

## Projet VALES

### Façades solaires en milieu urbain



©Architectes.ch, 2022

## Rapport technique final

Décembre 2022

Projet financé par :



Domaine Ingénierie et  
Architecture

Avec le soutien de :



## **Impressum**

Rapport final du projet VALES (2020-2022).

Auteurs des études et du rapport :

Gilles Desthieux (HEPIA)

Blaise Raybaud (HEPIA)

Adrien Gressin (HEIG-VD)

Jens Ingensand (HEIG-VD)

Guillaume Stern (HEIG-VD)

## Table des matières

RÉSUMÉ .....	4
1. INTRODUCTION.....	5
1.1 Contexte.....	5
1.2 Expériences passées .....	5
1.3 Vers une amélioration des outils d'analyse de potentiel solaire sur les façades .....	7
1.4 Objectifs du projet et champ d'application.....	8
2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE : VUE GLOBALE.....	9
3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE : ÉTAPES DE CALCUL.....	10
3.1 Identification des façades.....	10
3.2 Modélisation 3D du milieu bâti et calcul de l'irradiation I0 .....	11
3.2.1 Modélisation 3D .....	11
3.2.2 Calcul de l'irradiation solaire primaire (diffus et direct).....	12
3.3 Modélisation de la texture des façades .....	13
3.4 Calcul des réflexions .....	17
4. RÉSULTATS : DÉMONSTRATIONS SUR DES QUARTIERS PILOTES.....	21
4.1 Bergues .....	21
4.1.1 Périmètre et objectifs .....	21
4.1.2 Détection des fenêtres .....	21
4.1.3 Rendu final de l'irradiation solaire .....	22
4.2 Meyrin.....	22
4.2.1 Périmètres et objectifs .....	22
4.2.2 Détection des fenêtres .....	23
4.2.3 Calcul de l'irradiation en façades – périmètre restreint.....	24
4.2.4 Analyse de sensibilité .....	25
4.2.5 Résultats sur le périmètre élargi.....	27
4.2.6 Démonstration d'une étude de faisabilité d'un projet solaire .....	28
5. MESURES D'ENSOLEILLEMENT EN SITUATION RÉELLE .....	35
6. COMMUNICATION ET VALORISATION.....	36
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	37

## Résumé

A toutes les échelles, l'énergie solaire constitue un moteur majeur du processus de transition énergétique. Elle se substitue aux sources d'énergie conventionnelles, qui sont aujourd'hui essentiellement d'origine nucléaire et fossile. Les façades des bâtiments deviendront donc très importantes pour l'évaluation du rayonnement solaire car les toitures ne proposent pas de surfaces disponibles suffisamment conséquentes pour assurer des stratégies de transition énergétique. C'est pourquoi le projet VALES propose de porter son attention sur une meilleure caractérisation du potentiel de production énergétique solaire en façade. Dans ce cadre, les approches actuelles en matière d'évaluation du potentiel solaire en façades à l'échelle de la ville sont insuffisantes, car elles n'évaluent pas de façon fiable la part réfléchie de l'irradiation solaire sur les façades et ne se basent pas sur un niveau de détail suffisant des façades (vitrage, balcons, etc.) pour identifier les parties pouvant être installées par des panneaux solaires.

Le projet VALES vise ainsi à mettre au point des algorithmes spécifiques afin d'améliorer la modélisation du rayonnement réfléchi dans les zones bâties, qui est la principale composante du rayonnement solaire sur les surfaces verticales. Pour atteindre cet objectif, la modélisation de l'environnement bâti doit être améliorée en termes de niveau de détail (LOD). Cette évaluation du niveau de détail est basée sur des techniques de classification semi-automatique des images aériennes obliques, afin (i) d'identifier les surfaces appropriées pour l'installation de panneaux solaires, (ii) de classer la texture et l'albédo de chaque élément de façade. Les techniques radiosités sont utilisées avec un modèle 3D du milieu urbain. Cela permet de calculer le rayonnement solaire réfléchi et finalement le rayonnement solaire global.

Concrètement les activités du projet ont permis de développer les outils de modélisation, démontrer leur utilisation à l'échelle de quartiers pilotes (Meyrin-Cité). Le projet présenté s'inscrit dans la perspective de réaliser un cadastre solaire des façades à large échelle, en vue de compléter le cadastre solaire existant des toitures à l'échelle du Grand Genève. Il sera ainsi possible d'enrichir le bilan d'autoconsommation avec la composante façade et constituer une aide à l'investissement.

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte

La transition énergétique et climatique est en marche aujourd’hui à tous les niveaux, et il est plus que nécessaire d’intensifier sa progression suite aux derniers rapports du GIEC qui recommandent de plafonner les émissions GES mondiales d’ici 2025 en vue respecter l’accord Paris.

Cette transition a comme revers l’augmentation de la demande d’électricité, notamment à cause du développement massif des pompes à chaleur, des voitures électriques et des systèmes de refroidissement. Il en résulte une pression croissante sur le réseau électrique dans le contexte de risque actuel de pénurie. Face à cela, l’énergie solaire est un élément essentiel pour assurer une plus grande autonomie des agglomérations urbaines dans leur approvisionnement énergétique, en exploitant les ressources locales et renouvelables disponibles. Cette stratégie est particulièrement intéressante sur les bâtiments des villes où se concentre la population et donc les besoins en électricité. L’objectif est alors de convertir ces bâtiments de “consommateur” à “consommateur + producteur” d’énergie, chaque bâtiment visant à réduire ses besoins extérieurs en énergie.

Pour faire face à cette augmentation de la demande d’électricité et dans le prolongement de la Stratégie fédérale 2050 adoptée par la population en 2017, la Suisse met en place la Stratégie 2050+ impliquant entre autres de passer d’une production solaire PV de 2 TWh en 2020 à 34 TWh en 2050. Au niveau cantonal, le Plan directeur de l’énergie 2020-2030 vise à atteindre une capacité de production solaire PV de 350 MWc sur le Canton (80 MWc en 2021, potentiel évalué de 1000 MWc sur les toitures et 500 MWc sur les façades).

Si le développement de l’énergie solaire est particulièrement pertinent dans les villes qui consomment la majeure partie de la demande énergétique, il faut tenir compte des zones denses qui limitent la ressource solaire et par conséquent le déploiement des centrales solaires urbaines. Il est donc essentiel de mettre à disposition des outils numériques qui modélisent l’accessibilité à l’énergie solaire au sein du tissu urbain, en particulier les toitures et façades des bâtiments et toute autre localisation pertinente (les abris de parking par exemple).

Nous pensons en particulier que la composante façade des bâtiments deviendra très importante pour l’évaluation du potentiel solaire car si les surfaces disponibles actuellement en toitures seront progressivement occupés par des panneaux solaires, ces derniers ne permettront pas une production électrique suffisante pour mettre en œuvre la politique énergétique et climatique.

Le défi consiste alors à intégrer les capteurs solaires en tant qu’éléments constructifs de l’enveloppe du bâtiment (toit, façade) afin que toutes les surfaces deviennent des producteurs d’énergie. C’est ce qu’on appelle le BAPV (Building Applied Photo-Voltaic) ou le BIPV (Building Integrated Photo-Voltaic). Cependant, l’utilisation des façades se heurte à plusieurs obstacles : patrimoine, aspects esthétiques et architecturaux, espace disponible, ombres portées dans les canyons urbains, coûts importants, maîtrise technique insuffisante. De nouvelles technologies émergent et permettent notamment le choix des couleurs.

Dans ce contexte le projet VALES propose de porter son attention sur une meilleure caractérisation du potentiel de production énergétique solaire en façade, ce qui requiert une approche hautement plus complexe par rapport aux analyses des toitures.

## 1.2 Expériences passées

Cela fait plusieurs années que HEPIA travaille sur la question de l’accessibilité solaire en milieu urbain.

Cela a débouché sur deux principaux résultats :

(i) Cadastre solaire du Canton de Genève depuis 2011, puis mis à jour et étendu au Grand Genève dans le cadre du projet INTERRG G2 Solaire (2019-2022), permettant de caractériser sur les toitures uniquement le potentiel de production énergétique. Le cadastre est disponible au public sur la plateforme illustrée à la Figure 1. Dans sa nouvelle version, il permet de simuler le potentiel d’autoconsommation du solaire PV tenant compte du profil horaire des besoins du bâtiment.

(ii) Analyse de l’irradiation solaire brute sur les façades, telle qu’illustrée à la Figure 2, qui représente à gauche les résultats d’une modélisation d’une partie des bâtiments futurs du quartier PAV à Carouge, dans le cadre de la planification solaire de la Ville de Carouge<sup>1</sup>, à droite la modélisation solaire sur les bâtiments situés à Meyrin-Cité. Comme on le verra plus tard, cette approche est encore incomplète ne modélisant pas les inter-réflexions entre les façades et ne reposant pas sur un niveau de détail suffisant des façades (fenêtres, balcons).

