

Ilots de chaleur en ville de Fribourg

Identification, anticipation et stratégie d'adaptation et de valorisation



Projet de requalification de la Place de la Gare (www.ville-fribourg.ch)

Auteurs	Marc Vonlanthen, Jerome Kaempf, Anthony Di Blasi, Donatien Burin des Roziers
Partenaires	IDIAP
Mandant	Ville de Fribourg, secteur énergie et développement durable Rue Joseph Piller 7 CH – 1700 Fribourg
Date	03.11.2021

Résumé

En matière de changement climatique, la politique de la Confédération est articulée autour de deux axes principaux : la réduction des gaz à effet de serre (GES) et l'adaptation. En matière de réduction des GES, et plus particulièrement de réduction des émissions de CO₂, la Suisse vise la neutralité carbone pour 2050. Ce projet quant à lui s'inscrit dans les mesures d'adaptation, plus précisément dans la thématique "accentuation des fortes chaleurs" du programme pilote d'adaptation au changement climatique de la Confédération (Programme pilote « Adaptation aux changements climatiques » , 2018). Les différents partenaires sont la Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR), l'IDIAP Research Institute (IDIAP) et la ville de Fribourg.

D'une part, le plan directeur du canton de Fribourg table sur une augmentation de 50% de la population pour 2050 et d'autre part, la loi sur l'aménagement du territoire (LAT) impose un principe de densification urbaine vers l'intérieur de la ville. En tenant compte du changement climatique, l'accentuation des fortes chaleurs en ville - îlots de chaleur urbains ou ICU - est une nouvelle donnée avec laquelle les planificateurs urbains doivent compter. La ville de Fribourg souhaite, par ce projet, se munir d'un outil décisionnel et communicationnel pour anticiper et sensibiliser aux conséquences du changement climatique sur le confort urbain, la santé humaine et sur la planification urbaine.

Le présent rapport documente la démarche mise en œuvre dans la réalisation du projet, en présente et analyse les résultats. Nous revenons d'abord sur nos objectifs principaux et secondaires, nous exposons ensuite en détails la méthodologie développée ainsi que les outils et ressources numériques employées. Finalement, nous discutons en détails des résultats pour répondre aux attentes de la ville de Fribourg : obtenir des lignes directrices en matière de planification urbaine relativement à la problématique des ICU.

Table des matières

Résumé	2
Table des matières	3
1. Introduction	4
1.1 Programme pilote d'adaptation au changement climatique.....	4
1.2 Problématique des îlots de chaleur urbains (ICU)	5
1.3 Contexte de la ville de Fribourg	6
2. Buts du projet.....	7
2.1 Situation initiale	7
2.2 Objectifs du projet	7
2.2.1 Cartographie des ICU sur le territoire communal	7
2.2.2 Portail cartographique de la Ville de Fribourg	7
2.2.3 Information	8
2.2.4 Sensibilisation et communication.....	8
3. Méthodologie	9
3.1 Généralités	9
3.2 Ensemble de données	10
3.3 Outils de simulation	12
3.3.1 CitySim.....	12
3.3.2 Base de données.....	12
3.3.3 Liaison des différents logiciels	13
3.4 Hypothèses sur les ensembles de données	14
3.4.1 Hypothèses sur les bâtiments.....	14
3.4.2 Hypothèses sur les sols.....	16
3.4.3 Hypothèses sur les zones d'ombrages.....	16
3.5 Calibration	17
3.6 Méthodologie de simulation des scénarios	18
3.6.1 Simulations à l'échelle de la Ville de Fribourg	19
3.6.2 Simulations à l'échelle du quartier de la Gare	19
4. Résultats et analyses.....	21
4.1 Étude de la Ville de Fribourg.....	21
4.1.1 Scénario de référence 2017	21
4.1.2 Évolution 2030 – 2050	24
4.2 Étude du quartier de la Gare.....	28
4.2.1 Scénario de référence 2017	28
4.2.2 Scénario du quartier de la Gare actuel projeté à 2050.....	30
4.2.3 Scénario du quartier requalifié 2050.....	33
4.2.4 Scénario du quartier requalifié et optimisé 2050	36
4.2.5 Scénario végétalisé du quartier de la gare 2050	40
4.2.6 Résumé des résultats	41
4.3 Lignes directrices en matière d'urbanisme	41
5. Conclusions	44
6. Bibliographe.....	45

1. Introduction

1.1 Programme pilote d'adaptation au changement climatique

Le programme pilote « adaptation au changement climatique » vise d'une part à anticiper les conséquences du changement climatique de manière à pouvoir s'y adapter au mieux et d'autre part à identifier et à valoriser certaines opportunités. Nous savons en effet que même si la neutralité carbone était atteinte aujourd'hui, l'inertie du climat est telle que des modifications importantes continueraient à déployer leurs effets pendant plusieurs décennies. Ce programme pilote se décline en deux phases dont la première s'est déroulée de 2013 à 2017, et a vu la réalisation de 31 projets exemplaires. La deuxième phase, dans le cadre de laquelle s'inscrit le présent projet, soutient 50 projets exemplaires qui visent par conséquent à accompagner les villes, les régions et les cantons dans le développement d'une stratégie d'adaptation au changement climatique qui soit à la fois cohérente et efficace. La deuxième phase du programme pilote se décline suivant les axes suivants :

- A. Accentuation des fortes chaleurs ;
- B. Accroissement de la sécheresse estivale ;
- C. Aggravation du risque de crues, fragilisation des pentes et recrudescence des mouvements de terrain ;
- D. Modification des milieux naturels, de la composition des espèces et des paysages ;
- E. Propagation d'organismes nuisibles, de maladies et d'espèces exotiques ;
- F. Sensibilisation, information et coordination.

Notre projet « Îlots de chaleur en ville de Fribourg » fait partie du premier axe et est identifié par la numérotation A.13 dans la liste des projets du programme pilote. Structuré autour de quatre *work packages*, la réalisation s'étend en principe sur deux ans entre le 01.01.2019 et le 31.12.2020. Toutefois, en raison d'un retard administratif et de la pandémie de COVID-19, le projet s'est terminé le 30 avril 2021.

1.2 Problématique des îlots de chaleur urbains (ICU)

Le projet A.13 aborde la problématique des îlots de chaleur urbains. On désigne communément par *îlots de chaleur urbain* le phénomène physique par lequel la chaleur se concentre dans une certaine sous-structure urbaine avec pour conséquence directe une augmentation des températures de l'ordre de quelques degrés par rapport à la périphérie de la ville. Une étude a par exemple observé

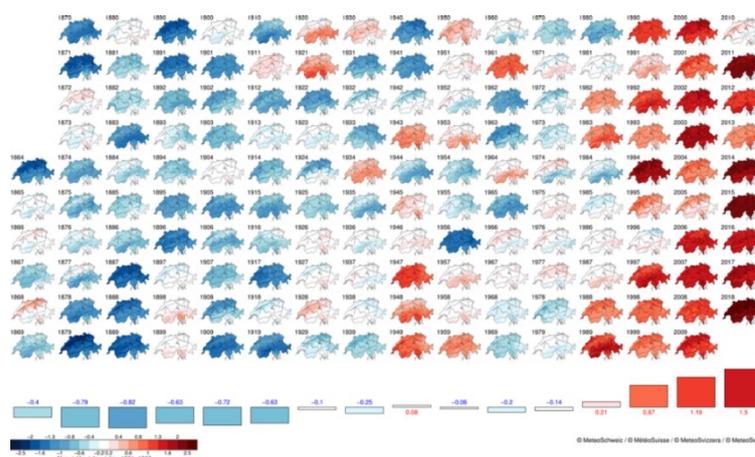


Figure 1 : Écarts de température à la moyenne 1961-1990 en Suisse pour chaque année depuis 1864. Les années en dessous de la moyenne sont en bleu, les années au-dessus de la moyenne sont en rouge. La partie inférieure du graphique montre les écarts à la moyenne sur une décennie avec les colonnes colorées en bleu

durant les vagues de chaleurs de l'été 2017 une intensité nocturne d'ICU d'une amplitude de 6 °C (Empa, 2017). Il est également établi que de tels épisodes extrêmes n'entraînent pas seulement un certain inconfort, mais peuvent aussi être la cause d'une surmortalité importante. Ainsi, l'été 2015, le deuxième été le plus chaud en 154 ans de mesures, a causé environ 800 décès principalement en milieux urbains (OFEV, 2018). En plus de la chaleur rejetée par l'activité humaine (trafic motorisé individuel, systèmes de production industriels, climatisation...), le changement climatique agit comme un dramatique accélérateur des ICU. En effet, les derniers scénarios climatiques pour la Suisse de 2060 montrent une augmentation des jours de fortes chaleurs – plus de 30 °C en journée et plus de 20°C la nuit – pouvant aller à 18 jours supplémentaires par été par rapport à aujourd'hui, ce qui représente 3 à 4 fois plus de jours de fortes chaleurs (National Center for Climate Services, 2018) : l'été de 2003, le plus chaud en 154 ans de mesures, risque bien de devenir la norme d'ici quelques dizaines d'années (Figure 1). Et les villes seront les plus durement touchées. Outre les aspects sanitaires, les fonctions économiques des villes pourraient être lourdement impactées par les ICU. Une étude publiée dans *Nature Climate Change* montre que l'impact économique (productivité au travail et consommation énergétique) combiné des ICU et du changement climatique pourrait se révéler 2.6 fois plus important que le seul impact du changement climatique en termes de produit intérieur brut (Francisco Estrada, 2017). En effet, la productivité baisse lors des épisodes de températures extrêmes alors que la demande en énergie augmente pour générer du froid. À ce sujet, des études ont également montré qu'à l'horizon 2060, les besoins énergétiques pour générer du froid dépasseront les besoins énergétiques pour nous chauffer.

Par conséquent, une stratégie urbaine d'adaptation au changement climatique est nécessaire. La première étape consiste en une identification des zones concernées et des lignes directrices, ce à quoi cherche à répondre le projet A.13 et le présent rapport dans le contexte particulier de la ville de Fribourg que nous exposons ci-dessous.

1.3 Contexte de la ville de Fribourg

La ville de Fribourg est une ville de taille moyenne avec une population d'environ 41'000 habitants. Les milieux qui la composent sont variés. Des milieux naturels tels que le Sarine et des forêts urbaines y sont présents, tout comme des zones urbaines denses historiques ou modernes présentant toutes les conditions nécessaires à l'apparition d'ICU en période estivale.

Si l'accroissement de la température dans les villes et les agglomérations est un phénomène connu, son étude en ville de Fribourg revêt une importance stratégique aujourd'hui dans la mesure où la ville s'apprête à subir plusieurs transformations urbanistiques d'ampleur : quartier historique du Bourg, quartier central de la gare et développements de divers lotissements de centaines de logements. Parallèlement, le Plan d'aménagement local (PAL) et le règlement communal d'urbanisme (RCU) sont en cours de révision, ce qui devrait permettre de donner une base réglementaire à certaines des mesures identifiées par le projet A.13. La ville souhaite également se doter d'un « plan climat » dont un des axes concernera l'urbanisme et pourra reprendre les résultats du présent rapport.

2. Buts du projet

2.1 Situation initiale

À ce stade, aucune étude sur les ICU en ville de Fribourg n'a été conduite et la ville ne possède pas encore de plan d'adaptation aux changements liés au climat. Toutefois, le secteur Énergie et Développement durable souhaite rapidement se munir d'outils décisionnels et de planification pour pouvoir intégrer cette problématique dans sa planification urbaine.

La situation initiale est d'une part celle d'une ville d'environ 41'000 habitants dans un canton où la démographie croît et dont les infrastructures doivent suivre cette tendance. D'autre part, du point de vue climatique, la ville est soumise aux contraintes connues : épisodes de chaleurs en forte augmentation en fréquence et en intensité. La conjonction de ces différentes observations décrit la situation initiale de la ville par rapport à la problématique des ICU, mais surtout l'intérêt d'y consacrer une étude approfondie maintenant.

2.2 Objectifs du projet

De manière générale, les objectifs du projet sont structurés en deux catégories :

1. Analyse des ICU selon divers scénarios (paragraphe 2.2.1 et 2.2.2 ci-dessous)
2. Information et sensibilisation (paragraphe 2.2.3 et 2.2.4 ci-dessous).

La répartition de ces objectifs entre les différents partenaires a été faite lors de l'appel à projets. L'exécution de la partie technique liée aux simulations et l'analyse des résultats est portée par la HEIA-FR et par l'IDIAP, alors que la partie communication et sensibilisation des résultats revient à la Ville de Fribourg. Le présent rapport porte exclusivement sur la démarche scientifique et technique du projet.

2.2.1 Cartographie des ICU sur le territoire communal

L'output attendu de cet objectif est la production de cartographies du territoire communal représentant la distribution spatiale des ICU (températures de surface) selon différents scénarios d'urbanisation et d'évolution climatique. Ces cartographies doivent permettre d'en tirer des lignes directrices en matière d'aménagement urbain.

2.2.2 Portail cartographique de la ville de Fribourg

En collaboration avec la ville, les différentes cartographies produites et toutes les données numériques associées doivent pouvoir être visualisées de manière dynamique sur le portail cartographique. Ceci permettra de superposer et de croiser différentes couches d'informations disponibles afin de prioriser les critères de décision en matière d'aménagement urbain.

2.2.3 Information

Les principaux résultats des simulations et des analyses de données seront synthétisés sous forme de lignes directrices en matière d'aménagement urbain. Par-là, nous entendons une liste de pratiques à favoriser et à éviter pour mitiger le phénomène des ICU. Ces résultats devront être rapportés au différents publics cibles par le biais de séances d'informations à l'intention des autorités communales, par une information à la population notamment par le biais du site de la ville et du journal communal et aux associations pertinentes.

2.2.4 Sensibilisation et communication

Des objectifs en matière de sensibilisation et de communication sur la thématique des ICU ont été définis avec leurs publics-cibles. Ces différentes tâches impliquent cependant davantage les secteurs de la ville et ne seront pas abordés dans le présent rapport. Nous nous limitons ici à mentionner que la HEIA-FR et l'IDIAP ont participé à diverses actions de communication en lien avec le projet, telles que par exemple des sollicitations des médias pour des articles et des reportages ou des présentations lors de conférences sur l'urbanisme.

3. Méthodologie

3.1 Généralités

Les ICU sont un phénomène physique complexe dont l'identification et l'évolution dépendent de nombreux paramètres environnementaux tels que l'apport en radiation solaire, les matériaux du bâti, la géométrie du territoire ou encore la chaleur anthropogène. Cette complexité implique d'avoir accès à de nombreux ensembles de données de qualités variables que nous décrivons au point 3.2. Il est ensuite nécessaire de pouvoir connaître, quantifier et prévoir les échanges thermiques entre les différents éléments des zones urbaines étudiées.

Pour pouvoir prétendre prendre en compte le plus grand nombre de paramètres déterminants et envisager des prévisions d'une précision satisfaisante, la seule alternative est de travailler avec des simulations numériques seules à même de traiter cette complexité. CitySim, l'outil de simulation employé dans le cadre de ce projet, est décrit en détails au point 3.3. Du point de vue méthodologique et une fois les ensembles de données collectés et

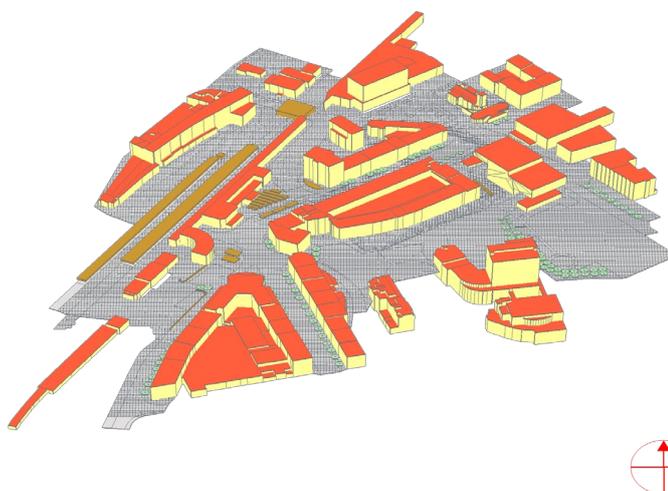


Figure 2 : modèle numérique de la Ville, ici le quartier de la Gare

complétés, un modèle numérique en trois dimensions de la Ville doit être construit (Figure 2). Pratiquement, cela signifie discrétiser l'ensemble du territoire communal en surfaces de quelques mètres carrés en leur associant, dans une base de données, tous les paramètres physiques pertinents dans le cadre d'une telle étude.

À titre d'illustration, nous présentons dans le tableau ci-dessous un certain nombre de données sur un des scénarios simulés et analysés ci-dessous au point 4.1.1. Il s'agit du scénario de référence de l'ensemble de la Ville pour l'année 2017.

