique totale sur une journée typique d'été pour l'ensemble des scénarii de la ZAC.

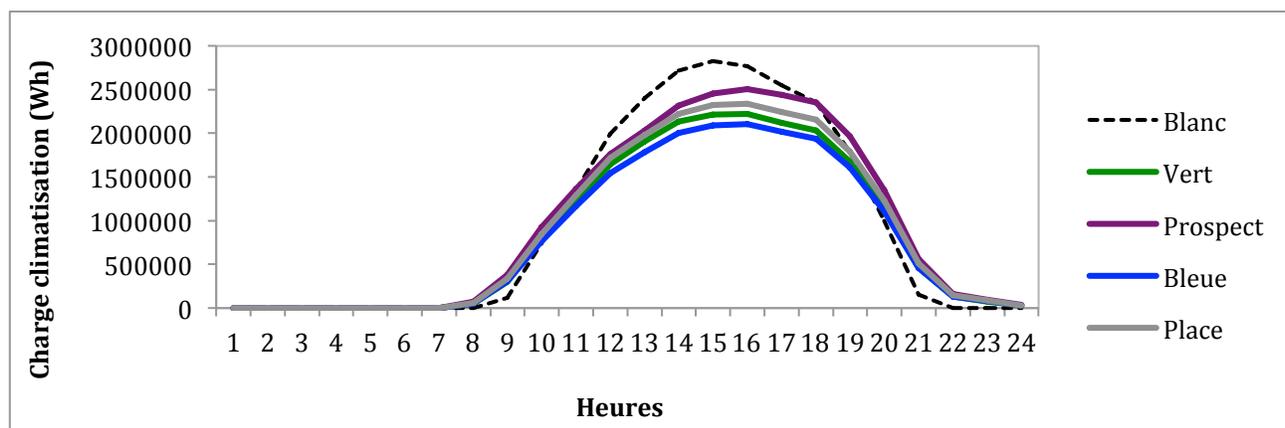


Figure 79 : Charge de climatisation théorique sur une journée typique d'été pour l'ensemble des scénarii de la ZAC

5.5. Discussions et perspectives

L'ensemble des informations produites à partir d'un jeu de variantes monothématiques étudiées a permis de mettre en avant un certain nombre de décisions utiles pour la production d'ilots de fraîcheurs urbains sur le projet de ZAC :

- il semble pertinent d'arboriser les itinéraires les plus pratiqués par les piétons et les vélos en créant des couloirs végétalisés par des alignements d'arbres de moyen à grand port ;
- il est important de proposer des espaces d'eau associés à des fontaines et/ou brumisateurs, en les plaçant en amont de la zone à traiter par rapport à la direction prédominante des vents, de manière à tenir en compte de l'extension de l'influence apportée par ce dispositif ;
- l'effet du dispositif « prospect moyen » et de « l'albédo moyen » des façades bâties doit être considéré raisonnablement en fonction d'autres facteurs associés, tel que la contigüité de la forme urbaine et l'albédo des revêtements du sol, respectivement.

6. Conclusion

Les villes sont des systèmes complexes avec un large éventail de facteurs interactifs jouant sur l'évolution du climat urbain à différentes échelles géographiques. En ce sens, il apparaît encore très difficile d'évaluer et de distinguer leur effet isolé, en dépit des nombreuses informations largement diffusées dans la littérature existante sur les îlots de chaleur urbains.

Le projet IFU a cherché à évaluer le potentiel d'un certain nombre de dispositifs urbains afin d'atténuer les effets d'îlot de chaleur en saison estivale pour le nouveau quartier de Toulouse Montaudran.

Nous cherchons à proposer des dispositifs urbains compatibles avec le projet initial d'aménagement en interaction avec les acteurs de la maîtrise d'ouvrage. L'objectif de la recherche consiste à créer des îlots de fraîcheurs urbains afin de réduire l'inconfort thermique du piéton en saison chaude, ainsi que la consommation énergétique des bâtiments pour la climatisation.

Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une méthode structurée en deux étapes principales : une évaluation microclimatique du projet initialement proposé et de scénarios variés, et une évaluation de leur impact sur le confort thermique extérieur des piétons et la consommation énergétique des bâtiments.

