



**HAL**  
open science

## La ville sur les toits : analyse et recherche sur le potentiel des espaces en hauteur disponibles

Barbara Tolino

### ► To cite this version:

Barbara Tolino. La ville sur les toits : analyse et recherche sur le potentiel des espaces en hauteur disponibles. Architecture, aménagement de l'espace. 2019. dumas-02329852

**HAL Id: dumas-02329852**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02329852>**

Submitted on 23 Oct 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**MASTER VILLE ET ENVIRONNEMENTS URBAINS**

**SPÉCIALITÉ ARCHITECTURE, AMBIANCES, URBANITÉS**

**Année 2018/2019**

**Thèse de Master VEU**

**Diplôme cohabilité :**

**École Centrale de Nantes**

**École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes**

Présentée et soutenue par :

Barbara TOLINO

le : 2 Septembre 2019

à 10h à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

**“LA VILLE SUR LES TOITS. ANALYSE ET RECHERCHE SUR LE POTENTIEL  
DES ESPACES EN HAUTEUR DISPONIBLES.”**

**JURY**

Président : Céline DROZD

Ingénieur de Recherche ENSA Nantes. CRENAU

Examineurs : Thomas LEDUC  
Vincent Tourre

Ingénieur de Recherche CNRS. CRENAU  
M.C. ENSA Nantes. CRENAU

Directeur de mémoire : Pascal JOANNE M.C. ENSA Nantes. CRENAU

Agence : Office Zola Architectes



# REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma gratitude.

Je voudrais dans un premier temps remercier Thomas Leduc, pour son intérêt au sujet, sa patience, sa disponibilité, ses conseils et surtout pour m'avoir aidé avec les scripts Python en QGIS.

Je désire aussi remercier Nantes Métropole qui m'a fourni la base de données (BT Topo) de la ville de Nantes et en générale pour l'intérêt porté vers mon sujet.

Je tiens à remercier spécialement Édouard Guyard et Laure Gahéry de l'agence « Office Zola » qui m'ont fait découvrir le sujet et m'ont offert l'opportunité de faire ma première expérience dans un cabinet d'architecture en France.

Un grand merci à Pascal Joanne pour m'avoir dirigée et encouragée pendant tout le parcours du Master et pour m'avoir transmis des bases pour la méthodologie de recherche.

Enfin, je remercie toutes les personnes que pendant ce master m'ont aidée et soutenue : Auline Rodler, Sebastien Comas, Domenico Borzacchiello e José Aguado.



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

## MOTS CLES

Réaménagement des toits, Toit végétalisée, Système d'information géographique, La ville sur les toits, Forme urbaine, Analyse multicritères, Développement urbain

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# RESUME

Ce travail vise à la mise en place d'une démarche d'analyse quantitative du potentiel de réaménagement des toitures terrasses non utilisées, afin de prévoir l'installation de toits végétalisés.

Une analyse multicritère a été effectuée sur une partie de la ville de Nantes à partir de bases de données vectorielles BD Topo 2D et d'images satellitaires 3D. En prenant en compte l'ensemble des critères de compatibilité entre la programmation envisagée et les indicateurs de la forme urbaine, ces derniers ont été traduits en exigences et bénéfices potentiellement apportés par les toits verts. L'objectif est de fournir des outils de prise de décision informée pour la planification urbaine et le développement durable.

Les indicateurs pris en compte par cette analyse sont présentés sous forme de cartographies augmentées montrant leur distribution spatiale dans la zone étudiée. Un bilan sur les résultats obtenus a permis de quantifier la surface disponible sur les toits de Nantes ayant un potentiel d'installation pour une couverture végétale.

# ABSTRACT

## **The city on the roofs. Analysis of the potential of urban spaces on rooftops.**

**Keywords :** Rooftop retrofitting potential, Green roof, Geographic information systems, The city on the roofs, Urban Shape, Multicriteria analysis, Urban development

This work aims at defining a procedure for the quantitative analysis of the retrofitting potential of the unused rooftops in the city, in order to convert them into green roofs.

A multicriteria analysis has been carried out over the historical centre of the city of Nantes using 2D vectorial data and 3D satellite images. By considering the relations between the roof functionality and the urban shape indicators, these have been translated into benefits and requirements for the green roofs. The goal is to develop new tools for informed decision-making in urban planning and sustainable development.

The urban shape indicators considered in this work are presented through augmented cartography showing the distributions in space of the analysed indicators over the chosen region. The results that were obtained helped to quantify the available surface over the rooftops and to identify the ones with high retrofitting potential for the green roof installation.

# SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| Remerciements.....   | i         |
| Mots clés.....   | iii       |
| Résumé.....  | iv        |
| Abstract.....  | v         |
| Sommaire.....  | vi        |
| Liste des figures.....   | viii      |
| Liste des tableaux.....  | x         |
| Liste des abréviations.....  | xi        |
| <b>Introduction et plan du mémoire.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre 1 : Contexte.....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1 La ville actuelle et ses problématiques.....   | 3         |
| 1.2 L'évolution de la cinquième façade.....  | 4         |
| 1.3 Réaménager les toits : État de l'art.....  | 7         |
| 1.4 Problématique et hypothèses.....   | 11        |
| <b>Chapitre 2 : Usages multiples des toits.....</b>  | <b>13</b> |
| 2.1 Classification en trois types.....   | 13        |
| 2.2 Toit énergétique.....  | 13        |
| 2.3 Toit habité.....   | 16        |
| 2.4 Toit vert.....   | 18        |
| <b>Chapitre 3 : Méthodologie et données pour l'évaluation du potentiel de réaménagement des toits végétalisés.....</b> | <b>23</b> |
| 3.1 Choix du site.....   | 23        |
| 3.2 Identification des toits plats.....  | 25        |
| 3.3 Mise en données sur QGIS et T4QS.....  | 25        |
| 3.4 Définition des bénéfices des toits verts.....  | 27        |
| 3.5 Définition des exigences des toits verts.....  | 33        |
| 3.6 Indicateurs identifiés et analysés.....  | 36        |
| 3.6.1 Exposition au soleil.....  | 36        |
| 3.6.2 Efficacité thermique.....  | 38        |
| 3.6.3 Réduction de l'îlot de chaleur.....  | 41        |
| 3.6.4 Surface vert visible.....  | 43        |
| 3.8 Schéma récapitulatif pour le calcul du potentiel.....  | 49        |
| <b>Chapitre 4 : Résultats et discussion.....</b>   | <b>50</b> |
| 4.1 Cartographie des toits plats.....  | 50        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2 Classification des toits par types.....                             | 51        |
| 4.3 Classification des toits par surfaces.....                          | 52        |
| 4.4 Classification des toits par hauteur .....                          | 53        |
| 4.5 Classification des bâtiments par programmation .....                | 54        |
| 4.6 Classification des toits par “Sky View Factor” .....                | 55        |
| 4.7 Classification des toits par “Roof to Envelope Ratio” .....         | 56        |
| 4.8 Classification des toits par “Green Roof Coverage Fraction”.....    | 57        |
| 4.9 Classification des toits par “Roof Available Area” .....            | 58        |
| 4.10 Classification des toits par “Sun ratio” .....                     | 59        |
| 4.11 Classification des toits par “Efficacité thermique” .....          | 60        |
| 4.12 Classification des toits par “Réduction de l’Îlot de Chaleur”..... | 61        |
| 4.13 Classification des toits par “Surface Vert Visible” .....          | 62        |
| 4.14 Cartographie du potentiel de toits végétalisés .....               | 63        |
| <b>Chapitre 5 : Conclusions et perspectives .....</b>                   | <b>64</b> |
| <b>Références.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>Références web.....</b>  | <b>72</b> |
| <b>Annexes .....</b>  | <b>75</b> |

# LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Îlot de chaleur. Rappèrent la différence de température systématique entre l'air atmosphérique des villes et celui des zones rurales ou périphériques suburbaines moins densifiées. Source : Groupe Descartes.....                          | 3  |
| Figure 2 : Évolution du changement climatique entre le 1884 et 2018.....   | 4  |
| Figure 3 : Casino Theatre de Rudolph Aronson. ....   | 5  |
| Figure 4 : L'unité d'habitation de Marseille, Le Corbusier. ....   | 6  |
| Figure 5 : Les trois images montrent : (i) la surface disponible pour le toit solaire, (ii) le potentiel de panneaux photovoltaïques et (iii) le pourcentage de la surface disponible sur le toit qui serait nécessaire pour le scénario de 2030. .... | 14 |
| Figure 6 : Installation de panneaux solaires et panneaux photovoltaïques sur un réservoir d'eau potable à l'Haÿ-les-Roses (Val-de-Marne).....  | 15 |
| Figure 7 : Vue aérienne de l'installation des panneaux solaires sur un des parkings du Zénith de Nantes. ....  | 15 |
| Figure 8 : 3BOX, de Stéphane Malka Architecture. Projet d'architecture parasite à Paris. ....  | 16 |
| Figure 9 : Dans l'immeuble Allure, les agences Fresh Architectures et Itar Architectures, réalisent une terrasse commune pour les habitante du bâtiment. ....  | 17 |
| Figure 10 : Park 'n' Play, JAJA Architects, Copenhague, Danemark.....  | 17 |
| Figure 11 : Les toits de Rotterdam pendant le festival « Rotterdam Rooftop Days ».....   | 18 |
| Figure 12 : Différents couches d'un toit végétalisé. La différence entre les trois types est dans l'épaisseur des couches. Source : CSTC.....  | 20 |
| Figure 13 : Serre à tomates sur le toit d'un immeuble de la rue Sorbier dans le 20 <sup>e</sup> .....  | 21 |
| Figure 14 : Ferme aquaponique realise par Urban Fermes. Elle est implanté dans la zone industriel de Bâle en Suisse. Elle a une capacité de production de 5 tonnes de végétaux et 800 kg de poisson. ....  | 22 |
| Figure 15 : Plan de Nantes 1914. ....  | 23 |
| Figure 16 : Bâtiments è toitures plates de la ville de Paris. Source : Apur. ....  | 24 |
| Figure 17 : Zone d'intérêt, Nantes, France. ....   | 24 |
| Figure 18 : Méthodologie appliquée pour l'identification des toits plats. Les toits sont identifiés sur Google Earth et enregistrés sur la BD TOPO 2017 de la ville de Nantes avec QGIS. ....  | 25 |
| Figure 19 : Interface graphique du logiciel QGIS.....  | 26 |
| Figure 20 : Table d'attributs du logiciel QGIS. ....   | 26 |
| Figure 21 : Consile Python en QGIS. ....   | 27 |
| Figure 22 : Classification des avantages pour différents secteurs. ....  | 33 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 23 : Pourcentage d'économie d'énergie en fonction de la RER et du nombre nombre d'étages dans le bâtiment. Source : Martens et al. (2008) .....  | 39 |
| Figure 24 : L'économie d'énergie de deux bâtiments ayant la même surface de toit diminuent avec l'augmentation de la hauteur .....  | 39 |
| Figure 25 : Ajustement de surface sur les données de Martens et al. (2008), afin d'obtenir une expression analytique pour l'efficacité thermique en fonction de de la RER et de la hauteur du bâtiment. ....                              | 40 |
| Figure 26 : Les deux figures illustrent le concept de densité de toits verts. À gauche, une zone à forte densité de végétation sur les toits. À droite, une zone de faible densité de toits verts. ....                                   | 41 |
| Figure 27 : L'indicateur $h / w$ est défini comme le rapport entre la hauteur $h$ et la largeur $w$ de la rue canyon.....   | 42 |
| Figure 28 : Les deux figures illustrent le concept de RAA. À gauche, le RAA est nettement inférieur à la surface totale du toit. À droite, la différence entre la RAA e la surface totale du toit est négligeable. ....                   | 44 |
| Figure 29 : Méthode de calcul pour le facteur de vue du ciel proposée par Bernard et al., 2018. ....  | 44 |
| Figure 30 : La figure illustre le concept de SVV. La surface du toit du bâtiment B, bien qu'elle soit supérieure à celle du bâtiment A, n'a aucun impact sur le paysage car elle n'est pas visible depuis les bâtiments environnants..... | 45 |
| Figure 31 : Le diagramme montre la procédure effectuée pour définir le potentiel des toits. ....  | 49 |
| Figure 32 : La cartographie indique le pourcentage de toits plats dans la zone d'étude. ....  | 50 |
| Figure 33 : Cartographie des toits plats divisé par : toits avec équipements techniques, toits déjà végétalisés et toits libres. ....   | 51 |
| Figure 34 : Cartographie des toits plats divisé par extension de surfaces. ....   | 52 |
| Figure 35 : Cartographie des toits plats par hauteur. ....  | 53 |
| Figure 36 : Cartographie des toits plats par programmation des batiments. ....  | 54 |
| Figure 37 : Cartographie de l'indicateur "Sky View Factor" .....  | 55 |
| Figure 38 : Cartographie de l'indicateur "Roof to Envelope Ratio" .....   | 56 |
| Figure 39 : Cartographie de l'indicateur "Green Roof Coverage Fraction" .....   | 57 |
| Figure 40 : Cartographie de l'indicateur "Roof Available Area" .....  | 58 |
| Figure 41 : Cartographie de l'indicateur "Sun ratio" .....  | 59 |
| Figure 42 : Cartographie de l'indicateur "Efficacité Thermique" .....   | 60 |
| Figure 43 : Cartographie de l'indicateur "Reduction de l'Îlot de Chaleur". ....   | 61 |
| Figure 44 : Cartographie de l'indicateur "Surface Vert Visible" .....   | 62 |
| Figure 45 : Potentiel de végétalisation des toits dans la zone d'intérêt. ....  | 63 |



# LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Table 1 : Le tableau montre les valeurs de normalisation des 3 indicateurs relatifs aux bénéfiques et leurs coefficients de priorité. .... | 47 |
| Table 2 : Le tableau montre les valeurs de normalisation de "Sun Ratio". ....  | 48 |
| Table 3 : Le tableau montre les valeurs de normalisation du potentiel des toits verts. ....  | 48 |

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# LISTE DES ABREVIATIONS

**ALUR** : Accès au Logement et un Urbanisme Rénové

**ET** : Efficacité Thermique

**GIS** : Geographic Information System

**GRCF** : Green Roof Coverage Fraction

**ICU** : Îlot de Chaleur Urbain

**LiDAR** : Light Detection and Ranging

**LTM** : Les Toits du Monde

**MNS** : Modèles Numériques de Surface

**MNT** : Modèles Numériques de Terrain

**QGIS** : Quantum GIS

**RAA** : Roof Available Area

**RER** : Roof to Envelope Ratio

**RICU** : Réduction de l'Îlot de Chaleur

**SUN** : Sun Ratio

**SVF** : Sky View Factor (facteur de vue du ciel)

**SVV** : Surface Vert Visible

**T4QG** : Tools 4 QGis

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



## Introduction et plan du mémoire

Ce mémoire part d'une interrogation sur le potentiel des toits plats de la ville de Nantes et sur leurs capacités de donner de nouvelles surfaces dans un contexte urbain dense. Les toits des bâtiments constituent une composante très importante du paysage de la ville et avec les siècles, les techniques de construction ainsi que les fonctions des toits ont fortement évoluées.

“Les toits constituent l'Eldorado des villes, regorgeant de ce qui manque aux citadins : du calme, de l'air, de l'espace, un horizon, des vues.” (*Darmon, 2019*).

En tant que point de rencontre entre le cadre bâti et le ciel, entre l'artificiel et le naturel, les toits de la ville peuvent avoir une multitude de programmations possibles. Ils peuvent accueillir de nouvelles habitations, des aires de jeux, de loisir ou de sport, des jardins potagers ou des serres urbaines, des commerces ou des points de restauration, ou bien des centrales photovoltaïques ou éoliennes. Les bénéfices de ces solutions ne se limitent pas exclusivement aux propriétaires, car les toits peuvent également offrir des espaces publics inédits pour la ville, pour augmenter l'attractivité du quartier où ils sont implantés.

Si d'une part les toits se présentent comme des « sites candidats » à fort potentiel d'aménagements pour le développement durable des villes, de l'autre ils sont aussi souvent les endroits de la ville les moins exploités. Traditionnellement, la « cinquième façade » présente un niveau de détail et de complexité architecturale nettement inférieur par rapport aux quatre autres. Les toits restent à présent des éléments « non résolus » de l'environnement urbain.

Face à la nécessité de développer de nouveaux outils d'analyse des toits à l'échelle de la ville, l'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est la mise en place d'une démarche d'analyse quantitative du potentiel de réaménagement des toitures terrasses à partir de bases de données cartographiques. L'analyse prend en compte l'ensemble des critères de cohérence et compatibilité entre la programmation envisagée pour le toit et les indicateurs de la forme urbaine ainsi que les bénéfices potentiellement apportés. La méthode proposée est un premier pas vers la création d'un outil d'analyse automatique ou semi-automatique permettant de définir des cadres d'action pour la programmation urbaine et évaluer des hypothèses d'intervention. La méthode est appliquée pour l'analyse du potentiel de réaménagement des toitures terrasses en toitures végétales sur une partie de la ville de Nantes.

Ce mémoire contient cinq chapitres :

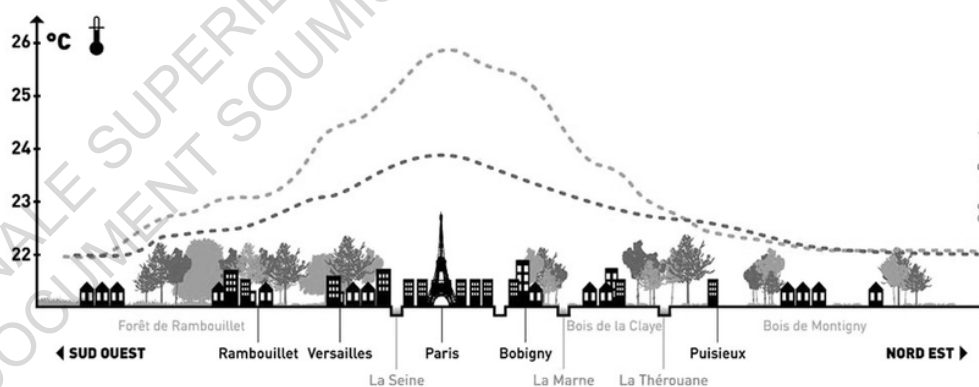
1. Le chapitre 1 analyse les problématiques liées à la densification de la ville contemporaine et des solutions offertes par le développement vertical de la ville sur les toits.
2. Le chapitre 2 propose une classification des toits selon leur programmation en toit « vert », toit « énergétique » et toit « habité ».
3. Le chapitre 3 décrit la méthodologie proposée pour l'analyse des toits végétaux dans la ville de Nantes.
4. Le chapitre 4 est dédié à la présentation et la discussion des résultats obtenus.
5. Le chapitre 5 présente les conclusions de ce travail et offre des perspectives sur quelques pistes de recherche future qui resteraient à explorer en continuité avec la démarche sur le potentiel des toits proposée dans ce mémoire.

# Chapitre 1 : Contexte

## 1.1 La ville actuelle et ses problématiques

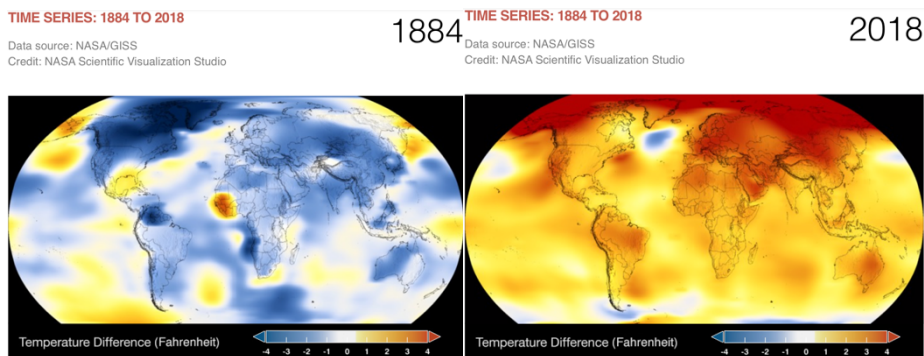
Aujourd'hui nous vivons dans des villes de plus en plus denses et urbanisées, où les bâtiments prennent souvent le dessus sur des espaces verts et naturels. Avec l'incrément constant de la population, les centres urbains connaissent une croissance continue et, par conséquent, une consommation plus importante à la fois de ressources et d'énergie. En 2050, deux tiers de la population mondiale vivront dans les villes, ce qui signifie que le pourcentage d'urbanisation augmentera de 68 % avec la prolifération de mégalo-poles (*ONU World Urbanization Prospects, 2018*).

D'autre part, la densification des villes est aussi considérée comme l'un des facteurs principaux du changement climatique. Dans les centres urbains les plus denses, le niveau de température est plus élevé en raison d'une plus forte concentration des infrastructures et des établissements par rapport aux zones rurales. C'est pourquoi nous parlons d'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène correspond à l'augmentation des températures maximales diurnes et nocturnes de l'air et des surfaces en milieu urbain (*ADEME, 2014*).



**Figure 1 :** L'îlot de chaleur urbain se manifeste avec une différence de température systématique entre l'air atmosphérique des villes et celui des zones rurales ou périphériques suburbaines moins densifiées. Source : Groupe Descartes

L'augmentation des températures dans les microclimats urbains est une réalité alarmante à laquelle les grandes villes tentent de remédier (*NASA, 2018*).



**Figure 2 :** Évolution du changement climatique entre le 1884 et 2018  
Source : NASA

Pour *Colombert (2008)*, les facteurs urbains ont un rôle important sur l'augmentation du phénomène d'îlot de chaleur. La couche superficielle du sol, avec plus ou moins de végétation ou d'eau, les activités humaines, mais aussi le cadre bâti et donc la forme urbaine, la hauteur et la largeur des bâtiments, les matériaux de construction et la largeur des rues ont un fort impact sur le climat de la ville.

La forme urbaine devient donc un sujet d'analyse, afin de développer des villes durables d'un point de vue environnemental, économique et social. Il est donc nécessaire d'explorer des idées innovantes, en encourageant aussi des changements dans les modes de vie des habitants.

Dans les cas où le tissu urbain est déjà saturé, les nouvelles constructions ne représentent que le 1 ou 2 % des bâtiments présents dans la ville (*Hills J. 2011*). Dans ce cadre, les bâtiments existants, en particulier leurs toits, offrent un paysage inhabité et souvent non résolu, capable de devenir « le fondement d'une nouvelle couche » (*Melet et Vreedenburgh, 2005*) en tant que plateformes surélevées capables d'accueillir de nouvelles opportunités s'intégrant parfaitement au tissu urbain existant. Le développement d'une « ville sur les toits » représente peut-être une des réponses les plus prometteuses aux problématiques de la ville d'aujourd'hui telles que la densification, la surpopulation, le réchauffement microclimatique, mais également pour la pollution et l'approvisionnement de ressources énergétiques et agroalimentaires. Pour ces raisons, l'étude du potentiel de réaménagement des toits et le développement de solutions techniques innovantes deviennent des enjeux majeurs pour la ville de demain.

## 1.2 L'évolution de la cinquième façade

Par définition, le toit est « la surface ou couverture couvrant la partie supérieure d'un édifice, permettant principalement de protéger son intérieur contre les intempéries et l'humidité ». Mais l'image que nous avons des toits a beaucoup évolué pendant le

siècle surtout avec la naissance des toitures terrasses. Ces espaces situés au-dessus de la ville permettent de s'éloigner du bruit et des odeurs de la ville (*Melet & Vreedenburgh, 2005*) et de profiter du calme, de la vue et de l'horizon. Cette façon de « vivre sur les toits » n'en a pas toujours été ainsi.

Par exemple, en Amérique, au XIXe siècle, le toit change rapidement sa fonction. Alors qu'il était habité exclusivement par les serviteurs, loin des propriétaires de l'immeuble, le toit devient progressivement un espace de luxe, décoré, l'endroit idéal pour montrer le statut social de ses résidents (*Busch, 1991*). C'est également à cette époque que les toits remplissent une autre fonction : ils deviennent des salles de théâtre afin d'attirer le public pendant la période estivale. Avec la technologie de l'ascenseur, qui permet la construction d'immeubles de plus de dix étages, les architectes commencent à réaliser des toits jardin pouvant accueillir des bars et des restaurants sur les toits des grands hôtels.



**Figure 3** : Casino Theatre de Rudolph Aronson.

En France, en revanche, à la fin du XIXe siècle, sous l'impulsion du mouvement hygiéniste, le toit se transforme en solarium. En fait, selon les hygiénistes, s'exposer à l'air et à la lumière était nécessaire pour combattre les épidémies qui envahissaient la Nation. Au début du XX siècle, l'essor du béton armé, fait développer ultérieurement le toit habité et sur les équipements publics et sur les bâtiments privés. L'idée d'utiliser le toit comme un jardin, où pouvoir profiter du bon air, caractérise les immeubles de la première décennie du XX siècle (*Darmon, 2018*).



Pendant les années qui suivent, les architectes modernes font du toit-terrasse un élément clé de leurs projets. En particulier, Le Corbusier propose déjà en 1923 l'idée de maximiser le potentiel du toit dans les cinq points de l'architecture moderne. L'idée du jardin suspendu était un principe fondamental dans ses projets. Le concept était basé sur l'idée que le jardin sur le toit devait restituer à la nature la surface du rez-de-chaussée couverte par la maison (*Le Corbusier, 1923*), donnant au toit quelque chose de plus que sa fonction primitive d'abri. Le Corbusier explique que les toits peuvent accueillir des jardins et donc promouvoir des activités favorisant les interactions sociales. L'unité d'habitation de Marseille montre le programme le plus complet de cette époque jamais réalisé sur un toit : une crèche, une surface de jeux, un gymnase, un solarium, un podium pour les représentations de théâtre, une piste de course et un bar (*Le Corbusier, 1965*).



**Figure 4** : L'unité d'habitation de Marseille, Le Corbusier.

Après les guerres, avec l'urgence de reconstruire de nouveaux logements à faible coût, le toit-terrasse change d'utilisation. Les toits plats en béton armé commencent à accueillir les équipements techniques du bâtiment. Ils sont passés d'être des lieux habités à des espaces inaccessibles sauf que pour la maintenance des installations.

Entre 1960 et 1970, le concept d'hybridation de la propriété collective et de la maison individuelle réactive la conception du toit habité. L'idée des « grands ensembles » est lancée par Olivier Guicharde, ministre de l'Équipement, du Logement et des Transports, dans le but de lutter contre la ségrégation sociale par l'habitat (*Darmon, 2018*).

Avec la prise de conscience écologique (conférences de l'ONU 1972-1992), il y a une vraie révolution, avec un impact assez conséquent sur l'industrie du bâtiment. Afin d'obtenir une réduction des gaz à effet serre, d'économiser sur les couts

énergétiques, de réaliser un développement durable et d'améliorer la qualité de vie, il faut agir et sur la performance thermique des constructions et sur la densification des villes. C'est dans ce contexte que le toit-terrasse devient une surface active des performances techniques et écologiques du bâtiment. Plusieurs recherches montrent que la végétalisation des toitures apporte de nombreux bénéfices comme l'efficacité thermique et acoustique, la réduction de pollution atmosphérique ou la rétention des eaux de ruissellement. Aujourd'hui, le toit devient un espace porteur de bénéfices sociaux et environnementaux.