Bâtiments	Bâtiments simulés	Arbres	Surfaces de sols non discrétisées	Surfaces de bâtiments	Intervalles temporels	Volume données
5158	4266	5544	70708	403281	8760	185 MB

Tableau 1 : chiffres caractéristiques d'une simulation des ICU pour la ville de Fribourg

3.2 Ensemble de données

Afin de pouvoir produire le modèle numérique de la ville sous forme de fichiers de simulation nécessaire au logiciel CitySim, plusieurs ensembles de données doivent être réunis :

- Données relatives à la géométrie de la ville (orientation et hauteur des bâtiments, largeur des rues, altitude etc...).
- Données relatives aux propriétés physiques de la ville (épaisseur et composition des sols, nombre et emplacement des arbres, couleur des revêtements etc...).
- Données relatives au climat pour les années simulées (rayonnement solaire, nébulosité, température de l'air...).

De manière générale, les données relatives à la géométrie ont été importées depuis le portail cartographique de la ville de Fribourg¹ ainsi que les informations suivantes : numéro EGID, type du bâtiment, aire de l'empreinte au sol, l'année de construction, la hauteur et le nombre d'étage. Des informations incomplètes ont été constatées, notamment le numéro EGID qui permet d'identifier les bâtiments et de faire le lien entre les données géométriques et les données physiques. Des données de la planification communale énergétique ont également été fournies par Groupe E afin de compléter des informations manquantes. Cependant plusieurs de ces informations n'ont pas pu être associées à un bâtiment précis à cause de l'absence de numéro EGID. En cas d'absence, et pour se référer pratiquement aux bâtiments correspondants, un nouveau numéro d'identification a été assigné à chaque bâtiment. Pour le reste des informations manquantes, des valeurs par défaut ont été introduites et sont décrites plus en détails ci-dessous dans le chapitre 3.4. Les données relatives aux sols ont été mises à disposition par la ville et retravaillées afin d'obtenir le sol discrétisé nécessaire à l'outil de simulation CitySim. Les sols sont décrits par un numéro d'identification unique, leur géométrie et la catégorie. Il y a en effet trois catégories principales de sols qui sont les zones vertes, les zones d'eau et les zones non-naturelles (ou minérales).

Pour le cas du quartier de la Gare qui a fait l'objet d'une étude approfondie, les ensembles de données sont les mêmes que précédemment, mais il s'y ajoute le nouveau site internet de la ville de Fribourg². Il s'agit d'une maquette 3D qui a pu être exportée en fichier *.obj*, retravaillée à l'aide du logiciel Sketch up³ et CitySimPro afin d'obtenir un modèle numérique du quartier autant proche que possible de la réalité. CitySimPro est l'interface graphique de CitySim qui est décrit dans le paragraphe 3.3.1. Les sols ont quant à eux été modélisés manuellement en fonction des plans architecturaux fournis par la ville. L'application de la même méthode à

¹ Ville de Fribourg, *Portail cartographique de la Ville de Fribourg*, <https://www.sitecof.ch/>

² Ville de Fribourg, *Maquette 3D*, <http://3d.ville-fribourg.ch/>

³ Sketch-up, *Logiciel de conception*, <https://www.sketchup.com/fr>

l'ensemble du territoire communal demanderait un temps considérable tout en apportant que peu d'éléments nouveaux. Elle n'a donc pas été envisagée à ce stade. Des plans architecturaux des rénovations du quartier ont aussi été mis à disposition afin de compléter les informations physiques de la requalification des sols. Finalement, différentes ressources numériques supplémentaires⁴ ont été utilisées, notamment pour définir les couleurs de surfaces du modèle. Ces couleurs ont par la suite été identifiées sur des portails numériques de référence^{5,6} afin d'assigner à chaque surface un indice de réflectance (albédo) approprié.

Finalement, concernant les données relatives au climat, des fichiers de format *.cli* sont nécessaires pour CitySim. De tels fichiers ont été générés à partir des mesures météorologiques fournies par MétéoSuisse sur son portail dédié à la recherche IDAWEB⁷. Les prédictions issues de simulations pour scénarios futurs sous l'effet du changement climatique proviennent de Meteonorm⁸:

Le tableau 2 ci-dessous résume l'ensemble des données employées pour les simulations numériques.

Type de données	Source principale	Sources complémentaires	État des données	Format
Informations physique des bâtiments	Portail cartographique de la ville de Fribourg	Données fournies par la ville	Incomplet	kml, csv
Géométrie	Portail cartographique de la ville de Fribourg (2D)	Informations physiques pour la hauteur (3D)	Incomplet	kml, csv
Sols	Fourni par la ville	-	Incomplet	kml, csv
Végétation	Fourni par la ville	-	Incomplet	csv
Énergie	Groupe E	-	Incomplet et non-réel	csv
Climat	IDAWEB	-	Complet	csv

Tableau 2 : résumé des données numériques employées pour les simulations

⁴ www.instantstreetview.com/

⁵ <https://ralcolor.net/>

⁶ <https://www.radiance-online.org/share/materials/ral-colors.html>

⁷ <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/service-et-publications/conseil-et-service/portail-de-donnees-pour-l-enseignement-et-la-recherche.html>

⁸ <https://meteonorm.com/en/>

3.3 Outils de simulation

3.3.1 CitySim

CitySim est un logiciel qui a vu le jour au sein de l'EPFL et qui a été développé par la suite par kaemco LLC⁹. Depuis une dizaine d'années, CitySim est un outil de simulations qui n'a cessé d'évoluer et a permis de mener à bien de nombreuses études et publications scientifiques référencées. CitySim permet d'effectuer des analyses thermiques centrées sur le parc immobilier, tout en prenant en compte les interactions radiantes à ondes courtes et longues. La taille du scénario simulé peut varier d'une simple maison à toute une ville. CitySim calcule les différents échanges thermiques et radiants entre des objets décomposés en surfaces et leur environnement selon des conditions climatiques ajustables. Les surfaces simulées ont des propriétés physiques associées telles que la nature des matériaux, le facteur de réflectance et l'émissivité. Les objets simulables comprennent les habitations, les sols et les arbres. Par exemple, il est possible de simuler le comportement thermique de son domicile dans son environnement (avec les ombrages et les échanges radiatifs) durant une année choisie. Une fois la simulation réalisée, les résultats sont visualisables depuis l'interface graphique CitySimPro à une heure précise de la période simulée. Différentes sorties de variables sont possibles et comprennent les températures de surfaces, les besoins en chaud et en froid, le potentiel solaire, et le rayonnement infrarouge. Les températures de surfaces des bâtiments, des sols et des arbres sont particulièrement intéressantes pour notre étude des îlots de chaleur urbain.

3.3.2 Base de données

Une base des données peut être décrite selon une hiérarchie simplifiée *top-down* :

base de données -> schéma -> table.

Les tables sont les entités qui contiennent les informations, elles se regroupent pour former des schémas qui eux-mêmes forment une base de données. Des liens et références entre les tables et les schémas peuvent être créés mais ceux-ci n'ont pas été utilisés dans le cadre de ce projet. La base de données est structurée en trois schémas principaux : *data*, *default_data* et *station*. Pour naviguer dans les données de la base de données PostgreSQL, nous utilisons PGAdmin¹⁰. Chacun des schémas contient des tables de données qui sont utilisés lors d'une simulation CitySim. Les deux premiers schémas sont des tables auxquelles le logiciel a recours lors des simulations de la totalité du territoire communal. Le schéma *data* contient tout

⁹ <http://kaemco.ch/>

¹⁰ <https://www.pgadmin.org/>

d'abord les données de base sur les objets de la simulation, c'est-à-dire les données relatives à la géométrie des bâtiments et des sols, ainsi que leurs informations physiques. Le schéma *data* recueille aussi les résultats des simulations afin de pouvoir les analyser et les visualiser. Le schéma *default_data* contient toutes informations nécessaires à l'utilisation de CitySim telles que par exemple les matériaux de base, les composites, les types de bâtiments, les profils d'utilisation des bâtiments. Ces informations sont principalement tirées des normes SIA décrites dans la section 3.4. D'autres tables secondaires, les tables *scénario_**, ont été implémentées afin de pouvoir simuler les différents scénarios. En fonction du scénario choisi, les paramètres des objets de la simulation peuvent être ajustés de manière simple afin de connaître leur impact sur la scène. Ces paramètres sont les informations concernant les vitrages, le type de surface, la réflectance des surfaces, le taux d'infiltration, le fichier climatique et la présence ou absence d'un objet de simulation (arbres, sols et bâtiments). Il est ainsi possible de simuler et de comparer dans un scénario un vieux bâtiment et son environnement, puis dans un autre scénario de simuler ce même bâtiment avec une enveloppe rénovée aux normes en vigueur tout en gardant le même environnement. Finalement, le schéma *station* contient uniquement des tables spécifiques au quartier de la gare et est utilisé pour sauvegarder les résultats de simulation et permettre de les visualiser. L'organisation de la base de données est présentée de façon plus détaillée dans l'annexe 7.3.

3.3.3 Liaison des différents logiciels

Un code en langage de programmation *Java* a été créé afin de pouvoir lier les données numériques et les différents logiciels nécessaires aux simulation. La fonction de ce code est de créer des fichiers de simulation pour CitySim (en XML) selon les données numériques souhaitées présentes dans la base de données. Ce fichier est ensuite utilisé afin d'effectuer des simulations avec CitySim qui produit à son tour les fichiers résultats en formats CSV. Ces fichiers sont finalement lus par un second code *Java* qui classe les résultats en fonction de leur appartenance aux différents objets de la scène et les sauvegarde dans la base de données. Différents scénarios peuvent être implémentés dans la base de données afin de créer différents modèles pour CitySim (en XML). La figure ci-dessous résume l'ensemble des liaisons entre la base de donnée *PostgreSQL* et les différents logiciels.

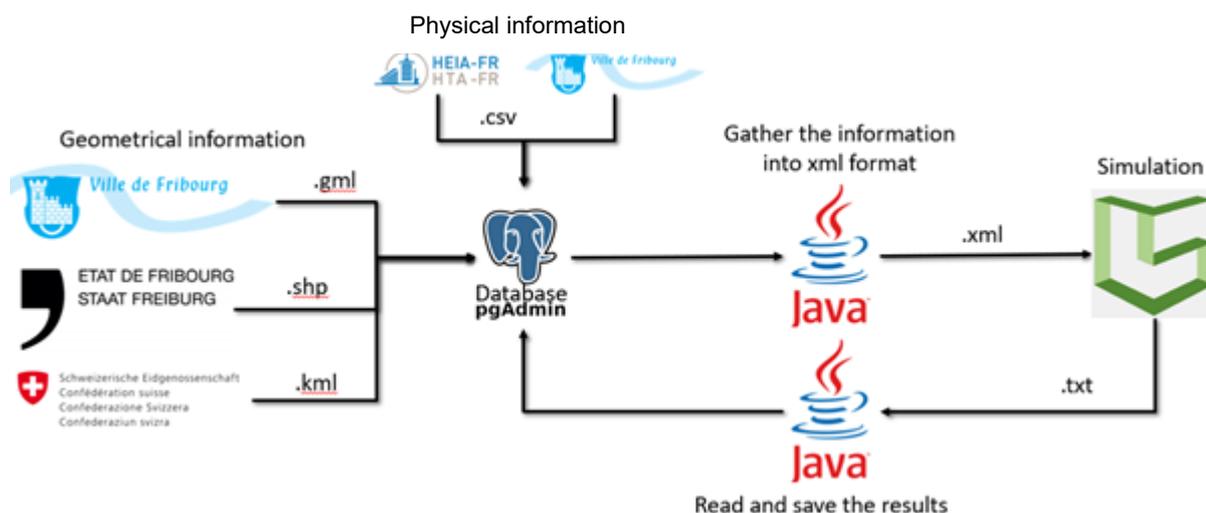


Figure 3: illustration des boucles logiciel d'une simulation, le logiciel pgAdmin permet d'accéder à la base de données PostgreSQL.

Le code *Java* est aussi utilisé afin de créer les géométries 2.5D des bâtiments à partir de leur empreinte au sol et de leur hauteur (voir §3.4.1). Dans cette étude, la géométrie 2.5D fait référence à une simple extrusion de l'empreinte au sol. Les bâtiments sont alors tous des parallélépipèdes rectangles, ce qui présente une simplification par rapport à la réalité.

3.4 Hypothèses sur les ensembles de données

3.4.1 Hypothèses sur les bâtiments

Afin de pouvoir réaliser de telles simulations, les hypothèses doivent pouvoir être généralisés sur l'ensemble du modèle. D'abord, les géométries de bâtiments de l'entièreté de la ville sont à l'origine des empreintes au sol, elles sont extrudées du plan horizontal pour créer une *shoebox* (Figure 4).

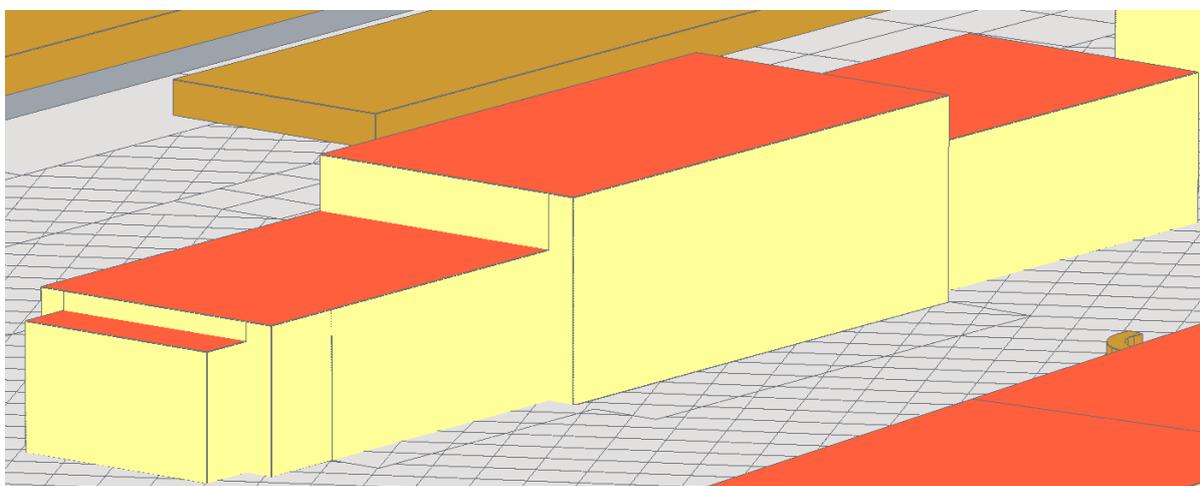


Figure 4 : Ancienne gare de Fribourg, modèle 2.5D. Le bâtiment est simplement extrudé du sol.

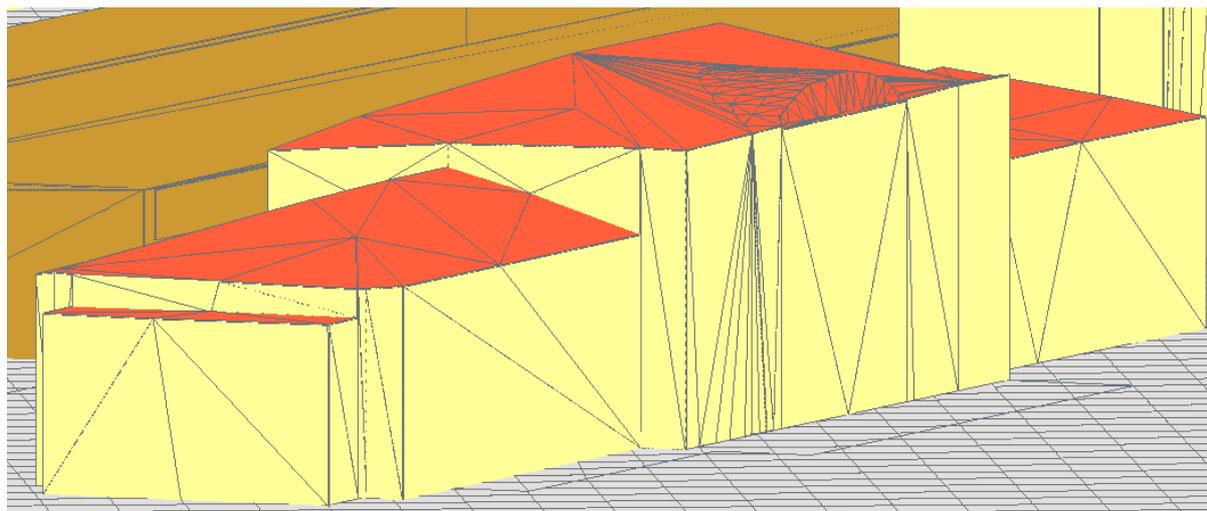


Figure 5 : Ancienne gare de Fribourg, modèle 3D. La géométrie des toits est prise en compte.