Travailler avec un (cas réel) « vrai » projet urbain en cours signifie intégrer (prendre en compte) soigneusement ses contraintes, ses limites ainsi que ses opportunités. En ce sens, au lieu d'étudier de nombreuses actions ponctuelles, cette recherche a choisi d'appliquer une approche référentielle basée sur des scénarii contrastés, qui vise à distinguer les solutions les plus pertinentes à partir d'un ensemble de stratégies potentielles structurées.

Ainsi, dans ce travail, nous avons développé une méthode hybride permettant de faciliter le transfert des savoirs de la recherche vers les praticiens. Nous avons débuté le projet par une approche descendante (top-down), visant à synthétiser et vulgariser les savoirs des chercheurs sur les principaux facteurs influençant l'intensité de l'îlot de chaleur, dans des documents synthétiques, que nous avons baptisé « fiches leviers d'action » (voir Annexe 2). Ensuite, dans une approche montante (bottom-up), nous avons présenté ces fiches leviers d'action à la maîtrise d'ouvrage et à l'aménageur, lors de plusieurs réunions de travail, pour déterminer avec eux le champ des « possibles » sur la ZAC Montaudran, que nous avons structuré dans des scénarii référentiels. Nous avons ensuite simulé ces scénarii référentiels grâce à l'outil de modélisation thermo-hygro-aéraulique ENVI-met. Nous avons utilisé cet outil de modélisation très sophistiqué, car il était capable de répondre aux contraintes complexes du contexte de la climatique urbaine : calcul simultané et interactif du bilan radiatif,

thermique, hydrique, aéraulique à plusieurs échelles, en tenant compte des transferts entre l'air, la végétation, les bâtiments, et le sol.

Les simulations numériques menées avec ce modèle microclimatique très pointu ont permis de comparer les dispositifs et leur influence sur l'atténuation des ICUs, diurne et nocturne, tout en tenant compte de leur réponse appliquée à un projet urbain existant.

Les résultats présentés sont issus des simulations numériques relativement proches de la réalité, car elle tiennent compte malgré quelques simplifications nécessaires lors de la modélisation (ex. géométries simplifiées comprises dans une grille, le forçage simple, la définition d'une condition climatique initiale assez simplifiée, etc.). Toutefois, ces simulations mises en œuvre pour l'évaluation microclimatique ont demandé un temps de calcul extrêmement prohibitif. Le calcul d'une journée climatique pour une grille de basse résolution (détail minimal à 9m) a demandé 15 jours de simulations, ; pour le projet avec la grille de haute résolution (détail à 3m), un temps de calcul de 30 jours a été nécessaire à chaque fois.

L'impact de certaines variables connues par leur grande influence sur les effets d'ICU, tels que le prospect (H/L) et l'albédo, s'est avéré moins pertinent sur l'atténuation des effets UHI que d'autres dispositifs tels que la densité de la végétation et la présence d'espaces d'eau. Les fontaines ou brumisateurs bien implantés par rapport aux mouvements de l'air ont permis de créer un effet d'IFU très étendu, en aval du vent dominant.

L'intégration d'une végétation locale associée aux fontaines d'eau placés stratégiquement au bord des voiries et sur les places, a permis de créer en même temps des conditions de confort thermique extérieures très proches de l'idéal pour le piéton, ainsi qu'une réduction globale relativement significative de la demande d'énergie des bâtiments (de tous les bâtiments de la zone étudiée).

Les facteurs, tels que la couverture végétale des espaces urbains et les bassins/fontaines d'eau, sont des dispositifs qui peuvent permettre d'adapter relativement facilement les projets en cours, mais doivent être soigneusement étudiées pour chaque cas. C'est par ce type d'actions que les politiques et les programmes visant à réduire les effets des îlots de chaleur – et atteindre des objectifs environnementaux et d'économies d'énergie – peut être les plus efficaces.

On pourrait ajouter un mot sur l'utilité de ces modélisations pour asseoir des partis pris d'aménagement : des images, des chiffres issus de simulation ont du poids pour argumenter des surcouts...