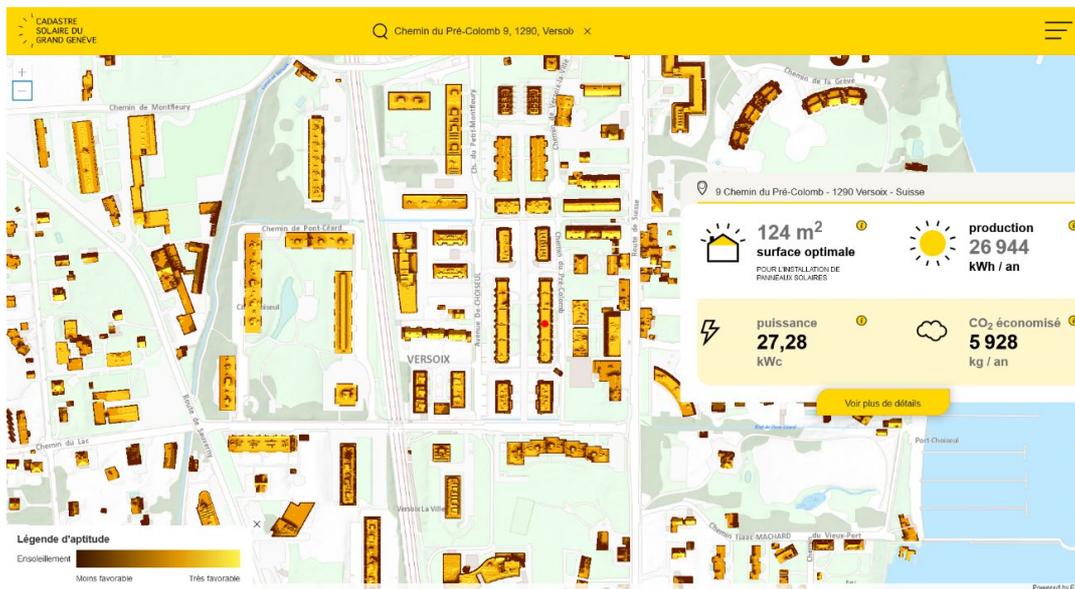


Figure 1. Interface Web du cadastre solaire genevois (<https://sitq-lab.ch/solaire>)



Figure 2. Image de gauche : Représentation 3D du rayonnement solaire incident (en kWh/m<sup>2</sup>/an) sur les façades d’un secteur de la Ville de Carouge (quartier PAV) mêlant les nouveaux aménagements (en haut, quartier de l’Étoile) et les zones industrielles existantes (en bas). Image de droite : modélisation solaire des bâtiments de Meyrin-Cité.

Les deux approches - analyse du potentiel sur les *toitures* et *façades* – ont en commun de modéliser sur une surface donnée (de toiture ou de façade) l’irradiation solaire incidente tenant compte de

<sup>1</sup> Les résultats complets de cette étude, soutenue par l’Office fédéral de la Culture, sont disponibles sur le lien : <https://www.bak.admin.ch/culturesolaire>

données météorologiques d'irradiation, de l'inclinaison et de l'orientation de la surface (l'irradiation incidente sera ainsi d'autant plus élevée sur des surfaces inclinées vers le sud), et des ombrages provenant de l'environnement proche (cheminées, bâtiments voisins, végétation, etc.) ou lointain (montagnes, relief). Cela présuppose de disposer d'un modèle 3D du territoire, du bâti et de la végétation, provenant de relevés laser aéroportés LiDAR et, pouvant être combinés avec un modèle 3D des bâtiments et des toitures. Il convient d'avoir en tête pour la suite du document, que l'irradiation solaire globale est la somme de trois composantes : l'irradiation directe, diffuse et réfléchie.

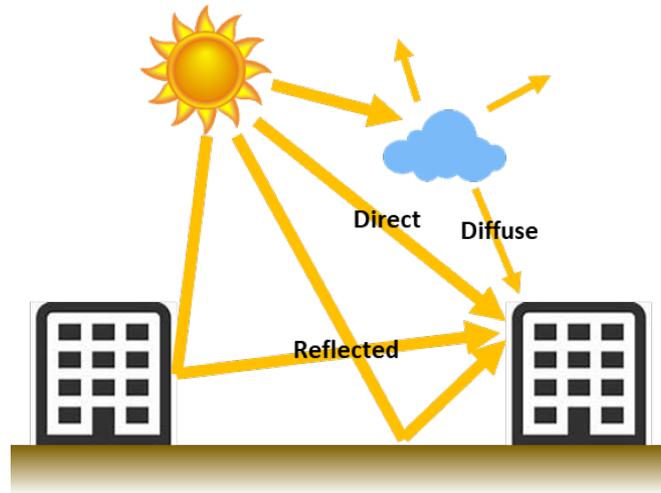


Figure 3. Les trois principales composantes de l'irradiation solaire globale : directe, diffuse, réfléchie.

Le modèle implémenté dans le cadastre solaire genevois permet enfin de convertir l'irradiation solaire incidente sur le tissu bâti en potentiel de production énergétique – thermique et électrique – à l'échelle des surfaces de toiture. L'approche méthodologique utilisée jusqu'à présent pour modéliser le potentiel solaire par HEPIA est détaillée dans [Desthieux et al. \(2018\)](#).

### 1.3 Vers une amélioration des outils d'analyse de potentiel solaire sur les façades

La modélisation du potentiel solaire sur les *toitures* est désormais bien stabilisée. Dans le cadre du projet INTERREG V France-Suisse G2Solaire, le cadastre solaire genevois a été étendu sur le territoire transfrontalier du Grand Genève, dans l'optique d'utiliser le cadastre solaire auprès des différents acteurs pour intensifier la production solaire à l'échelle de la région.

Néanmoins, la composante *façade*, est encore jusqu'à présent peu considérée ; ce constat est partagé dans la littérature scientifique. La plupart des cadastres solaires de plus en plus répandus dans les villes à travers le monde se limitent pour la plupart au potentiel solaire en toiture. Alors que, comme exposé en préambule, la mise en œuvre d'une transition énergétique massive vers les ressources renouvelables, nécessitera de pouvoir mobiliser le potentiel solaire en façades, en plus des toitures.

Le manque de considération de l'analyse de potentiel en façades s'explique par une approche méthodologique et technique plus complexe à mettre en œuvre, en particulier sur deux aspects.

- Les approches généralement utilisées pour modéliser l'irradiation réfléchie conviennent pour des surfaces planes ou faiblement inclinées comme les toitures, mais pas pour les surfaces verticales, où la part réfléchie devient prépondérante dans l'irradiation globale. Cela requiert le développement de modèles plus élaborés tenant compte de l'albédo des surfaces (facteur de réflexion) qui dépend lui-même du type de matériau, et analysant les obstructions (ombrages) au rayonnement réfléchi.

- Les parties bien irradiées des toitures sont généralement libres pour permettre des installations solaires. Tel n'est pas le cas des façades où la part des surfaces vitrées et balcons est significative, limitant l'espace pour des installations solaires. L'analyse telle que représentée à la Figure 2 n'a pas pu tenir compte de ce facteur. Il importe alors d'améliorer le niveau de détail des façades pour mieux localiser les surfaces exploitables.

Ces deux aspects seront centraux pour améliorer le modèle que HEPIA a développé jusqu'à présent, mais qui se limite à analyser l'irradiation solaire brute en façade (comme illustré à la Figure 2) de façon incomplète : sans bien modéliser la composante réfléchie et sans tenir compte de la texture des façades. La Confédération met certes à disposition un outil de cadastre solaire des façades ([www.facade-au-soleil.ch](http://www.facade-au-soleil.ch)), mais selon une approche similaire à celle développée précédemment par le requérant, sans tenir compte du niveau de détail des façades.

La littérature scientifique montre que face à ces défis, des outils et approches existent, mais ils sont souvent utilisés de façon partielle et pour d'autres applications, à l'échelle d'objets comme les bâtiments, mais pas à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Ainsi l'originalité du projet présenté a été d'intégrer et combiner les outils pour évaluer le potentiel solaire de façon fiable.

## 1.4 Objectifs du projet et champ d'application

Face à ce qui précède, le projet VALES vise premièrement à développer un outil intégré pour modéliser le potentiel de production solaire énergétique sur les façades impliquant deux composantes :

- Modélisation de la texture et de l'albédo des façades utilisant les techniques de photogrammétrie, de classification d'image et de *machine learning*.
- Modélisation de la part réfléchie de l'irradiation solaire dans le contexte de *canyons urbains* utilisant les techniques de *radiosité*.

Deuxièmement, il s'agit de réaliser un démonstrateur d'application de l'outil à l'échelle de quartiers urbains à Genève, en vue d'une meilleure valorisation et communication autour du projet et d'une réplique sur le reste de la ville ou du canton (cadastre solaire).

Au final, le produit issu du projet vise à constituer un support pour intensifier l'installation de panneaux solaires en façades des bâtiments, en complément des toitures, et de fournir ainsi les recommandations pour inciter les propriétaires à entreprendre une telle démarche.

Le champ d'application du projet concerne premièrement le tissu bâti *existant* sur lequel il s'agit d'évaluer le potentiel de production énergétique solaire en façade. En effet, la part existante du bâti sera à terme largement majoritaire par rapport aux constructions futures, dans un contexte de villes déjà fortement densifiées. Ainsi, une installation solaire en façade peut très bien s'intégrer dans le cadre de la rénovation de l'enveloppe d'un bâtiment. En outre, les modèles pourront tout à fait s'appliquer à des projets de construction futurs.

Deuxièmement, le projet porte en priorité sur l'intégration de *panneaux solaires photovoltaïques* plutôt que thermiques. Les installations de panneaux PV, plus légères, sont plus adéquates en façades, de plus la demande électrique est amenée à fortement augmenter à travers les pompes à chaleur et l'électromobilité encore émergente.

## 2. Approche méthodologique : vue globale

La Figure 4 ci-dessous donne une vue d'ensemble de la méthode mise en place, du flux des données et outils mobilisés.

Deux domaines de compétences sont impliqués :

- Photogrammétrie portée par HEIG-VD qui vise à premièrement à projeter des images aériennes obliques sur un modèle 3D existant des bâtiments du canton de Genève, deuxièmement de détecter, sur les ortho-images de façades précédemment calculées, les éléments de façades tels que les fenêtres.
- Modélisation solaire portée par HEPIA vise à modéliser les 3 composantes de l'irradiation solaire en tout point de façade, tenant compte des ombrages liés au milieu urbain, et portant son attention sur la composante réfléchi.