### 1.3 Réaménager les toits : État de l'art

La forte croissance démographique dans les villes est le facteur le plus influent dans les plans de développement urbain. Face au manque d'espace urbanisable, de nouveaux concepts d'architecture et d'urbanisme durable émergent. Parmi ceux-ci, la notion de « symbiose » s'est de plus en plus affirmée au cours des dernières décennies. Selon *Šijaković et Perić (2018)*, la symbiose, par analogie avec la biologie, fait référence à toutes sortes de relations étroites entre deux symbiotes : le bâtiment d'origine et la nouvelle construction. La relation symbiotique peut être liée à la structure, aux matériaux, à la forme et à l'organisation spatiale et doit garantir un bénéfice au moins à l'un des deux symbiotes.

En fonction de la nature de la relation entre les deux symbiotes, trois types de symbiose peuvent être distingués : le commensalisme, le mutualisme et le parasitisme. Le commensalisme est défini comme une relation dans laquelle l'un des symbiotes bénéficie d'un avantage clair, tandis que l'autre ne reçoit ni d'avantages ni d'inconvénients. La symbiose est donc positive pour l'un et neutre pour l'autre. Dans ce cas, le bâtiment d'origine n'est pas modifié par le couplage effectué.

Le mutualisme est un type de symbiose où les deux structures, l'originale et la nouvelle bénéficient mutuellement de la relation. Dans ce cas, l'adaptation des deux symbiotes nécessite des transformations plus ou moins marquées dans les deux structures. Cela implique l'introduction de nouveaux éléments structurels ou de nouveaux matériaux dans le bâtiment d'origine sans modifier sa forme, sa taille et son agencement spatial.

Le principe de conception du parasitisme implique les relations dynamiques entre différentes entités architecturales. En termes structurels, le parasitisme implique l'introduction de nouveaux éléments structurels indépendants de l'ancienne structure et, dans certains cas, le remplacement complet. Le positionnement et les dimensions des nouveaux éléments structurels dépendent entièrement de la nouvelle intervention et ne suivent pas la logique structurelle du bâtiment existant. Les ajouts et les modifications apportées à la structure du bâtiment hôte sont réalisés dans des matériaux distincts de l'ancien et même contradictoires. Dans les villes soumises à une forte augmentation de densité, les toits des bâtiments existants sont

des sites idéaux pour l'expression des principes de conception basés sur la symbiose.

Le potentiel de développement architectural et urbain des toits a été abordé par de nombreux auteurs. *Medio (2012)*, montre qu'un grand nombre de bâtiments dans le monde ont des toits architecturalement non exploités ou « non résolus ». Dans ces cas, le niveau de résolution de la conception du toit est significativement inférieur par rapport à la façade. L'auteur remarque que le toit non résolu se manifeste presque toujours comme un toit plat. Lorsque la pente du toit augmente, sa complexité structurelle et sa résolution architecturale augmentent aussi. D'ailleurs, les toits plats deviennent une véritable opportunité dans la conception architecturale contemporaine. Le toit plat a en effet un fort potentiel d'expression architecturale et d'intégration dans la conception, en tant que point d'accès privilégié aux éléments du ciel, tels que la lumière du soleil, l'énergie solaire, la ventilation et la vue.

*Zamperini et Lucenti (2014)*, examinent les aspects socio-économiques, les conditions culturelles et les aspects technologiques liés à l'architecture sur les toits des bâtiments existants en tant que solution à l'augmentation de la densité dans les zones résidentielles. En particulier pour les bâtiments de construction ancienne, la nécessité d'interventions de restauration offre la possibilité de mettre en place de nouvelles structures sur les toits, afin de réduire l'occupation irréversible du sol et de résoudre le conflit entre la préservation du patrimoine historique et le développement horizontal de la ville, afin de soutenir les processus de régénération et de densification de la ville. En fait, plusieurs cas internationaux montrent la possibilité d'interpréter le réaménagement d'immeubles comme une opportunité de lancer des actions de régénération qui réduisent la consommation de terrains urbains (*Corner, 2003*), densifient le tissu consolidé (*Sorkin, 2003; Reale, 2008*), augmentent la qualité de la construction (*Antonini, 2012*), ou bien favorisent la résilience (*Holden, 2018*). De nombreuses études ont analysé l'évolution architecturale sur les toits de différentes villes telles qu'Istanbul (*Ozdamar, 2015*), Paris (*Casnabet, 2016*), Portsmouth (*Paul, 2018*) et Tokyo (*Smetanina, 2018*).

La fonction d'espace habitable n'est pas le seul possible pour le toit. En fait, de nombreux autres programmes sont envisageables : la production alimentaire urbaine (*Wilkinson et Page, 2014; Sanyé-Mengual et al. 2015*); la construction de bars et de restaurants (OBR architectes, 2015), ou d'espaces de loisir (*Jaja architectes, 2017*), ou culturels (*Herzog et de Meuron, 2010*); l'installation de sources d'énergie renouvelables ; la création d'espaces verts (*Perrault, 2008*).

L'objectif de classer les toits en fonction de leur fonction ou de leur programmation a été repris par plusieurs auteurs. *Pomeroy (2012)*, définis deux possibles

déclinaisons pour l'architecture des toits : d'une part en tant que moyen de logement alternatif et d'autre part en tant qu'espace social alternatif. Pour *Bellini et Mocchi (2019)*, la possibilité de transférer un nombre toujours croissant de fonctions et d'activités sur les toits détermine l'altération de l'horizon symbolique, social et culturel de la ville. Les auteurs proposent l'identification de six catégories réalisables sur les toits : fonctionnelle, sociale, récréative, culturelle, sportive, environnementale. *De Urbanisten (2015)* a développé un projet pour la ville de Rotterdam, « Rotterdam Roofscapes », qui examine les avantages potentiels du toit « populaire ». Cette étude est focalisée sur l'optimisation du paysage de la toiture urbaine, et propose les quatre catégories suivantes : toit bleu (collecte des eaux pluviales), toit vert (végétalisé), toit à usage actif et toit pour la production d'énergie durable.

La possibilité d'améliorer les espaces inutilisés sur les toits des villes a motivé le développement de nouveaux outils analytiques pour quantifier le potentiel de développement de la ville sur les toits et permettre la planification urbaine pour un développement durable. La disponibilité de bases de données, de cartographies de la ville et d'images aériennes tridimensionnelles et à haute résolution permet d'utiliser des méthodes de télédétection pour une analyse détaillée de la forme urbaine.

L'un des principaux enjeux pour évaluer le potentiel des toits est l'identification automatique de la forme du toit. *Xiao et al. (2010)* ont développé une technologie de détection automatique de bâtiments avec des toits plats rectangulaires à partir des données d'imagerie oblique à points de vue multiples. *Massy et al. (2011)* proposent un outil de cartographie semi-automatisée des toitures végétalisées de la ville de Genève. Leur approche consiste à calibrer un algorithme de télédétection basé sur un modèle statistique sur des objets connus, prenant en compte quatre variables : la pente des toitures, leur luminosité, la présence de végétation et la surface. Ensuite, la méthode est utilisée sur l'ensemble des images aériennes disponibles (orthophotographies à quatre canaux) et des modèles numériques de surface et de terrain pour détecter les toits verts de la ville. *Hong et al. (2016)* analysent le potentiel d'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits du quartier de Gangnam à Seoul. L'étude est faite à partir des bases de données de type *DB Topo* avec le module d'analyse « Hillshade » présent dans le logiciel ArcGIS. Le calcul des surfaces ensoleillées est fait pour un seul jour (21 Mars 2014) entre 7 h et 18 h. *Song et al. (2018)* proposent une approche pour l'estimation du potentiel photovoltaïque solaire basée sur la récupération des toits à partir d'images de télédétection. La démarche présentée, combine la récupération de caractéristiques de toit sur des images d'aériennes et la simulation du rayonnement solaire mensuel et annuel pour estimer le potentiel solaire photovoltaïque. *Jochem et al. (2009)* proposent une méthode d'analyse automatique pour évaluer le potentiel solaire de la ville à partir de nuages de points LiDAR. La première étape est la segmentation des toits. Une fois que tous les toits sont détectés dans le nuage de points 3D, une analyse du

potentiel solaire est effectuée pour chaque toit. Les effets d'ombre des objets proches sont pris en compte, ainsi que les conditions météorologiques. Les résultats obtenus permettent d'estimer la radiation solaire incidente annuelle sur la zone analysée.

En France, l'ensemble des techniques de télédétection décrites ci-dessus ainsi que les modèles de simulation des conditions d'ensoleillement ont été utilisés pour analyser le potentiel d'installation de panneaux solaires et photovoltaïques sur les toits dans les Côtes-d'Armor (*Gouriou, 2018*) et à l'Ille-et-Vilaine (*Cerema, 2014*).

L'évaluation du potentiel de réaménagement des toits végétalisés a fait également l'objet de nombreuses études scientifiques. *Santos et al. (2016)* présentent une méthodologie basée sur la mesure de la couverture végétale actuelle au niveau du sol et sur l'estimation du potentiel de couverture de toiture végétalisée à l'aide des données 3D obtenues à partir du capteur LiDAR. Cette méthodologie est appliquée à la ville de Lisbonne. Les résultats de l'enquête montrent l'importance d'intégrer la modération 3D des données géographiques dans des indicateurs urbains 2D.

Plusieurs cas d'études sont disponibles pour différentes villes : San Francisco (*Bay Localize, 2007*); Melbourne (*Wilkinson et al., 2009*) Hong Kong (*Wong et al., 2013*); Paris (*Apur, 2013*); Londres (*Li, 2015*); Lisbonne (*Silva et al., 2017*). Toutes ces études proposent une analyse basée sur quelques indicateurs géométriques caractérisant l'enveloppe du bâtiment, comme la surface du toit ou la hauteur du bâtiment, et les conditions d'ensoleillement.

L'exception est représentée par les travaux de *Silva et al., (2017)* et *Naing et al., (2017)*. Les premiers développent une analyse multicritère basée sur 19 indicateurs, dont 12 liés à la forme du bâtiment et 7 liés à la forme urbaine. L'étude vise à évaluer le besoin d'espaces verts supplémentaires dans la ville de Lisbonne. Le potentiel n'est pas estimé individuellement pour chaque bâtiment, mais quartier par quartier, à l'aide de moyennes statistiques. L'objectif principal est d'identifier les zones prioritaires pour le réaménagement des toits verts. *Naing et al., (2017)* présentent une analyse détaillée d'une petite zone, le campus de l'Asian Institute of Technology (AIT). Ce travail vise à évaluer le potentiel de bâtiments individuels sur le campus dans le but de réaménager les toits pour les transformer en espaces verts. L'étude prend en compte 3 types de critères : physiques, économiques et sociaux. Ces critères sont évalués individuellement et en détail pour chacun des 15 bâtiments analysés. Parmi ceux-ci, le réaménagement des toitures est avantageux pour 7 bâtiments, possible pour 7 autres et infaisable pour 1.

## 1.4 Problématique et hypothèses

Malgré l'intérêt pour un développement urbain durable sur les toits, la capacité d'évaluer le potentiel de réaménagement de toits de structures déjà existantes est fortement limitée par le manque de démarches formelles. Un outil d'analyse à l'échelle de la ville visant à l'identification systématique des exigences techniques et les bénéfices apportés par les toitures terrasses serait indispensable pour une prise de décision informée en planification urbaine.

Le travail présenté dans ce mémoire se situe à mi-chemin entre les approches de *Silva et al., (2017)* et *Naing et al., (2017)*. D'une part, on souhaite définir les bases d'une méthode d'analyse du potentiel de réaménagement des toits à l'échelle de la ville. De l'autre, l'analyse du potentiel est faite individuellement pour chaque bâtiment par une analyse multicritère des besoins et des avantages associés au toit à réaménager.

La démarche proposée est constituée des étapes suivantes : (i) l'identification des toits plats ; (ii) le repérage des exigences et des avantages de la programmation choisie (végétale, énergétique, habitée, etc...) ; (iii) l'analyse des critères d'évaluation (indicateurs) permettant de quantifier les exigences et les avantages pour chaque toit ; (iv) et la détermination du potentiel avec une analyse multicritère.

L'étude menée sur la ville de Nantes prend en compte les hypothèses suivantes :

1. Le potentiel de réaménagement d'un toit dépend uniquement des indicateurs géométriques liés à l'enveloppe du bâtiment ou des indicateurs de la forme urbaine évalués sur une échelle allant de 200 à 600 mètres. Les critères techniques (structure et matériaux de la construction), socio-économiques, météorologiques et normatifs ne seront pas pris en compte.
2. L'analyse est menée uniquement pour les toitures plates et pour la programmation de toit végétalisé. Néanmoins, la démarche pourrait être généralisée pour des formes et des programmations différentes.
3. Le formalisme pour établir le lien entre les indicateurs choisis et les bénéfices ou les exigences des toits végétalisés est basé sur les résultats obtenus par des études antérieures (expérimentales ou numériques) repérées dans la littérature spécialisée.
4. La démarche est appliquée aux toitures de la ville de Nantes (Nantes intra boulevards et île)



# Chapitre 2 : Usages multiples des toits

## 2.1 Classification en trois types

À travers l'analyse des classifications distinctes déjà proposées par d'autres auteurs, on peut classer les toits selon trois programmations principales qui semblent être fondamentales pour l'avenir des toits urbains : le toit énergétique, le toit habité et le toit vert.

- Le toit « énergétique » concerne la fonction de production énergétique à partir de ressources renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque, thermique ou éolienne.
- Le toit « habité » concerne la conception de nouveaux logements nécessaires pour répondre à la demande croissante dans les villes et la réalisation de nouveaux espaces publics pour des activités culturelles, sportives, de loisirs ou commerciales.
- Le toit « vert » concerne tout type de programmation qui comporte une « restitution à la nature » de la partie de sol occupée par le bâtiment. Évidemment, l'objectif est d'une part de restaurer les équilibres hygrothermiques naturels pour le confort thermique urbain et la qualité de l'aire, et de l'autre, d'améliorer le paysage urbain et créer des espaces pour la production agroalimentaire locale. À cette catégorie appartiennent les toits végétalisés, mais également, les potagers urbains, les serres, les fermes aquaponiques et les bassins pour la récolte des eaux pluviales.

Ce mémoire est focalisé sur les toits verts et en particulier sur les toitures végétales. Néanmoins, pour rendre le manuscrit plus exhaustif, on présente par la suite les éléments caractérisant chacune des trois typologies introduites.

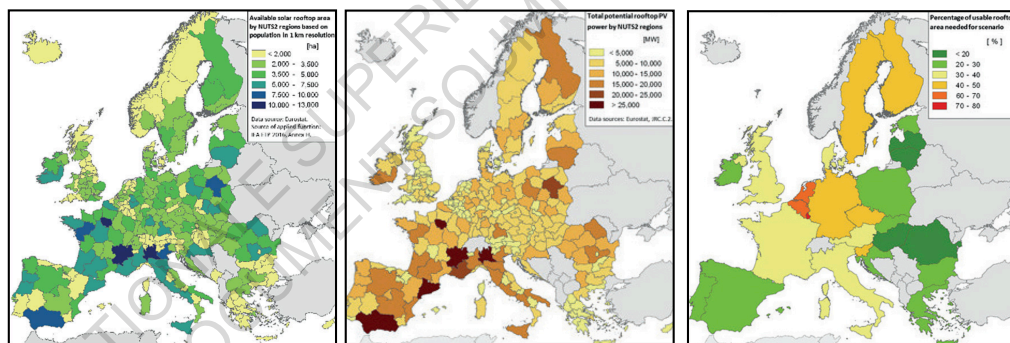
## 2.2 Toit énergétique

Le toit énergétique est constitué par l'ensemble des solutions techniques installées sur un toit capable d'absorber une source d'énergie renouvelable et de la transformer en électricité ou énergie thermique. Les systèmes qui permettent ce résultat sont principalement les panneaux photovoltaïques et les panneaux solaires. La production d'énergie éolienne est moins présente dans les villes surtout pour des raisons esthétiques.



L'un des principaux avantages de ces installations est leur impact environnemental très faible, car l'énergie produite est propre et renouvelable. En plus que les avantages environnementaux, les avantages économiques se démarquent certainement puisque ces systèmes permettent de réduire considérablement les coûts de la facture d'électricité. En effet, même les frais d'installation ne sont pas négligeables, la production d'énergie en local permet d'économiser sur les coûts de distribution et stockage de l'énergie électrique. De nombreuses villes en France soutiennent la transformation énergétique et l'installation de ces technologies pour mettre en œuvre des stratégies de développement durable. Ces systèmes pourraient être la réponse aux limites imposées par les accords de Paris qui visent à réduire de 40 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030. En janvier 2018, le Parlement Européen a voté pour un objectif contraignant de 35 % de la production d'énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2030.

*Bódis et al (2017)* identifient dans les toits de la ville les surfaces optimales pour l'installation de panneaux photovoltaïques. L'installation sur des toits individuels a des coûts plus élevés que la solution représentée par les centrales photovoltaïques. Néanmoins, cela est beaucoup plus avantageux, car la consommation d'électricité se fait sur place et ne se reflète donc pas dans les coûts de distribution. Une analyse de la superficie totale des toits européens montre une grande disponibilité pour l'installation de cette solution. En calculant le potentiel solaire des toits, il apparaît en effet que les objectifs fixés par les accords de Paris peuvent être atteints en récupérant un pourcentage des surfaces de la toiture allant de 40 % à 50 %.



**Figure 5 :** Les trois images montrent : (i) la surface disponible pour le toit solaire, (ii) le potentiel de panneaux photovoltaïques et (iii) le pourcentage de la surface disponible sur le toit qui serait nécessaire pour le scénario de 2030.

En France, une série d'actions concrètes ont été entreprises. En 2017 la plus vaste toiture photovoltaïque de l'île de France a été inaugurée à Paris. Cela est une application concrète de la stratégie de développement durable de la Ville de Paris qui vise à répondre au nouveau plan climat-air-énergie, pour faire de Paris une ville neutre en carbone et 100 % énergies renouvelables en 2050 en se conformant à l'Accord de Paris de 2015. Avec 20 000 m<sup>2</sup> de toiture disponible et environ 1 780 heures d'ensoleillement par an, ce toit était un candidat idéal pour l'installation

de 11 800 m<sup>2</sup> de panneaux solaires photovoltaïques et 6 578 panneaux photovoltaïques (Paris, 2019).



**Figure 6 :** Installation de panneaux solaires et panneaux photovoltaïques sur un réservoir d'eau potable à l'Hay-les-Roses (Val-de-Marne).

En plus, l'installation des panneaux photovoltaïques sur le toit de neuf écoles est prévue avant la fin de 2019 (Le parisien, 2019). Ils sont également prévus 5000 mètres carrés de panneaux solaires sur les toits de la ville (Linfodurable, 2019). À Nantes l'une des plus grosses infrastructures solaires de l'Ouest de la France a été inaugurée en avril 2019. Cette installation a été réalisée sur le nouveau Marché d'intérêt national (MIN) de Nantes. La surface de 30 000 m<sup>2</sup> a permis le positionnement de 19 000 panneaux solaires capable de produire l'équivalent de la consommation de 2000 foyers (hors eau chaude et chauffage). L'originalité de ce projet est qu'une partie de cette production sera utilisée pour alimenter les réfrigérateurs du Min 24 h/24. Sa gestion sera prise en charge groupe de 11 citoyens qui ont décidé de s'engager volontairement (20 Minutes, 2019).



**Figure 7 :** Vue aérienne de l'installation des panneaux solaires sur un des parkings du Zénith de Nantes.

## 2.3 Toit habité

Partout dans le monde, les architectes imaginent de nouvelles façons, parfois peut-être un peu inhabituelles, d'habiter les espaces urbains, compte tenu de la demande toujours croissante de nouveaux logements. La toiture des bâtiments existants devient ainsi une surface adaptée au logement neuf. À Paris, la société de développement « Les Toits du Monde » (LTM) se consacre à la construction de bâtiments parasites peu coûteux, conformément à une nouvelle ordonnance de la ville. La loi ALUR requiert 70 000 nouveaux logements construits sur les toits de la capitale. Les Toits du Monde, au lieu d'acheter des terrains coûteux en centre-ville, financent des projets de rénovation durable pour les propriétaires de bâtiments existants. En échange, par exemple de l'installation d'un ascenseur ou d'une meilleure isolation, les propriétaires fonciers donnent à LTM le droit de construire leurs structures parasites préfabriquées dans des ateliers extérieurs et simplement mises en place à la livraison. Un exemple est le projet à Paris « 3BOX » de Stéphane Malka Architecture. Ce faisant, l'espace est créé dans la ville afin d'éviter une plus grande dispersion, les nouvelles unités respectent les normes d'écoconception et les anciens bâtiments ne sont pas démolis.



**Figure 8 :** 3BOX, de Stéphane Malka Architecture. Projet d'architecture parasite à Paris.

Le toit habité peut, en outre, constituer un espace commun pour les habitants du bâtiment.

À Paris, dans la ZAC Clichy-Batignolles (17<sup>e</sup>), le projet Allure, livré en 2018 est un ensemble immobilier de 121 logements doté d'une terrasse commune de 300 mètres carrés sur le toit pour avec une cuisine extérieure pour organiser des fêtes, d'un studio partagé, d'une conciergerie pour gérer ces différents lieux.





**Figure 9** : Dans l'immeuble Allure, les agences Fresh Architectures et Itar Architectures, réalisent une terrasse commune pour les habitants du bâtiment.

Ces nouvelles résidences sont actuellement en cours de commercialisation. On les voit fleurir à Paris, Montreuil (Seine-Saint-Denis), Ivry-sur-Seine (Val-de-Marne), Nantes, Marseille, Palaiseau (Essonne) ou encore sur l'Île-Saint-Denis (Seine-Saint-Denis) (*Le Monde*, 2015).

Le toit habité trouve son application aussi pour les activités publiques. Les toits des bâtiments publics peuvent supporter un large éventail d'activités sociales et communautaires, permettant au public d'interagir avec la cinquième façade. Les espaces sociaux sur le toit peuvent fonctionner à différentes échelles, allant d'installations artistiques individuelles à un lieu accueillant des activités sociales à grande échelle.

*Zamperini et Lucenti (2014)* affirment que la réorganisation des toits des hôpitaux pourrait constituer une excellente réponse au grand manque d'espaces récréatifs et sociaux dans les structures. La création de nouveaux espaces sociaux ne se limite pas aux toits des hôpitaux, mais peut s'étendre à d'autres types de structures telles que des écoles, des centres sportifs, des centres commerciaux et des centres culturels.



**Figure 10** : Park 'n' Play, JAJA Architects, Copenhague, Danemark. Bâtiment pour parking avec un espace pour les enfants sur le toit (2016).

La création de toits publics dynamiques a été un facteur clé dans la proposition de *De Urbanisten* (2015) concernant les toits de Rotterdam. La ville a organisé avec succès des festivals musicaux sur les toits. Plus de 40 toits ont été ouverts au public (*Ryabets, 2015*). Cette approche vise à encourager les interactions sociales à travers des événements tels que des festivals, des soirées thématiques, des expériences sportives.



**Figure 11** : Les toits de Rotterdam pendant le festival « Rotterdam Rooftop Days » (2015).

## 2.4 Toit vert

Les toits verts répondent essentiellement à un principe de développement durable de la ville. L'implantation d'espaces verts sur le toit remplace l'empreinte végétale détruite lors de la construction du bâtiment.

Avant que le développement humain ne perturbe les habitats naturels, le sol et la végétation constituaient un élément d'un écosystème équilibré qui gèrait efficacement les précipitations et l'énergie solaire. Dans les zones naturelles, une grande partie de l'eau pluviale s'infiltrait dans le sol ou est renvoyée dans l'atmosphère via l'évapotranspiration, ce qui permet une fonction de refroidissement pour les surcharges solaires. L'incrément démographique et la densification des habitats urbains ont perturbé ces équilibres naturels.

Parce qu'une surface imperméable ne peut pas absorber les précipitations, l'infiltration dans les eaux souterraines est réduite. Dans les forêts, environ 95 % des précipitations sont absorbées, alors qu'environ 25 % seulement sont absorbées par

les villes (*Scholz – Barth, 2001*). Un ruissellement excessif augmente les risques d'inondation, car les eaux pluviales dépassent les capacités des canaux, ce qui entraîne des risques de dommages matériels et humains. Un volume élevé d'eaux pluviales peut également provoquer un débordement des réseaux d'égouts municipaux, avec un déversement des déchets bruts dans les rivières et les mers.

Du fait que les eaux de ruissellement provenant de ces surfaces ne sont pas retenues par le sol, la quantité d'eau disponible pour l'évapotranspiration est réduite. Par conséquent, une grande partie de l'énergie solaire incidente qui aurait servi pour l'évaporation de l'eau est transformée en chaleur sensible (*Barnes et al., 2001*). En outre, de nombreuses surfaces imperméables ont tendance à absorber la chaleur. L'albédo d'une surface est une mesure du rayonnement solaire entrant qui est réfléchi par la surface et qui n'est donc pas absorbé et transformé en énergie thermique. L'albédo des surfaces urbaines est généralement inférieur à celui des surfaces rurales d'environ 10 % (*Oliver, 1973*).

La perte de végétation et d'eau à cause de la création de surfaces imperméables, combinée aux propriétés d'absorption de chaleur de ces structures, entraîne des températures internes plus élevées et des températures de l'air extérieur plus importantes par rapport aux zones rurales. Selon la *USEPA (2003)*, la température de l'air dans la ville peut dépasser de 5-6 °C la valeur mesurée en dehors de la ville. Cet effet d'îlot de chaleur urbain est également présent pendant la nuit, car les surfaces bâties absorbent la chaleur et la restituent pendant la nuit. Des températures de l'air excessivement hautes peuvent entraîner des perturbations physiologiques, des lésions organiques et le décès (*USEPA, 2003*).