Nous considérons que la géométrie 2.5D est équivalente à celle du 3D (Figure 5) du point de thermique du bâtiment. Il y a bien sûr des bâtiments pour lesquelles la conversion du 3D et 2.5D provoque de fortes modifications de leur géométrie, mais leur nombre et leur impact sur l'ensemble de la ville est négligeable. Des géométries 3D ont été mises à disposition en cours d'étude mais la conversion de ces fichiers *.obj* fournis pour CitySim présente un investissement temporel important pour un gain faible en termes de précision du point de vue de la problématique des ICU. Cependant, la géométrie 3D a pu en revanche être utilisée pour les analyses du quartier de la gare. Les modèles 2.5D sont générés à moindre coût et sont simulés plus rapidement qu'un modèle 3D. Pour donner un ordre de grandeur, deux modèles simples du quartier de la gare (2.5D et 3D) ont été créés et simulés avec des temps respectivement de 5 secondes et 25 secondes pour un bâtiment. Concernant les propriétés physiques, les bâtiments sont caractérisés par les éléments suivants : l'année de construction, l'année de rénovation éventuelle et le type de bâtiment. L'année de construction et l'état de rénovation imposent le type d'enveloppe extérieure de l'objet séparée en trois parties - sol, mur et toit - mais aussi la proportion et le type de vitrage. Le type de bâtiment définit quant à lui le comportement à l'intérieur de l'enveloppe. La taux d'occupation mais aussi l'infrastructure ont un impact sur la température intérieure. Ils génèrent des sources de chaleur occasionnelles en journée et une consommation électrique. Il y a au total onze types de bâtiments considérés tels que par exemple le bâtiment résidentiel, les hôpitaux, les bureaux etc... Ces comportements ont été décrit selon la norme SIA 2024 (2006). Il y est également défini que la température intérieure doit être maintenue entre 20 et 26 °C pour garantir le confort thermique des utilisateurs. Dans nos hypothèses et par manque d'informations, les réservoirs de chaud et de froid ont un volume restreint et leur source une puissance illimitée. Ainsi les besoins sont satisfaits instantanément sans considérer le stockage de chaud ou de froid qui crée des

décalages entre la demande et la satisfaction. En résumé, afin d'être simulé, un objet de type bâtiments doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une géométrie du sol en 2D.
- Une hauteur permettant le passage de la 2D à la 2.5D.
- Un type d'utilisation.
- Une année de construction et/ou de rénovation.

De ces informations principales dépendent les autres informations nécessaires aux simulations. Si l'une de ces informations manque, à l'exception de l'empreinte au sol, elle se voit attribuer une valeur dite par défaut sans laquelle une simulation n'est pas possible. Le choix des valeurs par défaut est arrêté en considérant le scénario énergétique le plus prudent.

3.4.2 Hypothèses sur les sols

Les sols sont simulés sous les hypothèses suivantes. Le sol original du portail cartographique a été discrétisé. Puis en fonction de la nature du sol, un certain type générique est alors assigné aux tuiles résultant de sa discrétisation. Pour 43 natures de sol décrites dans le fichier original, 7 types de sol ont été assignés dans la simulation. En fonction du type, une tuile se voit définir une composition, une réflectance et un facteur d'évapotranspiration, appelé facteur k , qui rend compte de la quantité de vapeur d'eau transférée dans l'atmosphère.

3.4.3 Hypothèses sur les zones d'ombrages

Les derniers objets nécessaires aux simulations sont les objets qui vont produire des zones d'ombrages. Ces objets sont répartis en deux classes, les arbres et les *shadings*. Leurs comportements thermiques ne sont pas au centre des analyses, mais leurs impacts sur leur environnement doivent être pris en compte. Les arbres ont été représentés par une géométrie simplifiée (Figure 6). Le tronc est un hexagone extrudé dans la direction verticale et dont la hauteur est donnée par les informations fournies par la Ville. Le feuillage créant l'ombre a été fortement simplifié et est modélisé par un hexagone à deux dimensions dépendant de la largeur maximale de la couronne du feuillage. Par ce procédé, les géométries permettent de simuler plus rapidement l'impact de l'obstruction du soleil sur la température de surface des sols. Les *shadings* sont quant à eux des structures vides ou non-chauffées dont l'analyse thermique n'est pas pertinente. Il s'agit notamment d'abris composés d'un simple toit, de garages ou locaux techniques.

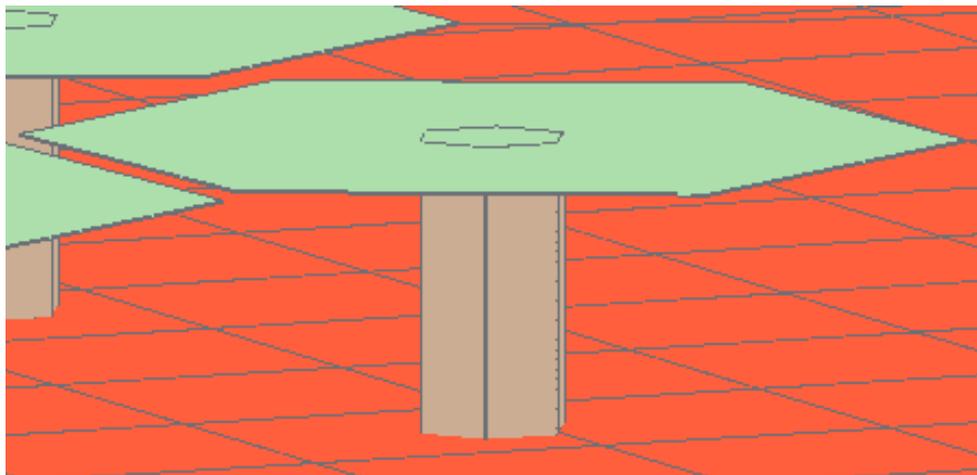


Figure 6: Objet de type arbre

3.5 Calibration

La calibration est une étape essentielle lors de l'élaboration de tout modèle numérique. Elle consiste à ajuster celui-ci afin qu'il corresponde à la réalité, et produise ainsi des résultats utilisables.

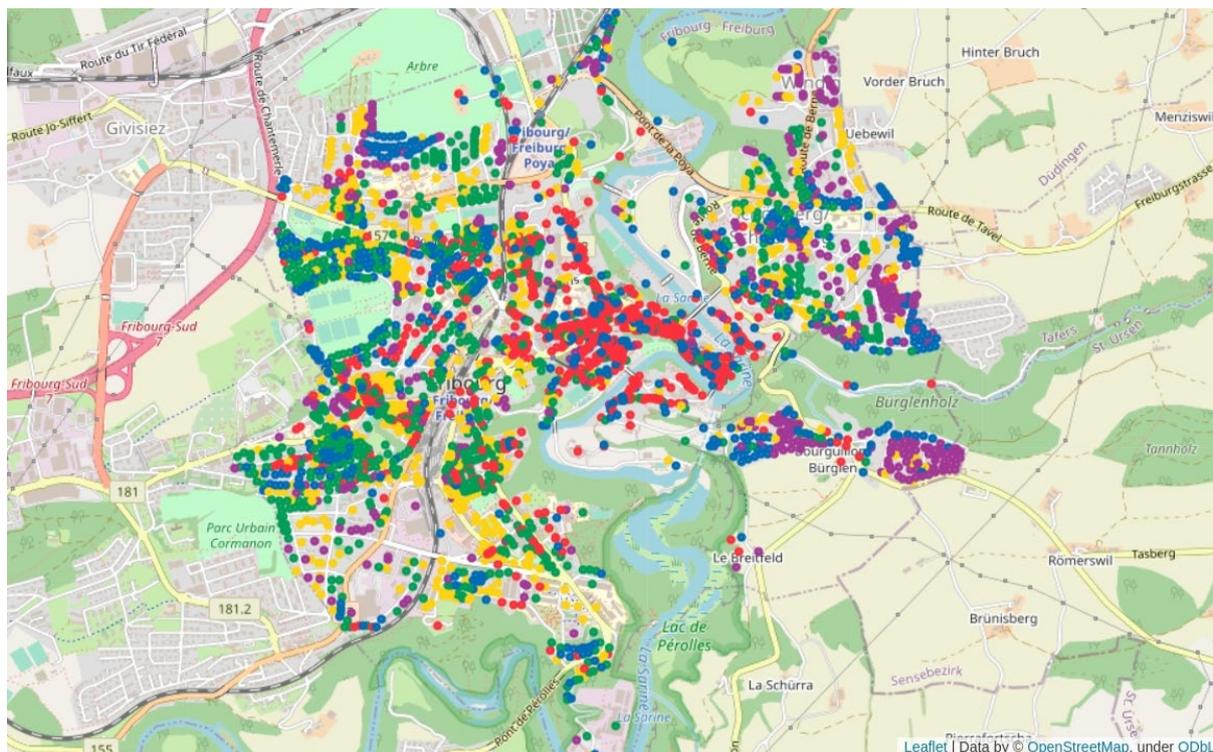


Figure 7 : Carte du partitionnement de la ville

Dans ce projet, la calibration consiste à ajuster la valeur l'une des variables de l'outil de simulation CitySim. Cette variable, nommée taux d'infiltration, correspond à la quantité de chaleur échangée entre un bâtiment et l'extérieur. Le taux d'infiltration joue un rôle déterminant

sur les échanges énergétiques, de la même façon que les ponts thermiques. Ainsi en jouant avec ce paramètre, nous pouvons corriger les pertes thermiques des bâtiments de façon à coller le plus possible à la réalité. Pour ce faire, nous l'avons calibré de telle façon à minimiser la différence entre les consommations énergétiques simulées des bâtiments et les données de la planification énergétique mise à disposition par Groupe E. La calibration s'est déroulée en deux étapes sur la base de méthodes algorithmiques dites de *clustering* (partitionnement):

1. Le partitionnement des bâtiments selon des caractéristiques thermiques et énergétiques communes. Cela permet d'effectuer l'étape suivante sur un échantillon de bâtiments et de l'étendre ensuite au reste de la ville. Le but est de n'utiliser qu'un échantillon représentatif de bâtiments, et ainsi de gagner un temps de simulation important.
2. Le raffinement de la valeur pour chaque partition de bâtiments. Cela consiste à lancer des simulations avec des valeurs extrêmes (minima et maxima réalistes) et la valeur médiane. On obtient ainsi un cadre pour utiliser une méthode dichotomique : on compare les résultats obtenus, et on tente alors de converger en minimisant une différence. Cette différence est celle de l'énergie utilisée en chauffage entre les résultats de la simulation et ceux projetés par les données de Groupe E.

3.6 Méthodologie de simulation des scénarios

Après discussion avec nos partenaires de la ville de Fribourg, les scénarios pertinents en fonction des besoins en matière d'aménagement urbain ont été arrêtés. De manière générale, il a été convenu de procéder d'une part à des simulations à l'échelle de la Ville de Fribourg (§ 3.6.1) et d'autre part, avec un degré de précision plus important, de simuler le quartier de la gare (§ 3.6.2). Chacun de ces deux territoires sont simulés sous différents scénarios climatiques, afin de pouvoir également prévoir l'évolution temporelle des ICU. Pour le quartier de la gare en processus de requalification, nous avons également effectué des simulations de l'état actuel et du quartier requalifié. En plus, des scénarios hypothétiques explorant les impacts d'une végétalisation massive ou de changements d'albédo ont également été réalisés. Cette démarche a pour objectif d'évaluer les nouveaux aménagements sous l'angle des ICU. Cette stratégie a l'avantage de pouvoir offrir une vue d'ensemble de la situation, un focus sur des aménagements urbains à l'échelle d'un quartier centre et une contextualisation temporelle de la problématique.

3.6.1 Simulations à l'échelle de la Ville de Fribourg

La première analyse est effectuée sur l'ensemble du territoire de la Ville de Fribourg (Figure 8). Étant donnée la taille de la scène et le nombre très important de données numériques (voir Tableau 1), les modèles XML pour CitySim sont créés par le code Java selon les informations présentes dans la base de données présentées aux §§ 3.2, 3.3 et 3.4. Le modèle physique est simulé pour les années 2017, 2030, 2040 et 2050 pour pouvoir constater l'évolution thermique de la ville dans les années à venir et pouvoir isoler les zones concernées par les ICU. Le scénario de la ville en 2017 sert de référence pour la calibration, comme cela a été expliqué au § 3.5. Le modèle a été séparé en dix zones (Figure 9) afin de permettre de paralléliser les calculs et de gagner du temps.

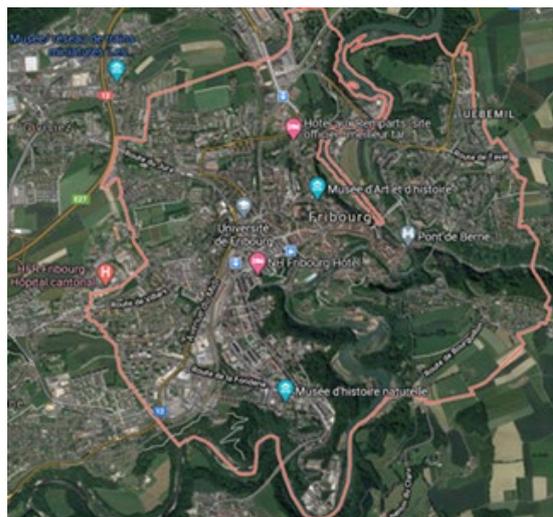


Figure 8 : Territoire communal délimité en rouge

Pour les années 2030, 2040 et 2050, plusieurs scénarios climatiques sont disponibles :

- A1B : croissance économique rapide, mondialisation, nouvelles technologies efficaces, pic de population au milieu du siècle, équilibre fossile/renouvelable
- A2 : croissance économique lente, régions autonomes, augmentation constante de population
- B1 : Similaire à A1B, avec une économie plus verte et moins matérialiste

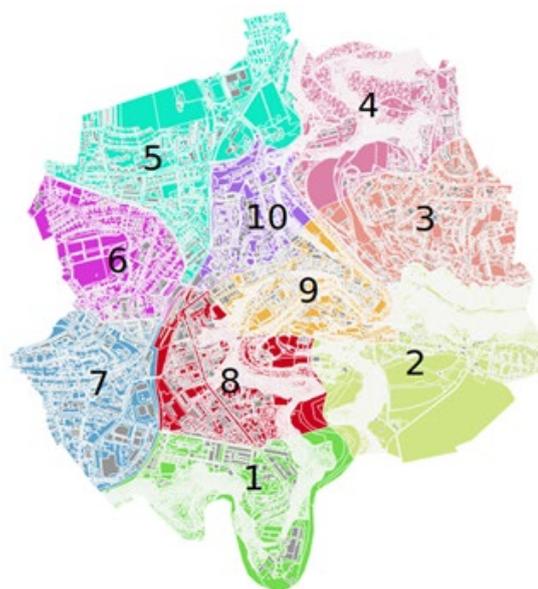


Figure 9 : Partitionnement de la Ville de Fribourg en différentes zones

Nous avons choisi le scénario climatique A1B pour les simulations, celui-ci nous paraissant le plus réaliste.

3.6.2 Simulations à l'échelle du quartier de la Gare

Au début de cette étude, un projet de requalification du quartier de la Gare était en cours. Ce projet de requalification d'envergure, de même que la diversité du bâti et la centralité de ce quartier, en ont fait tout naturellement une scène de choix pour des simulations plus précises

devant déboucher sur des conclusions en grande partie généralisable à d'autres lieux présentant des caractéristiques urbaines similaires (Figure 10 et la Figure 11).

Dans l'ensemble, les hypothèses de calcul sont identiques à celles ayant précédé aux simulations sur l'ensemble de la Ville. En revanche, le quartier de la gare est plus détaillé, notamment par l'utilisation d'un modèle 3D créé manuellement. Les sols ont également été étudiés plus précisément selon leur emplacement, leur composition et l'indice de réflectance ou albédo pour toutes les surfaces du quartier. De plus, étant donné que le quartier de la Gare est construit en grande partie sur des parkings souterrains, les sols ont été traités spécifiquement en les représentant comme des bâtiments souterrains entourés de terre, ceci afin de prendre en compte au mieux leur impact thermique. Dans ce cas d'étude, cinq scénarios pertinents ont été simulés :

- Le premier scénario est le scénario dit de référence. Il correspond au quartier de la Gare au moment de l'étude. Le fichier climatique pour la simulation intègre les données météorologiques mesurées en 2017 à la station de Posieux. En effet, 2017 est l'année

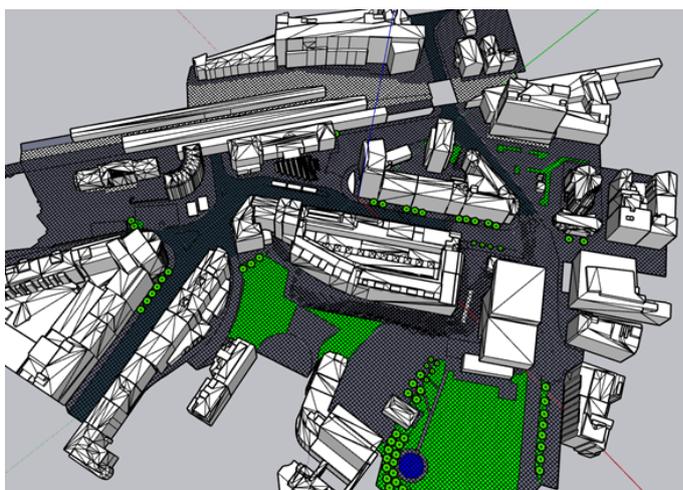


Figure 10 : Modèle SketchUp du quartier de la gare

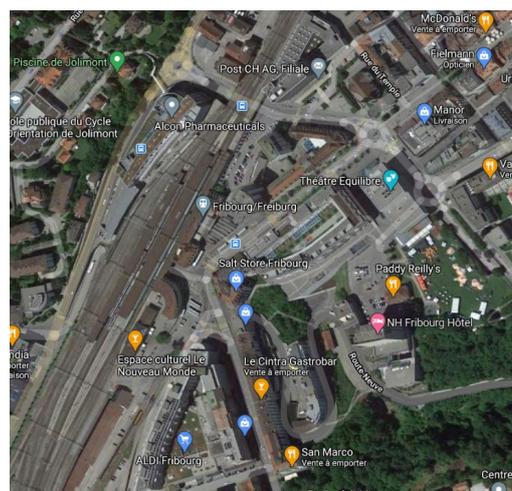


Figure 11 : Vue satellite du quartier de la gare

de référence pour les données de la planification énergétique de la Ville, le choix le plus cohérent consiste donc à simuler ce quartier en l'état actuel qui n'a pas subi d'évolution urbanistique majeure depuis 2017.