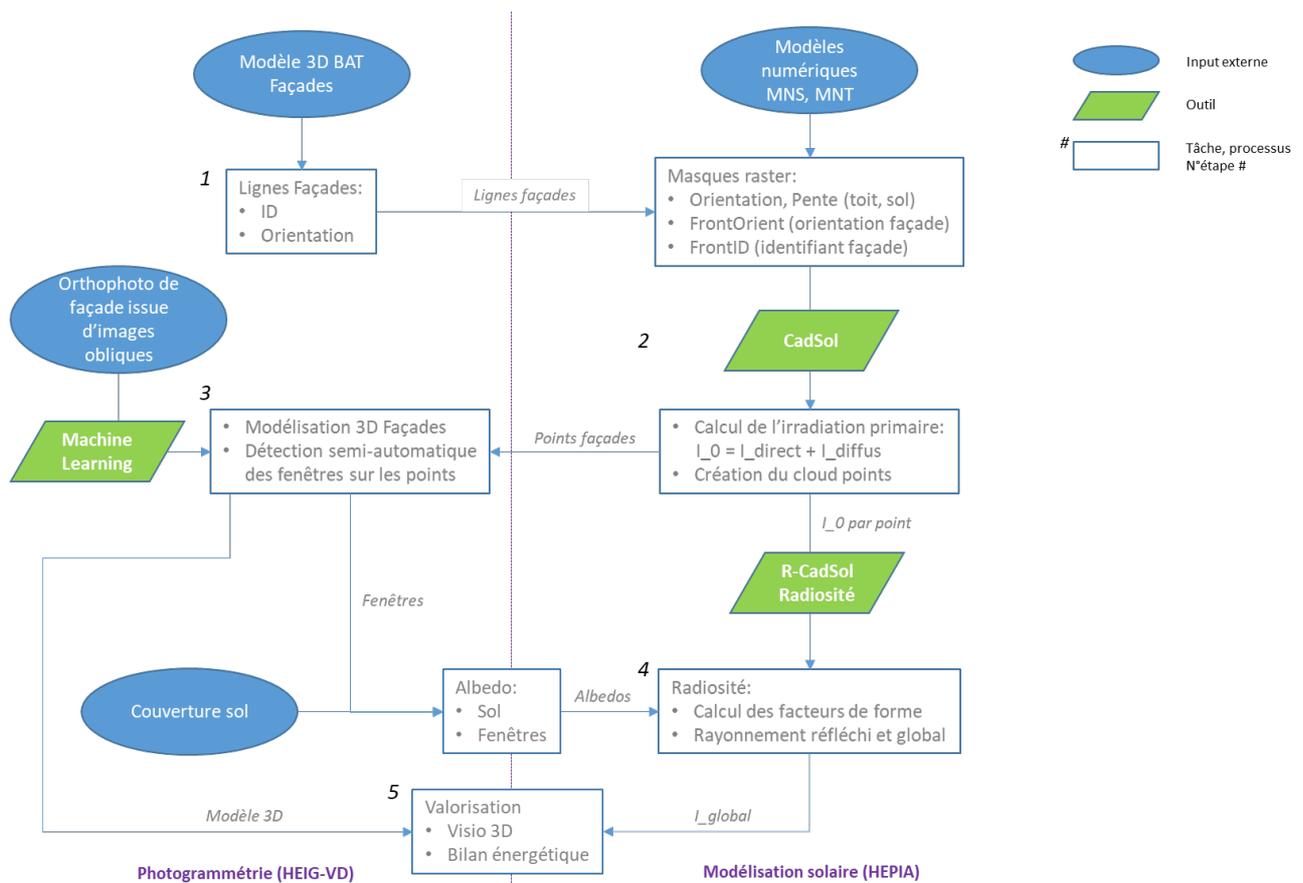


Figure 4. Vue d'ensemble des volets méthodologiques

En résumé, les étapes sont les suivantes, ces étapes étant détaillées au Chapitre 3 :

- 1 Identification des lignes de façade à partir de la couche [multipatch](#) (MP) des façades, issue du modèle 3D du bâti (SITG), et caractérisation (calcul de l'orientation de chaque segment de façade). Détail au Chapitre 3.1.
- 2 A partir du MP et des lignes de façade, création de couches raster qui servent d'input au calcul de l'irradiation solaire primaire en toiture et façade : les composantes de l'irradiation directe (beam) et diffuse. Sur les façades, les résultats sont calculés sur un nuage de points. Détail au Chapitre 3.2.
- 3 En parallèle, à partir d'images aériennes obliques, texturation d'un modèle 3D du secteur bâti analysé, permettant de détecter de façon semi-automatique (Machine Learning) des éléments

de façade comme les fenêtres. Le nuage de points (créé en 2) est projeté sur le modèle de façade, ainsi pour chaque point on détermine s'il appartient à une fenêtre ou non. Détail au Chapitre 3.3.

- 4 Mise en œuvre de l'approche de radiativité pour calculer l'irradiation réfléchie, tenant compte du facteur de réflexion (albédo) de l'environnement urbain qui varie selon les propriétés de surface : sol, bâtiments, et en particulier les fenêtres (grâce à la détection des points fenêtres en 3). Au final l'irradiation globale est calculée. Détail au Chapitre 3.4.
- 5 Résultats finaux : représentation en 3D des résultats (fenêtres, irradiation solaire sur les façades), bilan énergétique (production solaire) à l'échelle des bâtiments et du quartier. Détail au Chapitre 4.

L'outil de modélisation solaire en toiture et façade se base sur le modèle **CadSol** développé initialement dans le cadre d'un partenariat entre HEPIA, EPFL et Politecnico di Milano. Puis HEPIA a poursuivi son développement, notamment dans le cadre notamment du présent projet. Les fondements méthodologiques sont présentés dans [Desthieux et al., 2018](#).

Une vue d'ensemble de cet outil est présentée ici, incluant l'amélioration proposée dans le projet concernant la modélisation des réflexions optiques (Figure 5, encadré rouge). Les différentes étapes de calcul du modèle CadSol utilisent différents logiciels et langages informatiques, comme le soulignent les couleurs. Le modèle CadSol est capable de calculer les irradiances à très grande échelle, mais sans prendre en compte de manière appropriée les réflexions de l'environnement bâti. L'objectif du modèle R-CadSol, présenté en détail au chapitre 3.4 est donc de combler cette lacune.

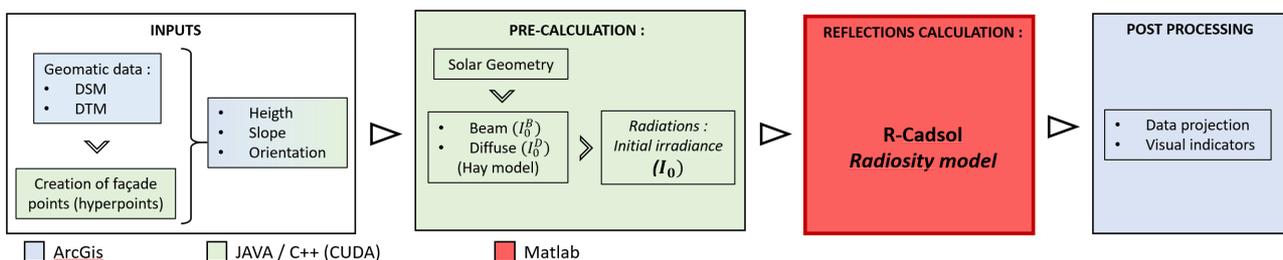


Figure 5: Processus global CadSol pour le calcul des radiations solaires sur le toit et les façades, y compris les réflexions.

### 3. Approche méthodologique : étapes de calcul

#### 3.1 Identification des façades

A partir de la [couche façades du bâtiment 3D](#), la première étape a consisté à extraire les façades en 2 dimensions, à leur affecter un identifiant unique (permettant également de faire le lien avec l'EGID de bâtiment d'origine), et de calculer son orientation.

Pour mener à bien cette opération, un script FME a été mise en place. La difficulté principale résidait dans le fait que la couche façade du bâtiment 3D contient non seulement les façades extérieures principales des bâtiments, mais également les petites façades des superstructures composant les bâtiments (chien-assis...) et les façades "communes" entre deux bâtiments d'un même pâté de maison. Le calcul de l'emprise au sol de chaque groupe de bâtiments (pâté de maison), mais de sélectionner la ligne extérieure englobant ces bâtiments.



Figure 6. Exemple d'extraction de l'emprise des bâtiments, pour l'extraction des façades sur un quartier (Meyrin-Cité)

## 3.2 Modélisation 3D du milieu bâti et calcul de l'irradiation IO

### 3.2.1 Modélisation 3D

Le milieu urbain analysé (bâtiments, sol, végétation) est modélisé selon deux approches.

#### ➤ Modélisation 2.5D en format numérique du territoire

Les données aéroportées LIDAR générées généralement tous les 2 à 3 ans permettent d'élaborer une cartographie numérique précise du territoire, sous la forme du modèle numérique de surface ou d'altitude (MNS, MNA) considérant l'élévation des objets comme les bâtiments et la végétation, ou du modèle numérique de terrain (MNT) considérant uniquement l'élévation du sol. A partir du MNS, sont générés deux autres masques : *pente* et *orientation* de chaque pixel. Ces trois couches raster : *MNS*, *pente* et *orientation* permettent de calculer le gisement brut solaire en tout point du territoire, en particulier sur les toitures et au sol.

La **résolution** retenue des couches raster pour le calcul du gisement solaire est de **0.5 m à 1m** selon l'échelle d'analyse et le temps de calcul souhaité.

#### ➤ Modélisation 3D des façades

Le MNS qui donne une représentation 2.5D du territoire ne permet pas de représenter directement les façades verticales des bâtiments.

Ainsi, un **nuage de points** en façade est généré à partir de la différence d'altitude entre les modèles MNT et MNS avec un pas dans l'espace défini selon la finesse d'analyse souhaitée. Chaque point fait l'objet d'une analyse d'ombrage et de potentiel solaire.

L'espacement entre les points (**résolution**), qui peut être différent horizontalement et verticalement, dépend de la finesse d'analyse souhaitée (intersection des points avec les fenêtres notamment) et du temps de calcul réaliste selon la taille du quartier. Une résolution de 1m, voire de 0.5m est compatible avec une analyse fine.

Chaque point est défini par sa position géométrique – x, y, z – et par ses caractéristiques issues de la classification d'image présentée au chapitre 3.3 suivant (texture et albédo).

Les points sont appelés aussi 'voxel', c'est-à-dire un pixel auquel on ajoute la troisième dimension.

Les façades ont également une pente par défaut de 90 degrés sans tenir compte des surplombs, et un azimut homogène qui est calculé pour chaque point le long de la façade.

En raison des formats de ces fichiers, il est plus facile de travailler avec une scène composée de nuages de points et non de maillages. Construire un réseau maillé à partir des points de la scène est en effet compliqué. La difficulté est de s'assurer que toutes les mailles sont jointes dans toute la scène et que les surfaces générées sont cohérentes avec les surfaces de la scène réelle. C'est un problème mathématique qui n'a pas été étudié dans ce projet. Le choix a donc été fait de trouver une solution permettant de travailler sur le nuage de points.