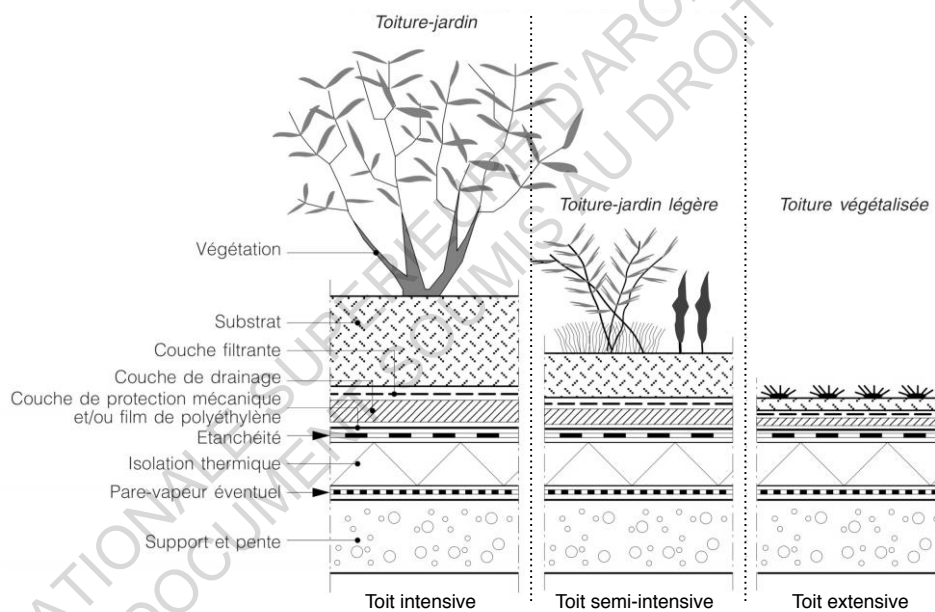
D'un point de vue purement économique, la technologie des toits végétalisés offre une alternative aux dépenses pour la rénovation d'infrastructures obsolètes pour la gestion des eaux pluviales et pour alimenter les climatiseurs. La technologie des toits végétalisés est similaire à celle des toits « blancs », car ils ont un albédo élevé (allant de 0,7 à 0,85), en fonction du taux de saturation d'eau (*Gaffin et al., 2005*). En général, les toits blancs ont un albédo initial autour de 0,8, mais cette valeur est susceptible de diminuer jusqu'à 11 % en raison de l'accumulation de débris. Les toits conventionnels ont des albédos beaucoup plus bas, allant de 0,05 à 0,25 (*USEPA, 2005*).

Un toit végétal ou végétalisé se définit comme un toit avec une couverture végétale importante posée sur une fondation légère spéciale placée sur le toit. Il s'agit d'une des technologies de la construction écologique, utilisée comme alternative au toit typique pour économiser la consommation d'énergie et d'autres ressources, tout en apportant de nombreux autres avantages (*Wilkinson et Reed, 2003*). Le système de toit vert est généralement développé en trois typologies : un système intégré dans lequel tous les composants sont initialement séparés et assemblés par la suite dans une installation unique ; un système modulaire pour lequel les composantes

végétales sont détachées et peuvent être repositionnées directement sur le toit existant et une couverture végétale ne contenant que du milieu de culture et des plantes (Banting et al., 2005).

En tout cas, le toit végétal comporte, de haut en bas, les couches suivantes :

- Les plantes, souvent choisies en fonction des conditions climatiques et des activités prévues sur le toit ;
- Un substrat de croissance fabriqué, parfois sans terre ;
- Un tissu filtrant pour accueillir les racines et le substrat tout en laissant pénétrer l'eau ;
- Une couche de drainage, qui comprend parfois des réservoirs d'eau intégrés ;
- Une membrane imperméable de couverture avec un agent anti-racine ;
- La structure du toit et un matériau isolant.



**Figure 12 :** Différents couches d'un toit végétalisé. La différence entre les trois types est dans l'épaisseur des couches. Source : CSTC

En fonction du type de sol de culture et des matériaux végétaux, les toits verts peuvent être divisés en trois types : végétation intensive, semi-intensive et extensive (Mairie de Paris, 2012).

Dans beaucoup de pays européens, les toits verts séduisent depuis plusieurs années. L'Allemagne est le pays qui en possède le plus, grâce à sa politique durable engagée depuis les années 90 (le Parisien, 2015).



En France, les toits verts se multiplient. Les données montrent qu'un million de mètres carrés de nouvelles toitures végétalisées a été construit en 2012, autant aux États-Unis et dix fois plus en Allemagne, pionnière dans le domaine. À Paris, 22 ha de toits, sur un potentiel de 80 ha, sont végétalisés. La plus grande toiture végétalisée de Paris inaugurée en 2013 a été réalisée au sommet d'un centre commercial. Une partie de ces 7 000 m<sup>2</sup> de surface du toit est réservée à un « jardin partagé » (*le Monde, 2013*).

Des solutions alternatives ont été développées dans le but d'amener l'agriculture sur les toits des centres urbains. Parmi celles-ci, les plus courantes sont : la serre et la ferme aquaponique.

A Paris la première serre agricole a été installée dans le 20<sup>ème</sup> arrondissement sur le toit des Galeries Lafayette Haussmann. Le toit avec une surface de 450m<sup>2</sup> accueille plus de 150 variétés de plantes comestibles, plus de 18 000 plantes, comme des fraises, des framboises, des fleurs comestibles ou bien des plantes aromatiques (*le Monde, 2018*).



**Figure 13** : Serre à tomates sur le toit d'un immeuble de la rue Sorbier dans le 20<sup>e</sup>  
Source : Sous les fraises

L'aquaponie permet une culture de végétaux en symbiose avec l'élevage de poissons par l'intermédiaire de bactéries. Plus précisément, les poissons produisent des déjections pleines d'ammonium qui sont transformées naturellement en nitrates par des bactéries. Les plantes consomment ces nutriments pour leur croissance et filtrent alors l'eau des poissons qui leur revient propre. Le processus est simple et proche d'un écosystème autogéré.





**Figure 14** : Ferme aquaponique réalisée par Urban Farms. Elle est implantée dans la zone industrielle de Bâle en Suisse. Elle a une capacité de production de 5 tonnes de végétaux et 800 kg de poisson.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# Chapitre 3 : Méthodologie et données pour l'évaluation du potentiel de réaménagement des toits végétalisés

## 3.1 Choix du site

Pour explorer le potentiel des toits plats, une analyse a été faite sur la ville de Nantes, en particulier sur l'aire de Nantes intra-boulevard et l'île de Nantes. Aussi appelé « boulevard de ceinture » dans le XIXe siècle, la limite de la zone d'analyse est définie plus précisément par : Boulevard de l'Égalité, B Boulevard de la Fraternité, Boulevard des Anglais, Boulevard Henry Orrion, Boulevard Eugène Orioux, Boulevard des Belges, Boulevard des Poilus et Boulevard de Doulon.

**Figure 15** : Plan de Nantes 1914.

Le choix d'évaluer une zone de dimension réduite a été dicté par la nécessité d'identifier manuellement les toits plats à partir d'images satellitaires. En effet, aucun logiciel libre pour la détection automatique des toits n'était disponible au moment où la zone d'étude a été choisie.

Cette zone se caractérise par un tissu urbain relativement uniforme et compact développé au XIXe siècle, à l'exception de l'île de Nantes qui a été revalorisée et développée ces dernières années (2009-2019).

En partant du constat que les toits plats sont une pratique de construction récente, il est possible de formuler l'hypothèse que le pourcentage de toits plats dans le centre-ville est inférieur par rapport à la périphérie. Cette hypothèse a été validée par une étude similaire réalisée sur la ville de Paris, qui montre (figure 16) comment la quantité de toits plats augmente en allant vers la périphérie de la ville (Apor, 2013).

**Figure 16** : Bâtiments à toitures plates de la ville de Paris. Source : Apur.

La zone considérée pour l'étude couvre une surface de 18533 Km<sup>2</sup> et en comprend 32711 bâtiments.



**Figure 17** : Zone d'intérêt, Nantes, France.

### 3.2 Identification des toits plats

Pour estimer le potentiel des toits, l'un des problèmes principaux en général est celui de classer les toits des bâtiments en fonction de leur forme dans des régions étendues. Avec le développement de la technique de la télédétection, l'analyse sur des zones plus étendues devient plus simple.

Une étude menée sur la ville de Genève, qui visait à produire une cartographie des toitures végétalisées, a montré qu'il est possible d'utiliser des techniques de télédétection en zones urbaines pour des objets de petite taille, en partant des données suivantes : orthophotographies à quatre canaux (rouge, vert, bleu et proche infrarouge ; résolution seize centimètres), les modèles numériques de surface (MNS) et les modèles numériques de terrain (MNT) (résolution métrique).

Cette approche limite le travail manuel et permet d'analyser de plus grandes zones urbaines, où l'identification manuelle deviendrait impossible.

Néanmoins, pour le travail de ce mémoire, l'identification des toits a été réalisée manuellement en observant les images 3D de Google Earth. L'utilisation de Google Earth a permis d'extraire plusieurs informations comme la forme du toit (plat ou en pente), le type d'utilisation actuel du toit et le type de programmation abrité par le bâtiment sous-jacent.

En ce qui concerne le type d'utilisation, les toitures repérées ont été classées en trois catégories : les toits occupés par les équipements techniques du bâtiment ; les toitures végétalisées et les toits libres de toute installation ou activité.

En revanche, pour la programmation les bâtiments ont été classés en cinq catégories : équipement, logement, logement/commerce, parking et tertiaire.



**Figure 18** : Méthodologie appliquée pour l'identification des toits plats. Les toits sont identifiés sur Google Earth et enregistrés sur la BD TOPO 2017 de la ville de Nantes avec QGIS.

### 3.3 Mise en données sur QGIS et T4QS

Le travail de recherche a été réalisé à l'aide du logiciel libre QGIS. QGIS est un système d'information géographique (SIG) de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo). Cet outil offre un grand nombre de fonctionnalités et de plugins qui permettent de visualiser, de gérer, de modifier et d'analyser des données provenant



de différentes sources pour composer des cartographies et produire des résultats statistiques.

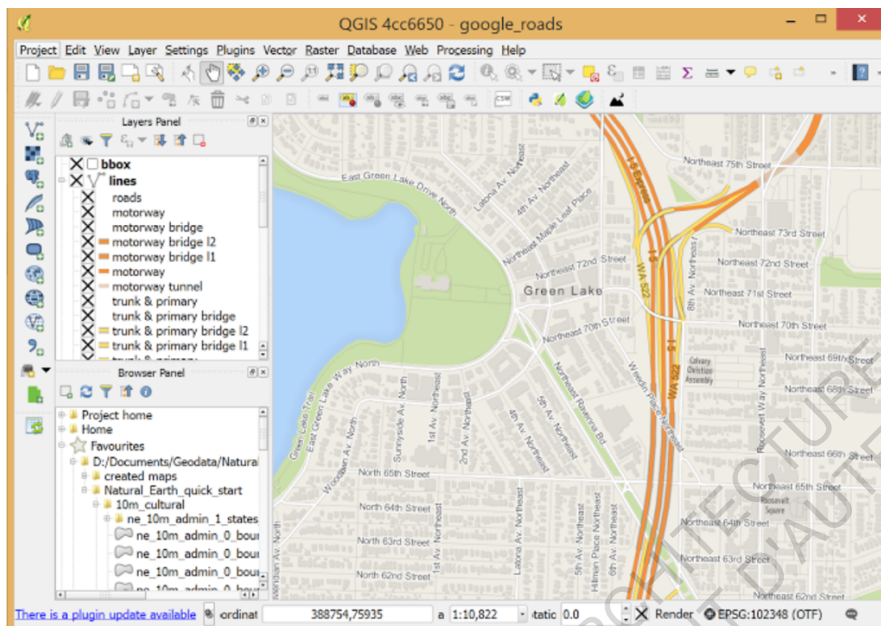


Figure 19 : Interface graphique du logiciel QGIS

Les cartographies produites ont été créées à partir des bases de données BD Topo de la ville fournies par Nantes Métropole. Les données utilisées datent de mars 2017.

Le BD Topo consiste en une série de couches (format Shapefile 3D) contenant de différentes informations. Chacune de ces couches définit des polygones pour les géométries des différentes entités. Par exemple, pour obtenir la cartographie de la ville de Nantes, des couches relatives aux bâtiments, aux espaces verts, aux voies navigables et aux routes ont été introduites dans le logiciel.

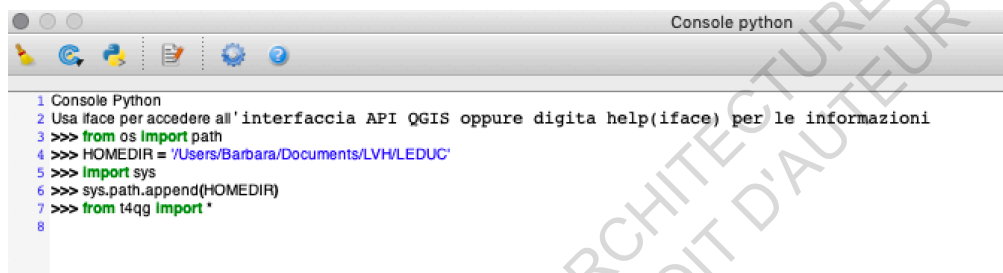
Des informations complémentaires sur chaque bâtiment figurent dans les différents « champs ». Ces derniers sont des champs hétérogènes, c'est-à-dire que leur type peut être soit numérique, réel ou entier (hauteur, surface), soit une chaîne de caractères (ID, origine du bâtiment, programmation, type).

| ID | PREC_PLANI    | PREC_ALTI     | ORIGIN_BAT    | HAUTEUR  | Z_MIN          | Z_MAX          | ROOFTOP        | SURFACE | TYPE           | PROG | area           | perimeter      | millier        |
|----|---------------|---------------|---------------|----------|----------------|----------------|----------------|---------|----------------|------|----------------|----------------|----------------|
| 28 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 5,00000000...  | 20,50000000... | 20,50000000... | PLAT    | 82,68999999... | LOG  | 82,68999999... | 36,4094730...  | 0,783851996... |
| 29 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 16,00000000... | 39,79999999... | 39,79999999... | PLAT    | 324,2500000... | LOG  | 324,2450000... | 82,3827008...  | 0,600359102... |
| 30 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 7,00000000...  | 25,30000000... | 25,30000000... | PLAT    | 205,6299999... | LOG  | 205,6349999... | 58,81384114... | 0,74704680...  |
| 31 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 6,00000000...  | 49,60000000... | 49,60000000... | PLAT    | 166,2100000... | LOG  | 166,2149999... | 95,55315016... | 0,228765252... |
| 32 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 10,00000000... | 51,60000000... | 51,60000000... | PLAT    | 194,9499999... | LOG  | 194,9500000... | 63,38611848... | 0,609740141... |
| 33 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 5,00000000...  | 35,89999999... | 35,89999999... | PLAT    | 1327,480000... | LOG  | 1327,475000... | 213,9339711... | 0,36448252...  |
| 34 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 10,00000000... | 43,89999999... | 43,89999999... | PLAT    | 287,0600000... | TER  | 287,0600000... | 79,9966472...  | 0,56368823...  |
| 35 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 13,00000000... | 29,80000000... | 29,80000000... | PLAT    | 397,3799999... | LOG  | 397,3850000... | 97,58590341... | 0,524381256... |
| 36 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 16,00000000... | 36,00000000... | 36,00000000... | PLAT    | 383,0899999... | LOG  | 383,0850000... | 104,7810305... | 0,43846979...  |
| 37 | BATIMENTO0... | 2,50000000... | 5,00000000... | Cadastre | 16,00000000... | 43,79999999... | 43,79999999... | PLAT    | 202,1800000... | LOG  | 202,1799999... | 60,6446400...  | 0,690817308... |

Figure 20 : Table d'attributs du logiciel QGIS.

Afin d'estimer le potentiel des toits, des indicateurs additionnels (périmètre, aire effective, facteur de vue du ciel, efficacité thermique, réduction de l'îlot de chaleur, surface vert visible) peuvent être créés à partir des champs existants avec la fonction de QGIS « créateur de champs ». Ces nouveaux indicateurs sont sauvegardés en tant que nouveaux champs dans la table d'attributs.

Il est à préciser que pour l'estimation de certains indicateurs, les fonctions de base fournies par QGIS n'étaient pas suffisantes. Il a été donc nécessaire d'intégrer le plug-in T4QG. T4QG est développé par l'équipe du CRENAU de l'ENSA. L'objectif de cet outil est d'assembler des indicateurs morphologiques relatifs à l'espace ouvert urbain. Ce logiciel de recherche, est utilisable grâce au terminal, présent dans QGIS, qui permet d'insérer des commandes ou des scripts en Python.



```
1 Console Python
2 Usa iface per accedere all'interfaccia API QGIS oppure digita help(iface) per le informazioni
3 >>> from os import path
4 >>> HOMEDIR = '/Users/Barbara/Documents/LVH/LEDUC'
5 >>> import sys
6 >>> sys.path.append(HOMEDIR)
7 >>> from t4qg import *
8
```

Figure 21 : Console Python en QGIS.

### 3.4 Définition des bénéfices des toits verts

La première étape dans l'estimation du potentiel de réaménagement des toitures terrasses existantes consiste à identifier les avantages pratiques apportés par l'installation d'une toiture végétale.

L'analyse des principaux ouvrages disponibles en littérature sur le sujet, évidence une série de bénéfices d'ordre économique, social, sociétal et environnemental.

Afin de quantifier les corrélations existantes entre les avantages des toits verts et les indicateurs de la forme urbaine et architecturale, on reprend par la suite l'analyse proposée par *Getter (2005)* avec une brève description de chaque bénéfice.

#### Gestion des eaux pluviales

Le principal service environnemental fourni par les toits verts est probablement la réduction du volume total des eaux de ruissellement. Dans un système de toiture végétalisée, une grande partie des précipitations est capturée dans le support ou la végétation et finira par s'évaporer de la surface du sol ou sera relâchée dans l'atmosphère par la transpiration. *Kolb (2004)* a rapporté que 45 % de toutes les précipitations peuvent être recyclés de cette manière. Les toits verts peuvent réduire le ruissellement de 60 % à 100 %, selon le type de système de toit vert (*DeNardo et al., 2005; Liescke, 1998; Moran et al., 2004; Rowe et al., 2003; VanWoert et al.,*

2005a). La rétention d'eau dépend de facteurs de conception tels que la profondeur du substrat, la composition et les espèces végétales, ainsi que de facteurs météorologiques tels que l'intensité et la durée des précipitations.

L'effet de la pente sur la détention de pluie n'est pas clair. En Allemagne, *Schade (2000)* et *Liesecke (1998)* n'ont trouvé aucune différence significative entre les taux de rétention sur des toits en pente différente. D'autres études suggèrent que l'augmentation de la pente augmente le ruissellement (*VanWoert et al., 2005a; Villarreal et Bengtsson, 2005*). Les résultats contradictoires peuvent être le résultat de régimes de précipitations dans différents environnements. De nombreux chercheurs ont observé que les conditions de substrat sec avant les précipitations entraînaient une plus grande rétention des eaux pluviales par rapport aux conditions initialement humides (*Connelly et Liu, 2005; Villarreal et Bengtsson, 2005*).

Même si les systèmes de toits verts retiennent les eaux pluviales, le ruissellement se produira quand le support sera saturé. Cependant, le ruissellement est retardé, car il faut du temps pour que les médias deviennent saturés et pour que l'eau s'écoule à travers les médias. Ce délai peut empêcher les réseaux d'égouts pluviaux de déborder, en lui permettant de traiter les eaux de ruissellement plus longtemps à un débit plus faible. Les toits verts peuvent retarder le ruissellement entre 95 minutes (*Liu, 2003*) et 4 heures (*Moran et al., 2004*), par rapport aux toits conventionnels pour lesquels le ruissellement est presque instantané. En ralentissant le taux de ruissellement et en l'étendant sur une plus longue période, les toits verts peuvent aider à atténuer le pouvoir érosif du ruissellement qui pénètre dans les cours d'eau, soit par le ruissellement direct, soit par les égouts pluviaux.

### Filtration et traitement des eaux pluviales

Les surfaces imperméables collectent des polluants tels que des huiles, des métaux lourds, des sels, des pesticides et des déchets animaux. Lors du ruissellement, ces contaminants peuvent se déverser dans les cours d'eau. *Novotny et Chesters (1981)* ont décrit la qualité des eaux de ruissellement urbaines comme se rapprochant de celle des eaux usées traitées, voire pires. La recherche confirme le lien entre le ruissellement des surfaces imperméables et la réduction de la qualité de l'eau dans les cours d'eau. Même 10 % des terres couvertes de surfaces imperméables peuvent avoir un effet sur la qualité des cours d'eau (*Ferguson, 1998*). Les eaux de ruissellement contenant une grande quantité de matière organique peuvent également provoquer une eutrophisation des eaux de surface, réduire la disponibilité en oxygène et entraîner une perte d'espèces aquatiques (*Barnes et al., 2001*). Non seulement le ruissellement pollué a-t-il un impact sur l'écosystème, mais il en va de même pour la santé humaine. Par exemple, le ruissellement urbain non traité sur les plages publiques a causé aux surfeurs deux fois plus de problèmes de santé que les plages non exposées au ruissellement urbain.

## Prolongation de la durée de vie des membranes des toits

Les supports et les matériaux végétaux protègent les membranes de toiture contre l'exposition solaire et les rayons ultraviolets susceptibles d'endommager la membrane de toiture bitumineuse traditionnelle. Ces matériaux réduisent également les fluctuations de température jour/nuit au niveau de la membrane, ce qui réduit les contraintes liées aux dilatations et contractions quotidiennes. Une étude a montré que les fluctuations diurnes d'un toit non vert étaient de 50 °C, alors que les fluctuations diurnes d'un toit vert n'étaient que de 3 °C (*Connelly et Liu, 2005*). La recherche confirme la différence de contrainte sur les membranes de toit entre un toit conventionnel et un toit vert. À Toronto, au Canada, la température de la membrane de toit d'un toit non revêtu a atteint 70 °C dans l'après-midi, alors que celle du toit vert n'était que de 25 °C (*Liu et Baskaran, 2003*). *Peck et associés (1999)* ont estimé que la modération de la température pouvait prolonger la vie de la membrane de deux à trois fois.

## Réduction de l'îlot de chaleur urbain

Peu d'études visant à évaluer le potentiel d'atténuation des îlots de chaleur des toits verts à l'échelle de la ville sont disponibles. La plupart des études utilisent des techniques de simulation basées principalement sur des modèles à moyenne échelle et considèrent des toits de type extensif. Des études sont disponibles pour New York et Chicago aux États-Unis, ainsi que pour Hong Kong et Tokyo. Des informations importantes sont également fournies par une étude expérimentale menée à Singapour.

Une étude de simulation visant à évaluer le potentiel d'atténuation des toits verts à Chicago, aux États-Unis, est décrite dans *Smith et Roeber (2011)*. Chicago est une ville leader dans la technologie des toits verts avec plus de 50 000 m<sup>2</sup> de toits végétaux installés en 2008. La version Advanced Research du modèle ARW (Weather Research and Forecasting) couplée à un modèle de couvert forestier urbain est utilisée (*Kusaka et Kimura, 2004*). Sur la base des résultats donnés dans *Rosenzweig et al. (2006)*, des toits verts ont été simulés en utilisant un albédo équivalent de 0,8. On constate que l'utilisation de toits verts procure un effet de refroidissement important à la ville. Les températures urbaines de 19 h à 23 h étaient de 2 à 3 degrés plus froides par rapport aux températures simulées sans utilisation de toits verts.

Comme mentionné précédemment, une étude de simulation visant à évaluer l'impact de diverses techniques d'atténuation des îlots de chaleur a été réalisée pour la ville de New York, aux États-Unis (*Savio et al., 2006*). Des toits extensifs ont été pris en compte. Les résultats montrent que la température ambiante maximale à 2 m de hauteur à 12 h du jour 14 août 2001, diminue de 0,37–0,86 degrés, tandis que la



diminution moyenne quotidienne de la température est proche de 0,3 – 0,55 degrés.

### Économies d'énergie

En plus d'augmenter la durée de vie de la membrane de toiture, les toits verts fournissent de l'ombre et de l'isolation, ce qui permet d'économiser de l'énergie et d'atténuer l'effet d'îlot thermique urbain. La profondeur du support, l'ombre des plantes et la transpiration peuvent réduire les gains en énergie solaire jusqu'à 90 % par rapport aux bâtiments non ombragés. Les toits verts ont des températures intérieures réduites de 3 à 4 °C lorsque les températures extérieures étaient comprises entre 25 °C et 30 °C (*Peck et al., 1999*). Toute diminution de la température de l'air intérieur du bâtiment de 0,5 °C peut réduire la consommation d'électricité pour la climatisation jusqu'à 8 % (*Dunnnett et Kingsbury, 2004*).

Il a été démontré que la température de l'air au-dessus du bâtiment était inférieure de 30 °C par rapport à un toit conventionnel (*Wong et al., 2003*), entraînant des économies de consommation d'énergie annuelle allant jusqu'à 15 %. Mais la quantité d'ombrage dépend fortement des types de plantes choisis, car l'indice de surface foliaire a un impact significatif sur l'effet d'ombrage (*Wong et al., 2003*).

Étant donné que les bâtiments correspondent à 36 % de la consommation totale d'énergie et 65 % de la consommation totale d'électricité, la mise en place d'une toiture végétalisée à grande échelle pourrait avoir un impact significatif sur les économies d'énergie (*Kula, 2005*). La plupart des avantages de l'isolation résultent du refroidissement, les réductions de chauffage allant de 0,12 % à 0,2 % et les réductions de refroidissement allant de 6,2 % à 6,4 % (*Saiz – Alcazar et Bass, 2005*).

La plupart des économies d'énergie réalisées sur les toits verts auront lieu pendant les mois d'été. Cela est dû au fait que les propriétés isolantes du substrat sont plus grandes lorsque l'espace aérien existe dans les pores et non lorsqu'elles sont saturées, ce qui est normalement le cas en hiver. Si les économies d'énergie constituaient la seule raison d'installer un toit vert, il serait beaucoup moins coûteux d'installer une isolation supplémentaire lors de la construction du bâtiment plutôt que d'installer un toit vert.

### Protection de la biodiversité

Parce que la plupart des toits verts extensifs sont inaccessibles au public, ils peuvent constituer un habitat non perturbé pour les micro-organismes, les insectes et les oiseaux. Dans une étude sur la biodiversité de 17 toits verts à Bâle, en Suisse, 78 espèces d'araignées et 254 espèces de coléoptères ont été identifiées au cours des trois premières années. Dix-huit pour cent de ces araignées et 11 % des coléoptères étaient classés comme étant en voie de disparition ou rares (*Brenneisen, 2003*). Dans une étude menée à Berlin-Ouest sur des toits verts de 50 ans, *Darius et*

*Drepper (1984)* ont trouvé des sauterelles, des vers blancs, des scarabées et un grand nombre d'acariens. Dans le nord-est de la Suisse, neuf espèces d'orchidées et d'autres espèces de plantes rares et menacées d'extinction se trouvaient sur un toit vert de 90 ans (*Brenneisen, 2004*). De plus, de nombreux oiseaux ont été enregistrés sur des toits verts en Allemagne, en Suisse et en Angleterre (*Brennisen, 2003; Gedge, 2003*).

Même des toits verts relativement neufs peuvent fournir un habitat. L'un des plus grands toits verts au monde se trouve à Dearborn, dans le Michigan, au sommet d'une usine de montage de la Ford Motor Company. Le toit végétalisé de 42 900 m<sup>2</sup> est composé d'un mélange de 13 espèces de *Sedum* plantées dans des milieux de moins de 7,6 cm. Dans les deux années suivant l'établissement initial des plantes, 29 espèces d'insectes, sept espèces d'araignées et deux espèces d'oiseaux ont été identifiées (*Coffman et Davis, 2005*).