- Le deuxième scénario est celui du projet requalifié simulé en 2050. Deux bâtiments planifiés sont ajoutés au modèle ainsi que la modification des sols selon la planification de requalification fournie par la Ville.
- Le troisième scénario est un scénario optimisé dans les limites urbanistiques réalisables, mais non prévues dans le projet de requalification. Un tel scénario fictif est

intéressant pour explorer les potentiels d'optimisation en matière d'ICU. Les couleurs de surfaces ont été déterminés afin d'augmenter leur facteur de réflectance dans une logique de mitigation des ICU.

- Le quatrième scénario reprend le modèle de référence et en simule les conditions climatiques 2050 pour pouvoir constater l'impact du changement climatique sur le quartier si aucune modification n'est apportée. Il s'agit d'une sorte de *worst case scenario*.
- Le cinquième et dernier scénario cherche à évaluer l'influence de la végétalisation des toits uniquement sur le quartier à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence projeté en 2050 également.

4. Résultats et analyses

4.1 Étude de la Ville de Fribourg

4.1.1 Scénario de référence 2017

Nous présentons ci-dessous (Tableau 3) les températures-clés pour le scénario de référence de 2017. Les valeurs moyennes sont pondérées par la surface des sols et bâtiments respectifs. Les valeurs extrêmes, maximale et minimale, correspondent à celles de la surface dont la température moyenne annuelle est la plus élevée, respectivement la plus basse.

Températures des surfaces de la ville [°C]								
Scénario	Sols				Bâtiment			
	Min	Max	Moyenne	Différence	Min	Max	Moyenne	Différence
2017 référence	5.2	18.4	12.2	-	6.6	15.5	11.7	-

Tableau 3 : Températures moyennes à l'année de 2017

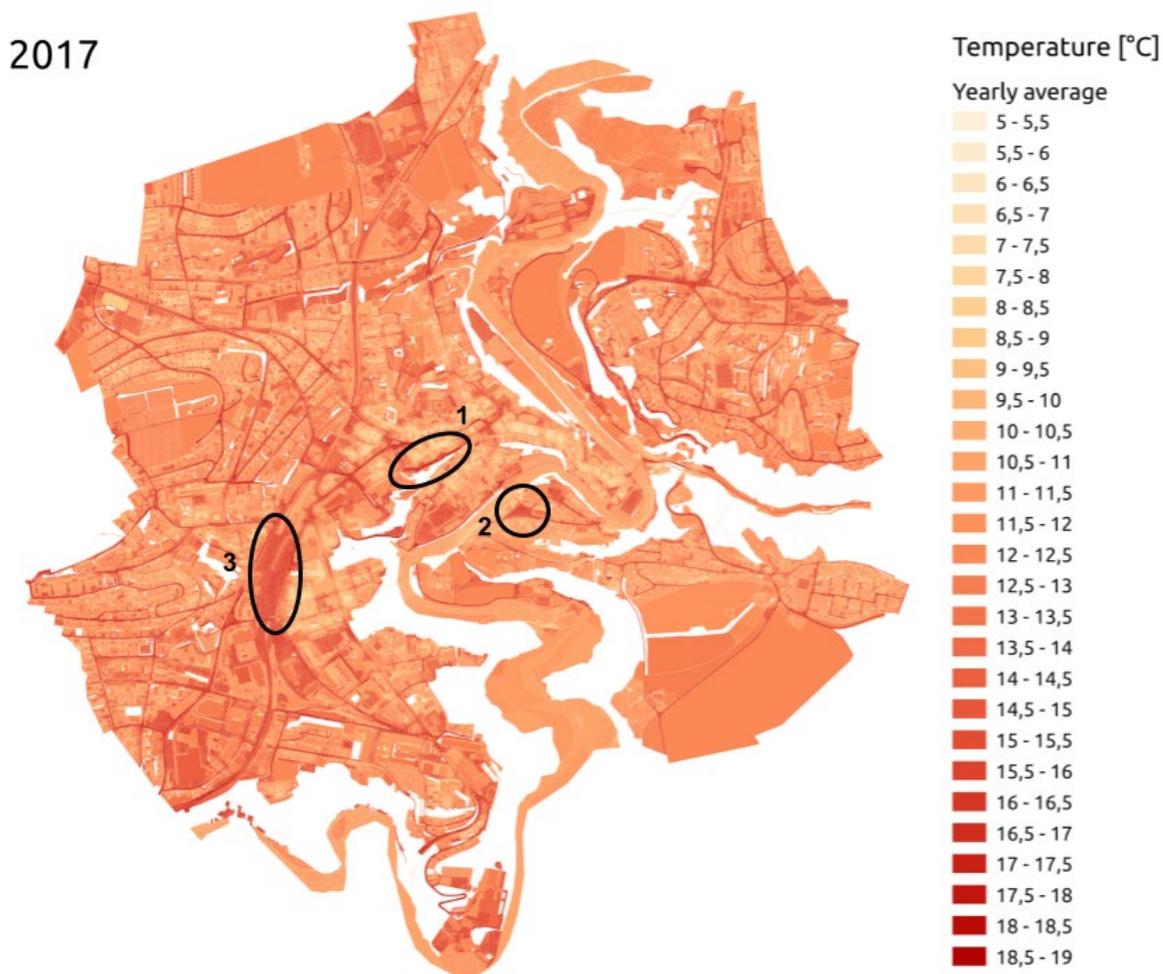


Figure 10 : Carte annotée des températures moyennes à l'année pour 2017

La Figure 12 présente la cartographie des températures de surface moyennes de la ville de Fribourg pour 2017. On distingue facilement les routes ainsi que les places minéralisées qui apparaissent plus rouges, et donc significativement plus chaudes. Inversement, la Sarine est légèrement plus froide que le reste de la ville, et donc plus claire. Quelques observations non exhaustives peuvent être faites :

- La route des Alpes est un cas typique de configuration urbaine favorable aux ICU : sans ombrage, orientée presque plein sud et asphaltée. De manière générale, toutes les surfaces asphaltées affichent des températures supérieures à la moyenne.
- La place de la Planche-Supérieure est une autre configuration urbaine favorable aux ICU. Il s'agit d'une place dégagée et très minérale. La végétation en est totalement absente.
- Les voies de chemin de fer et toute la zone située à l'intersection de la route des Arsenaux, du boulevard de Pérolles et de l'avenue de la Gare forment une grande zone

affichant les températures de surface moyennes parmi les plus élevées de la ville. Pour cette raison, cette zone est étudiée plus en détails ci-dessous au § 3.6.2.

Les températures extrêmes constatées sur l'année sont un autre indicateur pertinent des zones à considérer prioritairement. Pour 2017, l'heure identifiée comme étant la plus chaude est celle du 14 juillet à 13h00. Nous présentons ci-dessous (Tableau 4) la température de surface minimale, maximale ainsi que la moyenne à l'échelle de la ville de manière différenciée pour les sols et les bâtiments. La cartographie suivante (Figure 13) présente les températures de surface à l'échelle de la ville le même jour à la même heure.

Températures maximales des surfaces de la ville [°C]								
Scénario	Sols				Bâtiment			
	Min	Max	Moyenne	Différence	Min	Max	Moyenne	Différence
2017, référence	11.0	84.7	42.8	-	17.4	28.6	43.3	-

Tableau 4 : Températures le 14 juillet 2017 à 13h

On retrouve sur cette cartographie les mêmes zones très chaudes que pour la moyenne annuelle, mais avec de plus grands écarts de température entre les zones froides et chaudes. Les températures les plus élevées des sols ont augmenté plus drastiquement que celles des bâtiments et les températures extrêmes des sols sont aussi plus importantes que celles des bâtiments. Cette dernière constatation s'explique par les matériaux des sols qui emmagasinent davantage de chaleur, par les expositions en partie ombragées et par les températures intérieures des bâtiments plus fraîches qui tempèrent les surfaces extérieures également.

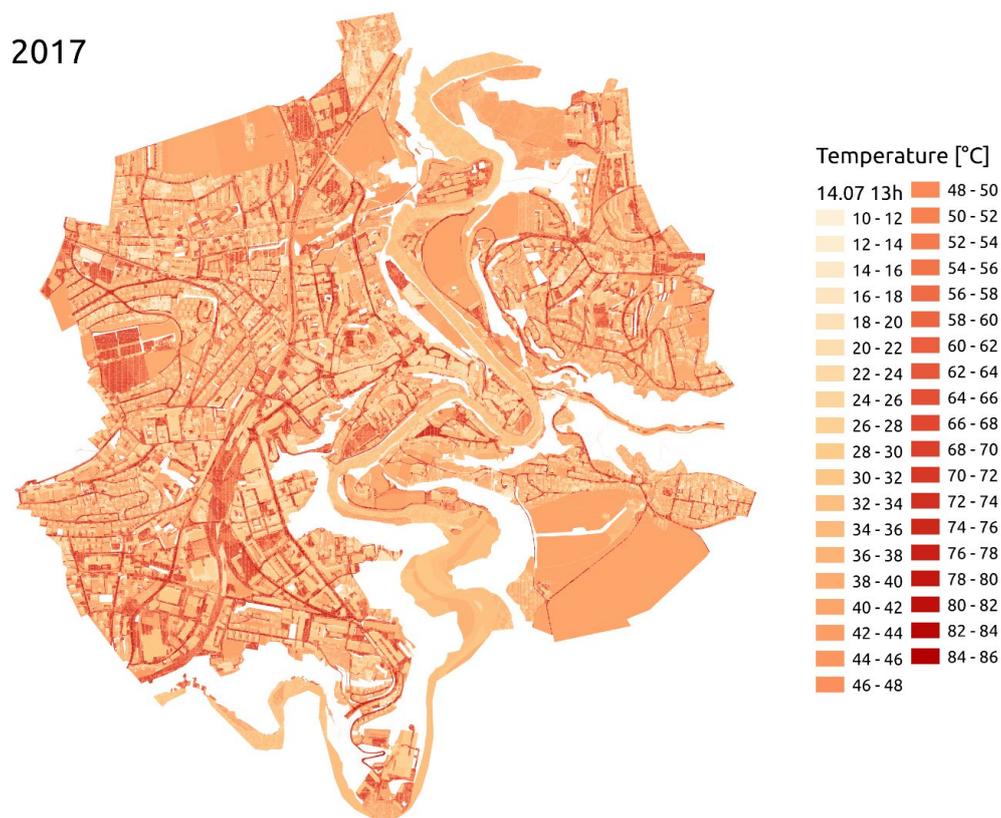


Figure 11 : Cartographie des températures le 14 juillet 2017 à 13h

4.1.2 Évolution 2030 – 2050

Les cartographies suivantes (Figure 14) montrent l'évolution des températures de surface moyennes de 2030 à 2050 par tranches de 10 ans (2030, 2040 et 2050) sous l'effet du changement climatique. Comme expliqué précédemment, le scénario de changement climatique retenu est le A1B. Les valeurs numériques pondérées par surface et moyennées par année sont présentées également dans le tableau ci-dessous (Tableau 5). À l'échelle globale, le scénario de changement climatique utilisé montre une augmentation moyenne des températures d'environ 0.1°C par décennie. Nos simulations montrent une augmentation moyenne de 0.2°C par décennie pour les sols et pour les bâtiments, ce qui est cohérent avec le fait établi que les villes se réchauffent plus vite que les zones non-construites.

Scénario	Températures moyennes des surfaces de la ville [°C]							
	Sols				Bâtiment			
	Min	Max	Moyenne	Différence (2017)	Min	Max	Moyenne	Différence (2017)
2017	5.2	18.4	12.2	-	6.6	15.5	11.7	-
2030	5.3	18.0	12.1	-0.1	6.7	15.3	11.6	-0.1
2040	5.7	18.4	12.4	+0.2	7.0	15.6	12.0	+0.4
2050	6.1	18.9	12.9	+0.7	7.4	16.1	12.4	+0.7

Tableau 5 : Températures des années 2030, 2040 et 2050

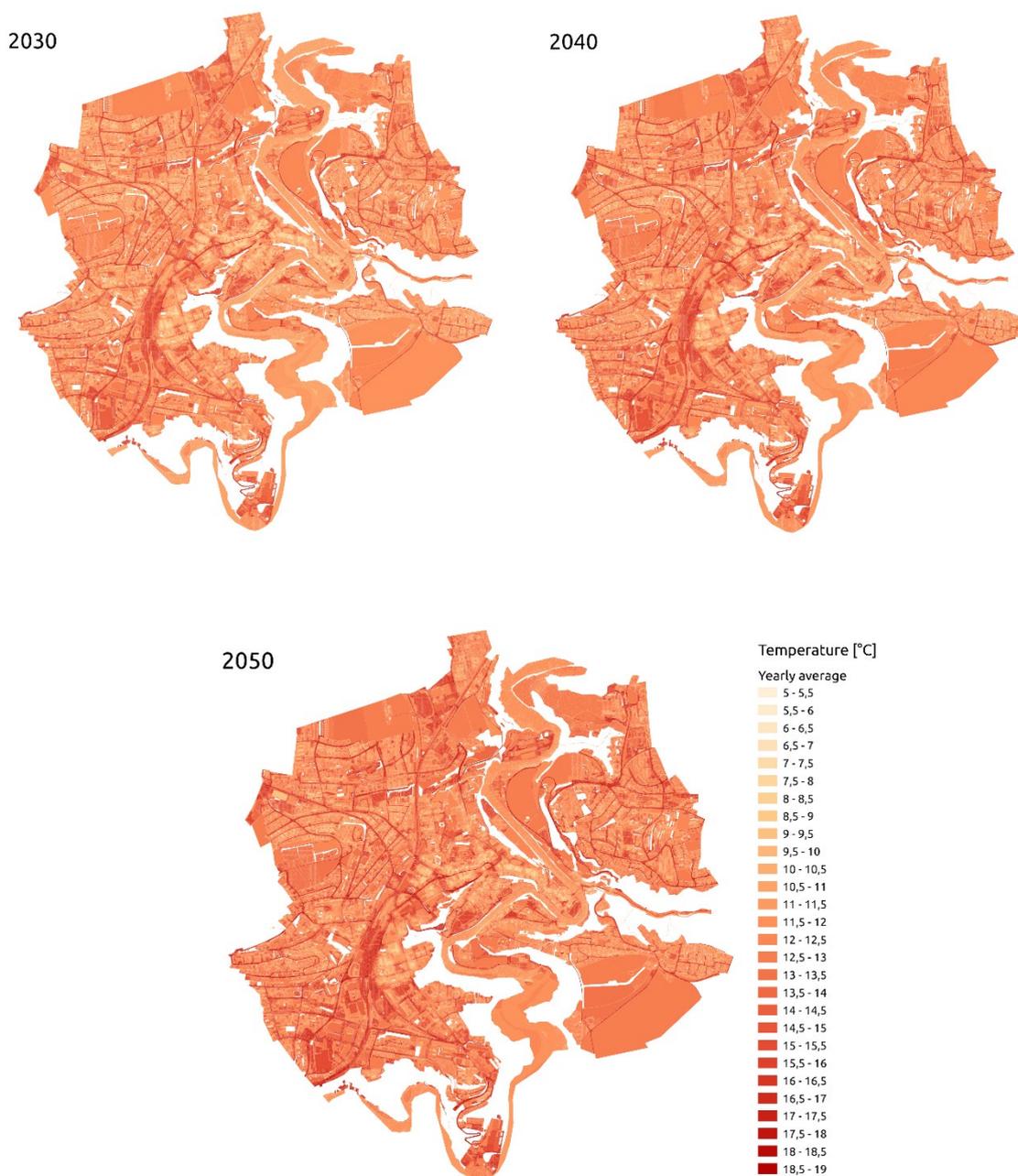


Figure 12 : Cartographie des températures moyennes pour 2030, 2040 et 2050

Il est à relever que l'année 2030 présente des températures inférieures à celles de 2017, ce qui peut à première vue paraître contradictoire sous l'effet du changement climatique. Cependant, il est à relever que l'année de référence 2017 a constitué une année particulièrement chaude, il s'agit même de la sixième année la plus chaude depuis le début des relevés en 1864. En d'autres termes, il faut interpréter la figure des différences de température (Figure 15) en prenant en compte le caractère exceptionnel de l'année 2017 qui va se généraliser, comme le montrent les cartographies des différences de température pour 2040 et 2050, toutes deux en moyennes bien plus chaudes que l'année 2017 dont la température a pourtant été particulièrement élevée en moyenne.