L'analyse des réflexions, telle que présentée au chapitre 3.4, consiste à analyser les intersections entre les éléments de la scène urbaine. Ainsi, les points sont générés non seulement sur les façades, mais aussi sur le sol, la végétation et les toitures. En dehors des façades, ces points sont générés directement à partir du MNS.

L'image ci-dessous illustre la modélisation du nuage de points, basée sur des données LIDAR dans un quartier de Genève (Meyrin-Cité). On distingue les points représentant les toits et le sol (gris), les arbres (vert) et les façades (violet).

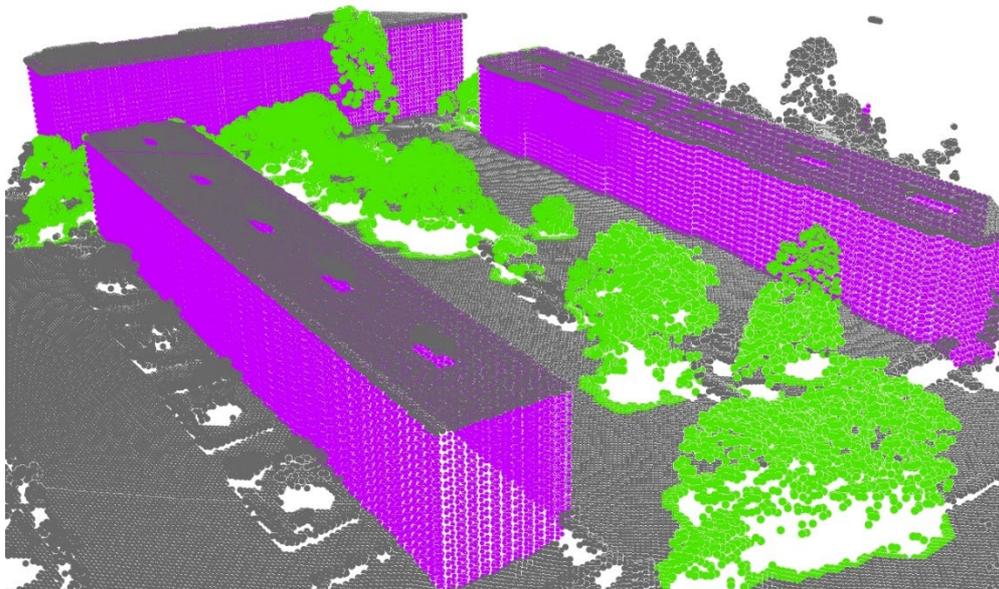


Figure 7. Exemple de modélisation des nuages de points dans un quartier (Meyrin-Cité)

### 3.2.2 Calcul de l'irradiation solaire primaire (diffus et direct)

#### ➤ Irradiation globale et ombres portées

L'irradiation incidente globale ( $I_{G,i}^0$ ) est la somme de trois composantes du rayonnement : direct, diffus et réfléchi. L'équation suivante présente l'irradiation globale sur le  $i^{\text{th}}$  point, à partir des trois rayonnements direct ( $B_i$ ), diffus ( $D_i$ ) et réfléchi ( $R_i$ ).

$$I_{G,i}^0 = I_{B,i}^0 + I_{D,i}^0 + R_i$$

Comme détaillé dans Desthieux et al. (2018), la modélisation des irradiations primaires est réalisée à l'aide d'un modèle open source codé avec JAVA. Ce dernier a ensuite été traduit dans un langage C++ et CUDA afin d'améliorer les performances de calcul à l'aide d'une machine GPU (Desthieux et al., 2018c ; Stendardo et al., 2020) et de traiter de grandes zones comme le Grand Genève (2'000 km<sup>2</sup>).

L'irradiation primaire est calculée sur les façades, les toitures et le sol. Les composantes directes et diffuses sont dérivées des données météorologiques statistiques sur surface plane (en utilisant la base de données Meteonorm®). Les ombres portées sont calculées en adaptant le modèle proposé par Ratti dans son travail de thèse (Ratti, 2001).

Un premier calcul permet de déterminer l'irradiation incidente directe à partir des coordonnées des points DSM et de la position du soleil. La position du soleil est déterminée à partir des angles d'élévation et d'azimut. L'irradiation sur une surface horizontale est transposée à partir de l'angle d'incidence déterminé entre la direction des rayons directs et la normale à la surface.

En ce qui concerne le rayonnement diffus et le Sky View Factor - SVF (permettant d'évaluer l'ombrage sur le diffus), la même routine de calcul est utilisée. Elle est cependant répétée sur 580 positions définies par défaut dont les intensités lumineuses sont calculées à l'aide du modèle de Hay (Iqbal, 1983b). Les résultats de ces 580 sources sont ensuite agrégés pour obtenir le SVF puis l'irradiation diffuse incidente.

#### ➤ **Approche initiale pour le calcul de la réflexion $R$**

CadSol, dans sa version originale, utilise une approche isotrope pour calculer l'irradiation issue des réflexions (Iqbal, 1983 ; Widén et Munkhammar, 2019).  $\beta$  est l'angle d'inclinaison du plan et  $\rho_g$  le coefficient moyen de réflexion de l'environnement proche.

$$R_i = (I_{B,i}^0 + I_{D,i}^0) \rho_g \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Le principal défaut de ce modèle est que la géométrie urbaine locale n'est pas prise en compte. Par conséquent, pour une même inclinaison de la façade, l'irradiation solaire fournie par la réflexion sera identique. Cependant, les modèles existants se sont révélés très approximatifs. L'objectif est donc de proposer une stratégie plus réaliste pour inclure les réflexions (ch. 3.4).

En conséquence, dans l'approche proposée, l'irradiation globale est calculée en deux temps : d'abord les composantes diffuses et directes ( $I_0$ ), puis la composante réfléchie selon la nouvelle méthode présentée au chapitre 3.4.

### **3.3 Modélisation de la texture des façades**

La présentation de l'approche méthodologique est illustrée à travers les deux quartiers pilotes Bergues et Meyrin Cité sur lesquels nous reviendrons au Chapitre 4 pour présenter les résultats.

L'objectif initial était de pouvoir segmenter les façades en parties homogènes ayant des caractéristiques communes (balcons, fenêtres, types de matériau), afin de déterminer le facteur d'albédo par type de surface (matériau) segmentée et les parties éligibles pour intégrer des panneaux solaires.

Nous avons dans un premier temps essayé de regrouper les façades du quartier des Bergues (cf. Chapitre 4.1) par type de matériaux. Différentes méthodes de "clustering" ont été testées, sans donner de résultats probants. Ceci est facilement explicable par la forte variation de l'illumination des façades sur la zone, ainsi un même matériau pourra être très clair au soleil et très sombre dans une ruelle ombragée. Nous avons donc laissé de côté cette étude, pour nous consacrer à la détection d'objet en façade, et avons travaillé dans un premier temps sur la détection de [fenêtres](#). Ces objets pourront ainsi servir pour affiner le modèle de radiation (en leur affectant un albédo différent de celui des façades), et pour l'étude des surfaces disponibles pour l'installation des panneaux solaires.



*Figure 8. Capteur imageur aérienne permettant des prises de vues obliques.*

Afin de mener à bien l'extraction des objets en façade, nous avons utilisé les images aériennes obliques acquises par le canton de Genève en 2019, en même temps que les images nadirales servant au calcul de l'ortho-image. Ces données sont issues d'un système possédant 5 capteurs, comme celui montré sur la Figure 8 précédente. La caméra centrale est la caméra nadirale, les quatre autres caméras vont pointer dans quatre directions différentes (avant, arrière, gauche et droite) avec un angle d'environ 45° avec l'horizon. Ces caméras permettent d'avoir une meilleure vue des façades des bâtiments dans les zones urbaines. Ces données sont disponibles sur demande au prêt du SITG<sup>2</sup>.

Cependant, nous avons dû géoréférencer ces images aériennes obliques (position et orientation), car le géoréférencement de ces données n'était pas d'une qualité suffisante pour garantir la précision lors de l'étape suivante de texturation du modèle 3D des bâtiments. Cette étape de géoréférencement est appelée aérotriangulation, elle consiste à orienter les images sur des points 3D connus en coordonnées terrain et visible dans les images : des points d'appuis. Le résultat de cette étape est visible sur la figure ci-après.

---

<sup>2</sup> <https://ge.ch/sitg/donnees>

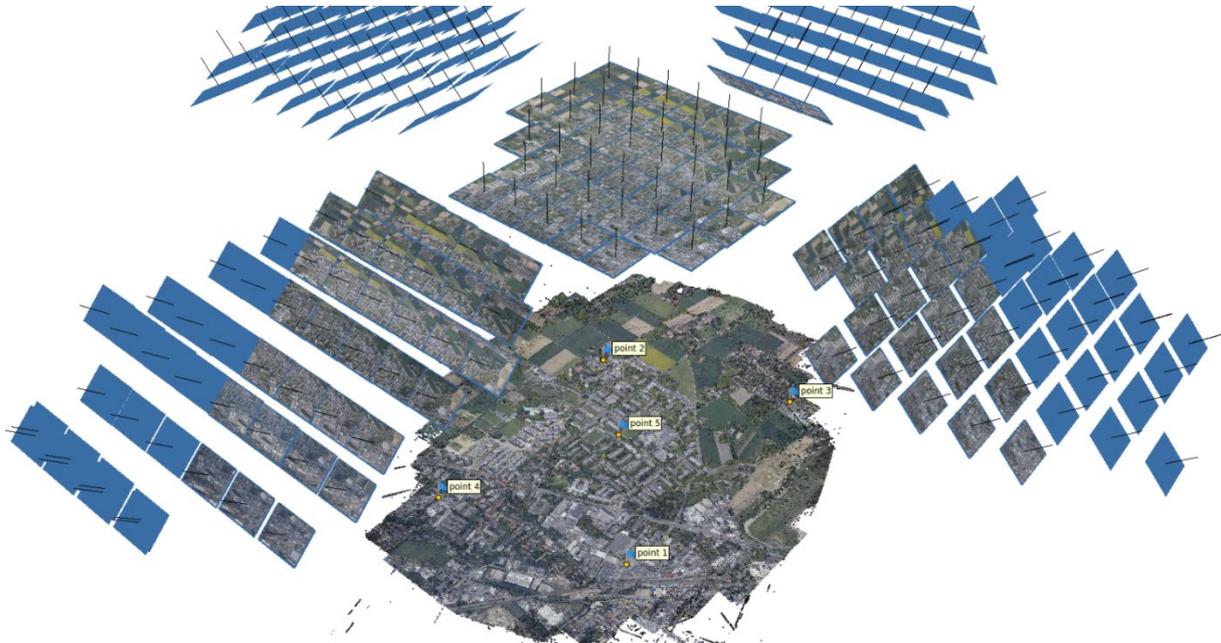


Figure 9. Calcul de l'aérotriangulation des images aériennes obliques sur le quartier de Meyrin. Cinq points d'appuis permettent de garantir la qualité du géoréférencement.