### **Amélioration du paysage urbain**

Lorsque les humains voient la nature, cela a des effets bénéfiques sur la santé, tels que la réduction du stress, la baisse de la pression artérielle, la réduction des tensions musculaires et l'augmentation du bien-être (*Ulrich et Simmons, 1986*). Ces avantages peuvent se traduire par une amélioration de la santé et de la productivité des travailleurs. *Kaplan et al. (1988)* ont rapporté que les employés qui avaient une vision de la nature, telle que des arbres et des fleurs, étaient moins stressés, éprouvaient une plus grande satisfaction au travail et rapportaient moins de maux de tête et de maladies que ceux n'ayant aucune vision naturelle. *Ulrich (1984)* a noté que les patients subissent une récupération plus rapide après une intervention chirurgicale lorsqu'ils ont une vue naturelle. Les environs verdoyants sont non seulement esthétiques, mais les propriétaires peuvent souvent augmenter les taux de location et les hôtels sont en mesure de faire payer plus cher pour une « chambre avec vue » par rapport au décor de toit dénudé traditionnel.

### **Amélioration de la qualité de l'air extérieur**

Les plantes peuvent filtrer les particules et les polluants gazeux dans l'air. Les particules seront finalement entraînées dans le sol par le mouvement des eaux de pluie et une partie des polluants sera absorbée par les tissus végétaux. Une variété de contaminants en suspension dans l'air peut être atténuée par les toits verts. Une étude allemande a démontré que la végétation des toits verts peut réduire considérablement la pollution de l'air par les moteurs diesel (*Liesecke et Borgwardt, 1997*). *Yok Tan et Sia (2005)* ont constaté une réduction de 37 % et 21 % de l'anhydride sulfureux et de l'acide nitreux respectivement au-dessus d'un toit vert récemment installé. D'autres ont estimé que les toits verts peuvent éliminer les particules de poussière de l'ordre de 0,2 kg de particules par an et par mètre carré de toit en herbe (*Peck et Kuhn, 2001*).

Les effets néfastes sur la santé de la pollution particulaire de l'air comprennent l'augmentation des problèmes respiratoires, la diminution de la fonction pulmonaire, l'augmentation du nombre d'hospitalisations et d'autres visites médicales pour maladies respiratoires et cardiovasculaires. L'augmentation de la morbidité respiratoire, mesurée par l'absentéisme au travail ou à l'école ou d'autres restrictions d'activité, et une mortalité accrue par maladie cardiopulmonaire sont également induites par la pollution atmosphérique (*Pope et al., 1995*).

### Réduction de bruit

Les surfaces dures des zones urbaines sont plus susceptibles de refléter les sons, alors que les toits verts absorbent les ondes sonores en raison de la nature du substrat et de la végétation. À l'aéroport de Francfort, en Allemagne, un toit vert de 10 cm de profondeur réduisait les niveaux de bruit de 5 dB (*Dunnnett et Kingsbury, 2004*). D'autres recherches montrent que 12 cm de substrat de toit vert peuvent à eux seuls réduire le bruit de 40 dB (*Peck et Kuhn, 2001*). Il existe de nombreuses études scientifiques sur les effets de l'exposition au bruit chez l'homme : déficience auditive, hypertension et cardiopathie ischémique, gêne, troubles du sommeil et baisse des résultats scolaires, ne sont que quelques-uns des problèmes rencontrés (*Passchier – Vermeer et Passchier, 2000*).

### Autres Avantages

Les toits verts peuvent retarder la propagation d'un incendie d'un toit vers l'immeuble, et vice versa, surtout si le substrat est saturé d'eau. En revanche, en manque d'entretien une couverture végétale sèche peut comporter un véritable facteur de risque incendie. Lorsqu'une toiture végétale est accessible, elle peut offrir une aire additionnelle aux habitants de l'immeuble pour des usages divers. Selon la programmation et l'occupation du bâtiment, il est possible de prévoir soit des espaces de détente et de réconciliation avec la nature pour les copropriétaires, soit des espaces publics de récréation ou convivialité pour la communauté. Il est également envisageable de créer des espaces qui peuvent contribuer et à la production alimentaire locale et à la création d'emploi. Enfin, les avantages économiques liés aux dépenses énergétiques du bâtiment et la réduction des nuisances sonores se traduisent également en amélioration du confort et de la qualité de l'air intérieur pour les occupants.

L'ensemble des avantages repérés sont classés selon deux critères. Les bénéfices apportés peuvent être de type économique ou social et environnemental. Ils peuvent, en outre, intéresser autant les propriétaires que la communauté. La classification des avantages des toits végétalisés est synthétisée dans le schéma en figure 22.

|                   | <b>Privé</b>  | <b>Collectif</b>  |
|-------------------|---|---|
| <b>SSE*</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Terrasse végétalisée accessible</li> <li>- Résistance au feu</li> <li>- Confort</li> </ul> <p>*Social / Sociétal / Environnemental</p>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtration et traitement de l'eau pluviale</li> <li>- Amélioration du paysage urbain</li> <li>- Protection de la biodiversité</li> <li>- Amélioration de la qualité de l'air</li> <li>- Espace de convivialité</li> <li>- Réduction de l'îlot de chaleur urbain</li> <li>- Réduction du bruit</li> </ul> |
| <b>Economique</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prolongation durée de vie membrane</li> <li>- Économie d'énergie en été comme en hiver</li> <li>- Augmentation de la valeur de l'immeuble</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Création d'emploi</li> <li>- Gestion des eaux pluviales</li> </ul>   |

**Figure 22** : Classification des avantages pour différents secteurs.

### 3.5 Définition des exigences des toits verts

Comme pour les bénéfices, on identifie une liste d'exigences, ou critères techniques à respecter pour l'installation des toits végétalisés. Parmi les nombreux critères existants, on fait le choix de lister par la suite uniquement ceux qui sont liés à l'état de la structure avant l'aménagement du toit vert. D'autres critères techniques également importants, comme l'irrigation, le choix du substrat et du type de végétation, l'entretien par exemple, ne seront pas pris en compte, car ils dépendent du choix de la solution technique adoptée et donc ne sont pas liés au potentiel intrinsèque du toit.

#### Résistance structurale

L'aménagement d'un toit végétalisé ajoute des charges supplémentaires sur un toit qui peuvent être plus ou moins importantes, selon le type de végétation installée, et qui doivent être estimées précisément avant l'installation de la solution envisagée.

Selon une étude présentée par la ville de *Montreal (2014)* dans un cahier de charges pour l'aménagement des toits verts, les charges à prendre en compte seraient de deux types : les charges permanentes (poids des matériaux constituant la couverture, de la végétation à son maximum de croissance, du substrat et la membrane), les charges climatiques supplémentaires (pluie, neige). En outre, si le toit est accessible (toit-terrace) pour les visiteurs ou les occupants du bâtiment, des charges additionnelles doivent aussi être prises en compte.

Pour un bâtiment existant, comme pour un bâtiment de nouvelle construction, ces calculs doivent être faits pour s'assurer que la structure portante du toit et des murs porteurs pourront supporter les charges supplémentaires du toit végétalisé.

Une étude présentée par la ville de *Toronto (2010)* renseigne sur l'importance de prendre en compte des critères de stabilité des structures ainsi que les caractéristiques de rétention d'humidité du système. Le document fournit des charges de référence pour les matériaux les plus fréquemment utilisés comme couche de drainage et couche de soutien de la dans les systèmes de toits verts. Les valeurs sont données en supposant que le matériau soit saturé. Un nouveau document rédigé par la région du *Quebec (2015)* requiert que la charge soit calculée en suivant deux cas : premièrement, le poids d'un toit saturé d'eau et drainé, et deuxièmement, le poids d'un toit saturé d'eau auquel s'ajoute l'eau retenue dans le système de drainage lors de précipitations. Le poids de l'eau dans le système est considéré comme une charge « vive ». Enfin, des charges « exceptionnelles » doivent prendre en compte les risques d'accumulation d'eau localisée à des endroits spécifiques comme les drains de toit obstrués par des résidus, les flèches de la superficie du toit ou les zones à plus haute densité de végétation qui peuvent créer des non-uniformités dans l'accumulation de la neige.

### **Résistance au soulèvement dû au vent et parapets**

Un toit végétalisé, étant réalisé sur la partie plus haute du bâtiment, doit nécessairement résister aux effets de soulèvement dû au vent.

Les calculs des effets de soulèvement causé par le vent doivent servir à déterminer les méthodes de fixation des différentes membranes et des couches du toit végétalisé. En outre, les conditions locales de vent déterminent la nécessité ou non de construire des parapets. Des mesures spécifiques de retenue doivent être prises, dans les coins et au pourtour des zones végétalisées pour maintenir en place le substrat de croissance et prévenir son érosion par le vent durant la période où les plantes et leur système racinaire ne sont pas développés (*Montreal, 2014*).

Selon la hauteur du bâtiment et la vitesse moyenne du vent, on détermine la hauteur des parapets et la densité minimale du substrat à utiliser sur les différentes zones du toit (périmètres, coins et centre). De même, le choix de la végétation doit aussi prendre en compte les conditions d'exposition au vent (*Quebec, 2015*).

Quelle que soit la hauteur d'un bâtiment, il faut prévoir des parapets sur le toit. Une étude élaborée par la région du *Quebec (2015)* affirme que pour tout type de toiture végétalisée à installer, les parapets doivent être séparés de la zone des végétaux par une bande de lest de pierre ou de dalles de béton d'au moins 500 mm de largeur. Selon une étude menée sur ville de *Montreal (2014)*, la présence de ces éléments tout autour du périmètre, favorise l'accumulation de l'eau pluviale, donc il est nécessaire envisager des solutions pour évacuer l'excès d'eau. Des systèmes

de drainage doivent être installés pour éviter l'accumulation d'eau *Toronto (2010)*. La hauteur des parapets est déterminée par la vitesse du vent *Quebec (2015)*.

### Résistance au feu

La résistance au feu est une des exigences à respecter pour l'installation des toits végétalisés, car il est essentiel de garantir la sécurité des habitants. Selon une étude présentée par la ville de *Montreal (2014)* la taille des zones vertes doit être réduite afin de limiter les risques d'incendie. Globalement aucune dimension d'un toit végétalisé ou celle d'une section, ne doit être supérieure à 30 mètres. Plus précisément l'aire d'un toit végétalisé ne doit pas dépasser 300 m<sup>2</sup>, lorsque les matériaux de construction sont combustibles et 900 m<sup>2</sup> lorsqu'ils ne le sont pas. Il faut prévenir les feux de toits verts en y intégrant au périmètre et à intervalles réguliers, ainsi qu'autour toute ouverture, des coupe-feux. Ces coupe-feux doivent être composés de matériaux non combustibles, tels que du gravier ou des dalles de béton de 60 cm de largeur tous les 40 m dans toutes les directions.

Les toits verts peuvent retarder la propagation d'un incendie si le substrat est saturé d'eau. Néanmoins, les plantes peuvent présenter un risque d'incendie si elles sont sèches. Selon le document rédigé par la région du *Quebec (2015)* les zones libres de végétation exigées doivent être recouvertes d'un matériau incombustible (pierre, gravier, dalles de béton, etc.) afin d'éviter la propagation du feu entre le toit végétalisé et les constructions avoisinantes. Éviter la végétation qui présente un risque d'incendie excessif *Toronto (2010)*.

### Essai d'étanchéité

Pour la réalisation d'un toit vert est impérative de procéder à un essai d'étanchéité avant la pose des composantes du toit végétalisé, afin de vérifier le bon état de la membrane d'étanchéité du toit.

Les principales méthodes d'essais reconnues par l'industrie sont les suivantes : l'arrosage ; la détection de fuites par relevé, vectoriel du champ électrique ; la détection de fuites par test d'impédance ; la thermographie infrarouge ; la détection de fuites par conductivité électrique à bas voltage ; la détection de fuites par conductivité électrique à haut voltage ; la détection d'humidité (*Montreal 2014*).

### Exposition au soleil

L'exposition à la lumière directe du soleil est probablement le critère le plus important à prendre en compte dans l'installation d'un toit vert. La disponibilité de lumière autre que d'eau joue un rôle fondamental pour la survie des végétaux et dans les équilibres écologiques des différentes espèces.

Il n'existe pas de critères universels concernant la quantité d'heures de lumières nécessaires pour assurer une durée de vie correcte pour la couverture végétale. En fonction du nombre d'heures disponibles, les espèces sélectionnées seront différentes (Yacinalp et al. 2017). Wilkinson et al. (2009) proposent un critère empirique, issu d'une enquête menée auprès de plusieurs experts, selon lequel la durée minimale d'exposition directe au soleil pour pouvoir installer un toit vert intensif est de 3 heures en moyenne par jour. En dessous d'une heure par jour, la solution de toiture végétalisée ne serait pas envisageable.

### 3.6 Indicateurs identifiés et analysés

Parmi la liste d'avantages et d'exigences identifiés, on fait le choix d'analyser uniquement ceux qui sont liés à la forme urbaine et pour lesquels le lien fonctionnel avec ces indicateurs est clairement identifiable. Les paramètres dépendant des caractéristiques structurelles du bâtiment comme la résistance, les matériaux, l'année de construction et l'étanchéité ne sont pas pris en compte dans cette étude. En outre, les paramètres qui dépendent non seulement de la forme urbaine, mais aussi des conditions climatiques et météorologiques locales, telles que la résistance au soulèvement par le vent, l'absorption et le filtrage de l'eau pluviale ont été négligés aussi. L'indicateur d'ensoleillement est estimé dans des conditions de ciel normales, sans tenir compte des conditions de nébulosité réelles.

Les critères pris en compte pour cette étude sont les suivants :

- Exposition au soleil
- Efficacité thermique
- Réduction de l'îlot de chaleur
- Surface vert visible pour l'amélioration du paysage urbain.

Par la suite les quatre critères, ainsi que leur lien avec la forme urbaine, sont décrits de façon plus détaillée.

#### 3.6.1 Exposition au soleil

L'exposition au soleil est le critère le plus important à prendre en compte pour installer un toit végétalisé.

La méthodologie à mettre en œuvre pour estimer les heures de lumière sur chaque toit plat pris en considération impliquerait la réalisation d'une moyenne statistique des heures d'exposition au soleil des surfaces pour toute l'année et pour tous les bâtiments à toit plat. Cela impliquerait également d'envisager un modèle statistique de ciel calibré sur la ville de Nantes afin d'obtenir des valeurs réalistes.

Plus précisément, il faudrait un calcul des trajectoires solaires pour chaque jour de l'année, diviser chaque trajectoire en intervalles de temps réguliers de l'ordre de



quelques minutes, calculer les conditions d'éclairage de la surface du toit pour chaque point de la trajectoire et pour chaque bâtiment de la scène urbaine.

Cette procédure serait effectivement précise, mais en même temps excessivement longue pour le calcul et pour le traitement des données. Pour obtenir des résultats dans un délai de temps raisonnable, on peut utiliser une estimation théorique simplifiée.

La méthode utilisée pour prendre en compte les heures de lumière des toits dans ce mémoire a été mise en place en tenant compte d'un ciel clair et sans nuages. Au lieu de calculer les heures de lumière de chaque toit pour toute l'année, un jour par mois a été choisi comme jour représentatif (le 21 de chaque mois).

En utilisant le plugin T4QG sur QGIS, il a été possible de définir des « datatimes ». Avec un script Python, on définit le jour à analyser pour chaque mois, la latitude et la longitude inhérentes à la ville et les intervalles de temps en minutes par jour.

```
dt = DateTimeGenerator.createSingleDayPerMonth(dayInMonth=21,
time0=None, time1=None, sliceTimeInMinPerDay=60,
outputLayername=None, latitude=47.2, longitude=-1.55,
timezone=0).run()
```

Cela permet de définir les trajectoires solaires des jours sélectionnés et leurs subdivisions en intervalles d'une heure. Sur les 12 jours examinés, les trajectoires solaires comprennent 144 heures de lumière au total, soit une moyenne de 12 heures par jour. Pour chacune des 144 heures, l'incidence de la lumière du soleil sur les toits plats de Nantes est calculée. Cela permet de calculer le nouveau champ « sun\_hits » qui correspond au nombre d'heures pendant lesquelles il y a une incidence directe de la lumière du soleil sur le toit.

```
sunDurRoof = SunshineDurationOnTopOfRoof(buildings, 'HAUTEUR', dt)
indics = STSpatialAttributeCommand([Area, Perimeter, MillerIndex,
bsf, svfRoof, sunDurRoof], buildings, 'roofs').run()
```

Un deuxième indicateur, le « sun\_ratio », est calculé en normalisant sun\_hits par rapport au nombre total d'heures :

$$\text{sun ratio} = \frac{\text{sun hits}}{144}$$

Cet indicateur permet de convertir en pourcentage les heures de lumière incidente sur les toits plats par rapport aux heures de lumière totales.



### 3.6.2 Efficacité thermique

L'efficacité thermique est l'un des avantages du toit vert. Plusieurs études ont analysé la capacité du toit végétal à améliorer l'isolation des bâtiments.

Avec l'étude menée par *Niachou et al. (2001)*, les auteurs ont analysé l'efficacité des toits verts sur des bâtiments présentant différents niveaux d'isolation. Leurs résultats montrent que la création d'un toit végétalisé sur une structure déjà bien isolée n'apporte pas d'avantages supplémentaires. En fait, la réduction de la consommation d'énergie est d'environ 40 % pour un toit non isolé, mais seulement de 2 % pour un toit bien isolé.

Les toits verts améliorent l'isolation thermique du bâtiment en réduisant le transfert de chaleur à travers le toit et, en conséquence, réduisent la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment.

En particulier, l'étude numérique réalisée par *Martens et al. (2008)* met en évidence le lien entre le toit végétal et la forme architecturale du bâtiment. L'efficacité thermique (ET) du toit végétal est définie comme l'économie d'énergie (en pourcentage) réalisée en présence du toit végétal par rapport au même bâtiment sans couverture végétale, afin de garder une même température fixe de l'air intérieur. Les simulations effectuées sont paramétrées en fonction de deux indicateurs : le rapport entre la surface de l'enveloppe et la surface du toit, ou « roof to envelope ratio » (RER) et la hauteur du bâtiment (H).

Afin d'évaluer les économies d'énergie réalisées avec l'installation de toits verts dans la ville de Nantes, on a recalé un modèle mathématique sur les résultats obtenus dans l'article.

Dans cette étude, des simulations ont été effectuées sur des bâtiments d'un, deux et trois étages et avec des valeurs de RER allant de 0,1 jusqu'à 0,9. Cette analyse a été réalisée sur des toits verts et non verts. Sur la base des résultats obtenus, l'efficacité thermique a été définie comme :

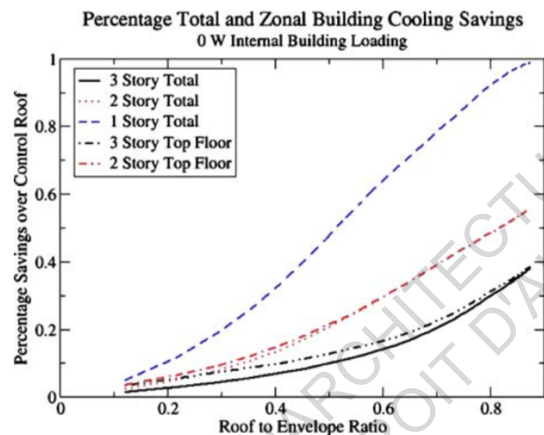
$$ET = \frac{p0 - pv}{p0}$$

Dans la formule précédente,  $p0$  est équivalent à la consommation d'énergie (kWh) du toit sans végétation et  $pv$  à la consommation d'énergie (kWh) du toit avec végétation.

L'indicateur pris en compte est le RER ou le rapport entre la surface totale du toit et la surface de l'enveloppe.

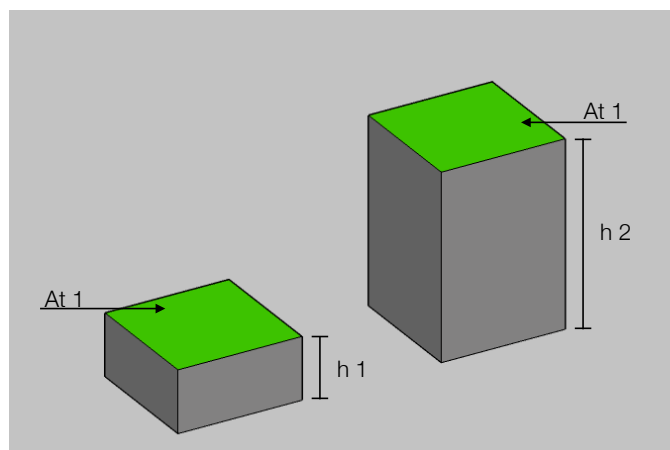
$$RER = \frac{A_t}{A_e}$$

Les résultats des simulations, présentés en figure 23, montrent que plus le RER est élevé, plus les économies d'énergie sont importantes et en outre, l'efficacité est liée au nombre d'étages du bâtiment.



**Figure 23 :** Pourcentage d'économie d'énergie en fonction de la RER et du nombre d'étages dans le bâtiment. Source : Martens et al. (2008)

Pour interpréter ces résultats, par rapport à la figure 24, à parité de surface du toit, le bâtiment à gauche à un réalisé une économie d'énergie plus importante grâce au toit végétal, car la surface d'échange de l'enveloppe est plus petite, donc l'échange thermique avec l'extérieur se fait principalement par le toit. En revanche, le bâtiment à droite a une efficacité thématique plus faible, car avec l'augmentation de la hauteur à parité de périmètre et surface du toit, la surface latérale augmente aussi et donc la végétalisation du toit a moins d'impact sur la thermique du bâtiment.



**Figure 24 :** L'économie d'énergie de deux bâtiments ayant la même surface de toit diminuent avec l'augmentation de la hauteur.

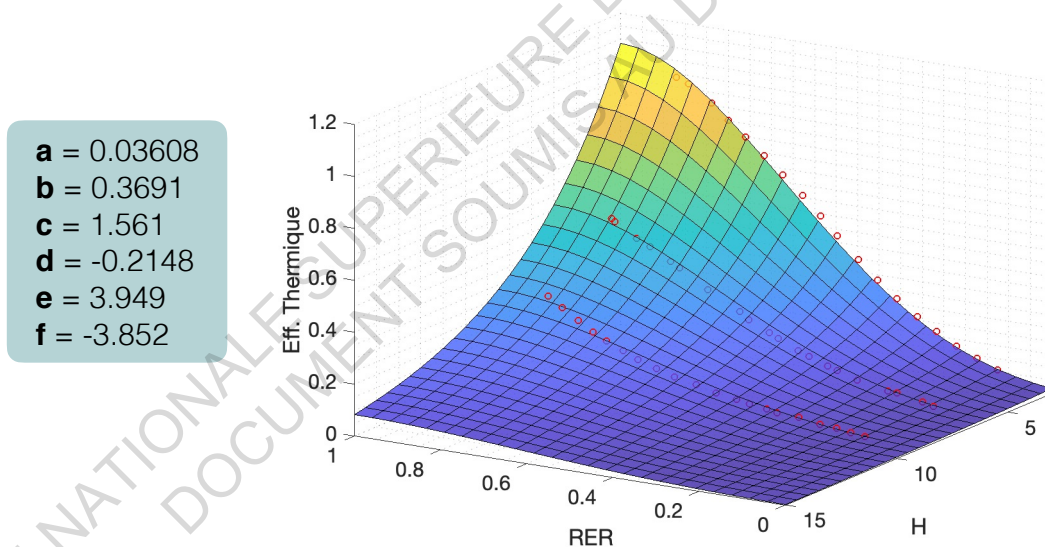
La hauteur des bâtiments était déjà disponible pour les données DB Topo. En revanche, le RER a été calculé avec le calculateur de champs de QGIS. La surface de l'enveloppe des bâtiments est la somme de la surface du toit et des surfaces latérales. Ceci peut s'exprimer comme le produit du périmètre  $P$  du bâtiment par sa hauteur  $H$ . Donc on obtient :

$$RER = \frac{At}{Ae} = \frac{At}{At + P * H}$$

Le calcul du RER est fait pour tous les toits plats de la zone analysée. Afin d'extrapoler les résultats de *Martens* aux bâtiments analysés, on effectue un ajustement du type :

$$ET = (a + b * RER + c * RER^2 + e * RER^3 + f * RER^4) * \exp^{d*H}$$

sur les données de l'article. Le calcul des coefficients de l'expression a été effectué à l'aide d'un script Matlab pour l'ajustement de surfaces. Ces coefficients, ainsi que la surface ajustée, sont rapportés en figure 25.



**Figure 25 :** Ajustement de surface sur les données de Martens et al. (2008), afin d'obtenir une expression analytique pour l'efficacité thermique en fonction de de la RER et de la hauteur du bâtiment.

Le graphique montre une très bonne correspondance entre les résultats de l'article de Martens et l'expression trouvée. Cette formule peut être rentrée directement dans le calculateur de champs de QGIS pour calculer l'efficacité thermique des toits verts en fonction du RER et de la hauteur du bâtiment.

### 3.6.3 Réduction de l'îlot de chaleur

L'impact des toits verts sur la réduction de l'îlot de chaleur urbain (ICU) a récemment été étudié à l'aide de modèles de simulation à petite, moyenne et grande échelle.

De ces études (Liu, 2005; Hui, 2009; Wong, 2013), il est mis en évidence qu'il existe deux indicateurs urbains qui sont corrélés avec l'impact des toits végétalisés sur la réduction de l'ICU. Par rapport aux indicateurs introduits dans la section précédente, ces deux paramètres ne sont pas liés à la forme architecturale du bâtiment en soi, mais à la morphologie urbaine.

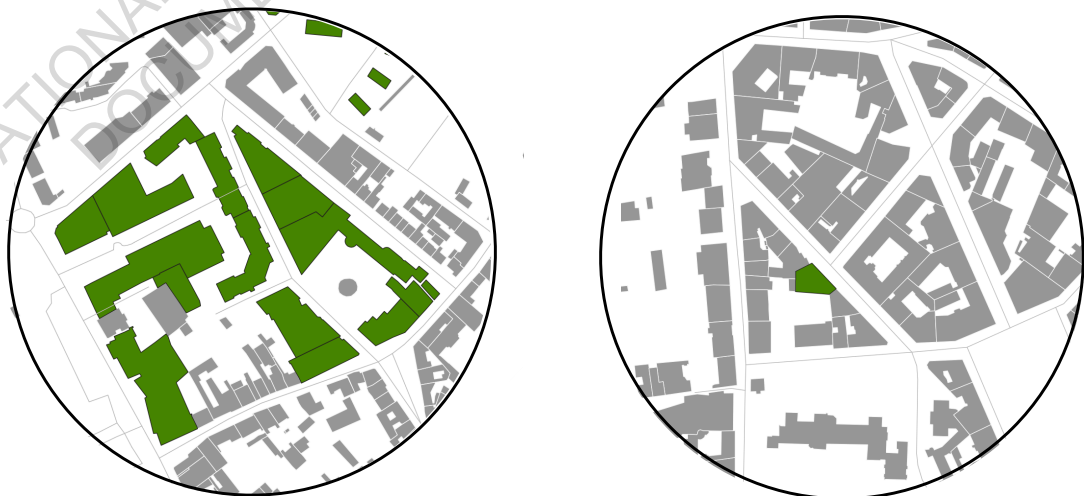
En fait, le premier facteur correspond au pourcentage de toits végétalisés par rapport à la surface totale des toits dans une zone d'analyse donnée.