Il est également intéressant de comparer visuellement les cartographies des différences de températures de surfaces moyennes entre le scénario de référence 2017 et les années 2030, 2040 et 2050 respectivement (Figure 16). Si, comme dit ci-dessus, l'année 2030 présente un léger refroidissement moyen par rapport à 2017 particulièrement chaude, le réchauffement moyen de la ville de +0.7°C à l'horizon 2050 est bien visible et affecte l'ensemble du territoire communal.

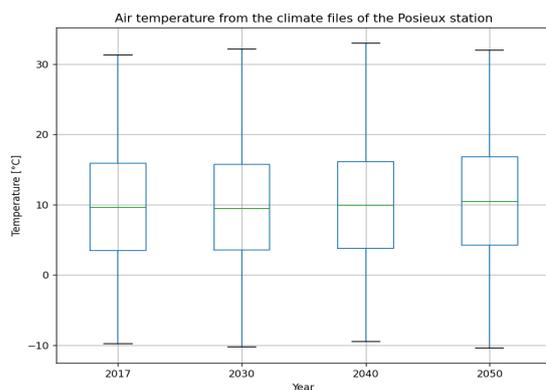


Figure 13 : Box plot des prévisions de températures moyennes de l'air 2030, 2040 et 2050 comparées aux valeurs mesurées en 2017.

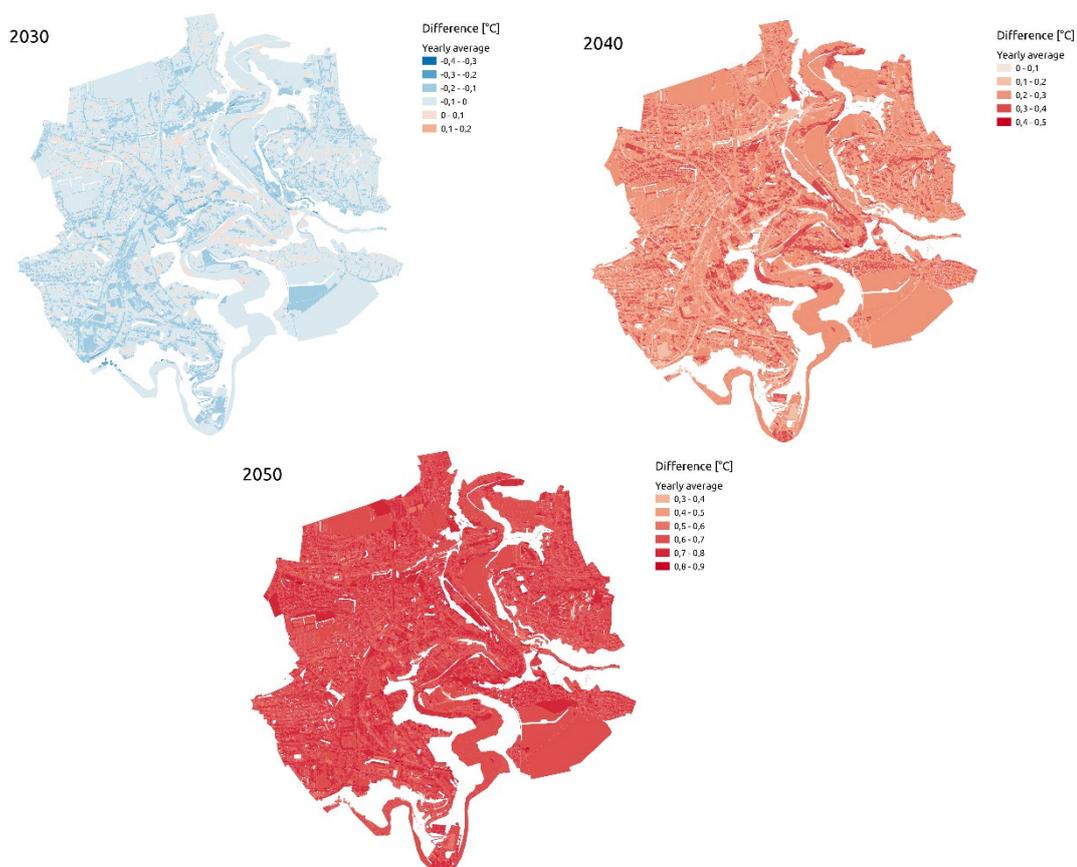


Figure 14 : Carte des différences de températures annuelles moyennes entre 2017 et 2030,2040 et 2050

Afin d’apprécier l’ampleur de l’augmentation de l’intensité des ICU sous l’effet du changement climatique, nous avons examiné l’évolution des distributions journalières des températures de surface estivales (21 juin au 21 septembre) d’une zone favorable de 2017 à 2050. Comme le quartier de la Gare fait ci-dessous l’objet d’une analyse détaillée, la zone retenue est celle de la Planche supérieure (Figure 17). Le tableau ci-dessous (Tableau 6) en résume les principales valeurs et montre un déplacement des températures journalières maximales de +0.7°C par décennie, alors qu’en moyenne ce déplacement est de +0.3°C par décennie. Si la ville se réchauffe plus rapidement que les zones non-construites (+0.2°C par décennie en moyenne à l’échelle de la ville selon nos résultats), à l’intérieur de la ville, ce résultat semble indiquer que les zones favorables aux ICU elles aussi se réchauffent plus rapidement.

Températures estivales, Planche-Supérieure [°C]				
Scénario				
	Min	Max	Moyenne	Différence
2017	14.1	42.1	29.4	-
2030	13.4	41.3	29.7	+ 0.3
2040	12.9	42.4	29.9	+ 0.5
2050	13.6	44.4	30.4	+ 1.0

Tableau 6 : Évolution des températures estivales à la Planche-Supérieure

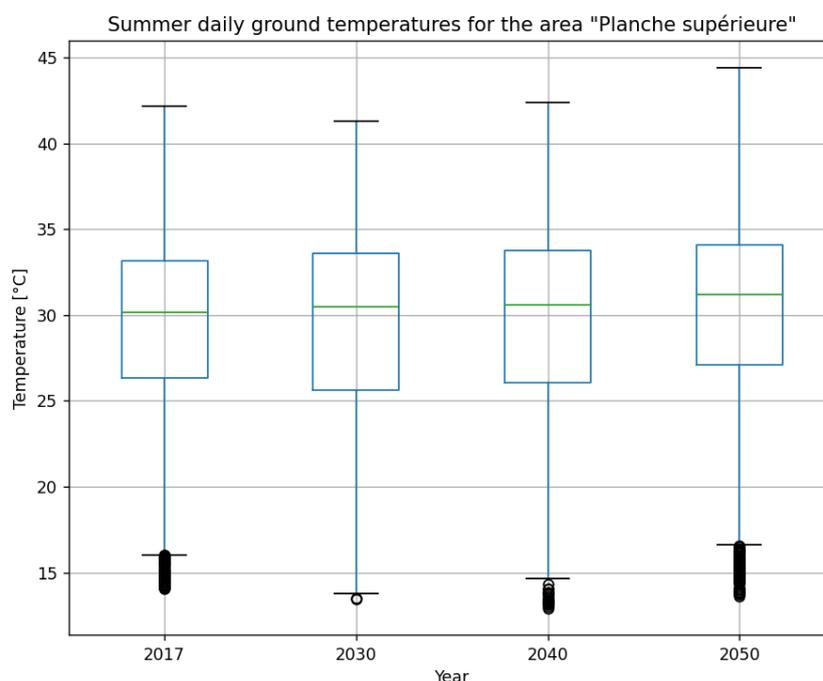


Figure 15 : Box plot des températures journalières moyennes de la Planche-Supérieure pour les années 2017, 2030, 2040 et 2050

4.2 Étude du quartier de la Gare

Dans cette section, nous présentons les cartographies des températures de surface pour chacun des différents scénarios détaillés ci-dessus au point 3.6.2. Nous nous efforçons d'en faire ressortir les zones les plus chaudes et les plus froides pour en mettre en évidence les principales caractéristiques urbanistiques qui seront reprises ensuite dans la section 4.3 dont la fonction est de synthétiser les conclusions des différents scénarios étudiés.

4.2.1 Scénario de référence 2017

Nous présentons ci-dessous les résultats pour le scénario de référence du quartier de la Gare avec des données climatologiques et de consommation énergétique de l'année 2017. Ce scénario nous donne une vision d'ensemble de la situation actuelle dans cette zone et nous sert comme référence pour les comparaisons avec les scénarios suivants. La couleur associée à chacune des surfaces qui composent la scène correspond, selon l'échelle des températures à droite de la cartographie (Figure 18), à la température annuelle moyenne de la surface en question et à la température horaire de l'heure la plus chaude telle que mesurée en 2017 à la station de Posieux. Le tableau suivant présente quelques chiffres-clé de ce scénario de référence.

Températures, scénario de référence 2017 [°C]								
Scénario	Annuelles				À l'heure la plus chaude			
	Min	Max	Moyenne	Différence	Min	Max	Moyenne	Différence
2017 référence	7.9	33.4	13.5	-	13.3	89.3	40.4	-

Tableau 7 : Températures moyennes et extrêmes du scénario de référence 2017

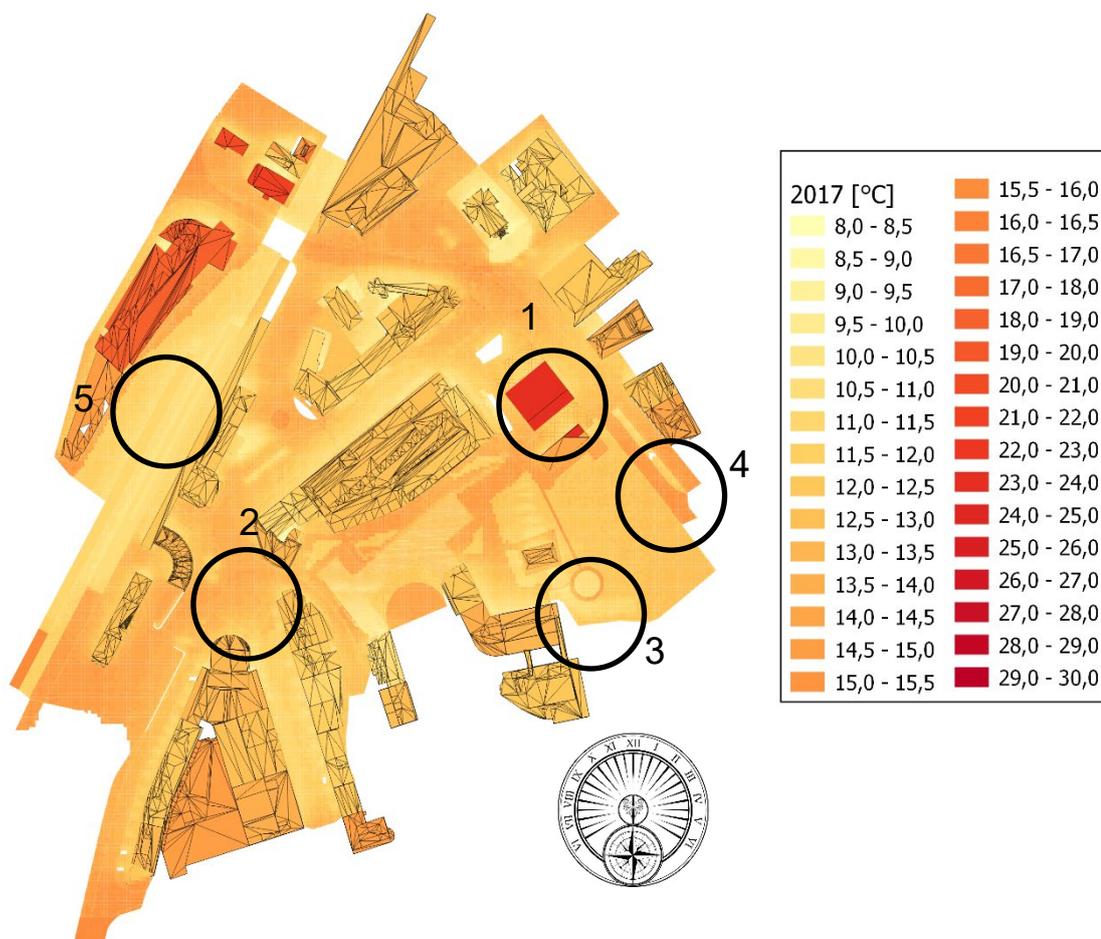


Figure 16 : Scénario de référence, cartographie des températures de surface pour 2017

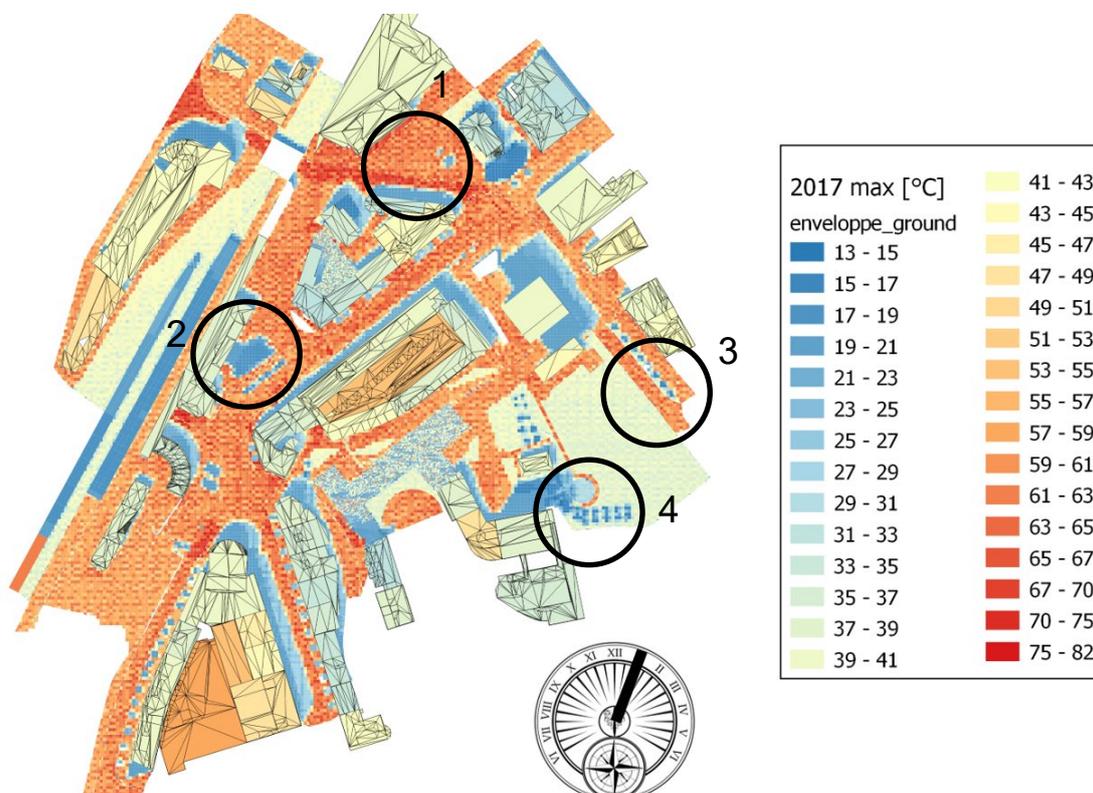


Figure 17 : Cartographie des températures horaires à l'heure la plus chaude de 2017.

Les simulations montrent donc une température annuelle moyenne du quartier de la Gare de 13.5°C et une température moyenne à l'heure la plus chaude telle que mesurée à la station de Posieux de 40.4°C. Les points suivants sont à relever :

- Les surfaces présentant les températures annuelles moyennes les plus élevés sont les toits du Théâtre Équilibre (Figure 18, zone 1) et de la Gare. Il s'agit en effet de surfaces fortement exposées au rayonnement solaire et constituées de matériaux de construction capables d'emmagasiner de la chaleur qui sera essentiellement évacuée sous forme de rayonnement infrarouge dans l'atmosphère. La cartographie montre cependant que les températures de surface à proximité immédiate de ces toits ne sont pas plus hautes que sur l'ensemble du quartier, et que par conséquent, ces toits ne semblent pas contribuer significativement aux phénomènes d'ICU ;
- De manière tout-à-fait évidente, les routes asphaltées et fortement exposées au rayonnement solaire (Figure 18, zones 2 et 4) présentent des températures annuelles moyennes nettement plus importante que la moyenne du quartier de la Gare. Cette conclusion sera encore renforcée par les effets de la présence de véhicules à moteur générant également de la chaleur pas prise en compte dans les simulations ;
- Les places végétalisées ou avec des éléments d'eaux, tels que les Grands Places (Figure 18, zone 3) offrent des températures inférieures à la moyenne annuelle. Ce constat est particulièrement vrai en cas de fortes chaleurs où la température de surface de zones végétalisées peut être inférieure de quelques dizaines de degrés à des zones minérales de même orientation (Figure 19, zones 3 et 4) ;
- Nous constatons de manière générale que toutes les surfaces aux abords de bâtiments générateurs d'ombre portée présentent des températures moins élevées que des surfaces de même nature mais davantage exposée au rayonnement solaire. À nouveau, ceci est particulièrement vrai en cas de fortes chaleurs (Figure 19).