Une fois les images correctement positionnée et orientée, nous avons pu réaliser la texturation du modèles 3D des bâtiments. Cette étape de calcul permet d'apporter le couleur sur les façades, tout en prenant en compte :

- Les zones cachées par un obstacle (autres bâtiments, végétation...)
- Les différentes images voyant la même façade (mosaïquage et égalisation radiométrique).

Le résultat de ce calcul est visible sur l'image ci-dessous. Elle permet d'obtenir un jumeau numérique du quartier.



Figure 10. Modèle 3D texturé des façades visualisées conjointement avec le nuage de points 3D généré par photogrammétrie à partir d'images aériennes (sol, végétation et toit).

Ainsi, pour chaque façade de chaque bâtiment, une ortho-image de façade est générée (voir Figure 11 ci-après). Une telle image est une représentation corrigée de toute déformation des façades, et permettra par la suite d'extraire plus facilement les objets (car on corrige le point de vue fortement oblique des images aériennes), tout en garantissant le géoréférencement des objets ainsi extraits.



Figure 11. Ortho-image de la façade d'un bâtiment du quartier de Meyrin.

Les données ainsi projetées ont pu être introduites dans un algorithme de DeepLearning, pré-entraîné pour la détection de fenêtre<sup>3</sup>. Cet algorithme se base sur un réseau de type Fast-RCNN qui permet d'obtenir d'une part une boîte englobante (BBox) de chaque objet, mais également un polygone détaillé de cet objet. Cette méthode est appliquée sur chaque ortho-image de chaque façade de chaque bâtiment. Enfin, comme nous connaissons le lien entre l'ortho-image et la façade en 3D, nous pouvons facilement reprojeter ces détections dans le modèle 3D des bâtiments (voir Figure 12 ci-dessous).



Figure 12. Résultat de l'extraction automatique des fenêtres sur les ortho-images de façades, reprojétés dans le modèle 3D des bâtiments. Exemple sur le quartier des Bergues.

La méthode ainsi proposée ici permet d'extraire de façon précise les objets de type fenêtre, et ainsi d'enrichir les modèles 3D de bâtiments disponibles sur la zone d'intérêts. Cette méthode pourrait être appliquée sur d'autre type d'objets de façades (balcons, portes, enseignes de magasin...), il suffirait alors d'entraîner un nouveau réseau de neurones sur la base d'une vérité terrain préalablement établie sur la zone. Cette étape permettrait également d'avoir un modèle d'IA plus spécifique<sup>4</sup> aux données aériennes reprojétées et donc d'améliorer les résultats que nous avons pu obtenir dans cette étude.

---

<sup>3</sup> [https://rosenfelder.ai/Instance\\_Image\\_Segmentation\\_for\\_Window\\_and\\_Building\\_Detection\\_with\\_detectron2/](https://rosenfelder.ai/Instance_Image_Segmentation_for_Window_and_Building_Detection_with_detectron2/)

<sup>4</sup> Si on réentraîne un réseau de neurone sur les données, on aura non seulement plus de classes (celles qu'on aura choisi), mais également un apprentissage qui colle mieux au type de données (ici des images aériennes).

### 3.4 Calcul des réflexions

Comme exposé ci-dessus, la composante réfléchie n'est pas suffisamment prise en compte dans les approches courantes ; elle est négligeable sur les surfaces quasi horizontales comme les toitures, mais elle devient quantitativement très importante sur les surfaces verticales. Ce volet consiste à modéliser les inter-réflexions de l'irradiation solaire en milieu urbain à travers *une technique de radiosité* ("radiosity" en anglais). Cela revient à calculer les échanges lumineux entre surfaces en supposant l'ensemble des réflexions diffuses (réflexion dite "lambertienne"). En prenant en compte le coefficient d'albédo de chaque point, l'irradiation solaire réfléchie peut être alors déduite.

Les développements effectués sur la composante réfléchie de l'irradiation solaire sont intégrés avec les autres composantes – irradiations directe et diffuse ( $I_0$ ) – dont les modèles sont présentés au chapitre 1.2. Il sera ainsi possible d'obtenir un potentiel solaire fiable, avec la partie réfléchie améliorée.

Comme souligné auparavant, l'objectif de cette étude est de permettre un calcul des irradiances en façade prenant en compte les effets de réflexions sur les surfaces environnantes. Deux types d'études seront distinguées : les études sur des scènes de grandes échelles () et sur des échelles de tailles plus réduites. Les méthodes utilisées dans le calcul des irradiances pourront alors diverger en fonction du type de scène considéré.

#### ➤ Théorie de la méthode de radiosité

L'idée est d'utiliser une méthode par radiosité qui permet de calculer les réflexions diffuses sur l'ensemble des surfaces composant la scène urbaine. Cette stratégie de calcul repose sur un calcul d'équilibre énergétique représenté par un problème d'algèbre linéaire. Cette méthode nécessite un maillage de la scène urbaine.  $B$  représente la radiosité, soit l'irradiance diffusée ( $[W / m^2]$ ) par chacune des mailles composant la scène urbaine,  $F$  la matrice de facteur de forme et  $\rho$  représente le vecteur des coefficients de réflexion, où  $\rho_i$  correspond au coefficient de réflexion de la maille  $i$ .  $E$  est le terme source, avec  $E_i$  l'irradiance initialement émise par la maille  $i$  ( $[W / m^2]$ ) (cf. Thèse de Raybaud).

Equation de la radiosité :

$$B = E + \rho FB$$

Or cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- Elle nécessite l'utilisation d'un maillage de la scène urbaine
- Elle nécessite le calcul des facteurs de forme pour chaque paire de maille (point de scène)
- Elle nécessite le stockage d'un grand nombre de données (matrice des facteurs de forme notamment).

Ces raisons font que la méthode des radiosités ne peut être appliquée telle quelle dans le cadre de ce projet. Il nous faut alors trouver une stratégie permettant de réduire la dimension du problème.

#### ➤ Adaptation de la méthode des radiosités

La principale astuce consiste à ne pas calculer la radiosité comme l'échange entre points de scène, mais comme l'échange entre points de scène et points virtuels. Chaque point virtuel représente alors, pour un point de scène donné, un ensemble de points de scènes (cf. Figure 13).

Pour obtenir ces points virtuels, on utilise une sphère maillée de rayon 1 centrée sur l'origine : cela permet d'obtenir la direction vers chacun des points de cette sphère. Les points situés sur la sphère

(qui correspondent aux directions dans lesquelles sont fait les tests de visibilité) correspondent aux barycentres des mailles.

L'idée est ainsi de se baser sur l'approche du calcul du coefficient de vue de ciel (SVF) tel qu'introduite par Ratti, qui repose sur l'analyse de visibilité d'un point de scène par rapport à un point du ciel. Selon cette approche, les obstacles potentiels sont explorés dans l'environnement du point de scène en direction du point du ciel selon une progression itérative en  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . Pour chaque couple point de scène – point de ciel, l'objectif est de repérer et enregistrer les coordonnées  $x$ ,  $y$ ,  $z$  du premier obstacle et ensuite le point de la scène le plus proche de l'intersection.

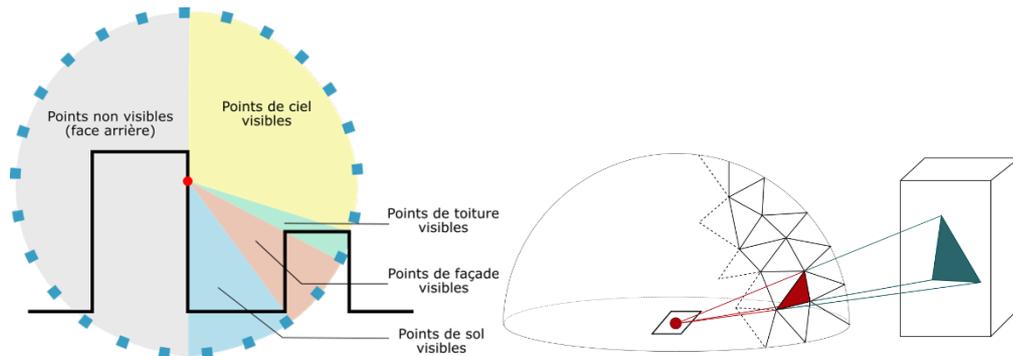


Figure 13. A gauche : Représentation 2D des points de sphère visibles depuis le point central de la sphère. A droite : représentation 3D de la surface verte détectée dans la direction d'exploration associée au barycentre de la maille de sphère rouge.