On peut donc définir un indicateur de la fraction de toits végétalisés ou « Green Roof Coverage Fraction » (GRCF) de la manière suivante :

$$\text{GRCF} = \frac{A_v}{A_t}$$

Dans l'expression précédente,  $A_v$  est la surface des toits verts et  $A_t$  correspond à la surface totale des toits dans une région centrée sur le toit pour lequel on veut estimer le potentiel et de rayon fixé (par exemple 200 m).

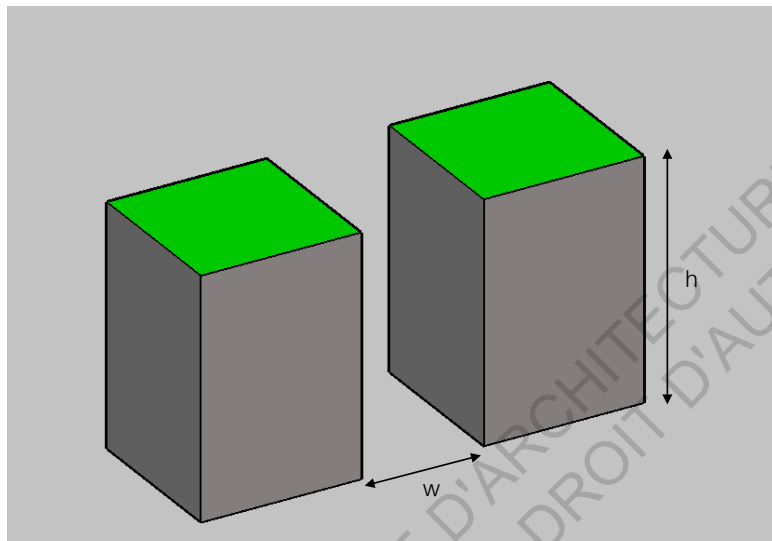
Dans le but de quantifier le potentiel de réaménagement de la toiture, on remplace dans la définition du GRCF la surface des toits verts par la surface des toits plats. En effet, il a été démontré que le potentiel de réduction des îlots de chaleur est lié non pas tant aux caractéristiques du toit lui-même, mais à la présence potentielle d'une densité de toits verts.



**Figure 26 :** Les deux figures illustrent le concept de densité de toits verts. À gauche, une zone à forte densité de végétation sur les toits. À droite, une zone de faible densité de toits verts.

Comme on peut le voir sur la figure 26, la forte densité de bâtiments à toits végétalisés exprimée dans la cartographie de gauche entraîne une réduction considérable de l'îlot de chaleur par rapport à la situation de droite où il n'y a qu'un seul bâtiment avec un toit vert.

Le deuxième facteur est identifié comme le rapport entre la hauteur et la largeur ( $h/w$ ) des rues canyon (voir figure 27).



**Figure 27** : L'indicateur  $h/w$  est défini comme le rapport entre la hauteur  $h$  et la largeur  $w$  de la rue canyon.

Plusieurs études montrent que si ce rapport est supérieur à 1, les effets de réduction de l'îlot de chaleur par la présence du toit végétalisé sont négligeables au niveau des piétons (*Sahnoune et Benhassine, 2017; Zhang et al. 2019*).

Cet indicateur présente une difficulté liée à sa propre formulation. En fait, il est difficile d'attribuer une valeur spécifique à chaque toit individuellement, car cet indicateur contient des informations relatives au réseau routier environnant plutôt qu'au toit individuel. Pour le définir, il serait possible de considérer une valeur moyenne dans une zone circulaire comme pour le GRCF, mais la définition formelle de cette moyenne n'est pas claire et, pour des raisons d'ordre technique liées à son implémentation en Python, elle n'a pas été explorée dans cette étude pour le moment.

Pour comprendre comment lier formellement le GRCF à la réduction de l'îlot de chaleur, on fait référence à l'étude présentée par (*Ng, 2012*).

L'auteur présente une série de simulations effectuées pour deux configurations, une de densité moyenne et l'autre de densité élevée. Pour les deux configurations, il a étudié la variation de l'îlot de chaleur urbaine en faisant varier l'indicateur GRCF.

Dans le cas de tissu urbain à densité moyenne élevée, comme Nantes intra-boulevard, l'auteur montre deux résultats fondamentaux :

1. La présence de végétation sur le toit permet de réduire la température de surface des toits jusqu'à 6 - 7 °C
2. La réduction de l'îlot de chaleur urbain, définie comme réduction de la température de l'air, est directement proportionnelle au GRCF.

En particulier, l'auteur indique que pour un GRCF de 90 %, la réduction de l'îlot de chaleur urbain (RICU) est de 0,5 °C. En utilisant ces résultats, il est possible d'extrapoler une loi de corrélation linéaire du type :

$$\text{RICU} = \frac{0,5 * \text{GRCF}}{0,9}$$

Cette formule peut-être rentrée dans le calculateur de champs de QGIS afin d'être utilisée comme modèle simplifié pour estimer le potentiel de réduction de l'ICU des toits plats dans la zone analysée.

### 3.6.4 Surface vert visible

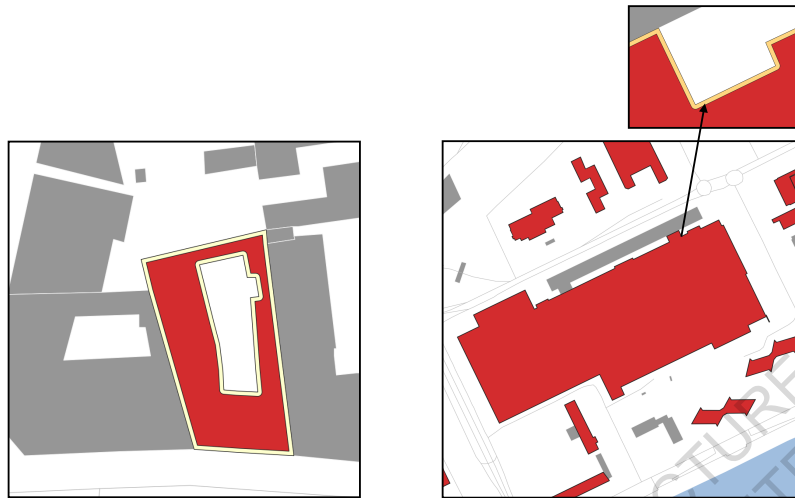
L'impact des toits de jardin sur le paysage dépend de l'extension de la zone verte visible depuis les structures environnantes. Intuitivement, cela se produit lorsque le toit jardin est situé sur un bâtiment avec une surface importante et relativement peu élevée par rapport aux bâtiments autour. Il est clair que ce critère dépend à la fois d'indicateurs architecturaux (l'aire effective de la toiture recouverte par la végétation) et d'indicateurs de la forme urbaine liée à la visibilité du toit depuis les zones environnantes.

Le concept de surface verte effective est issu d'une considération liée à la norme NF-DTU 43.1 qui établit une largeur des zones stériles d'au moins 40 cm autour du périmètre du toit, pour des raisons liées à la sécurité aux incendies. Ces zones sont constituées de matériaux anti-racines tels que du gravier ou du béton qui ne permettent pas la croissance de la végétation et servent par conséquent de barrière anti-feu.

La réalisation des zones stériles obligatoires sur les surfaces de toit permet de définir l'aire disponible effective pour la couche végétale, ou « Roof Available Area » (RAA). Dans QGIS, la RAA est définie par le calculateur de champs à l'aide de la commande suivante :

Air ( buffer( \$geometry ,-0.4 ) )

Comme on peut le voir en figure 28, la RAA a un impact important sur les surfaces de forme petite et irrégulière des bâtiments et minimale sur les bâtiments de très grande surface.

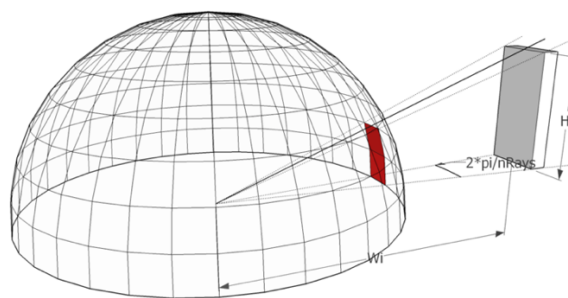


**Figure 28 :** Les deux figures illustrent le concept de RAA. À gauche, le RAA est nettement inférieur à la surface totale du toit. À droite, la différence entre la RAA et la surface totale du toit est négligeable.

Le deuxième aspect qui influence le paysage est lié à la visibilité du toit. En fait, le toit végétal n'apporte aucune amélioration du paysage s'il n'est pas visible. En analyse de la forme urbaine, on utilise le facteur de vue du ciel ou « Sky view factor » (SVF). Le SVF correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée (Colombert, 2008). Ce facteur ne dépend ni de la latitude, ni de l'orientation, ni même du moment de l'année, mais seulement de la géométrie de l'espace. La valeur du SVF est exprimée en pourcentage (0-1).

La SVF est calculée avec la formule de Bernard, où  $H_i$  et  $W_i$  sont définis dans la figure et  $n$  est le nombre de rayons envoyés du point central de la surface d'analyse à la sphère céleste.

$$SVF = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \left( \arctan \left( \frac{H_i}{W_i} \right) \right)$$



**Figure 29 :** Méthode de calcul pour le facteur de vue du ciel proposée par Bernard et al., 2018.



En utilisant le plugin T4QG, il a été possible de calculer le SVF sur les toits de chaque bâtiment en lançant le script suivant dans la console Python :

```
svfRoof = SkyViewFactorOnTopOfRoof(buildings, nRays=64,  
maxRayLen=100.0, elevationFieldName='HAUTEUR', method=2018,  
background=True, nsegm=1)
```

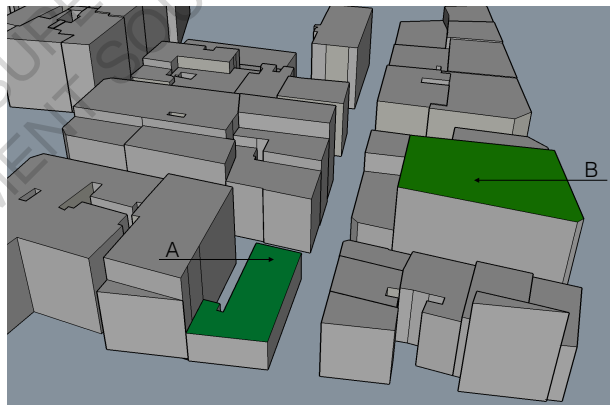
Pour analyser le facteur de vue des toits verts par rapport aux bâtiments environnants, on considère l'indicateur complémentaire au SVF, c'est-à-dire le facteur  $(1 - \text{SVF})$ .

Lorsque  $(1 - \text{SVF})$  est nul, le toit ne « voit que le ciel » et, par conséquent, la couverture végétale ne peut pas être vue depuis les bâtiments environnants. Le toit vert n'a donc pas d'impact sur l'amélioration du paysage urbain. En revanche, lorsque  $1 - \text{SVF}$  tend vers 1, la visibilité du toit vert est maximale.

Donc pour calculer le potentiel l'impact paysager des toits verts, on définit la surface verte visible (SVV) avec la formule suivante :

$$\text{SVV} = \text{RAA} * (1 - \text{SVF})$$

L'indicateur SVV est donc une estimation approximée de la surface verte (en m<sup>2</sup>) visible depuis les bâtiments environnants. Selon la formule proposée, un espace vert ayant le facteur SVF tendant vers 1, quelle que soit sa surface, n'a pas d'impact paysager.



**Figure 30 :** La figure illustre le concept de SVV. La surface du toit du bâtiment B, bien qu'elle soit supérieure à celle du bâtiment A, n'a aucun impact sur le paysage car elle n'est pas visible depuis les bâtiments environnants.

L'indicateur identifié comme SVV peut être compris intuitivement à partir de la figure 30. Le bâtiment A a une couverture végétale inférieure à celle du bâtiment B, mais son impact sur l'amélioration du paysage est plus important, car elle est visible alors que pour le toit du bâtiment B, qui est totalement exposé à la vue du ciel, elle ne l'est pas.



La méthode d'analyse multicritères comprend un ensemble d'outils quantitatifs pour l'évaluation de solutions alternatives caractérisées par des critères multiples pouvant être contradictoires.

Comme indiqué par *Figueira (2005)*, il existe une multitude d'approches classées dans l'analyse multicritères. En général, elles ont pour objectif commun de prendre des décisions principalement en termes de choix, de classification ou de triage.

L'analyse multicritères appliquée à la détermination du potentiel de réaménagement des toits végétalisés comprend cinq phases :

1. **Normalisation des indicateurs.** Cette étape permet de remettre toutes les valeurs des différents critères pour les avantages sur une même échelle allant de 0 à 3. Ces valeurs peuvent être associées à des scores tels que : insuffisant (0) ; faible (1) ; bon (2) ; excellent (3).
2. **Détermination de coefficients de priorité.** Ces coefficients précisent l'importance relative d'un critère par rapport à l'autre. Par convention, on suppose que la somme des coefficients doit être égale à 1.
3. **Calcul multicritère.** Cela se fait par combinaison linéaire des différents indicateurs avec les coefficients de priorités. Le résultat de cette opération est par définition un nombre réel compris entre 0 et 3. Les étapes 1-2-3 sont répétées pour l'analyse des exigences. Toutefois, puisqu'un seul critère est considéré pour les besoins, dans ce cas les étapes 2 et 3 sont ignorées. La normalisation du critère unique (*sun\_ratio*) dans ce cas est basée sur un score prenant les valeurs suivantes : valeurs 0 (insuffisant) ; 0,5 (suffisant) ; 1 (excellent).
4. **Obtention du potentiel.** Une fois que les bénéfices et les exigences ont été analysés séparément, les deux scores sont multipliés pour obtenir le potentiel. Le résultat obtenu est à nouveau un nombre réel compris entre 0 et 3.
5. **Renormalisation.** On normalise le résultat obtenu selon les trois classes :

0 – 1 **Faible potentiel**

1 - 2 **Potentiel moyen**

2 - 3 **Fort potentiel**

Dans cette analyse, la procédure de normalisation des indicateurs et l'attribution du coefficient de priorité sont arbitraires. En général, pour rendre l'analyse le plus

objective possible, une enquête est réalisée à l'aide de questionnaires adressés à des experts du secteur.

Les questionnaires sont destinés à :

1. Définir les classes de subdivision de chaque indicateur (insuffisante, faible, bon, excellent).
2. Attribuer à chaque critère un coefficient de priorité qui représente son importance relative par rapport aux autres critères et son influence dans la détermination du potentiel global.

Les résultats obtenus de l'enquête sont traités statistiquement afin d'extraire des critères de classification les plus objectifs possibles.

Dans cette étude, n'ayant pas de moyens pratiques pour effectuer des sondages, la normalisation et l'attribution des coefficients ont été effectuées de façon heuristique sur la base des informations tirées de l'analyse bibliographique. Le tableau suivant résume le choix des classes relatives aux trois indicateurs pour les bénéfiques et leurs coefficients de priorité.

|      | ET          | RICU         | SVV        |
|------|-------------|--------------|------------|
| 0    | 0 - 0,01    | 0 - 0,05     | < 100      |
| 1    | 0,02 - 0,08 | 0,05 - 0,125 | 100 - 300  |
| 2    | 0,08 - 0,25 | 0,125 - 0,4  | 300 - 1000 |
| 3    | 0,25 - 1    | > 0,4        | > 1000     |
| Coef | A = 0,5     | B = 0,25     | C = 0,25   |

**Table 1** : Le tableau montre les valeurs de normalisation des 3 indicateurs relatifs aux bénéfiques et leurs coefficients de priorité.

En ce qui concerne la seule exigence analysée, la division en classes normalisées est indiquée dans le tableau suivant :

|           | 0     | 0,5       | 1     |
|-----------|-------|-----------|-------|
| SUN RATIO | < 1 h | 1 h - 3 h | > 3 h |

**Table 2** : Le tableau montre les valeurs de normalisation de "Sun Ratio".

Le potentiel est estimé en tant que produit entre l'évaluation globale des bénéfices et celle de l'exigence.

$$Potentiel = SUN_n * (A * ET_n + B * RICU_n + C * SVV_n)$$

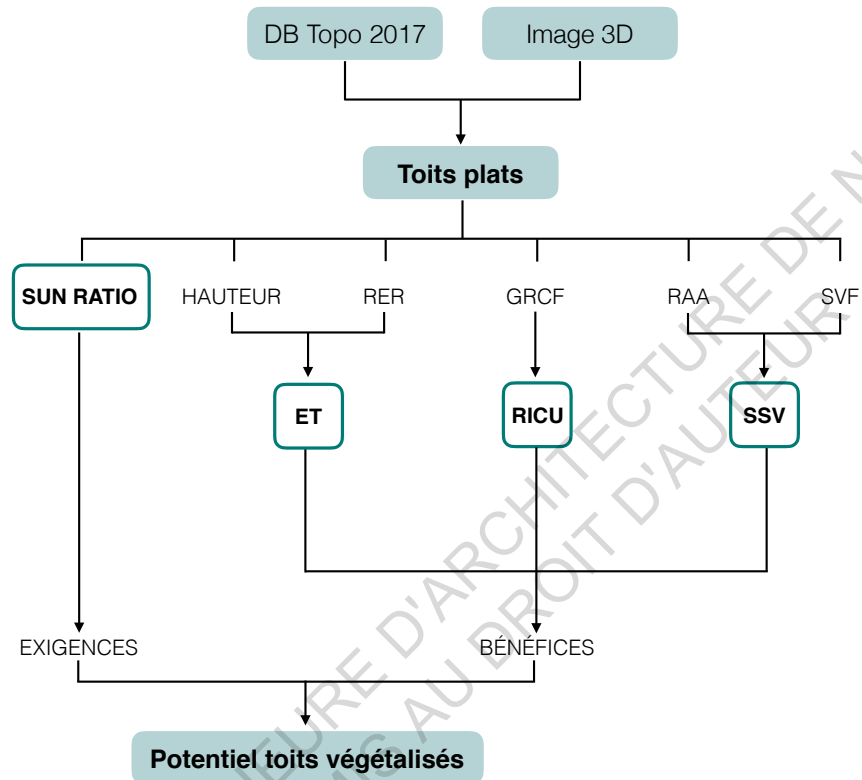
Dans cette expression l'indice n signifie que les indicateurs utilisés sont normalisés. La structure multiplicative de cette formule s'explique par le raisonnement suivant : bien qu'un toit puisse présenter de nombreux avantages, si l'évaluation de ses exigences est insuffisante ( $SUN_n = 0$ ), son potentiel sera globalement insuffisant. De même, un toit pour lequel l'évaluation des exigences est excellente aura un potentiel globalement insuffisant si l'évaluation des bénéfices est nulle. Les opérations de normalisation et de calcul du potentiel sont faites à l'aide du calculateur de champs de QGIS. Le potentiel calculé est un nombre réel compris entre 0 et 3. Pour cela, une normalisation supplémentaire est appliquée selon la division en classes montrée par le tableau 3.

|           | Faible | Moyen | Fort  |
|-----------|--------|-------|-------|
| Potentiel | 0 - 1  | 1 - 2 | 2 - 3 |

**Table 3** : Le tableau montre les valeurs de normalisation du potentiel des toits verts.

### 3.8 Schéma récapitulatif pour le calcul du potentiel

Le diagramme ci-dessous résume la procédure mise en œuvre pour définir le potentiel des toits verts, comme décrit dans les sections précédentes.

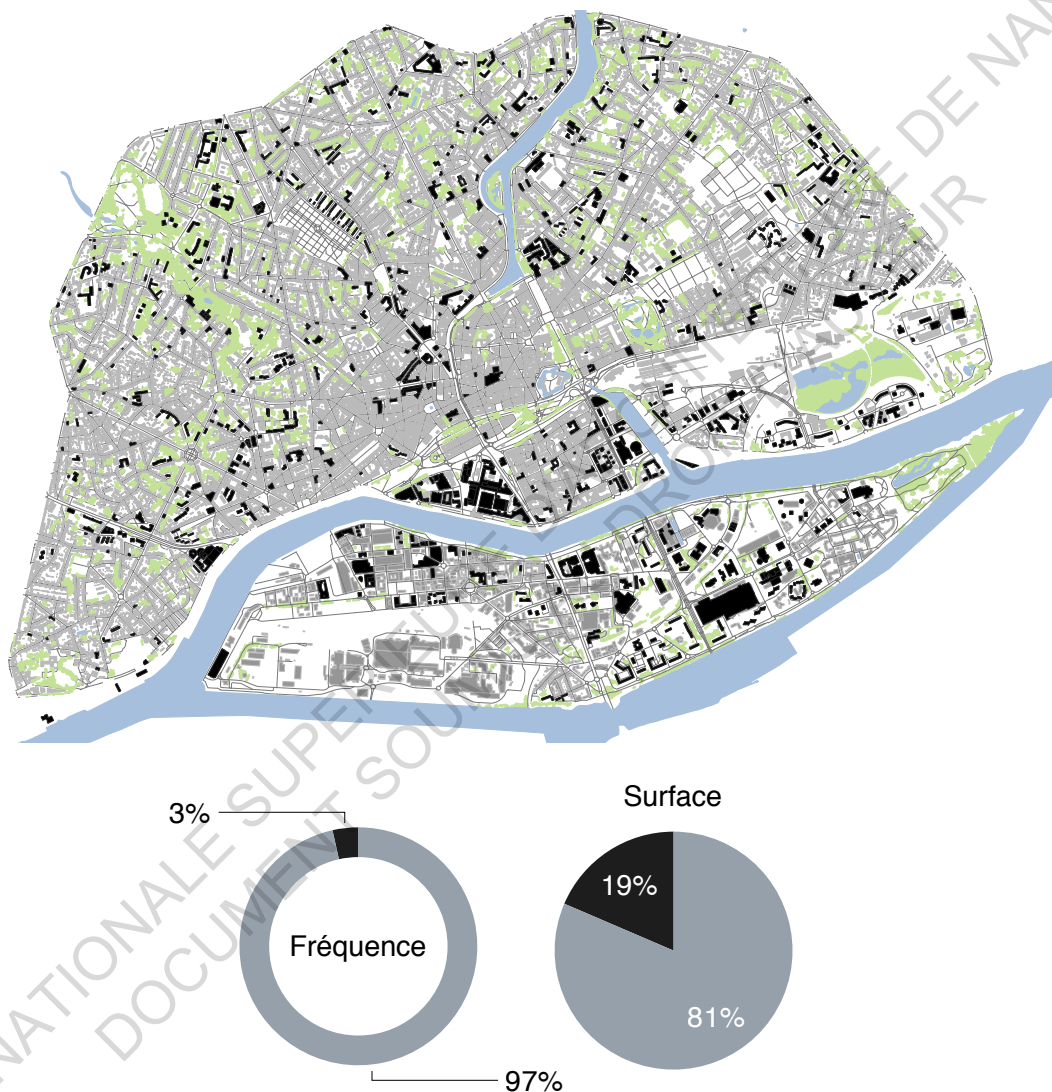


**Figure 31** : Le diagramme montre la procédure effectuée pour définir le potentiel des toits.

## Chapitre 4 : Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont rapportés avec une série de cartographies élaborées en QGIS.

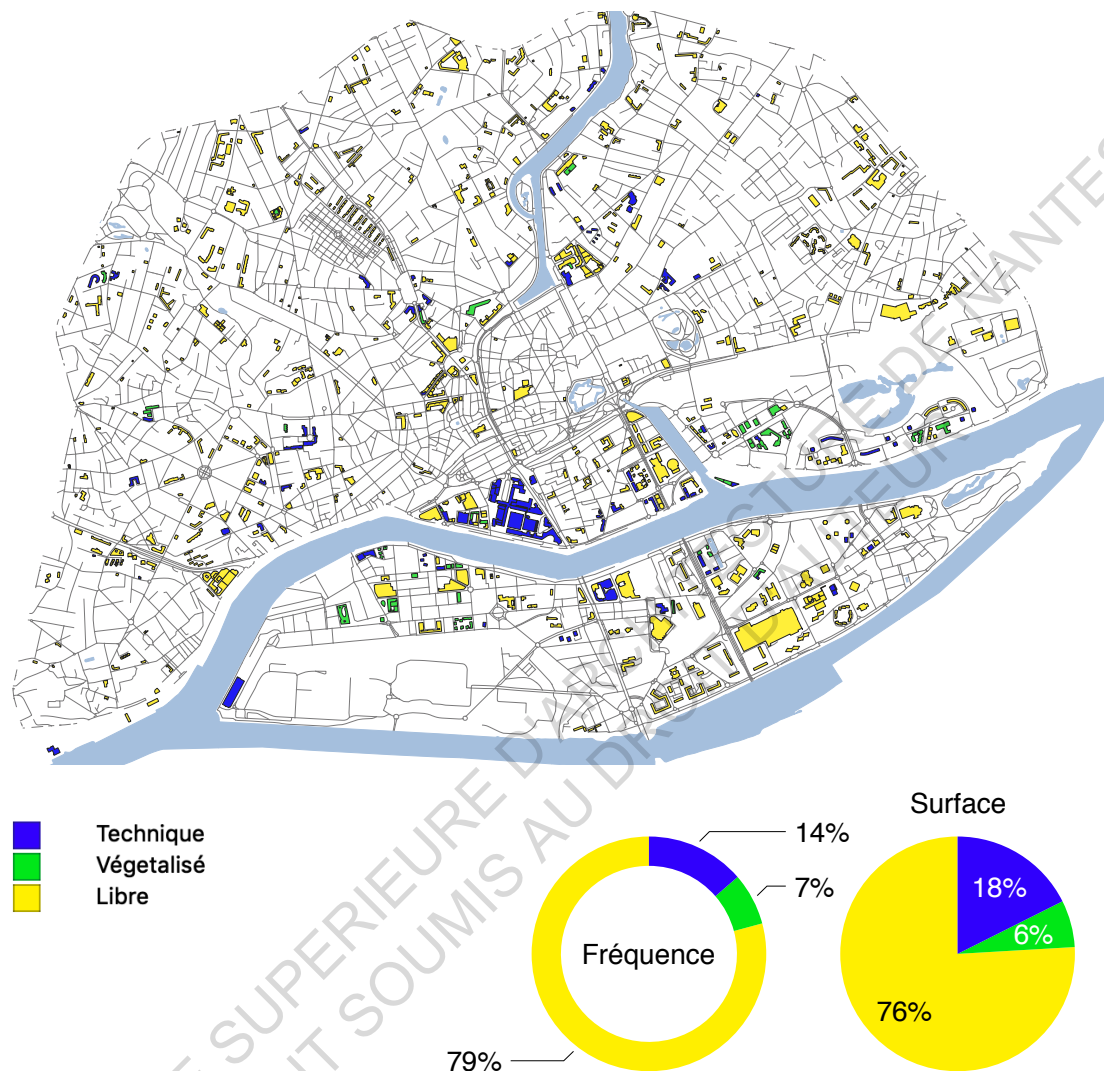
### 4.1 Cartographie des toits plats



**Figure 32** : La cartographie indique le pourcentage de toits plats dans la zone d'étude.

Comme le montre la cartographie de la zone d'étude, 97 % des toits sont en pente et seulement 3 % sont plats, soit 929 toits. Cela correspond à 19 % de la surface du sol bâti dans la zone étudiée, soit 809 064 m<sup>2</sup>.