Ainsi, il apparaît de l'analyse de ce scénario de référence pour le quartier de la Gare que deux facteurs déterminants de l'ICU sont l'ombrage et la nature des sols.

4.2.2 Scénario du quartier de la Gare actuel projeté à 2050

Nous présentons ci-dessous le scénario du quartier de la Gare en l'état actuel mais avec les conditions météorologiques de 2050 (scénario de changement climatique A1B). Grâce à ce scénario, il est possible de constater l'effet du changement climatique sur la scène si aucun aménagement urbain n'est entrepris.

Dans le Tableau 5, les températures moyennes sont toujours plus élevées que dans le scénario de référence ci-dessus. Ceci est dû uniquement au changement climatique (scénario

A1B). Globalement, les températures augmentent durant les trente prochaines années d'environ 1°C aussi bien en moyenne (0.7°C) qu'à l'heure la plus chaude (0.8°C).

Températures moyennes pondérées selon l'aire des surfaces [°C]								
Scenario	annuelle				À l'heure la plus chaude			
	min	max	moyenne	différence	min	max	moyenne	différence
2017	7.9	33.4	13.5	-	13.3	89.3	40.4	-
2050	8.6	34.4	14.2	+ 0.7	13.5	91.0	41.2	+ 0.8

Tableau 8: Résumé des températures du scénario actuel projeté à 2050 et différence avec le scénario de référence

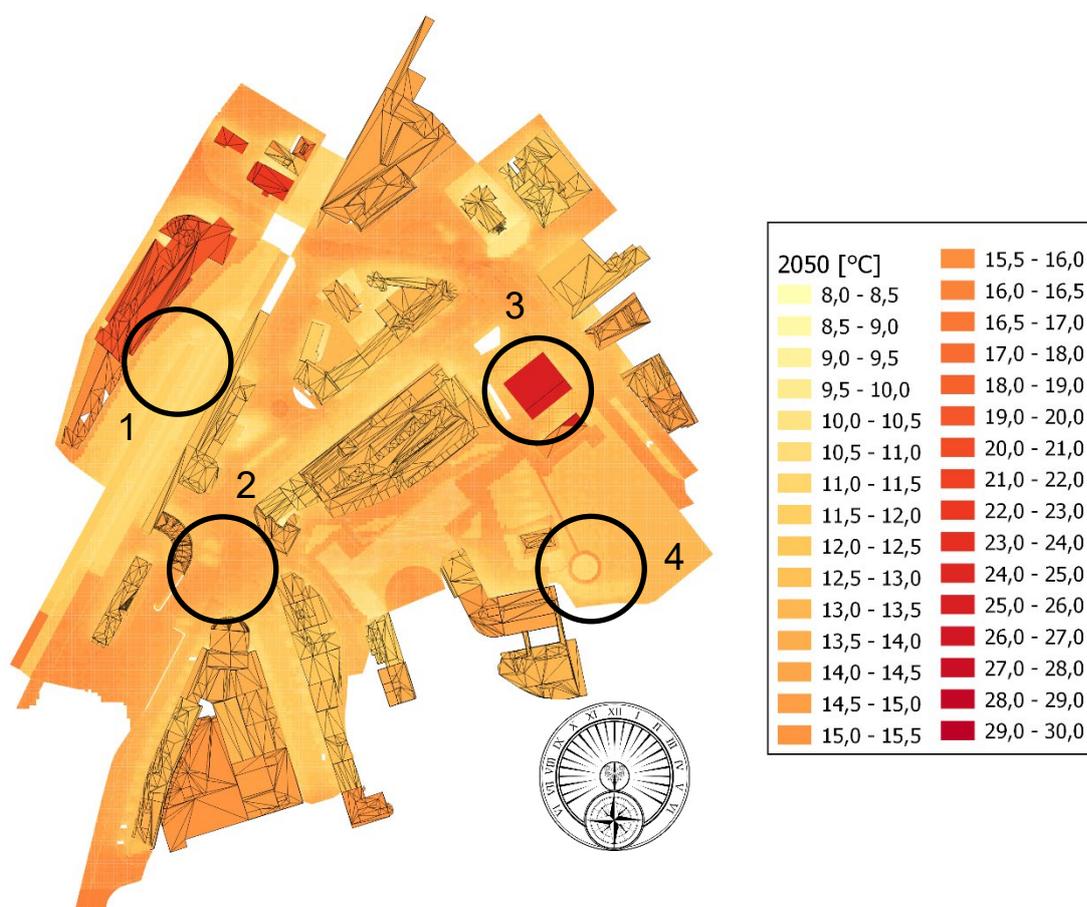


Figure 18: Moyenne annuelle des températures pour le scénario actuel projeté à 2050

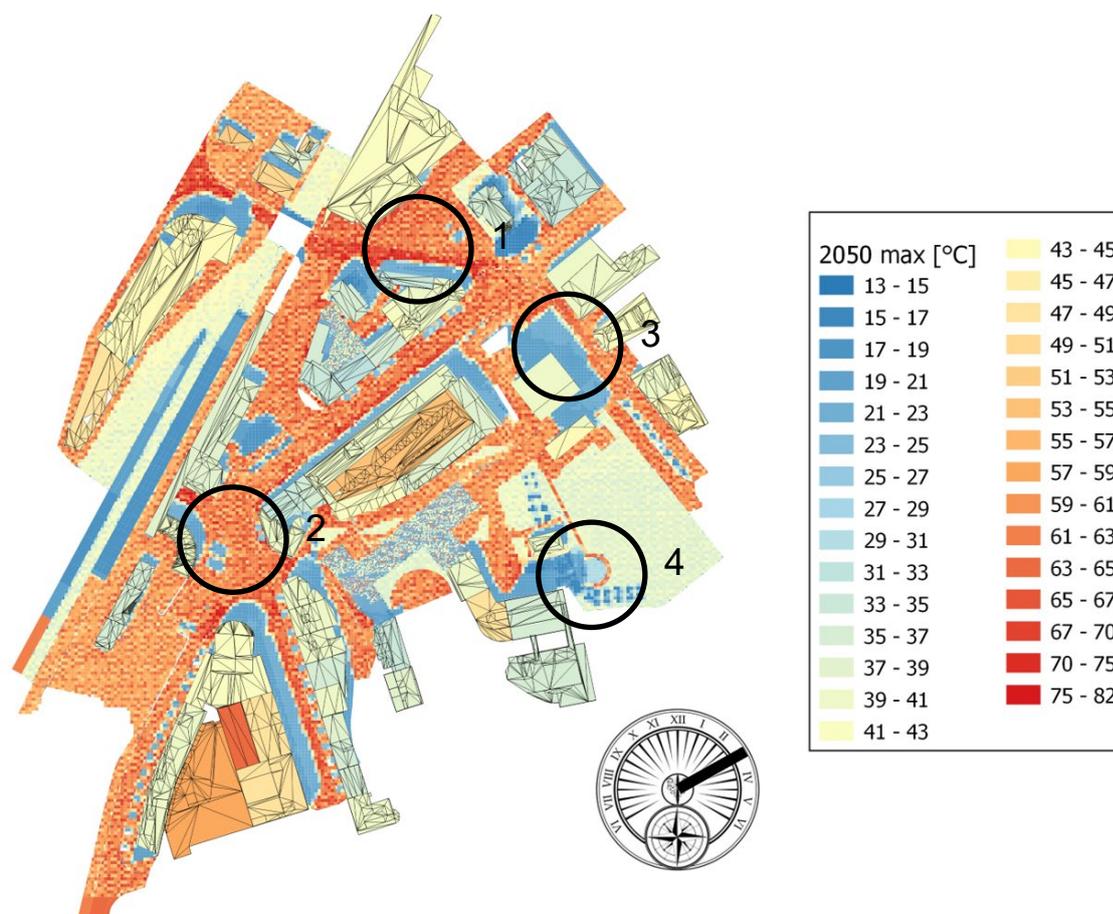


Figure 19: Température à l'heure chaude pour le scénario actuel projeté à 2050

Pour ce scénario, la température moyenne annuelle pondérée par l'aire des surfaces est de 14.2°C (+0.7°C). En ce qui concerne l'heure la plus chaude, la comparaison doit être faite de manière prudente car cette heure n'est pas identique en 2017 et en 2050. Par conséquent, ces heures ont été choisies afin qu'elles soient la suite d'une succession maximale de jours chauds et ensoleillés avec le minimum de nébulosité. Ces conditions assurent un stockage d'énergie thermique maximal dans le bâti et sont dès lors représentatives de l'ICU. Quelques éléments sont à relever en priorité :

- La zone 1 (Figure 20) nous indique que la température annuelle des voies de chemin de fer est en général plus basse que le reste de la scène. Il est probable que cela corresponde à un ballast ayant une réflectance plutôt faible et évitant un stockage important d'énergie thermique ;
- Dans la zone 2 (Figure 20 et Figure 21), le revêtement d'asphalte antiphonique ainsi qu'une zone dégagée provoque une augmentation des température de surface. Effectivement, cette asphalte d'un couleur plus sombre que l'ancien revêtement à un albédo plus bas et donc emmagasine plus d'énergie solaire. De plus, l'absence d'ombrage accentue cet effet ;

- Dans les zone 1 et 3 (Figure 20), la différence de températures due uniquement à l'exposition solaire est bien visible. Nous relevons en effet plus de 40°C de différence par rapport à la moyenne à l'heure la plus chaude.
- Dans la zone 4 (Figure 20), les surfaces très fraîches sont des surface avec plusieurs arbres et bénéficiant de leurs ombrages. Nous constatons également que la surface ronde (la fontaine de Tinguely) est plus fraîche que les zones vertes qui l'entourent. Les surfaces végétalisées restent en moyenne plus fraîches que les zones goudronnées ou minérales mais sont plus chaudes que les zones protégées des rayonnements solaires directs.

L'étude du scénario actuel projeté en 2050 révèle donc un réchauffement global du quartier de la Gare compatible avec les prévisions du GIEC.

4.2.3 Scénario du quartier requalifié 2050

Ce scénario présente le quartier de la Gare projeté en 2050 selon le projet de requalification. Cette requalification concerne principalement les dispositions et la composition des sols. L'intérêt d'avoir simulé ce quartier est de pouvoir le comparer avec le scénario précédent (quartier de la Gare dans son état actuel projeté en 2050) sous l'angle des aménagements urbains et des ICU.

Températures moyennes, quartier de la Gare [°C]								
Scénario	annuelle				À l'heure la plus chaude			
	min	max	moyenne	différence	min	max	moyenne	différence
2017	7.9	33.4	13.5	-	13.3	89.3	40.4	-
2050	8.6	34.4	14.2	+ 0.7	13.5	91.0	41.2	+ 0.8
2050_req	8.6	34.4	14.1	+ 0.6	13.5	91.0	41.0	+ 0.6

Tableau 9: Températures pour le scénario 2050 requalifié et comparaison avec les scénarios précédents

Les figures ci-dessous (Figure 22 et Figure 23) représentent le même type de cartographies que celles des points précédents selon la même méthodologie. De plus, pour une meilleure compréhension des résultats, une figure supplémentaire (Figure 24) a été réalisée. Cette figure montre les différences de température entre le quartier de la Gare dans son état actuel et le quartier requalifié, tous deux projetés en 2050 pour intégrer les effets du changement climatique.