7. Bibliographie

- Adolphe, L., Châtelet, A., Boussoulim, Aït-Ameur, Barlet, Casal, ... Deboulbé, E. (2002). SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines - RAPPORT FINAL (MENRT- Direction de la Technologie.).
- Bozonnet, Emmanuel. « Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments- Cas de la rue canyon ». Université de la Rochelle, 2005. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011115/>.
- Colombert, M. (2008a). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Paris Est. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2008PEST0233>
- Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate – a preview on Envi-met 4.0. 7th International Conference on Urban Climate. *Proceedings...ICUC 2009*. Yokohama, Japon.
- Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Univ. Paris Est. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2008PEST0233>
- Cordier, A. (2015) NEST, un logiciel simple de simulation thermique pour l'habitat, Efficiencia.
- Judkoff, R. et Neymark, J. (1995) BESTEST Building Energy Simulation Test. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/bestest_test_suites.pdf
- Colombert, M. (2008b). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (Contribution to the analysis of various means to take into account urban climate in urban planning). Université Paris-Est. Consulté à l'adresse <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00470536/>
- Colombert, M. (2012). Enjeux climatiques et pistes d'intervention en milieu urbain. Cahier des territoires.
- Colombert, M., Salagnac, J.-L., Morand, D., & Diab, Y. (2012). Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 12). doi:10.4000/vertigo.11811
- Dettwiller, J. (1978). L'évolution séculaire de la température à Paris. *FRA*, 6(13), 95–130.
- Dubois, C. (2014, novembre). Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique ; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois (Adapt neighborhoods and buildings to global warming; A roadmap to support architects and urban designers in Quebec) [in French]. Université Laval, Québec.
- Gagge, A., Stolwijk, J., and Nishi, Y. (1971): An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans.*, 77(1):247–262.
- GIEC, Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2008). Bilan 2007 des changements climatiques rapport de synthèse. Geneve: GIEC.

- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment* (1978-), 115–133.
- Griffiths, J. F. (1976). *Climate and the Environment: The Atmospheric Impact on Man*. Paul Elek Incorporated.
- Gros, A.; Bozonnet, E.; Inard, C. (2014) Cool materials impact at district scale—Coupling building energy and microclimate models, *Sustainable Cities and Society*, Volume 13, Pages 254-266.
- Gros, A.; Bozonnet, E. (2015) Simulation tools to assess microclimate and building energy – a case study on the design of a new district, *Energy and Buildings*, In Press.
- Guide AICVF n°2 : Calcul des charges de climatisation et conditionnement d'air, PYC Editions, ISBN10 : 2-911008-22-7
- Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43, 71-75.
- Koukoku-Arnaud, R., Lemonsu, A., & Desplat, J. (2011). Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique (Evolution of urban climate of Paris in the context of climate change). In *Proceedings of 2R2CV*. Université Paul Verlaine - Metz, France. Consulté à l'adresse <http://www.univ-metz.fr/recherche/labos/cegum/2R2CV/Actes/Koukoku-Arnaud.pdf>
- Liébard, A., & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Moniteur.
- MeteoFrance. (2014) Weather data series.
- Molina, G. (2012). Lutte contre le changement climatique : les acteurs de l'aménagement entre coopération, reconversion et concurrence. *Métropolitiques*. Consulté à l'adresse <http://www.metropolitiques.eu/Lutte - contre - le - changement.html>
- Musy, A. (2005, février). Cours Hydrologie générale - Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) - Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) - Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL). Consulté 2 juillet 2013, à l'adresse <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>
- Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* (1967), 22(12), 2691–2700.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Psychology Press.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings*, 11(1), 103–113.
- Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., & Hidalgo, J. (2008). De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville (From the observation of urban microclimate to an integrated modeling of the city) [in french]. *La Météorologie*, (62). doi:10.4267/2042/19174
- Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300.

Ringenbach, N. (2004). Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine: mesures, modélisation et validation sur Strasbourg (Radiation balance and heat fluxes in urban climatology: measurements, modeling and validation on Strasbourg).

Sacre, C. (1983). Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique (Comfort in outdoor spaces: microclimatic analysis). CSTB de Nantes.