## 4.2 Classification des toits par types

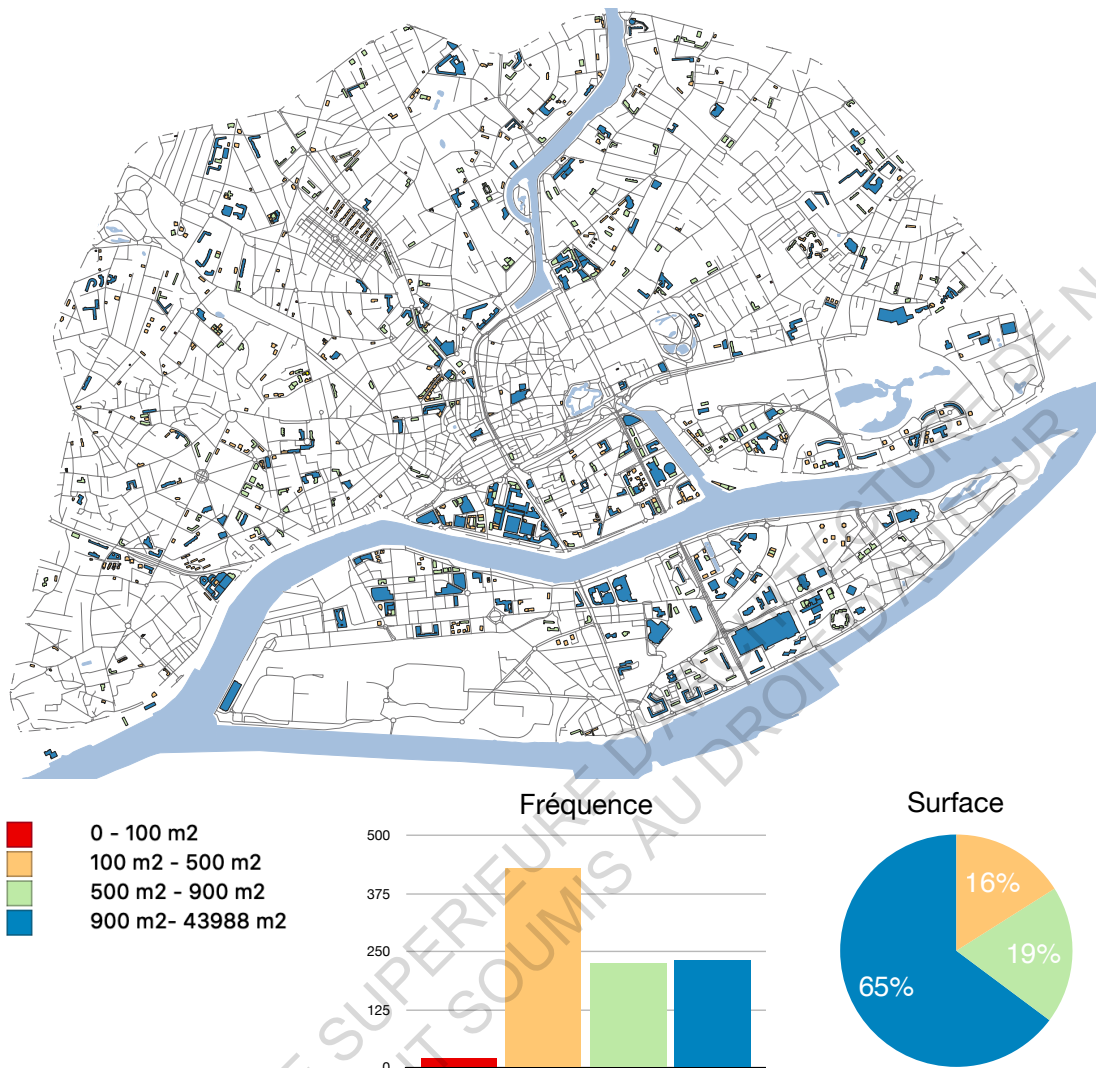


**Figure 33 :** Cartographie des toits plats divisé par : toits avec équipements techniques, toits déjà végétalisés et toits libres.

Dans cette seconde cartographie, seuls les toits plats de la zone d'étude sont visualisés. Les toitures ont été divisées en trois types correspondant aux utilisations des toits à l'état actuel. L'analyse montre que 14 % des toits hébergent des installations techniques, seulement 7 % sont déjà verts, soit 6 % de la surface disponible sur les toits. Le 79 % des toits soit le 76 % de la surface disponible est inutilisé, c'est-à-dire libre de toute installation. Ces résultats montrent d'une part que seulement une petite fraction du potentiel des toitures terrasses est réellement exploitée et, de l'autre, qu'il reste une surface de 614 323 m<sup>2</sup> avec un potentiel d'installation de toiture végétalisée toujours inexplorée.



### 4.3 Classification des toits par surfaces

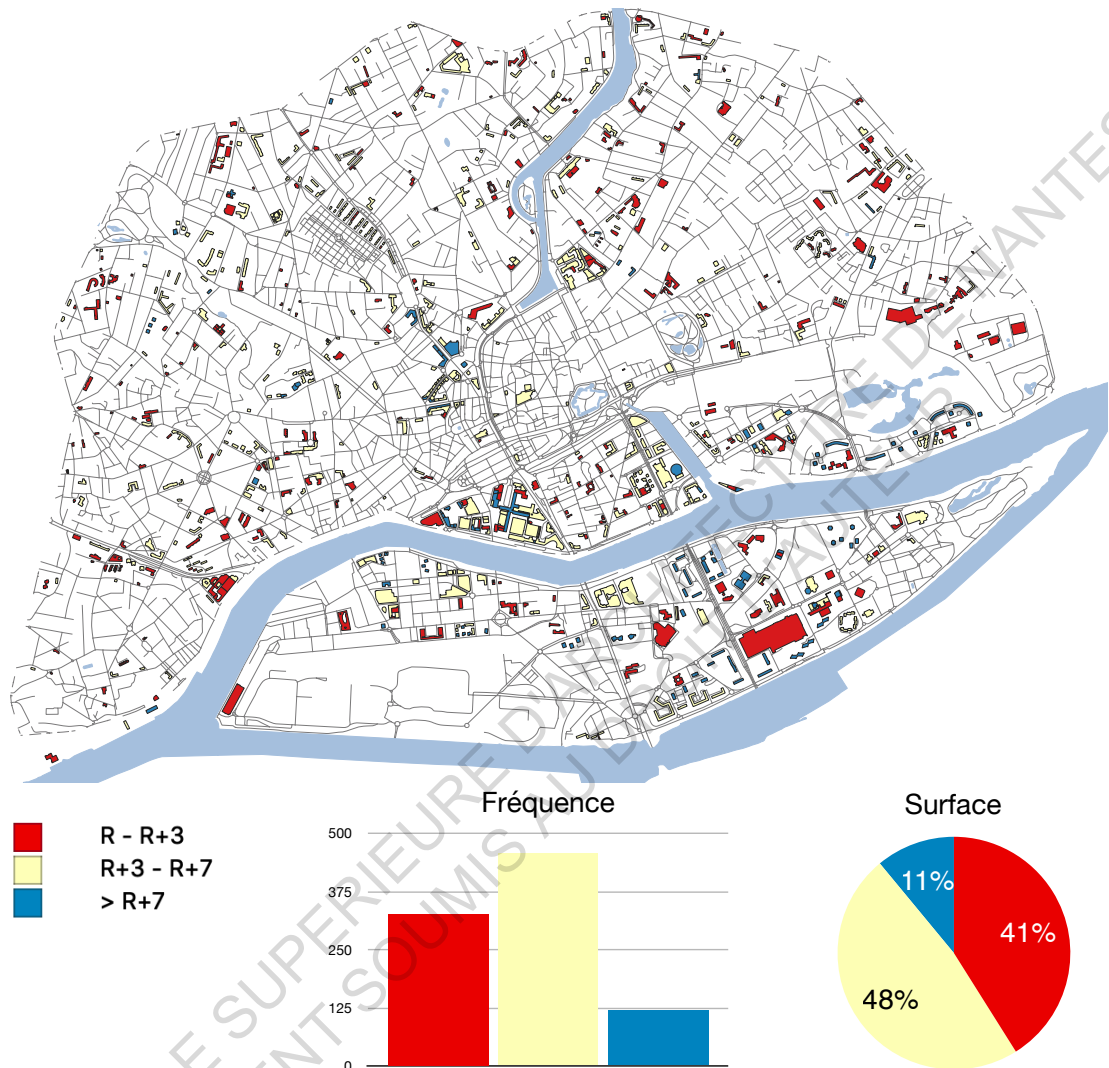


**Figure 34 :** Cartographie des toits plats divisé par extension de surfaces.

Dans cette cartographie, les toits plats sont analysés par leur extension. Conformément aux directives utilisées à Monaco (Allemagne) et à Linz (Autriche), les surfaces inférieures ou égales à 100 m<sup>2</sup> ne sont pas utilisables dans la pratique. Étant de petites dimensions, la transformation en toiture n'apporterait aucune amélioration. Les toits restants ont été divisés en trois cartographies : petites surfaces (100 m<sup>2</sup> - 500 m<sup>2</sup>), moyennes (500 m<sup>2</sup> - 900 m<sup>2</sup>) et grandes surfaces (> 900 m<sup>2</sup>).

Les statistiques montrent que la plupart des toits analysés sont de petite extension. Toutefois, plus que 65 % des surfaces disponibles correspondent à des toits de grande dimension.

## 4.4 Classification des toits par hauteur



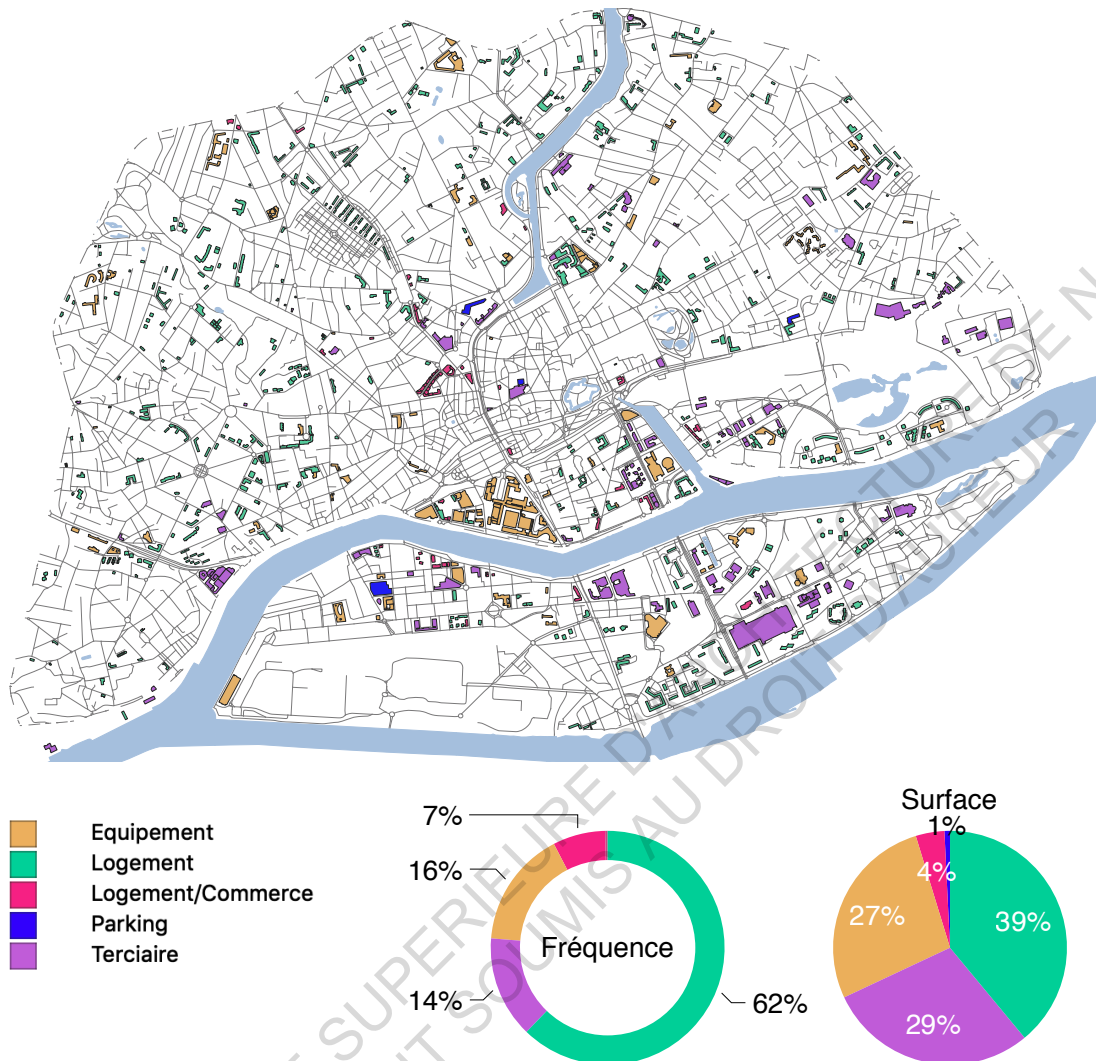
**Figure 35** : Cartographie des toits plats par hauteur.

Dans cette cartographie, les toits sont classés en fonction de leur hauteur. La subdivision était divisée en trois catégories : bâtiments bas d'une hauteur comprise entre 3 m et 12 m, bâtiments moyens d'une hauteur comprise entre 12 m et 24 m et bâtiments hauts de plus que 24 m.

Les graphiques montrent que le pourcentage de bâtiments de plus de 24 m est nettement inférieur à celui des deux autres classes. La plupart des surfaces disponibles correspondent à des bâtiments de faible ou moyenne hauteur.



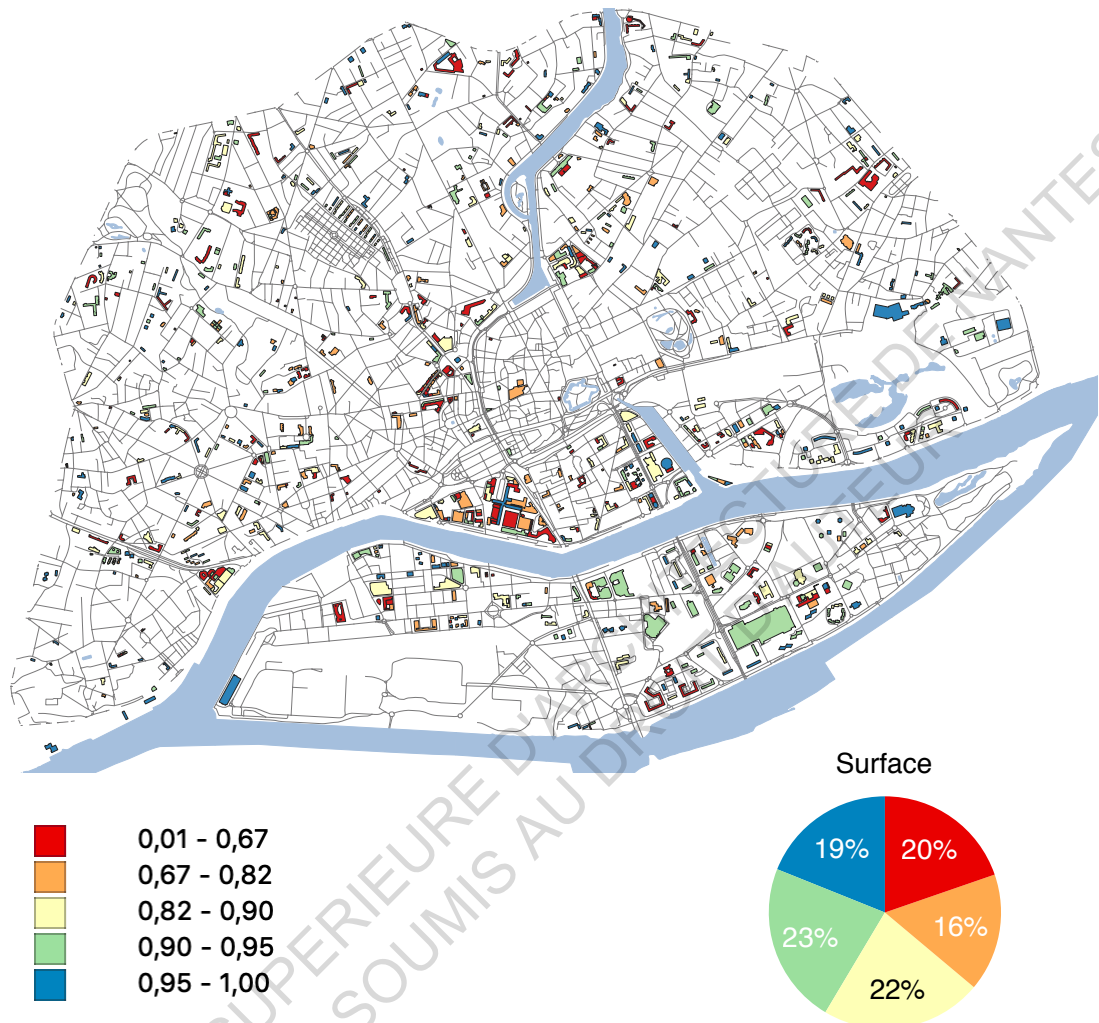
## 4.5 Classification des bâtiments par programmation



**Figure 36** : Cartographie des toits plats par programmation des bâtiments.

Les toits plats ont été classés également en fonction de leur programmation. Les statistiques calculées montrent que 62 % des toits plats ont été identifiés sur des bâtiments résidentiels, 16 % sur des bâtiments d'équipement tels que des hôpitaux, des écoles, des centres sportifs et culturels, 14 % des toits plats correspondent à de bâtiments tertiaires alors que seulement 7 % sont situés sur des bâtiments mixtes avec des activités commerciales au rez-de-chaussée et des appartements aux étages supérieurs. Si l'on considère la même classification en termes de surfaces, on peut voir que les toits plats au-dessus des logements et des parkings occupent en moyenne une surface plutôt négligeable par rapport aux toits avec équipement et programmation tertiaire.

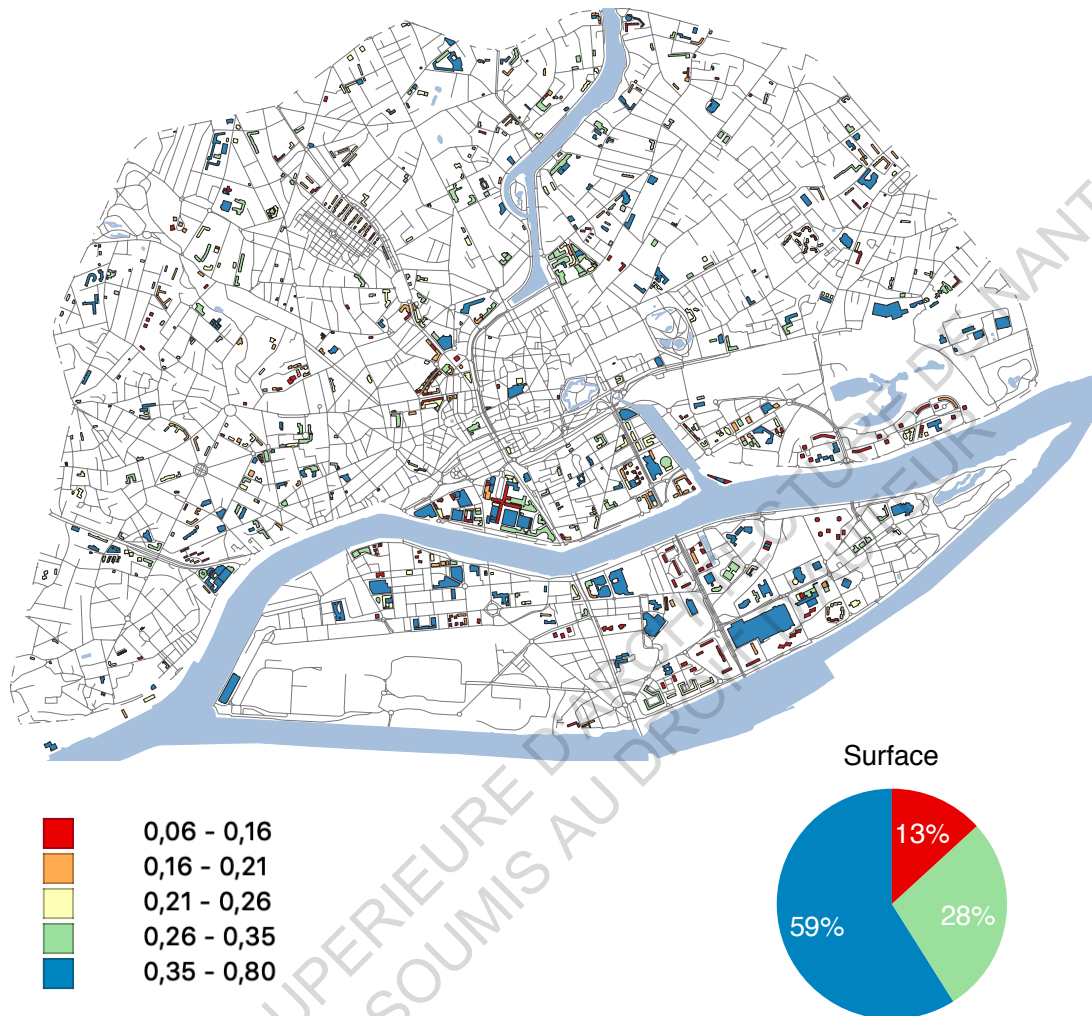
#### 4.6 Classification des toits par “Sky View Factor”



**Figure 37** : Cartographie de l'indicateur “Sky View Factor”.

Dans cette cartographie, les valeurs de SVF pour chaque bâtiment sont divisées par quantile. Avec ce regroupement, chaque classe contient un nombre égal d'éléments. Le choix de diviser les classes de cette manière s'explique par le fait qu'en définissant les classes avec un espacement linéaire entre 0 et 1, la plupart des éléments auraient été identifiés dans une ou deux classes seulement. De cette manière, la cartographie n'aurait apporté aucune information sur la distribution des classes. La distribution des surfaces est presque uniforme dans ce cas.

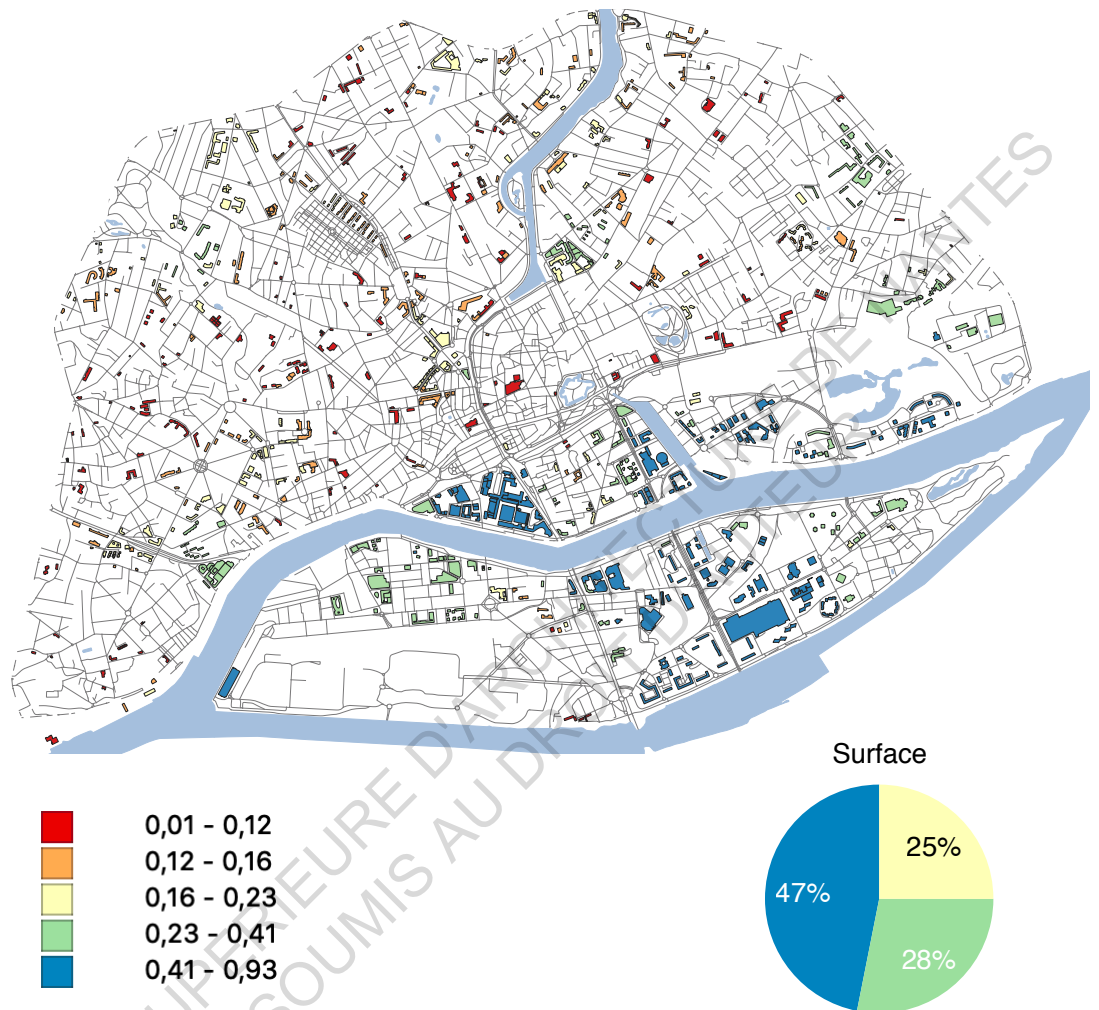
## 4.7 Classification des toits par “Roof to Envelope Ratio”



**Figure 38** : Cartographie de l'indicateur “Roof to Envelope Ratio”.

Dans la septième cartographie, les toits sont classés selon le RER. Pour cet indicateur aussi la classification a été effectuée par quantile. Le diagramme circulaire montre que 13 % de la surface totale des toits plats a des valeurs comprises entre 0,06 et 0,16, donc un très faible RER. D'autre part, 59 % de la surface totale des toits plats a un RER compris entre 0,35 et 0,80. Ces données montrent que plus de la moitié de la surface totale des toits plats analysés est associée à une valeur de RER potentielle favorable à l'installation d'un toit jardin comme moyen d'économiser de l'énergie.