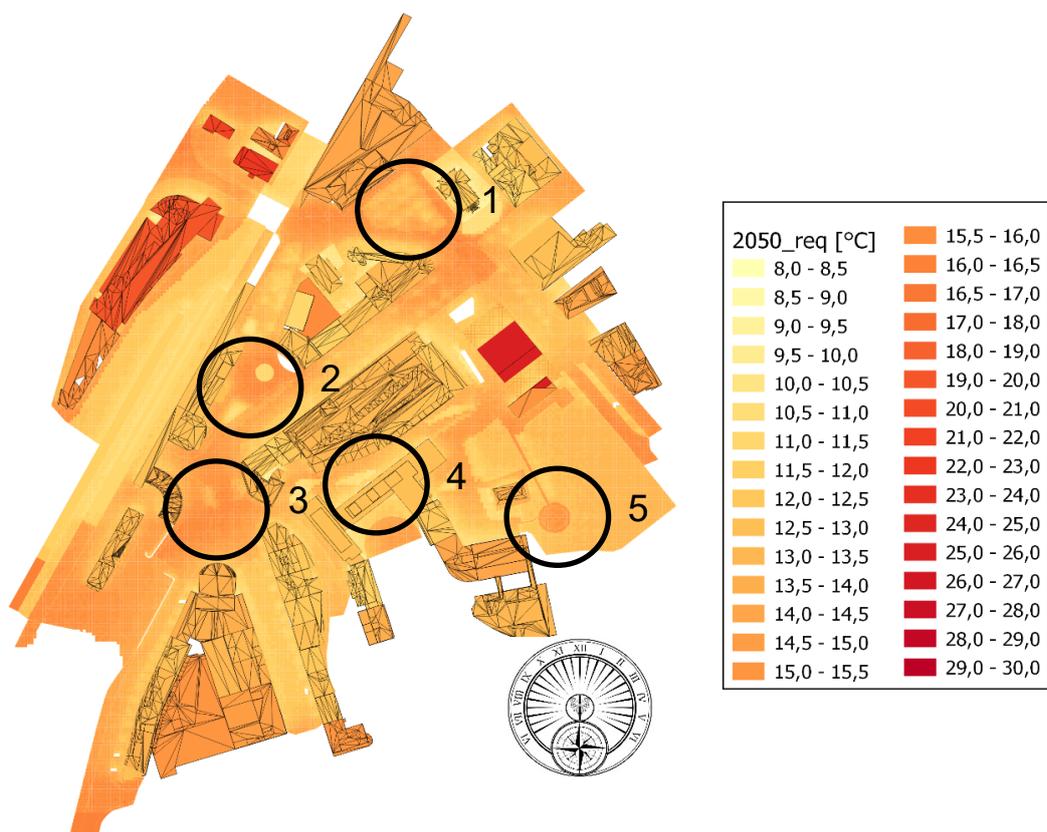


Figure 20: Moyenne annuelle des températures pour le scénario requalifié 2050

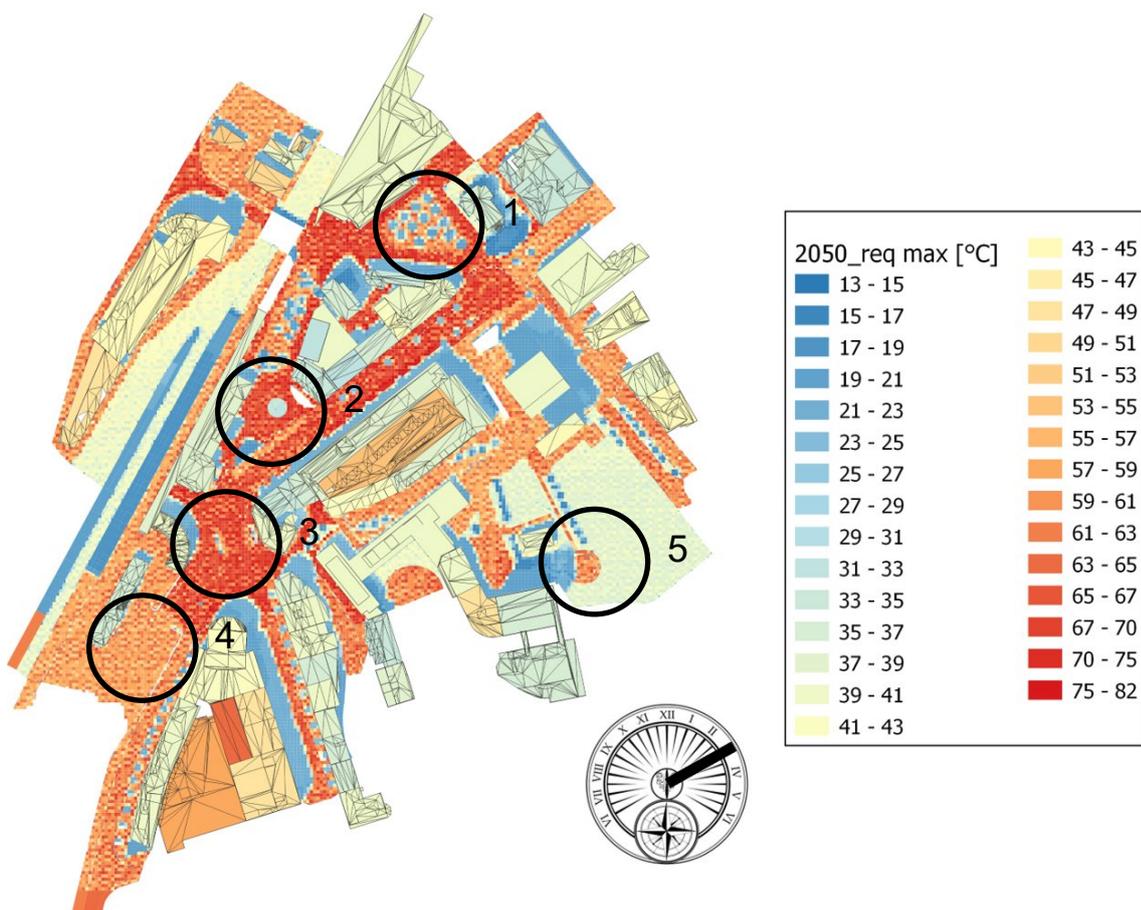


Figure 21: Heure chaude pour le scénario requalifié 2050

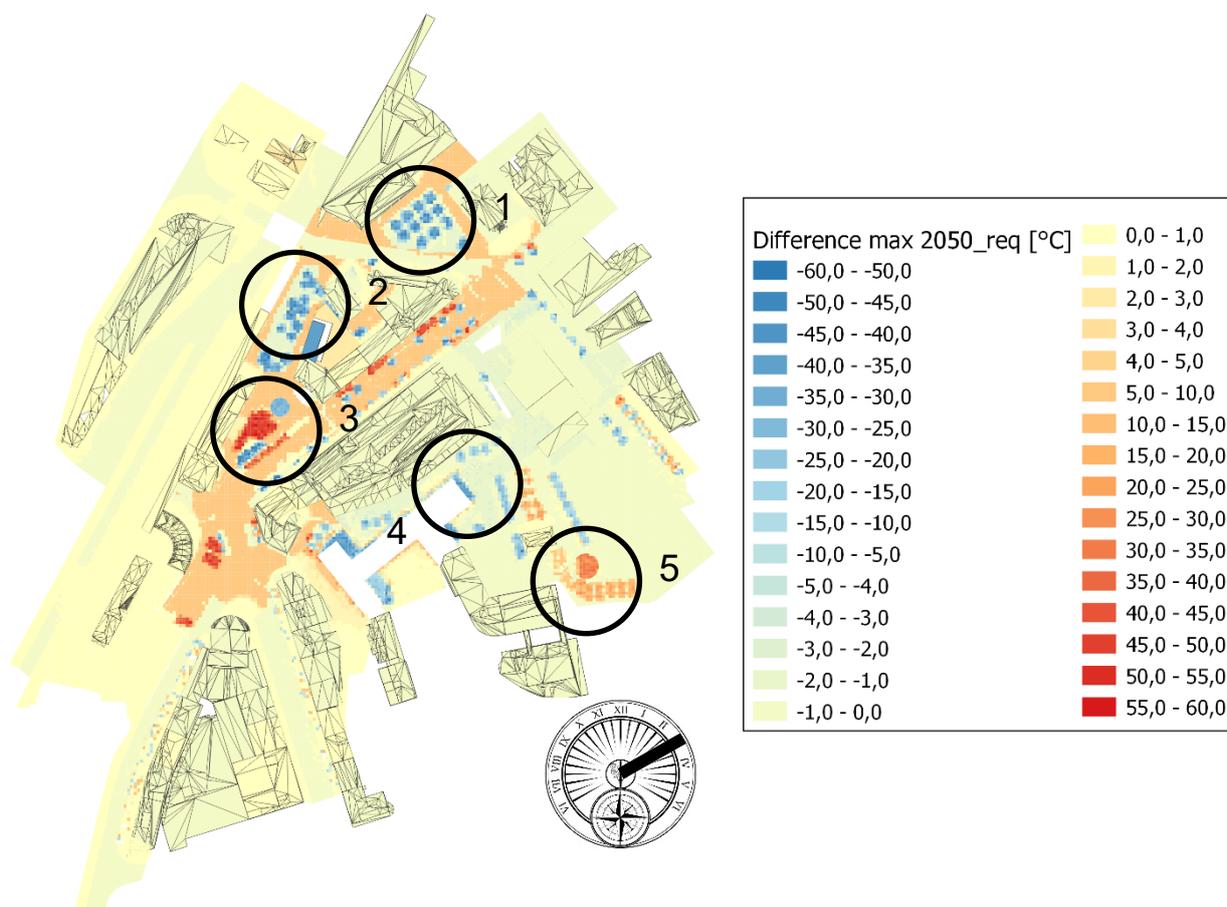


Figure 22: Différence de température de surface entre les quartiers actuel et requalifié projetés en 2050

Le quartier de la Gare dans sa version requalifiée projetée en 2050 présente une température moyenne annuelle pondérée de 14.1°C, soit une augmentation annuelle de 0.6°C par rapport au scénario de référence. Pour l'heure la plus chaude, la température moyenne est de 41.0°C, une augmentation de 0.6°C également par rapport au scénario de référence. La comparaison entre les deux scénarios projetés en 2050 permet de mettre en évidence l'apport du nouveau projet par rapport à la problématique des ICU. Le scénario actuel projeté en 2050 présente une température moyenne annuelle de 14.2°C et de 41.2°C à l'heure la plus chaude. Ainsi, le projet requalifié produit un abaissement de la température moyenne de 0.1°C et de 0.2°C à l'heure la plus chaude. Globalement, l'effet de la requalification du quartier de la gare est modéré par rapport aux ICU. Toutefois, les mesures d'aménagement projetés auront des effets plus localisés sur lesquels nous revenons ici :

- Dans la zone 1 des trois figures, la requalification a changé une surface de béton pour un sol recouvert de gravier et des arbres. On constate que la température de surface de cette zone est largement inférieure par plusieurs dizaines de degrés. Cet effet provient principalement de l'ombrage des arbres, dans une moindre mesure du

changement de surface. On distingue en effet clairement la forme ronde correspondant à l'ombre portée de la couronne des arbres, elle plus fraîche que la zone proche de gravier. Si de tels écarts peuvent sembler très importants, il faut garder à l'esprit qu'ils correspondent à des différences de température de surface. De plus, une surface minérale en plein été et sans ombrage peut atteindre des températures de surface de l'ordre de 60-70°C, alors qu'au même moment, une surface végétalisée et ombragée restera autour des 20°C, ainsi que le montrent nos simulations.

- Sur la zone 3 de la Figure 24, deux changements importants sont visibles. Le premier est l'apport de la fontaine (rond bleu). Les surfaces d'eau de la fontaine sont plus fraîches mais leur effet sur les surfaces environnantes est faible. Le deuxième est l'augmentation de température consécutif à la suppression de l'abri à l'entrée de la gare. La zone étant désormais exposée au rayonnement direct, elle voit sa température augmenter fortement.
- La zone 3 des Figure 22 et Figure 23 est une zone d'asphalte sombre sans ombrage. Il est clair qu'elle réunit toutes les caractéristiques de l'ICU et le projet requalifié n'y apporte pas d'amélioration.
- Dans la zone 4 de la Figure 24, le changement d'un sol de béton à des pavés, permet de réduire très légèrement (au maximum 5°C) la température des surfaces.
- Dans la zone 5 de la Figure 24, la suppression des arbres dans le projet requalifié engendre une augmentation de la température des surfaces vertes. Le même phénomène se produit avec l'absence de la fontaine remplacée par du béton.

4.2.4 Scénario du quartier requalifié et optimisé 2050

Ce dernier scénario illustre des modifications qui peuvent être apportées au quartier afin de réduire les effets d'ICU. Il reprend le projet requalifié, mais en optimise les paramètres comme l'albédo des surfaces pour réduire les gains solaires et le nombre d'arbres. Le changement d'albédo concerne principalement les sols, les bâtiments appartenant en principe à des privés. Les changements d'albédo de même que les arbres supplémentaires ont été intégrés selon une étude parallèle résumée ci-dessous :

- Les sols ont été modifiés de telle manière à optimiser leur albédo (SWR ou *short wave reflectance*). Ces modifications ont été effectués sur la base de valeurs référencées et en permettant aux sols de garder leurs fonctions.
- De nouvelles arborisations ont été intégrées également dans les espaces libres. Ces nouvelles arborisations ne sont pas prévues par le projet de requalifications et sont

certainement non réalisables en raison de contraintes urbanistiques. Toutefois, il nous a semblé pertinent de les simuler pour en constater les effets.

La figure ci-dessous résume les éléments inclus dans ce scénario :

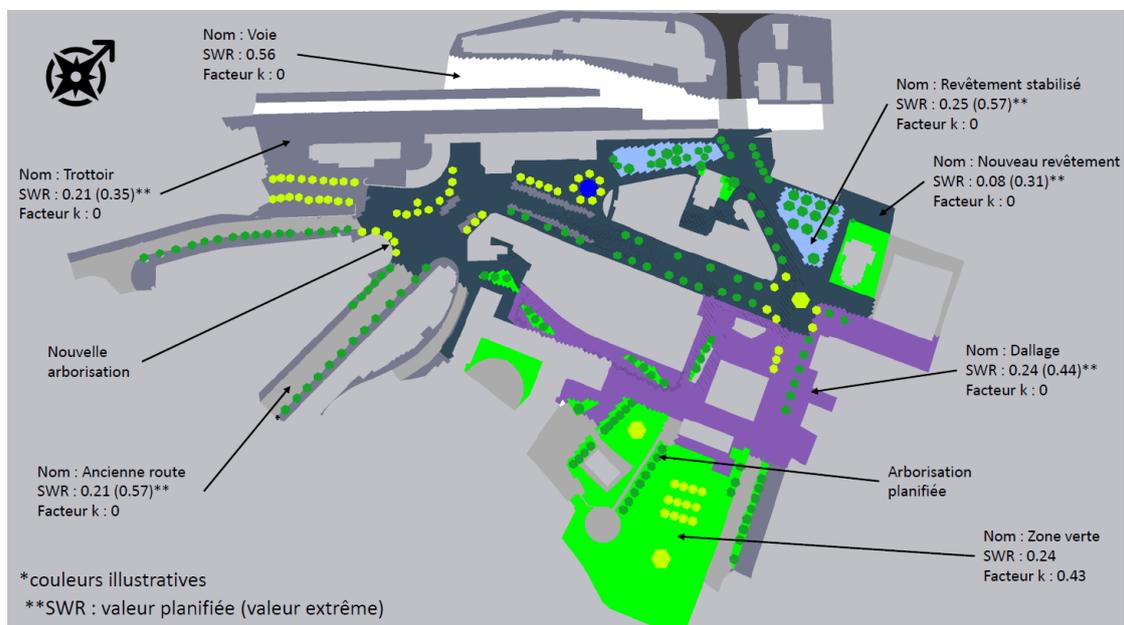


Figure 23 : Optimisations du scénario requalifié projeté en 2050 (nouvelle arborisation et albédo).

Le tableau ci-dessous (Tableau 11) présente les résultats des simulations du scénario requalifié optimisé par rapport au scénario simplement requalifié, tous deux projetés en 2050. Le scénario de référence est également indiqué à des fins comparatives. Les figures suivantes (Figure 26, Figure 27 et Figure 28) représentent les cartographies selon les mêmes modalités et méthodologie que celles adoptées aux paragraphes précédents.

Scénario	Températures moyennes pondérées selon l'aire des surfaces [°C]							
	annuelle				à l'heure chaude			
	min	max	moyenne	différence	min	max	moyenne	différence
2017	7.9	33.4	13.5	0.0	13.3	89.3	40.4	0.0
2050_req	8.6	34.4	14.1	+ 0.6	13.5	91.0	41.0	+ 0.6
2050_opt	8.5	33.1	13.5	0.0	13.5	91.7	39.3	- 1.1

Tableau 10 : Résumé des températures pour le scénario 2050 requalifié et optimisé et comparaison avec les scénarios précédents

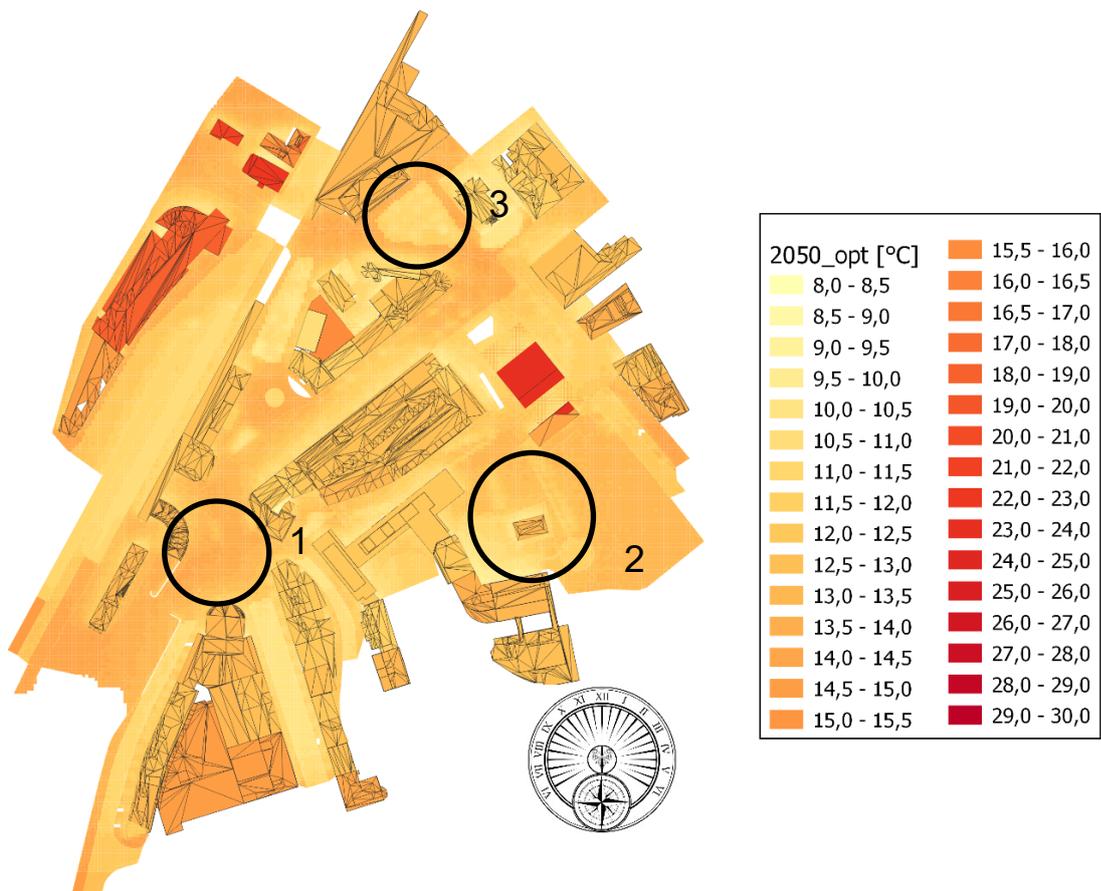


Figure 24: Moyenne annuelle des températures pour le scénario requalifié et optimisé 2050