L'utilisation d'une sphère permet de précalculer les angles solides depuis le centre. Les angles solides sont donnés par la formule suivante :

$$\Omega_i = \frac{S_i}{r^2}$$

Les facteurs de formes sont obtenus à partir des angles solides. Une correction est appliquée. Cette correction correspond au cosinus de l'angle entre la normale au point de scène d'étude et la direction de sphère testée (angle  $\theta_i$ ). On note également que le facteur de forme est non nul si et seulement si un élément est détecté dans la direction d'exploration  $j$  depuis la maille  $i$ . Ce coefficient est noté  $V_{i,j}$ .

$$F_{i,j} = \cos(\theta_j) \Omega_j V_{i,j}$$

Les facteurs de forme sont également normalisés afin d'assurer la conservation de l'énergie (et éviter la création d'énergie en raison d'une approximation numérique). Enfin, la sphère utilisée est de rayon 1 ce qui aboutit à la formule suivante :

$$F_{i,j} = \frac{\cos(\theta_i) s}{2\pi} V_{i,j}$$

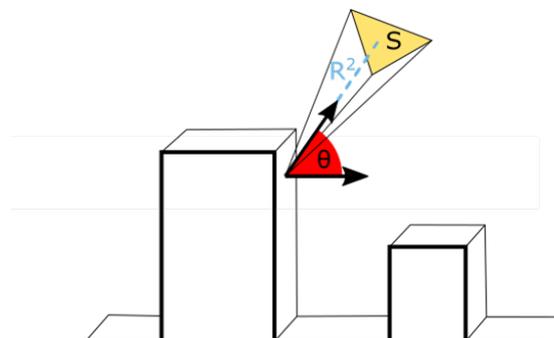


Figure 14 : Calcul de l'angle solide depuis le point d'étude

### ➤ Résolution numérique

Habituellement, le calcul de radiosité s'apparente à une résolution itérative ou une résolution par inversion de matrice.

La construction de la radiosité propos e ici, avec l'utilisation d'une sphère rajoutant une couche de calcul intermédiaire mais permettant de réduire la dimension du problème, ne permet pas de résoudre la radiosité de manière standard.

On utilise alors une stratégie similaire à la radiosité progressive : les réflexions sont calcul es successivement et l'irradiance supplémentaire issue de la réflexion suivante est calcul e à partir de l'irradiance apport e par la réflexion précédente. La première irradiance ( $I_G^0$ ) est initialis e comme l'irradiance initiale issue des rayonnements direct et diffus.

$$\begin{cases} B^0 = I_G^0 \\ B^1 = \text{diag}(F(\rho_S.* B^{0,sph})) \\ \dots \\ B^n = \text{diag}(F(\rho_S.* B^{n-1,sph})) \end{cases}$$

La Figure 15 présente schématiquement une étape de calcul.

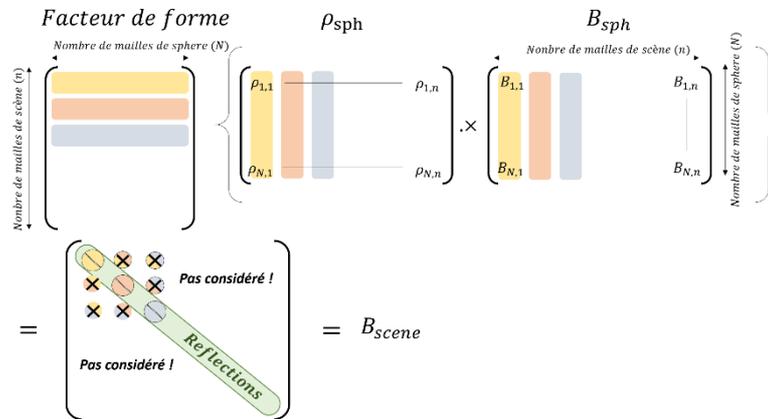


Figure 15. Schéma de la stratégie de calcul mise en place dans le cadre de la méthode adapt e de radiosité dans le modèle R-Cadsol

L'irradiance totale est calcul e comme la somme de l'irradiance initiale et des irradiances issues des réflexions successives. On note  $N_{refl}$  le nombre de réflexions calcul es :

$$B_{tot} = \sum_{i=0}^{N_{refl}} B^i.$$

### ➤ Validation du modèle

Le modèle est validé à partir des travaux de thèse de Raybaud Blaise. Ces travaux présentent une comparaison entre un modèle de radiosité (dont l'approche est standard) et une campagne de mesure en conditions réelles r alis e sur maquette. Ces comparaisons ont permis de valider le modèle de radiosité développé durant cette thèse. En utilisant les données météorologiques issues des campagnes de mesure r alis e dans la thèse comme irradiance initiale dans le modèle R-Cadsol, il est possible d'obtenir les irradiances avec réflexions calcul es par ce modèle. Ces irradiances issues de R-Cadsol sont alors compar es à celles calcul es dans la thèse.

Les données de la journée du 31 mai 2019 sont utilis es. Il s'agit d'une journée claire. On observe sur la Figure 16 que les données issues du modèle R-Cadsol (traits continus) sont très similaires aux données obtenues avec un modèle de radiosité classique (trait-till s), validant le modèle développé dans le projet VALES.

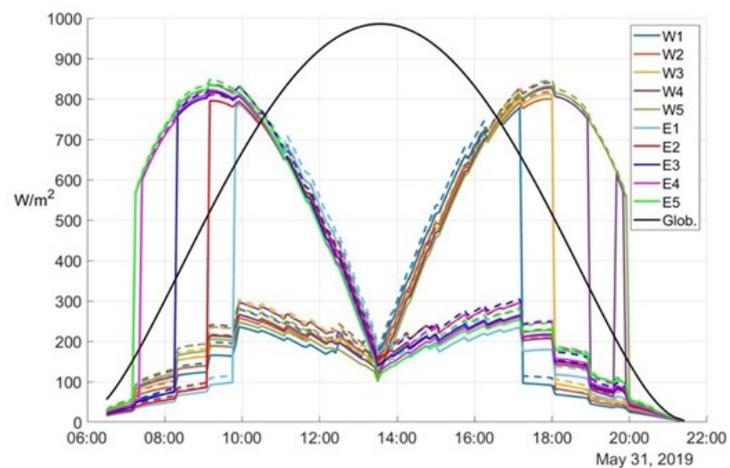


Figure 16. Comparaison des ensoleillements calculés à partir du modèle de radiativité de la thèse de Raybaud (trait-tillé) et des ensoleillements calculés à partir du modèle R-Cadsol (trait continu)

La méthode adaptée de radiativité développée dans le projet VALES a été publiée dans [Raybaud et Desthieux \(2022\)](#).

## 4. Résultats : démonstrations sur des quartiers pilotes

Les outils présentés ci-dessus au Chapitre 3 ont été développés et testés à travers deux quartiers pilotes : dans un premier temps le quartier des Bergues à Genève pour mettre en place les outils, puis le quartier de Meyrin Cité à différentes échelles pour travailler dans un contexte de potentiel réel solaire en façade et travailler sur la performance des outils de calcul.

### 4.1 Bergues

#### 4.1.1 Périmètre et objectifs

L'objectif de ce quartier pilote au démarrage du projet était de mettre en place les outils et travailler sur le flux de données entre les différentes approches telles présentées à la Figure 4.

Le quartier s'y prêtait bien pour une première démonstration, car il offrait une bonne homogénéité architecturale et des images obliques aériennes bien visibles et de bonne qualité notamment pour les façades situées au bord du Rhône.



Figure 17. Délimitation du périmètre du quartier des Bergues. Superficie : 3 ha.

#### 4.1.2 Détection des fenêtres

Comme présenté dans la partie sur la méthodologie, les données d'imageries aériennes ont été récupérées sur la zone du quartier des Bergues, puis correctement géoréférencées à l'aide de point d'appuis. Ces données ont ainsi pu servir à texturer les données de la couche bâtiments 3D du canton sur cette même zone. Une fois cette étape effectuée, nous étions en mesure d'extraire les fenêtres sur les ortho-images des façades des bâtiments (voir Figure 18 ci-dessous). Il est à noter ici que les bâtiments d'un style assez classique, ont permis à notre méthode d'extraction de fenêtres de bien fonctionner, avec un taux important de bonne détection.



Figure 18. Vue d'ensemble de la détection des fenêtres sur le quartier des Bergues.

Les zones en bas des bâtiments se situant dans de petite ruelle ont naturellement posées plus de soucis, à cause de la moins bonne qualité des images sur ces zones. Sur ce type de ruelle, il pourrait être intéressant d'envisager de compléter la donnée aérienne par des prises de vue terrestre, même si on risque aussi d'avoir des problèmes avec le manque de recul. On peut remarquer qu'il s'agit de ruelles sombres et donc très probablement pas les plus intéressante pour l'installation de panneau solaire.

#### 4.1.3 Rendu final de l'irradiation solaire

Une fois l'étape précédente réalisée, le résultat du calcul d'irradiation a pu être reprojété sur le modèle 3D (voir Figure 19 ci-dessous).

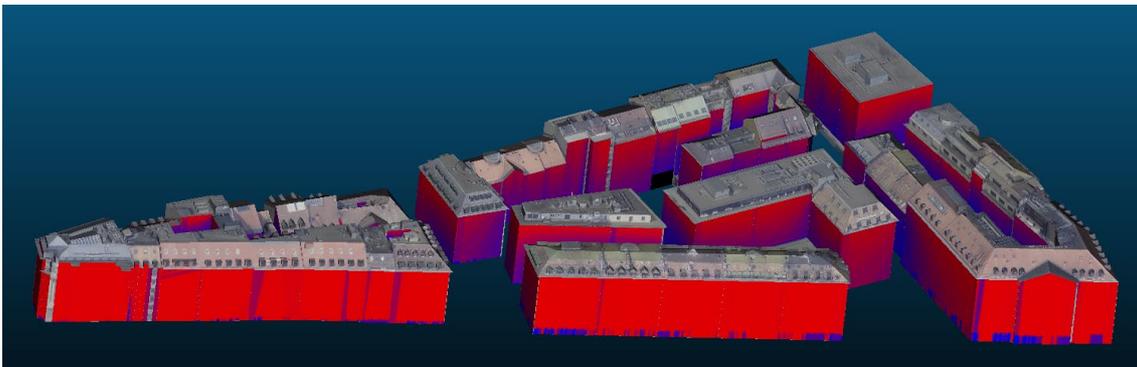


Figure 19. Vue d'ensemble du rendu du calcul d'irradiation annuelle sur les façades des bâtiments des Bergues.

## 4.2 Meyrin

### 4.2.1 Périmètres et objectifs

Deux échelles sont considérées sur ce deuxième quartier pilote : un périmètre restreint ayant une dimension de 300m x 300m (périmètre et bâtiments en *bleu* sur l'image ci-dessous), un périmètre élargi ayant une dimension de 1 km x 1 km (périmètre et bâtiments en *violet*).