## 4.8 Classification des toits par “Green Roof Coverage Fraction”

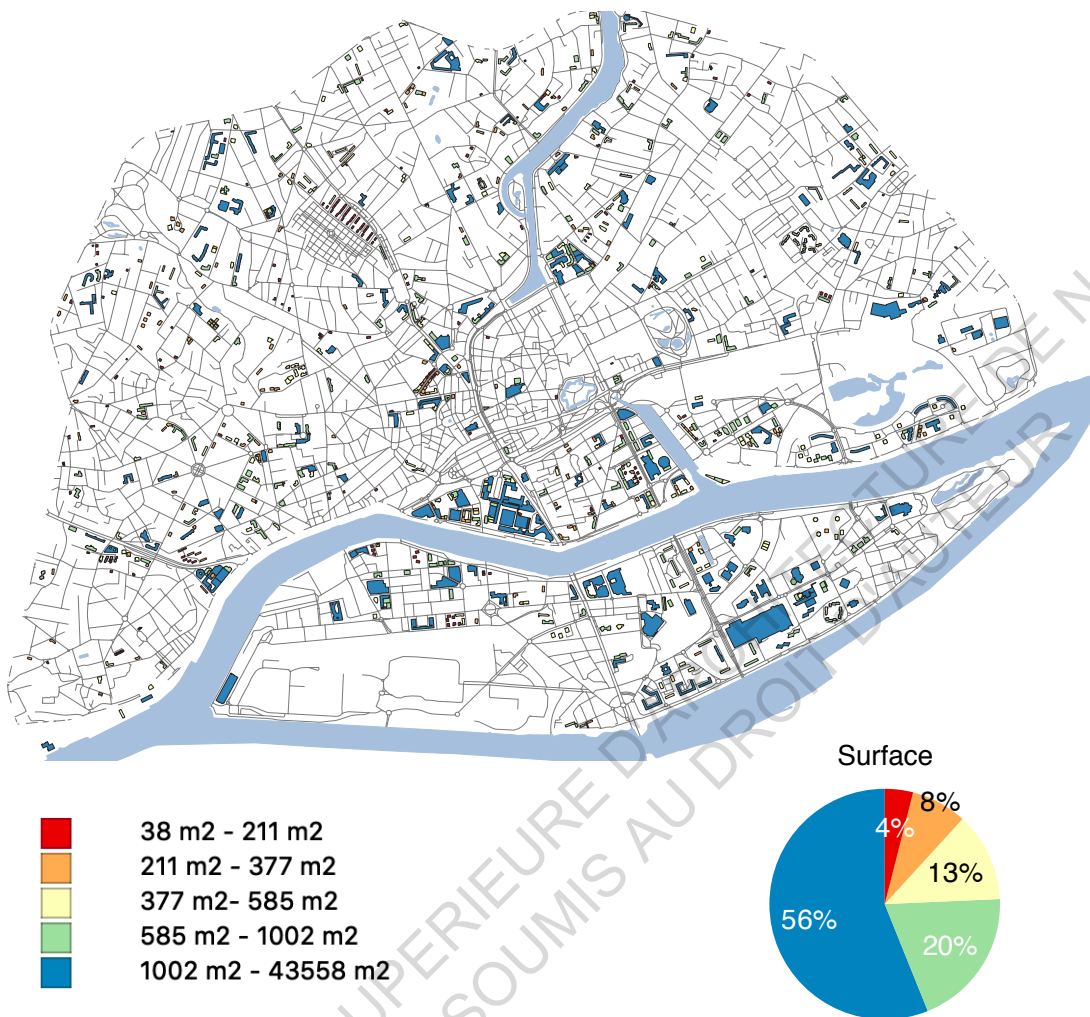


**Figure 39** : Cartographie de l'indicateur “Green Roof Coverage Fraction”.

Le classement a été effectué par quantile. Cette carte montre le pourcentage de surfaces par rapport au GRCF. Le graphique montre que les toits compris entre 0,01 et 0,16 représentent un pourcentage négligeable des surfaces totales des toits plats. Par ailleurs, 47 % de la surface totale des toits plats a des valeurs de GRCF comprises entre 0,41 et 0,93. Ces données montrent que les zones à grande densité d'immeubles ayant toits plats présentent un fort potentiel de réduction de l'îlot de chaleur si elles sont converties en toits verts.



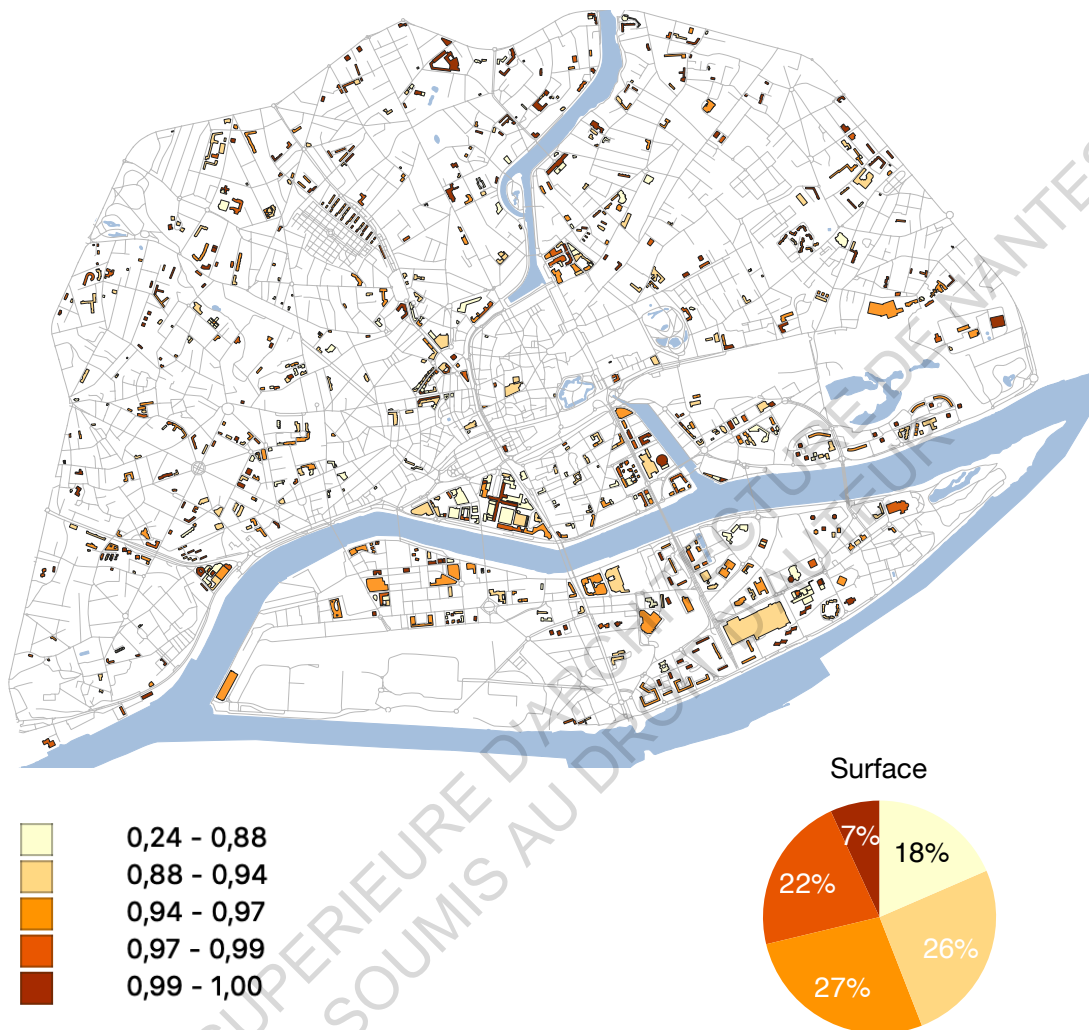
## 4.9 Classification des toits par “Roof Available Area”



**Figure 40** : Cartographie de l'indicateur “Roof Available Area”.

La cartographie montre la distribution des RAA sur la zone d'étude. Les cinq classes de cet indicateur ont également été divisées par quantile. Presque, la moitié des toits plats de la zone analysée, soit 76 % de la surface totale, est potentiellement associée à des aires végétalisées assez importantes (RAA > 500 m<sup>2</sup>).

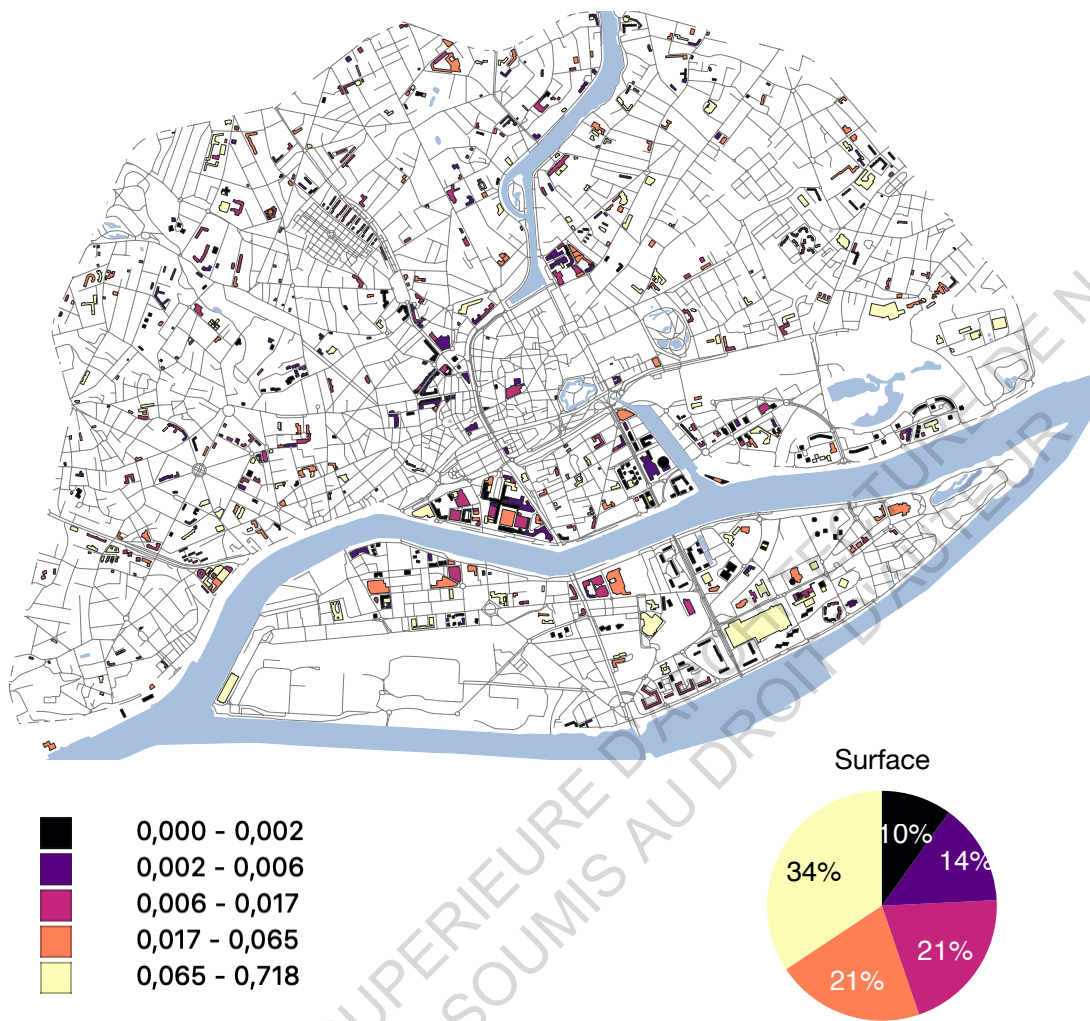
#### 4.10 Classification des toits par "Sun ratio"



**Figure 41** : Cartographie de l'indicateur "Sun ratio".

La cartographie montre le pourcentage d'ensoleillement des toits plats. Les classes sont divisées par quantile. Le graphique indique que seulement 7 % de la surface totale des toits plats a une exposition maximale. Néanmoins, si l'on considère que l'exigence minimale pour l'installation de toits verts est égale à trois heures de lumière par jour en moyen, ce qui correspond à une valeur de sun ratio de 0,25, on peut en déduire que la presque totalité des surfaces des toits plats de la zone d'analyse satisfait cette condition. Un facteur à prendre en compte pour interpréter ce résultat est le modèle de ciel adopté. En fait, puisqu'on a considéré un ciel toujours dégagé, l'estimation obtenue est relativement « optimiste ».

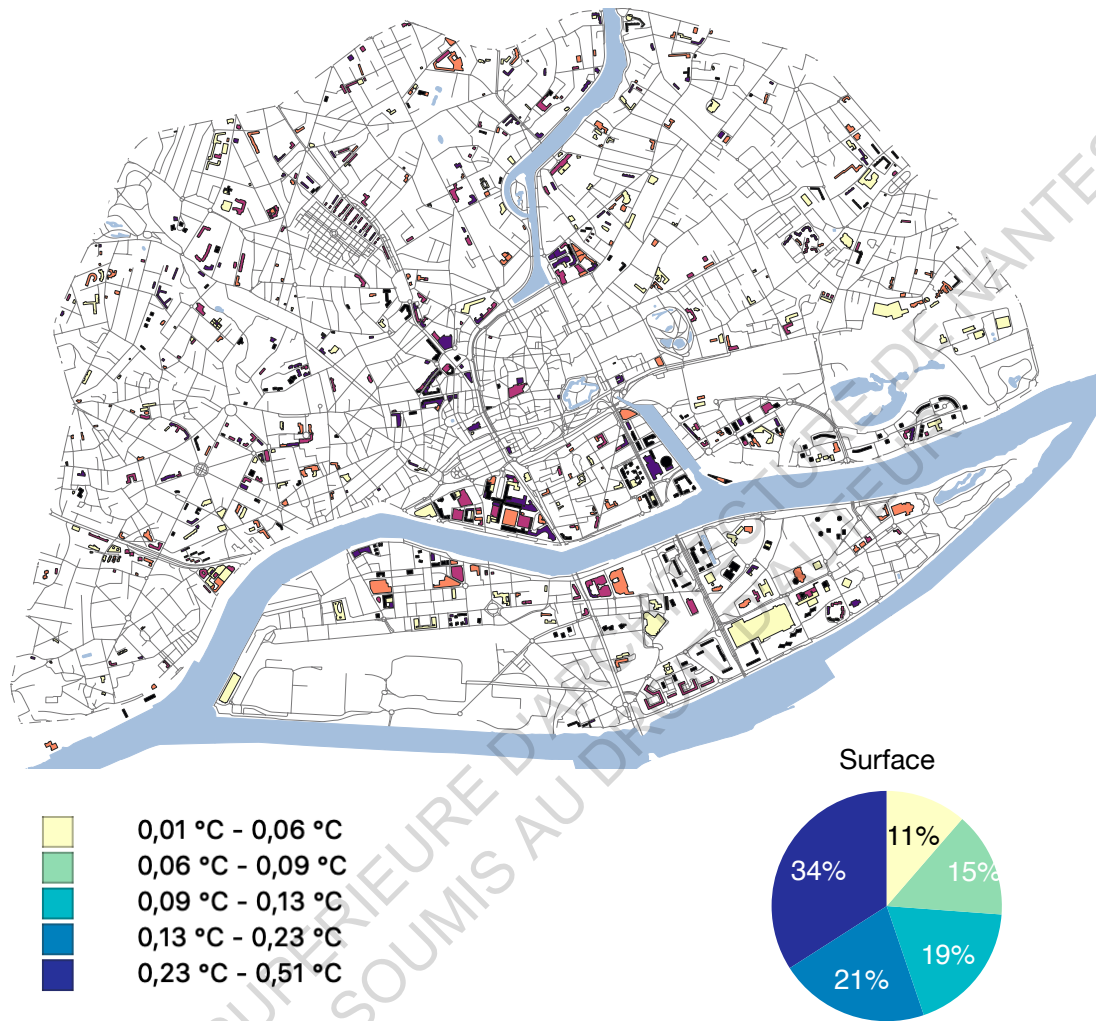
#### 4.11 Classification des toits par “Efficacité thermique”



**Figure 42 :** Cartographie de l'indicateur “Efficacité Thermique”.

Dans cette cartographie, les toits sont classés en fonction de leur efficacité thermique et les classes sont développées par quantile. Les données obtenues montrent que le pourcentage des surfaces des toits plats présentant une bonne efficacité thermique n'est que de 34 % par rapport à la surface totale des toits analysés.

## 4.12 Classification des toits par “Réduction de l’Îlot de Chaleur”

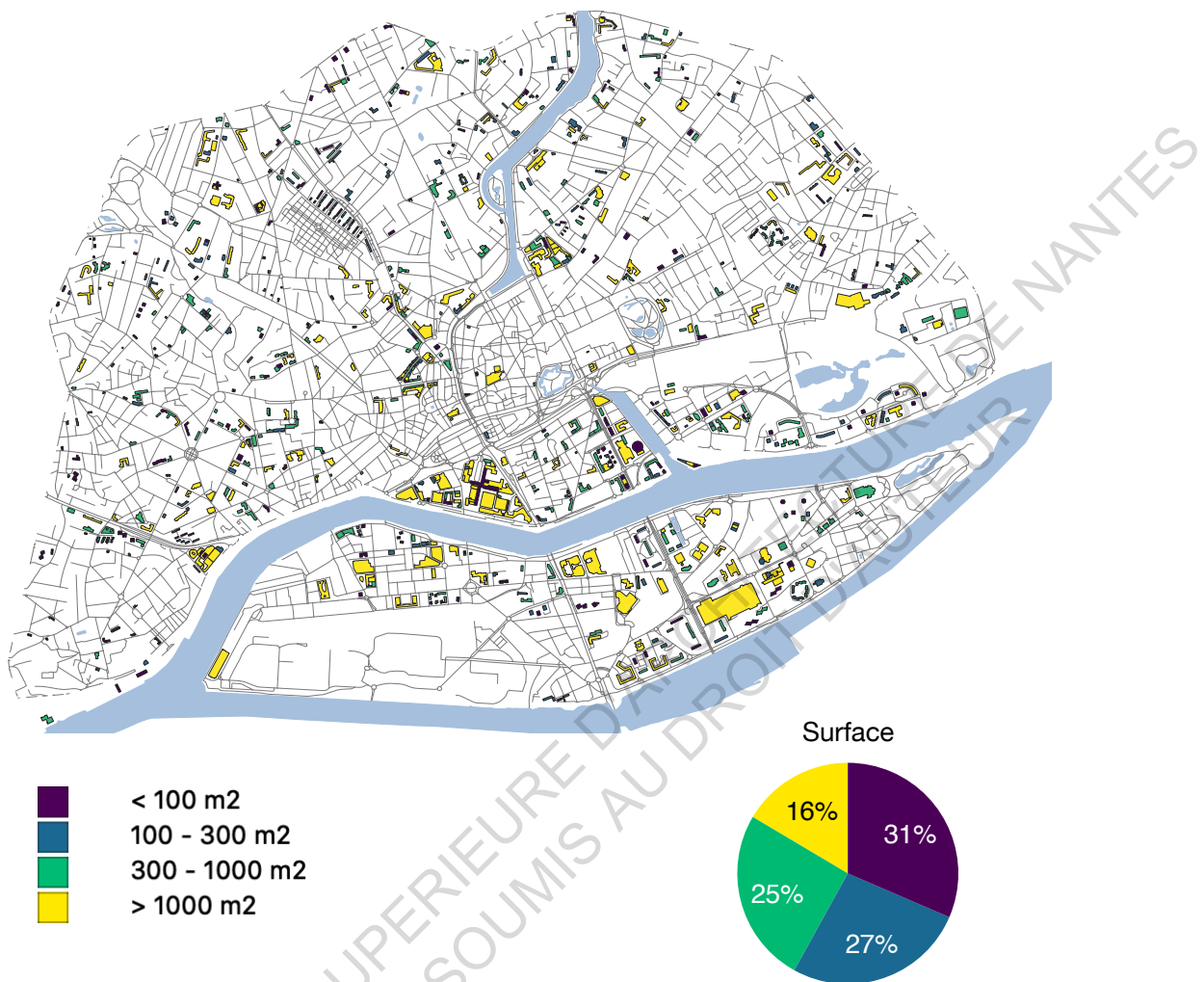


**Figure 43 :** Cartographie de l'indicateur "Réduction de l'Îlot de Chaleur".

Cette cartographie montre les toits plats de la zone d'intérêt classés par quantile en fonction de leur capacité à réduire l'îlot de chaleur. Le graphique montre que si 34 % des surfaces des toits plats étaient transformées en toits végétalisés, il y aurait, en accord avec le modèle utilisé, une réduction des températures allant de 0,1 à 0,5 °C.



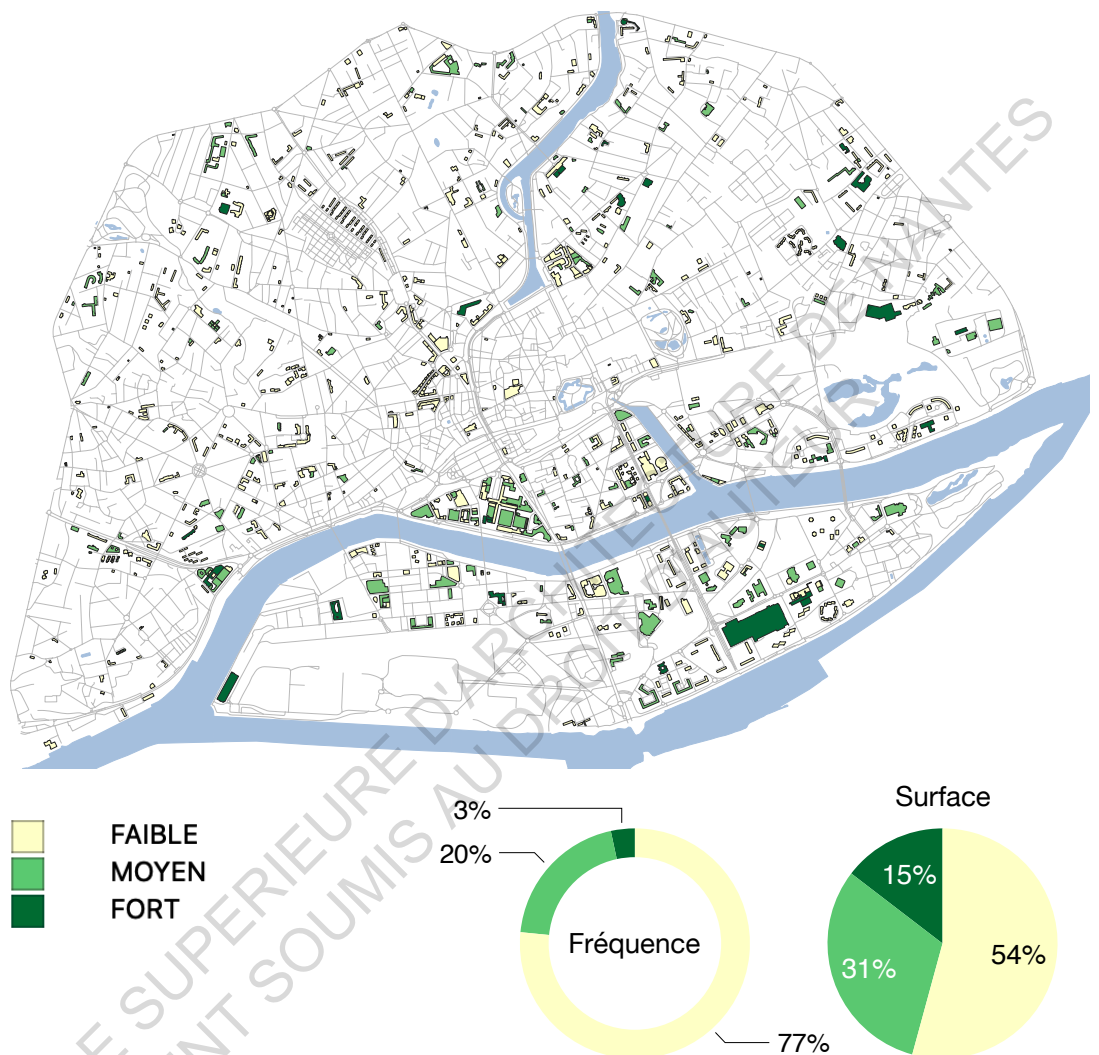
#### 4.13 Classification des toits par “Surface Vert Visible”



**Figure 44 :** Cartographie de l'indicateur “Surface Vert Visible”.

La cartographie montre les toits classés en fonction de leur espace vert visible depuis les bâtiments environnants. Les toits dont la surface verte est inférieure à 100 m<sup>2</sup> ont un impact limité sur le paysage, mais globalement, ils correspondent à 31 % de la surface totale des toits plats. Le graphique montre également que 41 % des surfaces des toits ont une valeur de SVV supérieure à 300 m<sup>2</sup> avec un impact potentiellement important sur le paysage.

#### 4.14 Cartographie du potentiel de toits végétalisés



**Figure 45** : Potentiel de végétalisation des toits dans la zone d'intérêt.

Cette cartographie montre le potentiel des toits végétalisés de la zone d'analyse. Comme le montrent les statistiques, 77 % des toits ont un faible potentiel, 20 % un potentiel moyen et seulement 3 % des toits ont un fort potentiel. En règle générale, les toits à fort potentiel réalisent au moins deux des avantages des toits végétalisés, alors que les toits à potentiel moyen réalisent au moins un avantage. Compte tenu de cette considération, les toits où une couverture végétale serait envisageable correspondent à 23 % des toits analysés, soit à presque la moitié (46 %) de la surface disponible sur les toits de la ville.

## Chapitre 5 : Conclusions et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire a permis de développer une méthodologie d'analyse de la forme urbaine, afin d'estimer le potentiel de réaménagement des toits de la ville.

La méthodologie a été appliquée sur les toits plats de Nantes intra boulevard et île de Nantes pour estimer le pourcentage de surface disponibles reconvertisibles en toits verts.

La méthode repose sur l'analyse des exigences et des bénéfices et sur l'identification de leurs liens avec les paramètres de la forme urbaine. Ce type d'enquête peut être généralisé à d'autres types de toiture à condition de prendre en compte les exigences et bénéfices spécifiques du type d'utilisation envisagée sur la toiture.

Le principal résultat obtenu grâce à ces travaux indique que près de la moitié des surfaces des toits plats examinés pourrait être prise en compte pour l'installation de toits végétaux.

Ce résultat doit être interprété à la lumière des hypothèses à la base de l'analyse. En premier lieu, on a pris en compte les critères relatifs aux exigences et aux bénéfices liés exclusivement à la forme urbaine, en laissant de côté les facteurs techniques, structurels, réglementaires ou liés aux facteurs climatiques et météorologiques.

Prenant en compte tous ces critères, on arriverait à des hypothèses d'étude beaucoup plus restrictives. Il est donc raisonnable de s'attendre que les résultats obtenus représentent une estimation excédentaire des toits effectivement convertibles en toits jardin. Néanmoins, l'analyse effectuée reste un outil intéressant pour un repérage rapide des toits à plus fort potentiel. Une fois que les sites les plus intéressants sont identifiés à l'aide de cette approche, l'étude peut être raffinée par une analyse technique plus détaillée.

Un autre aspect à considérer dans la discussion des résultats est lié à normalisation et à l'attribution de coefficients de priorité pour chaque critère analysé. Pour que les résultats soient fiables, une enquête devrait être menée parmi les experts du domaine, afin de rendre la démarche cohérente avec leurs avis.