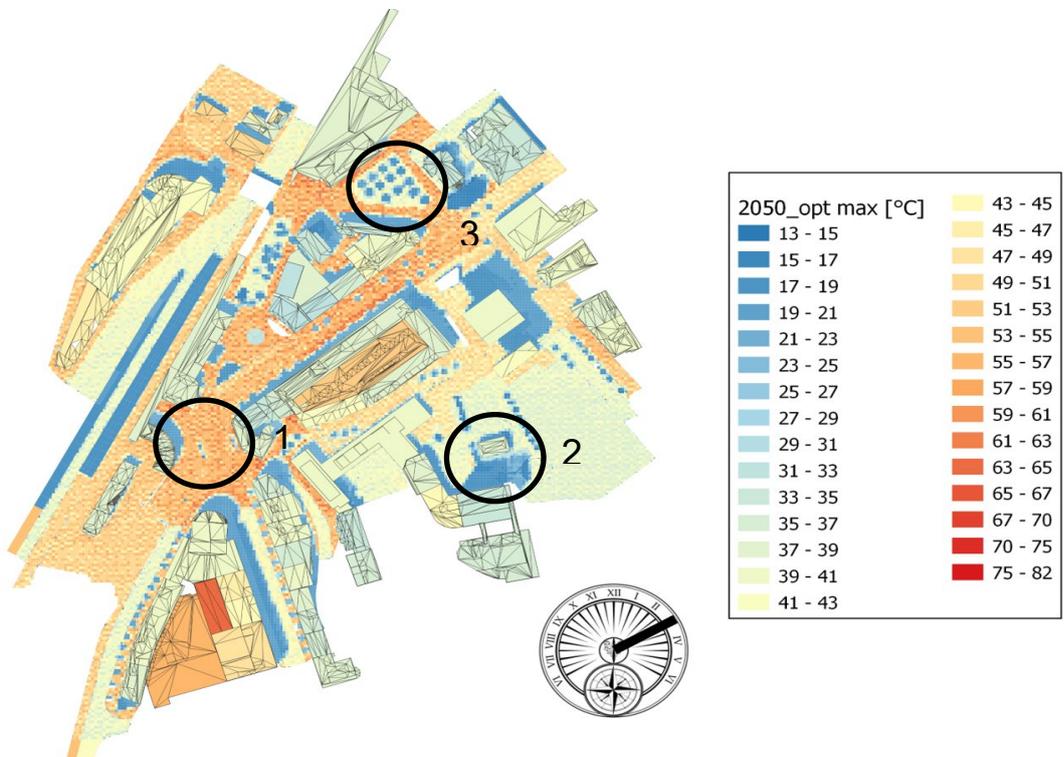


Figure 25: Heure la plus chaude pour le scénario requalifié et optimisé 2050

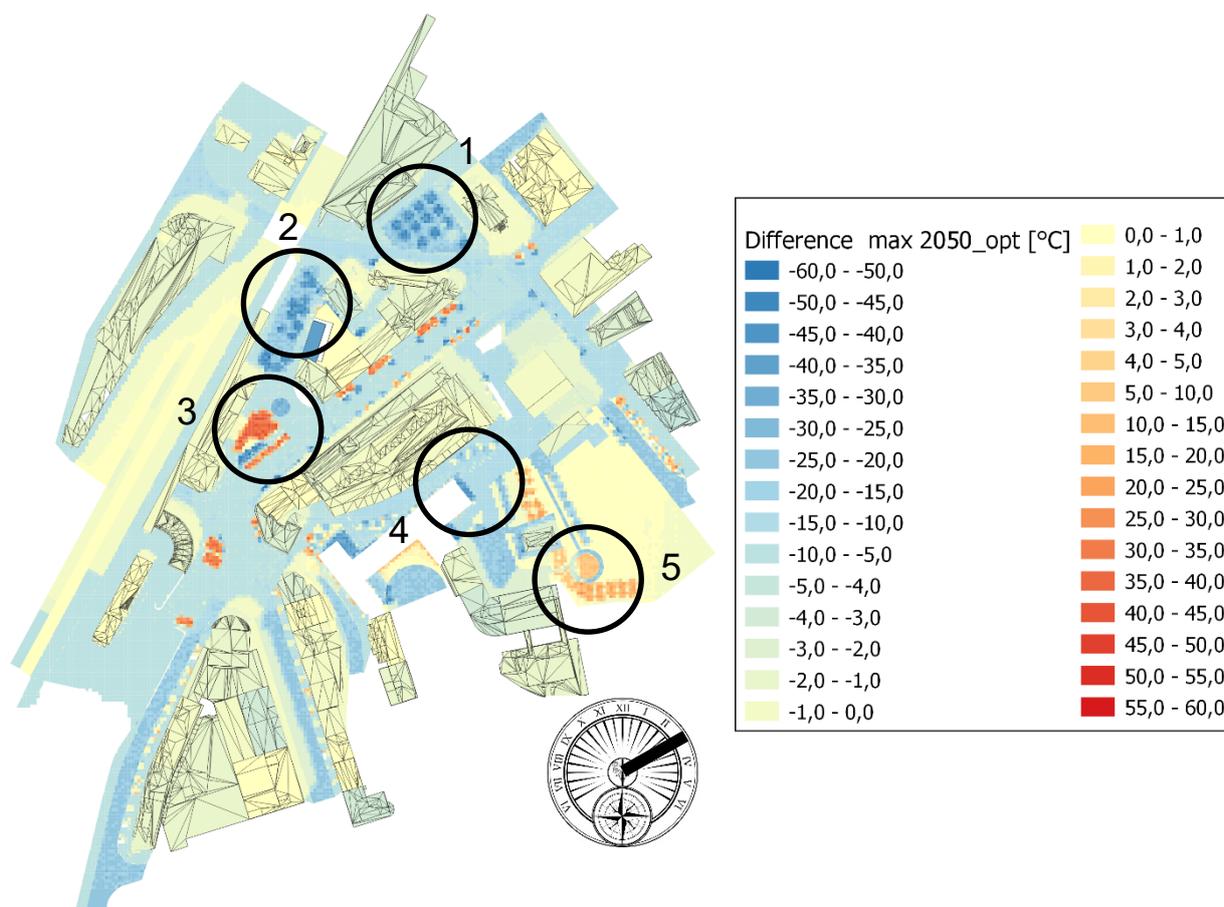


Figure 26: Différence de température de surface entre la requalification-optimisation et le quartier actuel en 2050

La température moyenne annuelle pondérée par surface est pour ce scénario de 13.5°C. Il est tout-à-fait intéressant de constater que cette température est identique à celle du scénario de référence 2017. En d'autres termes, l'optimisation de l'albédo et de la végétalisation (arborisation) dans le quartier de la Gare permet de neutraliser les effets du changement climatique jusqu'à 2050. De plus, la température moyenne à l'heure la plus chaude est inférieure de 1.1°C. Plus en détails :

- Sur la zone 1, le passage d'un albédo de 0.25 à 0.57 permet sur l'année 2050 une réduction des températures de surface de l'ordre de 3 à 5°C (Figure 28). Cet effet est encore plus marqué aux heures les plus chaudes.
- Sur l'ensemble des routes du quartier de la Gare pour lesquelles l'albédo a été modifié, les effets en termes de réduction des températures de surface aux heures les plus chaudes sont très importants, de l'ordre de 20 à 30°C. Ces sols constituant par ailleurs des endroits qui ne pourront pas être végétalisés ou difficilement ombragés, le choix des couleurs apparaît dès lors comme une mesure de mitigation intéressante.
- Les effets des nouvelles arborisations sont visibles, zone 2 par exemple, mais sur une échelle spatiale plus localisée autour des arbres.

La conclusion est que le choix de la couleur des surfaces (albédo) permet de réduire les extrêmes surtout durant l'été et également de partiellement compenser les effets du changement climatique en matière d'augmentation des températures et d'ICU.

4.2.5 Scénario végétalisé du quartier de la gare 2050

Ce scénario a été simulé dans le but d'évaluer le potentiel de la végétalisation généralisée des toits dans le contexte de changement climatique. Ainsi, pour voir dans quelle mesure la végétalisation peut en partie compenser la hausse des températures, nous avons simulé le quartier de la gare en 2050 sous l'hypothèse de travail que tous les toits ont pu être végétalisés et nous l'avons comparé aux températures de surface du quartier du quartier actuel projeté en 2050. Les cartographies ci-dessous présentent les différences de températures pondérées par la surface et moyennée sur l'année de même qu'à l'heure la plus chaude.

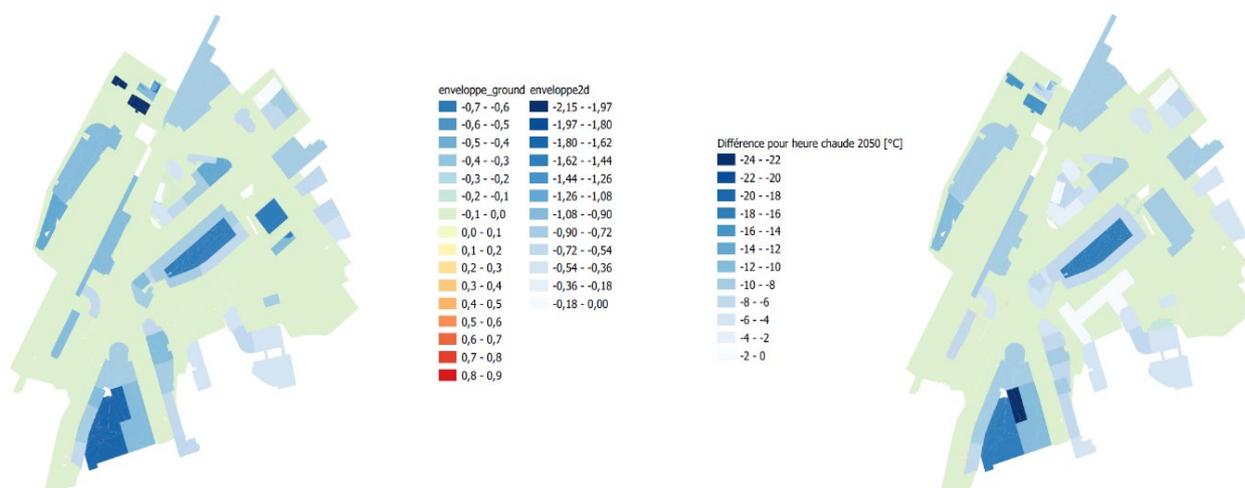


Figure 27 : Différences de températures entre le scénario végétalisé et actuel projetés en 2050. À gauche, la moyenne annuelle et à droite à l'heure la plus chaude de l'année.

Nous constatons que les différences de températures sont dans les deux cas négatives sur l'ensemble de la zone, ce qui signifie que les effets moyens et extrêmes du changement climatique peuvent être complètement compensés et même au-delà.

Scenario	Températures moyennes pondérées selon l'aire des surfaces [°C]							
	annuelle				à l'heure chaude			
	min	max	moyenne	différence	min	max	moyenne	différence
2017	7.9	33.4	13.5	-	13.3	89.3	40.4	-
2050	8.6	34.4	14.2	+ 0.7	13.5	91.0	41.2	+ 0.8
2050 végétalisé	8.2	31.1	13.2	- 0.3	13.5	84.0	33.6	- 6.8

Tableau 11 : Températures moyennes du scénario végétalisé 2050 comparées à 2017 et 2050

4.2.6 Résumé des résultats

Le tableaux ci-dessus reprend tous les résultats des cinq scénarios simulés au quartier de la Gare. Les conclusions en matière d'aménagement urbain sont synthétisés sous formes de lignes directrices au paragraphe 4.3.

Températures moyennes pondérées selon l'aire des surfaces [°C]								
Scenario	annuelle				à l'heure chaude			
	min	max	moyenne	différence	min	max	moyenne	différence
2017	7.9	33.4	13.5	0.0	13.3	89.3	40.4	0.0
2050	8.6	34.4	14.2	+ 0.7	13.5	91.0	41.2	+ 0.8
2050_req	8.6	34.4	14.1	+ 0.6	13.5	91.0	41.0	+ 0.6
2050_opt	8.5	33.1	13.5	0.0	13.5	91.7	39.3	- 1.1
2050 végétalisé	8.2	31.1	13.2	- 0.3	13.5	84.0	33.6	- 6.8

Tableau 12 : Résumé des résultats pour les cinq scénarios simulés au quartier de la Gare

4.3 Lignes directrices en matière d'urbanisme

Après l'examen détaillé des résultats de simulations, il apparaît que les éléments d'aménagement urbains qui peuvent jouer un rôle différencié en matière d'adaptation au changement climatique en milieu urbain et d'ICU sont la couleur des surfaces (albédo), l'ombrage de manière générale et en particulier en lien avec l'arborisation, la végétalisation des surfaces et les plans d'eau. Il apparaît également que les facteurs déterminants qui permettent à ces mesures de déployer pleinement leur potentiel en matière de mitigation des ICU sont d'une part l'intensité de mesure et d'autre part la combinaison de deux ou plus de ces mesures entre elles. L'intensité des mesures peut être comprise en termes d'étendue spatiale pour la végétalisation et l'ombrage ou en termes de valeur de l'albédo. Le tableau ci-dessous (Tableau 13) apporte une appréciation globale quant au potentiel de mitigation de ces mesures.

Intensité des mesures								Types de mesures
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
Forte	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	
Modérée	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
Faible	1	2	3	1+2	1+3	2+3	1+2+3	

Tableau 13 : Tableau synthétique des mesures de mitigation

Sur l'axe horizontal sont représentées les mesures ainsi que leurs combinaisons possibles, sur l'axe vertical, l'intensité de la mesure déployée. Le chiffre 1 correspond à des mesures visant à augmenter l'albédo des surfaces, le 2 la part d'ombrage (arborisation) et le 3 la végétalisation. Ci-dessous, nous donnons quelques exemples à partir desquels cette synthèse est établie.

- A1, B1, C1 : Figure 28, des modifications d'albédo provoquent un effet visible, mais limité si de telles mesures sont prises isolément. La différence est nette entre Pérolles qui bénéficie davantage d'ombre que l'Avenue de la Gare, ceci pour le même type de revêtement.
- A2, B2 : Figure 27, aux heures les plus chaudes, nous constatons que l'ombre portée des bâtiments réduit significativement les températures de surface, comme par exemple sur l'avenue de Tivoli à l'ombre du théâtre Équilibre. Cependant, l'effet est moindre que si la mesure est combinée avec de la végétalisation des sols et changements de réflectance.
- A3 : Tableau 12, la végétalisation massive du quartier de la Gare est en mesure d'aborder complètement l'augmentation des températures du changement climatique.
- A4, B4, C4 : Figure 28, si les surfaces sont ombragées, le changement d'albédo n'apporte qu'un effet limité.
- A5, B5, C5 : Figure 28, si la végétalisation (arborisation) est bien développée, le changement d'albédo des surfaces résiduelles n'apporte pas d'amélioration significative.
- A6, B6 et C6 : Figure 29, le scénario végétalisé (sans changement d'albédo) montre que l'augmentation de la part d'ombrage et la végétalisation importante, même localisée, contribue significativement à la mitigation des ICU.
- A7, B7 et C7 : Figure 28, les zones 1 (place de la Gare) et 2 (place de la Poste) dans le scénario requalifié projeté en 2050 présentent un fort potentiel de mitigation des ICU. Ces zones combinent végétalisation, arborisation riche, et par conséquent de l'ombrage et des valeurs d'albédo intéressantes. De plus, même si les mesures ont une relativement faible extension spatiale, l'effet combiné reste très important.
- C2 : Figure 28, les arbres isolés simulés sur Pérolles et sans changement important de couleur et de nature des sols sont une mesure peu efficace en termes de réduction de températures et dont l'effet reste extrêmement localisé.

- B3-C3 : Figure 22, Grand-Places. Des surfaces peu densément végétalisées et dépourvues d'ombrage (arborisation) ont un effet faible sur les ICU. L'effet de la mesure augmente cependant avec la taille de la surface végétalisée.

Par ordre de priorité, il est ainsi possible d'émettre les lignes directrices suivantes :

- 1. L'aménagement urbain sous l'angle des ICU doit être développé en termes de combinaison et de réseau des mesures.** En effet, nos résultats montrent que ce sont avant tout l'intensité de la couverture spatiale (réseau) et la combinaison des mesures qui permettent de rafraîchir le climat urbain.
- 2. Les espaces verts existants ont un potentiel de mitigation important qui peut être encore développé.** Les exemples des Grands-Places ou de la place du Domino montrent que ces espaces présentent des températures légèrement inférieures aux moyennes. Cependant, la comparaison avec les zones arborisées ou bien ombragées indique que le climat de ces espaces verts centraux peut être optimisé en densifiant la végétation et en augmentant l'arborisation.
- 3. Les arbres sont à eux seuls une combinaison de toutes les mesures. La plantation d'arbre doit être, dans la mesure du possible, développée.** En effet, avec un albédo (0.15-0.20) légèrement supérieur ou égal à celui des revêtements, l'évapotranspiration, l'ombrage généré et les sols perméables nécessaires, les environnements arborisés cumulent toutes les mesures efficaces dans la mitigation des ICU. En revanche, nous constatons que l'effet d'arbres isolés et dont les racines sont prises dans des structures inertes étroites est relativement faible comparativement.
- 4. Les sols imperméabilisés accroissent l'effet d'ICU.** Combinés à une absence de végétalisation et d'ombrage, toutes les facteurs nécessaires à des ICU intenses sont réunis, comme le montrent les exemples de la place de la Gare et de la Planche-Supérieure. Dans la mesure du possible, il convient de mener une réflexion sur la nature et la couleur des sols prioritairement dans les zones où l'arborisation et la végétalisation ne sont pas possibles.
- 5. Les surfaces d'eau ont un effet régulateur sur le climat urbain,** comme le montrent nos résultats pour la Sarine, l'Étang du Jura ou encore la fontaine de Tinguely. Il est à noter qu'en ville de Fribourg, l'utilisation de surfaces d'eau, notamment dans les parcs ou espaces publics, est une mesure très peu développée, voir totalement absente.

5. Conclusions

Les simulations à l'échelle de la ville ont montré que la ville de Fribourg se réchauffe en moyenne à un rythme deux fois supérieur (+0.2°C par décennie) au rythme moyen à l'échelle de la planète (+0.1°C par décennie). De plus, Les simulations à l'échelle de la ville ont mis en évidence que les zones favorables au ICU se réchauffent à un rythme plus rapide encore (+0.3°C par décennie par exemple à la Planche Supérieure). Par conséquent, il importe dans la mesure du possible de prendre des mesures de mitigation adéquates dans les zones que nos cartographies indiquent comme étant favorables au développement d'ICU particulièrement marqués (Place de la Gare, Planche-Supérieure, Place du Petit St-Jean, bordures de route...). Une analyse plus détaillée sur le quartier de la Gare a permis d'identifier et de caractériser les mesures de mitigation des ICU. Nous relevons que pour déployer des effets significatifs, ces mesures doivent être développées en réseau et en combinaison. En effet, dans des environnements urbains densément construits et minéralisés, la mise en place de mesures localisés ne permet pas de remédier de manière efficace aux ICU.

6. Bibliographie

Empa. (2017). Des «îlots de chaleur» dans les villes. *News Portal*.

Francisco Estrada, W. J. (2017). A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nature Climate Change*, 403.

National Center for Climate Services. (2018). Scénarios climatiques pour la Suisse. 11.

OFEV. (2018). Quand la ville surchauffe. 11.

(2018). *Programme pilote « Adaptation aux changements climatiques »* . Consulté le octobre 25, 2020, sur <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/adaptation-aux-changements-climatiques.html>

W. Seidinger, M. Ménard (2006), SIA 2024 - Condition d'utilisation standard pour l'énergie et les installations des bâtiments, SIA Zürich.