Santamouris, Matheos, Jérôme Adnot, Servando Alvarez, N Klitsikas, M Orphelin, C Lopez, et F Sanchez. Cooling the cities: rafraîchir les villes. Ecole des Mines de Paris - Les Presses., 2004.

Smith, C., & Levermore, G. (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world. *Energy Policy*, 36(12), 4558-4562. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.011

Solecki, W. D.; Rosenzweig, C.; Parshall, L.; Pope, G.; Clark, M.; Cox, J.; Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards* 6 (1): 39-49.

United States Environmental Protection Agency. (2008, octobre). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Consulté à l'adresse <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>

ANNEXE 1 : Typologies végétales dans la ZAC

ZAC projet	Situation dans la ZAC	Nom commun	Feuillage	Port	Couronne	Système racinaire	Humidité sol	Croissance	Photo	Equivalents ENVImet
Acer Ginnala		Erable de Mandchourie	Caduc. 5 à 10cm	3 à 5m	arrondi	superficiel, racines fines et nombreuses	Sec	rapide		Acer Negundo (Ash-leaved Maple)
Acer Monspessulanum		Erable de Montpellier	Feuille 3 à 6 cm	5 à 6 m. max : 15m	Arrondi et diffus	Traçant		Assez longue		Acer campestre (Field Maple)
Acer Palmatum "fireglow"		Erable du Japon	Caduc. Feuille 5 à 10 cm	3 m	Étalé	Superficiel et étalé		Lente		Acer campestre (Field Maple) - (Feldahorn)
Acer rufinerve		Erable à peau de serpente (ou à feuilles de vigne)	Caduc.. Feuille 12 cm	10 m	Étalé	Traçant		Assez lente		Acer pseudoplatanus (Maple) - Arbre de soie (Albizia julibrissin Durazz)

Rapport Final de Recherche

Alnus Cordata	Place centrale	Aulne de Corse	Caduc. Feuille 10 cm	10 à 20m	Étroit et conique	Racines étalées et ramifiées		Rapide 15m dans 20 ans		Larix Decidua (Larch)
Alnus Glutinosa		Aulne glutineux	Non-caduc. ???	10 à 25 m	Large et conique	Développé ; Jusqu'à 4m de profondeur		Rapide 12m dans 20 ans		Albis Alba (silver Fir) - Sapin WeiBtanne
Amelanchier canadensis		Amélanchier du canada	Caduc. Feuille 3 à 8 cm	6 m	Très dense	Racines fibreuses, étendues et peu profondes		Moyenne Lente au départ		Acer pseudoplatanus (Maple) - Arbre de soie Albizia julibrissin Durazz (arbre soie)
Betula Utilis	Place centrale	Bouleau de l'Himalaya	Feuille 5 à 8 cm	Jusqu'à 18 m	Large et conique	Racines superficielles		rapide, sous réserve de luminosité		Picea Abies (European Spruce) - Picea (Fichte)
Celtis Australis (déjà présent sur site)	Place centrale (piste bord)	Micocoulier de Provence	Caduc, Ovale, allongée ~15 cm - plein de lumière	5 à 25m	Régulière et arrondie	Racines traçantes et profondes		Relativement rapide au départ		Fern Tree (Jacaranda mimosifolia)

IFU – Ilots de Fraicheur Urbains

Cercis Siliquastrum		Arbre de Judée	Touffu Feuille 7 à 12 cm	Jusqu'à 10 m	Étalé	Racines traçantes		Assez lente, sauf premières années		Cercis siliquastrum (Judas Tree)
Cornus Florida "rainbow"		Cornouiller grande fleurs	Petite arbre caduc. Feuille 8 à 15 cm	6 m max	Dressé et compact	Racines traçantes		Lente à moyenne		Cercis siliquastrum (Judas Tree)
Crataegus carrieri	Parc Sportif	Aubépine	Caduc.	7 m	Étalé			Croissance rapide		Cercis siliquastrum
Fraxinus angustifolia (déjà présent sur site)		Frêne oxyphylle	Caduc. Feuille 15 à 25 cm	20 à 25 m	Étalé			Croissance rapide		Fraxinus
Ginkgo Biloba (déjà présent sur site)		Arbre aux 40 écus	Caduc. 5 à 15 cm	Max 25 m mais jusqu'à 6 les 10 premières années	Dressé puis étalé	Racine Pivotante longue		6 mètres dans 10 à 12 ans		Fraxinus excelsior