Enfin, la zone analysée est relativement petite comparée à la taille réelle de la ville. Cette restriction sur la zone d'étude a certainement un impact sur les résultats obtenus. Comme le montre l'exemple de la ville de Paris, le pourcentage de toits plats et leur superficie moyenne augmentent dans les zones périphériques de construction plus récente. Cette considération permet de conclure qu'en élargissant la zone d'analyse, les pourcentages obtenus peuvent augmenter aussi.

Afin de développer ce type d'étude sur de plus grandes surfaces, l'utilisation d'une méthode de télédétection des toits permettant d'identifier automatiquement les toits plats à partir d'images 3D est impérative. Un ultérieur facteur limitant a été l'indisponibilité des images satellites plus récentes compatibles avec la dernière version de la base de données BD Topo.

Néanmoins, les perspectives de ce travail restent prometteuses. Les résultats obtenus valident la faisabilité de la démarche et indiquent des stratégies possibles pour relever les limites mises en évidence.

De nouvelles pistes de recherche envisageables seraient :

1. Étendre cette méthodologie pour analyser différents usages des toits (énergétique, habités);
2. Développer un système de recommandation capable d'identifier l'utilisation idéale d'un toit en prenant en compte tous les critères;
3. Automatiser la méthodologie, en supprimant toutes les phases manuelles, comme la détection des toits plats;
4. Développer des modèles de référence plus précis (basés soit sur des simulations numériques directes soit sur des données expérimentales) pour l'estimation des exigences et des bénéfices à partir des indicateurs sélectionnés.

## Références

Antonini, E., Gaspari, J. and Olivieri, G. (2012). Densifying to upgrading : strategies for improving the social housing built stock in Italy. *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, 4, 306-314.

Apur (2013). Etude sur le potentiel de végétalisation des toitures terrasses à Paris. Report.

Bay Localize. (2007). Tapping the potential of urban rooftops rooftop resources neighborhood assessment. Report.

Banting, D., Hitesh, D., James, L., and Paul, M. (2005) Report on the environmental benefits and costs of green roofing. Ryerson University, Ontario, Canada.

Barnes, K., J. Morgan, and M. Roberge. (2001). Impervious surfaces and the quality of natural built environments. Baltimore: Department of Geography and Environmental Planning, Towson University.

Bellini, O. E., & Mocchi, M. (2019). Rooftop architecture e urban roofscape: azioni trasformativa per la nuova città verticale. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 17.

Bódis, K., Huld, T., Pinedo Pascua, I., Taylor, N., Jäger-Waldau, A. Technical potential of rooftop photovoltaics in EU member states, regions and cities, JRC Technical Report, 2017, JRC 110353

Boukarta S., Mokhtari A. (2017) Analyse multicriterio pour une caractérisation énergétique des formes urbaines. *Courrier du Savoir*, 24, 163-174.

Brenneisen, S. (2003). The benefits of biodiversity from green roofs: Key design consequences, p. 323–329. In Proc. of 1st North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Chicago. 29–30 May 2003. The Cardinal Group, Toronto.

Brenneisen, S. (2004). Green roofs: How nature returns to the city. *Acta Hort.* 643:289–293. Cheney, C. 2005. New York City: Greening Gotham's rooftops, p. 130–133. In EarthPledge. Green roofs: Ecological design and construction. Schiffer Books, Atglen, Pa. City of Chicago, Department of Environment. 2004. Green roofs open to the public.

Busch, A. (1991) *Rooftop Architecture : The art of going through the roof*. New York : Henry Holt and Company Inc.

Casnabet R. (2016). Réinventer Paris à travers le prisme des toits. Report. [https://issuu.com/casnabetrphael/docs/memoire\\_issuu](https://issuu.com/casnabetrphael/docs/memoire_issuu)

CEREMA. (2014). Identifier le potentiel d'installation de panneaux solaires sur toiture. Report.

Coffman, R.R., and G. Davis. (2005). Insect and avian fauna presence on the Ford assembly plant ecoroof, p. 457–468. In Proc. of 3rd North American Green Roof

Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC. 4–6 May 2005. The CardinalGroup, Toronto.

Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Paris. France.

Connelly, M., and K. Liu. (2005). Green roof research in British Columbia: An overview, p. 416–432. In Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Corner, J. (2003). Espansioni urbane orizzontali. Lotus International, 117,116-120.

Cushman, J.C. (2001). Crassulacean acid metabolism. A plastic photosynthetic adaptation to arid environments. *Plant Physiol.* 127:1439–1448.

Darmon, O. (2018). Habiter le toit. France.

DeNardo, J.C., A.R. Jarrett, H.B. Manbeck, D.J. Beattie, and R.D. Berghage. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Trans. ASAE* 48:1491–1496.

Department of Health and Human Services. (2005). About Extreme Heat. Centers for Disease Control and Prevention.

Dunnett, N., and N. Kingsbury. (2004). Planting green roofs and living walls. Timber Press, Inc., Portland, Ore.

Ferguson, B.K. (1998). Introduction to stormwater: Concept, purpose, design. John Wiley and Sons, New York.

Gaffin, S., C. Rosenzweig, L. Parshall, D. Beattie, R. Berghage, G. O'Keefe, and D. Braman. (2005). Energy balance modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency, p. 583–597. In Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Gaffin, S., Rosenzweig, C., Parshall, L., Hillel, D., Eichenbaum-Pikser, J., Greenbaum, A., Blake, R., Beattie, D., Berghage, R., (2006). Quantifying evaporative cooling from green roofs and comparison to other land surfaces. Paper presented at the Fourth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, May 11–12 2006. Boston, MA.

Gedge, D. (2003). From rubble to redstarts, p. 233– 241. In Proc. of 1st North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Chicago. 29–30 May 2003. The Cardinal Group, Toronto.

Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.

Gouriou, P. (2018). Direction départementale des territoires et de la mer. Identification du potentiel d'installation de panneaux photovoltaïques sur toiture des bâtiments supérieurs à 1000 m<sup>2</sup> dans les Côtes-d'Armor. Report.

Hills J. (2011). Retrofitting existing buildings: The low cost, high volume solution to climate change. *Sustainability Asia Pacific*, 4, 11-15.

Holden, G. (2018). Top-up: Urban Resilience through additions to the tops of city buildings, in Wilkinson, S., Remøy, H. (Eds.), *Building Urban Resilience through Change Use*, Wiley Blackwell, Oxford, 105-120.

Hong, T., Lee, M., Koo, C., Kim, J., & Jeong, K. (2016). Estimation of the available rooftop area for installing the rooftop solar photovoltaic (PV) system by analyzing the building shadow using Hillshade analysis. *Energy Procedia*, 88, 408-413.

Jochem, A., Höfle, B., Rutzinger, M., & Pfeifer, N. (2009). Automatic roof plane detection and analysis in airborne lidar point clouds for solar potential assessment. *Sensors*, 9 (7), 5241-5262.

Kaplan, S., J.F. Talbot, and R. Kaplan. (1988). Coping with daily hassles: The impact of the nearby natural environment. Project report. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Urban Forestry Unit Co-operative. Agreement 23-85-08.

Kolb, W. (2004). Good reasons for roof planting: Green roofs and rainwater. *Acta Hortic.* 643:295–300.

Kula, R. (2005). Green roofs and the LEED green building rating system, p. 141–153. In *Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities*, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Kusaka, H., Kimura, F., (2004). Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact of urban heat island simulation for an idealized case. *J. Meteor. Soc. Japan* 82, 67–80.

Le Corbusier (1923). *Vers une architecture*. Francia.

Le Corbusier (1965). *Oeuvre complète*, volume 7, 1957-1965, Zurich, Les Éditions d'architecture.

Leonard, T., and J. Leonard. (2005). The green roof and energy performance: Rooftop data analyzed, p. 433–443. In *Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities*, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Li, Y. & Brimicombe, A. (2015). A New Approach on Rapid Appraisal of Green Roof Potential in Urban Area. *LIDAR Magazine*. 5 (5), pp. 55-57.

Liesecke, H.J. (1998). Das Retentionsvermögen von Dachbegrünungen. (Water retention capacity of vegetated roofs). *Stadt und Grün* 47:46–53.

Liesecke, H.J., and H. Borgwardt. (1997). Abbau von Luftschadstoffen durch extensive Dachbegrünungen (Degradation of air pollutants by extensive green roofs). *Stadt und Grün*. 46:245–251.

Liu, K. (2003). Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation. *Proc. of the 18th International Convention of the Roof Consultants Institute*. 93–103.

Liu, K., and B. Baskaran. (2003). Thermal performance of green roofs through field evaluation, p. 273–282. In Proc. of 1st North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Chicago. 29–30 May 2003. The Cardinal Group, Toronto.

Mairie de Paris. (2012) Cahier technique : toitures végétalisées .

Martens, R., Bass, B., & Alcazar, S. S. (2008). Roof–envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosystems*, 11(4), 399-408.

Massy J., Martin P., Wyler N. (2011). Cartographie semi-automatisée des toitures végétalisées de la Ville de Genève. *Géomatique Expert*, 81, 26-31.

Medio, S. (2012). The unresolved rooftop. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, 6(2), 115-131.

Melet, E., & Vreedenburgh, E. (2005) *Rooftop Architecture - Building on an elevation surface*. Rotterdam : NAI Publishers.

Moran, A., B. Hunt, and G. Jennings. (2004). A North Carolina field study to evaluate green roof runoff quantity, runoff quality, and plant growth, p. 446–460. In Proc. of 2nd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Portland, OR. 2–4 June 2004. The Cardinal Group, Toronto.

Naing Y. M., Nitivattananon V., & Shipin O. V. (2017). Green Roof Retrofitting: Assessment of the Potential for Academic Campus. *Engineering journal*. 21 (7), 58-74.

Ng, E., Chen, Liang., Wang, Yingna., Yuan, Chao., (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong. *Building and Environment* 47, 256–271.

Novotny, V., and G. Chesters. (1981). *Handbook of urban nonpoint pollution: Sources and management*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Oberlander, C., E. Whitelaw, and E. Matsuzaki. (2002). *Introductory manual for greening roofs for public works*.

Oliver, J.E. (1973). *Climate and man's environment: An introduction to applied climatology*. John Wiley & Sons, New York.

Osmundson, T. (1999). *Roof gardens: History, design and construction*. W.W. Norton & Company, New York.

Ozdamar E. G. (2015). *Rooftop Architecture in Istanbul*. Lo Squaderno. 10.

Passchier–Vermeer, W., and W.F. Passchier. (2000). Noise exposure and public health. *Environ. Health Perspect.* 108(Suppl 1):123–131.

Paul A. R. (2018). *Architecture on the roof : An exploration into rooftop architecture and its potential applications within Portsmouth as a case study for UK cities*. Report.

Peck, S.W., C. Callaghan, M.E. Kuhn, and B. Bass. (1999). *Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada*. Canada Mortgage and Housing Corporation. Ottawa, Canada.



Peck, S., and M. Kuhn. (2001). Design guidelines for green roofs. Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, Ontario. 16 Nov. 2005.

Pons, O., Nadal, A., Sanyé-Mengual, E., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., Sanjuan-Delmàs, D., ... & Rovira, M. R. (2015). Roofs of the future: Rooftop greenhouses to improve buildings metabolism. *Procedia Engineering*, 123, 441-448.

Pope, C.A., D.V. Bates, and M.E. Raizenne. (1995). Health effects of particulate air pollution: time for reassessment? *Environ. Health Perspect.* 103:472–480.

Reale, L. (2008). *Densità, città, residenza. Tecniche di densificazione e strategie anti sprawl*, Gangemi, Roma.

Régie du bâtiment du Québec. (2015). Critères techniques visant la construction de toits végétalisés.

Rowe, D.B., C.L. Rugh, N. VanWoert, M.A. Monterusso, and D.K. Russell. (2003). Green roof slope, substrate depth, and vegetation influence runoff, p. 354–362. In *Proc. of 1st North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities*, Chicago. 29–30 May 2003. The Cardinal Group, Toronto.

Saiz–Alcazar, S., and B. Bass. (2005). Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in Madrid. *Greening roof-tops for sustainable communities*, p. 569–582. In *Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities*, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2015). An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. *Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level. The International journal of life cycle assessment*, 20(3), 350-366.

Santos, T., Tenedório, J., & Gonçalves, J. (2016). Quantifying the city's green area potential gain using remote sensing data. *Sustainability*, 8(12), 1247.

Savio, P., Cynthia Rosenzweig, Solecki, William D., Slosberg, Ronald B., (2006). *Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces*. New York City Regional Heat Island Initiative. The New York State Energy Research and Development Authority, Albany, NY.

Sahnoune, S., & Benhassine, N. (2017). Quantifying the impact of green-roofs on urban heat island mitigation. *International Journal of Environmental Science and Development*, 8(2), 116.

Schade, C. (2000). Wasserrückhaltung und Abflußbeiwerte bei dünn-schichtigen extensivbegrünungen. *Stadt und Grün* 49:95–100.

Scholz–Barth, K. (2001). Green roofs: Stormwater management from the top down. *Environmental Design & Construction* 4:63–70.

Šijaković, M., & Perić, A. (2018). Symbiotic architecture: Redefinition of recycling design principles. *Frontiers of Architectural Research*, 7(1), 67-79.

Silva, C. M., Flores-Colen, I., & Antunes, M. (2017). Step-by-step approach to ranking green roof retrofit potential in urban areas: A case study of Lisbon, Portugal. *Urban forestry & urban greening*, 25, 120-129.

Smetanina V. (2018). Rooftop urbanism. Usage and potential of rooftop space in the urban environment. Report.

Smith, K., Roeber, P., (2011). Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *Journal Applied Meteorology and Climatology* 50, 507–522.

Song, X., Huang, Y., Zhao, C., Liu, Y., Lu, Y., Chang, Y., & Yang, J. (2018). An Approach for Estimating Solar Photovoltaic Potential Based on Rooftop Retrieval from Remote Sensing Images. *Energies*, 11(11), 3172.

Sorkin, M. (2003). *Pensieri sulla densità*, Lotus International, 117, 4-10.

Toronto (2010). Toronto green roof construction standard. Supplementary guide.

Ulrich, R.S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science* 224:420–421.

Ulrich, R.S., and R. Simons. (1986). Recovery from stress during exposure to everyday outdoor environments. In J. Wineman, R. Barnes, and C. Zimring (eds.). *The costs of not knowing*. Proceedings of the 17th Annual Conference of the Environmental Research Association. Environmental Research Association, Washington, D.C.

USEPA. (2003). Cooling summertime temperatures: Strategies to reduce urban heat islands. EPA 430-F-03-014. USEPA, Washington, D.C.

USEPA. (2005). Cool roofs. 04 Jan. 2006. <http://www.usgreenbuildingcouncil.org>. U.S. Green Building Council. 2005. An introduction to the U.S. Green Building Council and the LEED Green Building Rating System.

Van Mechelen C. (2015). Nature as a template for a new concept of extensive green roofs. *Agricultural sciences*. Université d'Avignon. English. NNT : 2015AVIG0334.

VanWoert, N.D., D.B. Rowe, J.A. Andresen, C.L. Rugh, R.T. Fernandez, and L. Xiao. (2005). Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *J. Environ. Qual.* 34:1036–1044.

Villarreal, E.L., and L. Bengtsson. (2005). Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecol. Eng.* 25:1–7.

Ville de Montreal (2014). La construction de toits végétalisés. Guide technique pour préparer une solution de rechange.

Von Stulpnagel, A., M. Horbert, and H. Sukopp. (1990). The importance of vegetation for the urban climate. *Urban ecology*. Academic Publishing. The Hague, the Netherlands. Water Resources Group. 1998. Water laws: Understanding the problems facing urban water- sheds. 20 Oct. 2005.

Wilkinson, S. J., & Reed, R. (2009). Green roof retrofit potential in the central business district. *Property Management*, 27(5), 284-301.

Wilkinson, S. J., & Page, L. (2014). Exploring the potential for urban food production on Sydney's rooftops. In ZEMCH International Conference. ZEMCH Network.

Wong, N.H., Y. Chen, C.L. Ong, and A. Sia. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38:261–270.

Wong, J. K. W., & Lau, L. S. K. (2013). From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. *Habitat International*, 39, 25-35.

Xiao, J., Gerke, M., & Vosselman, G. (2010). Automatic detection of buildings with rectangular flat roofs from multi-view oblique imagery. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(3A).

Yalcinalp, E., Ozveren, S., Meral, A., Pulatkan, M., & Akbulut, S. (2017). Habitat Effect on Urban Roof Vegetation. *Sustainability*, 9(11), 1985.

Yok Tan, P., and A. Sia. (2005). A pilot green roof research project in Singapore, p. 399–415. In *Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities*, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Zamperini E., Lucenti S. (2014). Symbiotic architecture: rooftop additions on existing buildings. *Proceedings of the International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures*, 2, 1203-1212.

Zhang, G., He, B. J., Zhu, Z., & Dewancker, B. J. (2019). Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2).

Sahnoune, S., & Benhassine, N. (2017). Quantifying the impact of green-roofs on urban heat island mitigation. *International Journal of Environmental Science and Development*, 8(2), 116.

## Références web

20 Minutes. (2019). Nantes: Sur le toit du MIN, une des plus grandes centrales photovoltaïques citoyennes de France

<https://www.20minutes.fr/nantes/2547235-20190623-nantes-toit-min-plus-grandes-centrales-photovoltaïques-citoyennes-france>

De Urbanisten. (2015) <http://www.urbanisten.nl/wp/?portfolio=rotterdam-roofscapes>

Dominique Perrault Architecture <http://www.perraultarchitecture.com>

Guide bâtiment durable.

<https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/3-composition.html?IDC=7441>

Herzog et De Meuron Architects <https://www.herzogdemeuron.com>

JAJA Architects <https://www.ja-ja.dk>

Obr Architects <https://www.obr.eu/publications/>

Paris, (2019). Voici la plus grande toiture photovoltaïque d'Île-de-France.  
<https://www.paris.fr/actualites/voici-la-plus-grande-toiture-photovoltaique-d-ile-de-france-5375>

Le Monde, (2015). Logements neufs : la mode des espaces partagés.  
[https://www.lemonde.fr/argent/article/2015/03/14/logements-neufs-la-mode-des-espaces-partages\\_4593556\\_1657007.html](https://www.lemonde.fr/argent/article/2015/03/14/logements-neufs-la-mode-des-espaces-partages_4593556_1657007.html)

Linfodurable, (2019). Paris se met au solaire : 4800 mètres carrés de panneaux photovoltaïques sur les toits de la capitale.  
<https://www.linfodurable.fr/environnement/paris-se-met-au-solaire-4800-metres-carres-de-panneaux-photovoltaiques-sur-les-toits>

Le parisien, (2019). Paris : et si vous financiez des centrales solaires sur les toits?  
<http://www.leparisien.fr/paris-75/paris-et-si-vous-financiez-des-centrales-solaires-sur-les-toits-21-04-2019-8057640.php>

QGIS <https://www.qgis.org/it/site/>

Ryabets, K. (2015). Rotterdam festival explores another level of urban space.  
<https://popupcity.net/rotterdam-festival-explores-another-level-of-urban-space/>

T4QG <https://mau.hypotheses.org>



# Annexes

## Script Python pour le calcul des indicateurs

### Script Python 1

```
#~
execfile('d:/tleduc/Dropbox/crenau/7_encadrements/barbara.tolino/dev
/script-4.py')
#~
execfile('/home/tleduc/Dropbox/crenau/7_encadrements/barbara.tolino/
dev/script-4.py')
#~
=====
==
#~ Thomas LEDUC - le 14 juillet 2019
#~
=====
==
from os import path

if path.exists('d:/tleduc'):
    HOMEDIR = 'd:/tleduc'
elif path.exists('/home/tleduc'):
    HOMEDIR = '/home/tleduc'

import sys
sys.path.append(HOMEDIR + '/prj/t4qg')
from t4qg import *

srcdir = HOMEDIR +
'/Dropbox/crenau/7_encadrements/barbara.tolino/dev'
#~
=====
==
def foo(layer):
    dataProvider = layer.dataProvider()
    dataProvider.addAttributes([QgsField('sun_hits',
QVariant.Int)])
    dataProvider.addAttributes([QgsField('sun_ratio',
QVariant.Double)])
    layer.updateFields()

    fieldIdx1 = layer.fieldNameIndex('sun_hits')
    fieldIdx2 = layer.fieldNameIndex('sun_ratio')
```

```

        layer.startEditing()
        for feature in layer.getFeatures():
            fid = feature.id()
            sun_hits, sun_ratio =
ArrayCoding.decode(feature['sun_hits_ratio'], str, '#')
            layer.changeAttributeValue(fid, fieldIdx1,
int(sun_hits))
            layer.changeAttributeValue(fid, fieldIdx2,
float(sun_ratio))
            layer.commitChanges()
        return layer

#~
=====
==
start = timer()

#~ -----
QgsProject.instance().clear()

#~ -----
buildings = loadLayer(HOMEDIR + '/prj/sketchUpPlugin/shp',
'ensa_nantes')
buildings.setLayerName('buildings')
setFillSymbol(buildings, color='lightgrey', outline_color='black',
style_border='solid', width_border='0.0')
# setAlternateFillSymbol(buildings, color='black',
patternDistance=1.0, lineAngle=45, penstyle='solid', width='0.35')

#~ -----
#~ interior_points = STSpatialCommand(InteriorPoint, buildings,
'intPt').run()

#~ -----
#~ dt = DateTimeGenerator('2019-07-14', time0='15:54',
time1='16:53', sliceTimeInMinPerDay=10).run()
#~ dt =
DateTimeGenerator.createSingleDayPerMonth(sliceTimeInMinPerDay=1080)
.run()
dt =
DateTimeGenerator.createSingleDayPerMonth(sliceTimeInMinPerDay=60).r
un()

svfRoof = SkyViewFactorOnTopOfRoof(buildings, nRays=64,
maxRayLen=100.0, elevationFieldName='HAUTEUR', method=2018,
background=True, nsegm=1)
sunDurRoof = SunshineDurationOnTopOfRoof(buildings, 'HAUTEUR', dt)
bsf = BuildingSurfaceFraction(buildings, buffDist=300.0)

```



```

indics = STSpatialAttributeCommand([Area, Perimeter, MillerIndex,
bsf, svfRoof, sunDurRoof], buildings, 'roofs').run()

#~ indics = STSpatialAttributeCommand([svfRoof, sunDurRoof],
buildings, 'roofs').run()
foo(indics)

#~ setBlueRed5GraduatedSymbol(indics, 'bsf', ndigits=2,
labelFieldName=None)
#~ setBlueRed5GraduatedSymbol(indics, 'svf_roof', ndigits=2,
labelFieldName=None)
setBlueRed5GraduatedSymbol(indics, 'sun_ratio', ndigits=2,
labelFieldName=None)
setLabelSymbol(indics, 'HAUTEUR', overPoint=True, size='11',
color='black', positionX=None, positionY=None, offsetX=None,
offsetY=None)

#~ -----
showFeatureCount(['roofs', 'buildings'])

#~ -----
stop = timer()
delta = stop - start
print 'Elapsed time: %.3f s (%02d:%02d:%02d)' % (delta,
int(delta)/3600, (int(delta)%3600)/60, (int(delta)%3600)%60)

```

## Script Python 2

```

#~
execfile('d:/tleduc/Dropbox/crenau/7_encadrements/barbara.tolino/dev
/script-4.py')
#~
execfile('/home/tleduc/Dropbox/crenau/7_encadrements/barbara.tolino/
dev/script-4.py')
#~
=====
==
#~ Thomas LEDUC - le 14 juillet 2019
#~
=====
==
from os import path

if path.exists('d:/tleduc'):
    HOMEDIR = 'd:/tleduc'
elif path.exists('/home/tleduc'):
    HOMEDIR = '/home/tleduc'

```

```

import sys
sys.path.append(HOMEDIR + '/prj/t4qg')
from t4qg import *

srcdir = HOMEDIR +
'/Dropbox/crenau/7_encadrements/barbara.tolino/dev'

#~
=====
==
def foo(layer):
    dataProvider = layer.dataProvider()
    dataProvider.addAttributes([QgsField('sun_hits_roof',
QVariant.Int)])
    dataProvider.addAttributes([QgsField('sun_ratio_roof',
QVariant.Double)])
    layer.updateFields()

    fieldIdx1 = layer.fieldNameIndex('sun_hits_roof')
    fieldIdx2 = layer.fieldNameIndex('sun_ratio_roof')

    layer.startEditing()
    for feature in layer.getFeatures():
        fid = feature.id()
        sun_hits, sun_ratio =
ArrayCoding.decode(feature['sun_hits_ratio'])
        layer.changeAttributeValue(fid, fieldIdx1,
int(sun_hits))
        layer.changeAttributeValue(fid, fieldIdx2,
float(sun_ratio))
    layer.commitChanges()
    return layer

#~
=====
==
start = timer()

#~ -----
QgsProject.instance().clear()

#~ -----
buildings = loadLayer(HOMEDIR + '/prj/sketchUpPlugin/shp',
'ensa_nantes')
buildings.setLayerName('buildings')
setFillSymbol(buildings, color='lightgrey', outline_color='black',
style_border='solid', width_border='0.0')

```

```

# setAlternateFillSymbol(buildings, color='black',
patternDistance=1.0, lineAngle=45, penstyle='solid', width='0.35')

#~ -----
#~ interior_points = STSpatialCommand(InteriorPoint, buildings,
'intPt').run()

#~ -----
#~ dt = DateTimeGenerator('2019-07-14', time0='15:54',
time1='16:53', sliceTimeInMinPerDay=10).run()
#~ dt =
DateTimeGenerator.createSingleDayPerMonth(sliceTimeInMinPerDay=1080)
.run()
dt =
DateTimeGenerator.createSingleDayPerMonth(sliceTimeInMinPerDay=60).r
un()

svfRoof = SkyViewFactorOnTopOfRoof(buildings, nRays=64,
maxRayLen=100.0, elevationFieldName='HAUTEUR', method=2018,
background=True, nsegm=1)
sunDurRoof = SunshineDurationOnTopOfRoof(buildings, 'HAUTEUR', dt)
#~ bsf = BuildingSurfaceFraction(buildings, buffDist=300.0)
indics = STSpatialAttributeCommand([Area, Perimeter, MillerIndex,
bsf, svfRoof, sunDurRoof], buildings, 'roofs').run()

#~ indics = STSpatialAttributeCommand([svfRoof, sunDurRoof],
buildings, 'roofs').run()
foo(indics)

#~ setBlueRed5GraduatedSymbol(indics, 'bsf', ndigits=2,
labelFieldName=None)
#~ setBlueRed5GraduatedSymbol(indics, 'svf_roof', ndigits=2,
labelFieldName=None)
setBlueRed5GraduatedSymbol(indics, 'sun_ratio_roof', ndigits=2,
labelFieldName=None)
setLabelSymbol(indics, 'HAUTEUR', overPoint=True, size='11',
color='black', positionX=None, positionY=None, offsetX=None,
offsetY=None)

#~ -----
showFeatureCount(['roofs', 'buildings'])

#~ -----
stop = timer()
delta = stop - start
print 'Elapsed time: %.3f s (%02d:%02d:%02d)' % (delta,
int(delta)/3600, (int(delta)%3600)/60, (int(delta)%3600)%60)

```