Les objectifs de la démonstration sur quartier selon les deux échelles sont les suivants :

- Tester les outils améliorés suite à la démonstration sur les Bergues (en matière de flux et d'échange de données)
- Evaluer le potentiel solaire d'installation en façade (cf. Chapitre 4.2.6) et effectuer un bilan d'autoconsommation dans la perspective d'un projet solaire réaliste et concret (périmètre restreint).
- Tester les performances de calcul sur un quartier élargi (1 km<sup>2</sup>), dans la perspective d'un cadastre solaire des façades à grande échelle (cf. Chapitre 4.2.5).

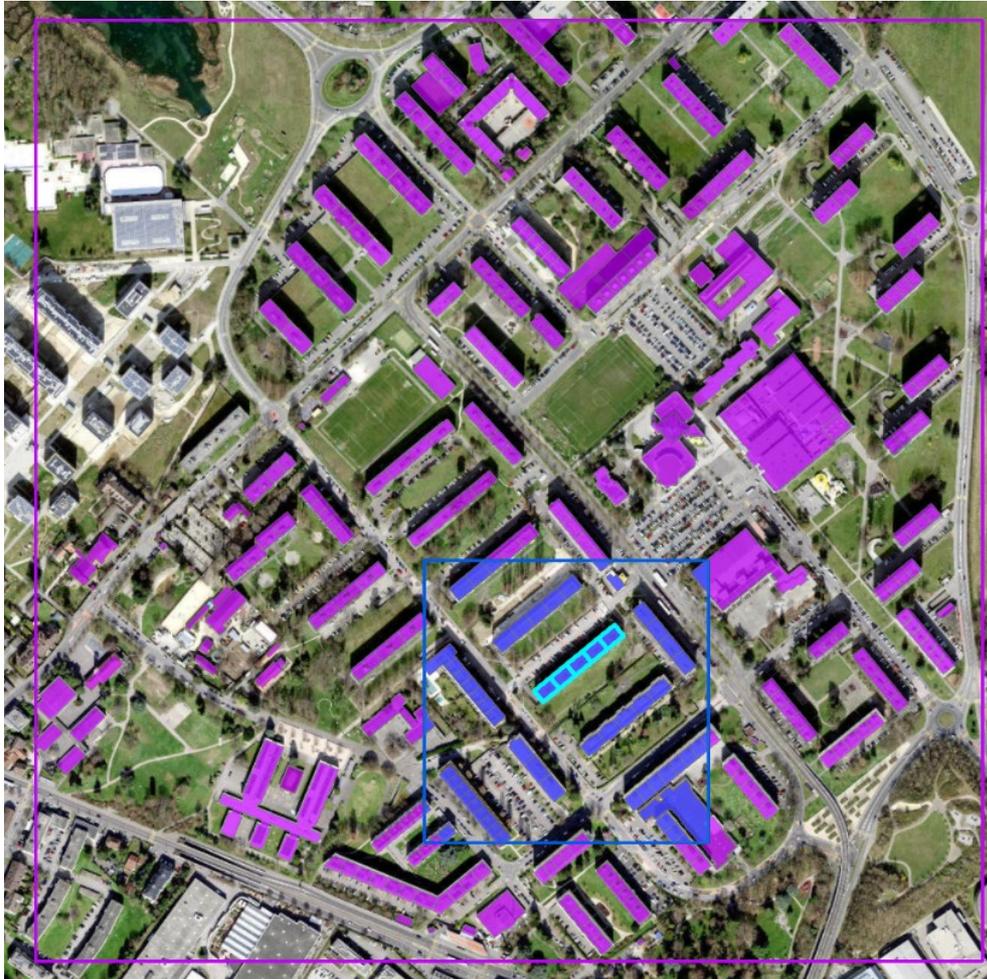


Figure 20. Délimitation des deux périmètres et bâtiments analysés à Meyrin-Cité : périmètre élargi 1km<sup>2</sup> en bleu, périmètre restreint 300m x 300m en bleu. Les bâtiments sélectionnés en bleu clair font l'objet d'une démonstration d'étude solaire au ch. 3.1.7.

#### 4.2.2 Détection des fenêtres

Comme pour le quartier des Bergues, les mêmes étapes ont été réalisées sur Meyrin. Sur cette zone, les bâtiments étant bien espacés les uns des autres, nous n'avons pas constaté de problème en pied de bâtiment. On peut noter de manière anecdotique la présence de quelques arbres cachant certaines parties de façades.

Cependant, ce quartier est composé d'immeubles plus modernes que sur le quartier des Bergues, et nous avons pu constater que ce type d'architecture de fenêtre était beaucoup moins bien détecté par notre algorithme. Il conviendrait ainsi d'effectuer un apprentissage spécifique sur ce quartier afin d'améliorer les résultats de détection de fenêtres.

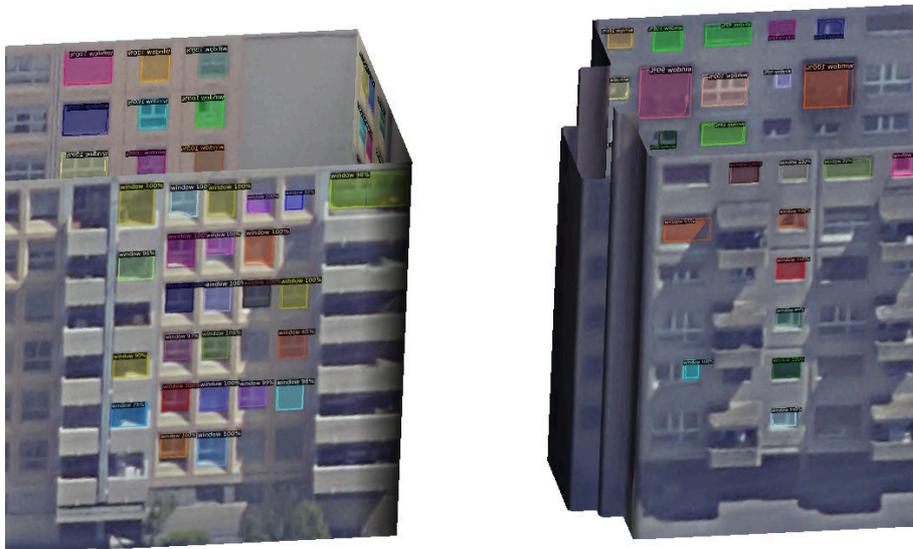


Figure 21. Vue détaillée de l'extraction des fenêtres sur le quartier de Meyrin.

#### 4.2.3 Calcul de l'irradiation en façades – périmètre restreint

Le calcul de l'irradiation solaire en façade, selon la méthode développée dans le projet (cf. Chapitre 3.4), est illustré sur le périmètre restreint de Meyrin Cité.

Pour chaque point, un albédo est affecté à partir de la nature de la surface.

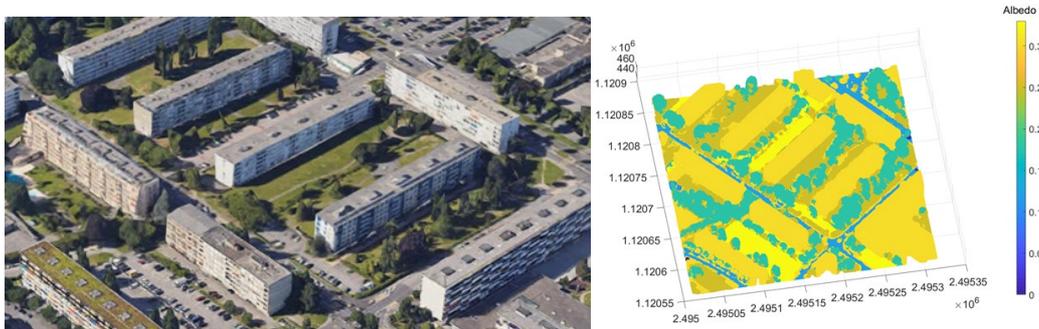


Figure 22. Illustration du quartier de Meyrin (issue de GoogleMaps) et cartographie des albédos figure de droite.

Afin de ne pas calculer les irradiances pour l'ensemble des jours de l'année, on utilise une journée type par mois. Cette journée type tient compte de l'aléa météorologique associée au mois dont elle est issue. Les irradiances sont ainsi calculées à chaque heure de chaque journée type.

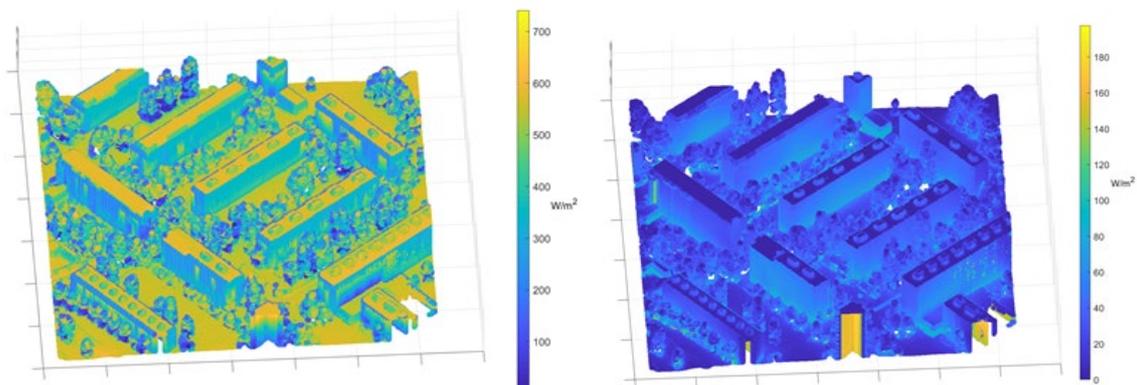


Figure 23. La figure de gauche présente le potentiel solaire issu des rayonnements directs et diffus (uniquement) type pour une journée représentative de mai à 12h00 UTC. La figure de droite présente les apports qui peuvent être issus des réflexions.