Rapport Final de Recherche

Liquidambar styraciflua		Copalme d'Amérique	Feuille 17,5 cm	25 m	Conique large	Pivotante		Relativement lente		
Magnolia x loberi 'merril'			Caduc. Feuille 10 à 15 cm	3 à 12 m	ovale			Relativement lente		
Malus 'rudolph'	Place centrale	Pommier d'ornement	Caduc. Feuille 7 cm	5 à 10 m	Dressé	Ramifié		Moyenne		Cercis siliquastrum
Metasequoia glyptostroboide	Place centrale	Métaséquoia	Feuille 8 à 15 cm épines 1 à 1 mm	Jusqu'à 30 m	Conique étroit	Racines superficielles et étalées		Rapide		Larix
Morus nigra (déjà présent sur site)	Parc sportif	Murier noir	Feuille 15 à 20 cm sur les rameaux non fruitiers	12 à 15 m	Etalé	Traçantes		Lente		Privet

IFU – Ilots de Fraicheur Urbains

Ostrya carpinifolia	Place centrale (piste bord ilots) Parc sportif	Charme houblon	Feuille 5 à 10 cm	15 m	Conique large					Carpinus Betulus
Pinus nigra		Conifere Pin noir d'Autriche	Feuille 8 à 14 cm	25 m	Conique large		sec	Rapide		Pinus Pinea (Stone Pine) - Pin (Pine Tree)
Platanus acerifolia (déjà présent sur site)		Platane à feuille d'érable	Feuille 13 à 15 cm	Jusqu'à 40 m	Etalé					Platanus x acerifolia
Populus x canadenses (déjà présent sur site)		Peuplier euraméricain		20 à 30 m	Conique étroit	Superficiel		Rapide		Populus alba
Prunus subhirtella 'Autumnalis'		Cerisier du Japon		5 m	Etalé	Large, plate, ramifié		Moyenne		

Rapport Final de Recherche

Prunus x yedoensis		Cerisier à fleur yedoensis		8 à 12 m	Étalé	Large, plate, ramifié		Moyenne		
Quercus cerris	Place centrale	Chêne chevelu	Caduc. Feuille 3 à 6 cm	30 m	Étalé	Profond		Relativement rapide		Fagus sylvatica
Quercus 'frainetto'	Parc sportif	Chêne 'Hungarian crown'	Caduc. Feuille 20 cm	30 m	Ovale	Pivotant		Relativement rapide		Acer pseudoplatanus
Quercus palustris		Chêne des marais	Feuille 4 à 10 cm	20 m	Conique large	Pivotant		Moyenne		Acer
Quercus rubra		Chêne rouge d'Amérique	Feuille 15 à 20 cm	25 m	Étalé	Pivotant		Assez lente		Quercus Robur

IFU – Ilots de Fraicheur Urbains

Quercus rubra x turneri 'pseudoturneri'		Chêne de Turner	Feuille 6 à 12 cm	18 m	Dense et arrondi					Érable sycomore (Bergahorn)
Salix cáprea (déjà présent sur site)	Place centrale (bord piste rocade)	Saule marsault	Conifère Feuille 8 cm	10 m	pleureur	Traçant		Rapide		Olea europaea
Taxodium distichom		Cyprés chauve	Feuille 1 à 1,6 cm	30 m	Conique étroit					Cypres
Tilia Cordata (déjà présent sur site)	Place centrale (bord piste parc jeu)	Tilleul des bois (à petites feuilles)	Feuille 5 à 8 cm	20 à 30 m	Ovale	Les racines traçantes produisent des rejets.		Moyenne		Tilleul à petites feuilles Tillia cordata
Ulmus 'resista'	Place centrale (piste bord rocade)		Caduc. Feuille 5 à 8 cm	15 m	étalé	Superficiel et étalé		Rapide		Ulmus x hollandica