En intégrant les résultats obtenus sur l'ensemble de l'année, il est possible d'obtenir un potentiel solaire annuel sur chacun des points de la scène. Il est alors également possible de comparer l'évolution du potentiel solaire entre différents points de la scène. En particulier, il est possible de comparer le potentiel solaire en façade et en toiture. Le graphique sur la Figure 24 (droite) présente notamment l'évolution au cours d'une année type des potentiels solaires sur les points rouges identifiés l'image de gauche. Chaque mois est représenté par une journée type tenant compte des aléas météorologiques.

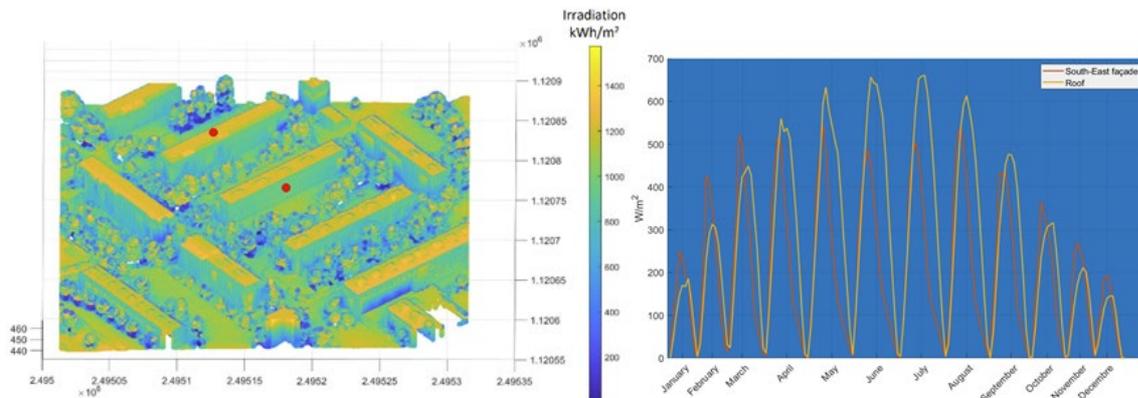


Figure 24. La figure de gauche présente le potentiel solaire annuel sur l'ensemble du quartier de Meyrin (réflexions pris en compte). Les points rouges sont les points dont le potentiel solaire est détaillé figure de droite. La figure de droite présente donc l'évolution annuelle du potentiel solaire pour un point en façade orientée vers le sud/est (courbe rouge) et d'un point en toiture (courbe jaune).

L'analyse de la Figure 24 permet de vérifier la plus-value du potentiel solaire en façade durant les mois d'hiver par rapport au potentiel solaire en toiture.

Il faut toutefois noter que les résultats présentés ci-dessus peuvent comporter des erreurs ou des biais par rapport à la réalité, notamment lorsque l'on s'intéresse à un point en particulier. Les tests de validation montrent que ces erreurs sont minimes mais il convient de les citer ici :

- Des masques non réalistes peuvent être pris en compte. Ces masques peuvent en particulier être issus des points voisins, notamment si ce sont des points de façade et que ces derniers présentent un Id différent. Il s'agit de la principale source d'erreur potentielle.
- Les valeurs d'albédo associées peuvent être approximatives, et dépendre des conditions climatiques
- Les réflexions dites "spéculaires" (type miroir, représentatives du verre à partir d'un angle d'incidence suffisamment conséquent) ne sont pas pris en compte. Ces effets peuvent être considérés par une approche dite de "lancer de rayons" (ray tracing), présentant d'autres caractéristiques que l'approche par radiativité. Une approche hybride a été étudiée dans le cadre d'un autre projet VALES mais elle ne permet pas d'effectuer de calculs à grande échelle.

#### 4.2.4 Analyse de sensibilité

##### ➤ Configuration

L'objectif est de déterminer la sensibilité du modèle de calcul d'irradiation solaire (avec l'outil CadSol) en fonction de deux paramètres : résolution spatiale de la scène et résolution de sphère de transfert.

La résolution de la sphère, sur laquelle sont projetés les rayons provenant des points de la scène pour le calcul des facteurs de forme, est déterminée par le nombre de mailles comme décrit dans le tableau suivant.

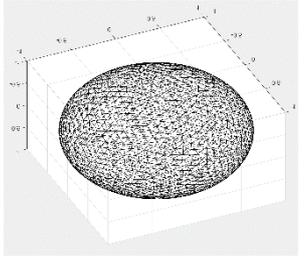
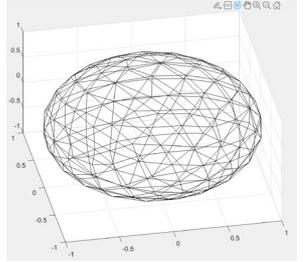
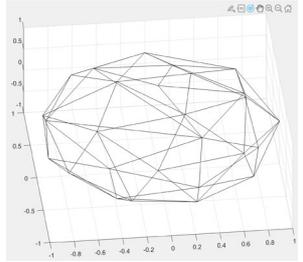
	Sphère n°1	Sphère n°2	Sphère n°3
Nom Matlab	Sphere03	Sphere3	Spere1_5
Nombre de mailles ( $N_{sph}$ )	2968	324	50
Surface moy. mailles (m <sup>2</sup> )	0.0042	0.038	0.2513
Illustration			

Tableau 1. Types de sphère selon la résolution des mailles.

L'analyse de sensibilité est effectuée sur le périmètre restreint de Meyrin-Cité de taille 300m x 300m. Les points concernent le sol, la végétation, les toitures et les façades.

	Scène n°1	Scène n°2	Scène n°3	Scène n°4
Nom Matlab	Meyrin_1m	Meyrin_1_5m	Meyrin_2m	Meyrin_3m
Nombre de points ( $N_{scene}$ )	140 716	63 194	35 389	16 069
Résolution	1m	1,5m	2m	3m

Tableau 2. Résolution spatiale (écart entre les points) et nombre total de points correspondant sur la scène du périmètre restreint.

### ➤ Résultats

L'analyse de sensibilité a pour objectif d'analyser les écarts et différences entre les configurations (combinant résolutions de la scène et de la sphère) sur les aspects suivants :

- Temps de calcul
- Volume de stockage des données
- Résultats d'irradiation

Les deux premiers aspects portent sur le calcul du rayonnement réfléchi uniquement (en deux phases : facteurs de forme et réflexion).

Les résultats sont synthétisés ci-dessous selon trois configurations combinant ainsi les résolutions :

- Minimale (la moins précise) : résolution spatiale 3m, Sphère 1\_5
- Moyenne (hypothèse d'une précision acceptable) : résolution spatiale 1m, Sphère 3
- Maximale (la plus précise) : résolution spatiale 1m, Sphère 03

Concernant l'irradiation, l'écart représente la valeur absolue de la différence moyenne sur tous les points et toute l'année entre deux configurations sur l'irradiance totale annuelle et sur toute la scène (sol, toiture, façade). La comparaison se fait par rapport à la configuration maximale.

	Temps de calcul (h)	Volume stockage (MB)	Différence - irradiation globale (Wh)
Config. minimale	15h30	4'000	0
Config. moyenne	2h40	600	97
Config. maximale	0.0125 h (45 s)	48	1'800

Tableau 3. Synthèse des résultats de l'analyse de sensibilité.

Concernant l'irradiation, une évaluation plus fine a été faite à niveau horaire, sur deux points test en toiture et deux points test en façade. L'écart sur l'irradiation est évalué séparément sur l'irradiation primaire (directe et diffuse) et réfléchi, puis global.

En toiture, sur le rayonnement réfléchi qui nous intéresse particulièrement, l'écart est très faible (< 1 W/m<sup>2</sup>) quelle que soit la configuration, car ce type de rayonnement est lui-même proche de 0 (la réflexion augmentant avec la pente).

En façade, l'écart entre les configurations et celle optimale est tantôt positif, tantôt négatif selon les mois et heures, mais jamais plus que 10 W/m<sup>2</sup>.

### ➤ Conclusions

Les résultats de cette analyse de sensibilité nous permettent de conclure de la façon suivante :

- Résolution spatiale : celle de 1m est appropriée, car au-delà les lignes de façade risquent de ne pas être modélisée de façon suffisamment précise, surtout dans les coins et zones de discontinuité. On pourrait toutefois envisager d'avoir une résolution verticale différente (par exemple 2m) s'il s'agit de gagner en efficacité.
- Sphère : la Sphère 03 impliquant des temps de calcul et surtout de volume de stockage prohibitif. La Sphère 1\_5 se traduit par des écarts plus significatifs au niveau de l'irradiation globale. Tandis que l'écart est très faible entre la Sphère 3 et la Sphère 03, avec toutefois un gain très important en temps de calcul et volume de données. Néanmoins l'écart observé de 1'800 Wh entre les Sphères 1\_5 et 3 est très faible en absolu au niveau annuel. Mais, la Sphère 1\_5 implique un nombre de points de sphère très faible et risque de fausser les résultats de réflexion dans les scènes urbaines complexes et discontinues. Ainsi, la Sphère 3 paraît être un bon compromis.

En conclusion, dans la perspective d'un cadastre solaire à large échelle des façades, la configuration 1m – Sphère 3 paraît appropriée. Avec la perspective de migrer le code du modèle de MatLab vers un langage C++ compatible avec une machine GPU, le gain en temps de calcul sera très important.

## 4.2.5 Résultats sur le périmètre élargi

Nous avons voulu tester l'utilisation du modèle sur la scène élargie de Meyrin de 1 km<sup>2</sup> dans la perspective d'un cadastre solaire à grande échelle (en travaillant avec des tuiles de 1km<sup>2</sup>). La configuration suivante a été choisie : « Sphere1\_5 », résolution spatiale de 1m en horizontal et de 2m en vertical, il est possible de calculer le potentiel solaire annuel sur une scène de 1 km<sup>2</sup> de superficie.

Avec le prototype encodé en MatLab, il en ressort un temps de calcul relativement prohibitif de 25h (facteurs de forme + irradiances). Mais avec les développements prévus sur un code C++ et une

machine GPU, le temps de calcul sera certainement plus raisonnable, y compris avec une configuration de plus haute résolution (idéalement Sphère 3 et résolution spatiale verticale/horizontale de 1m).

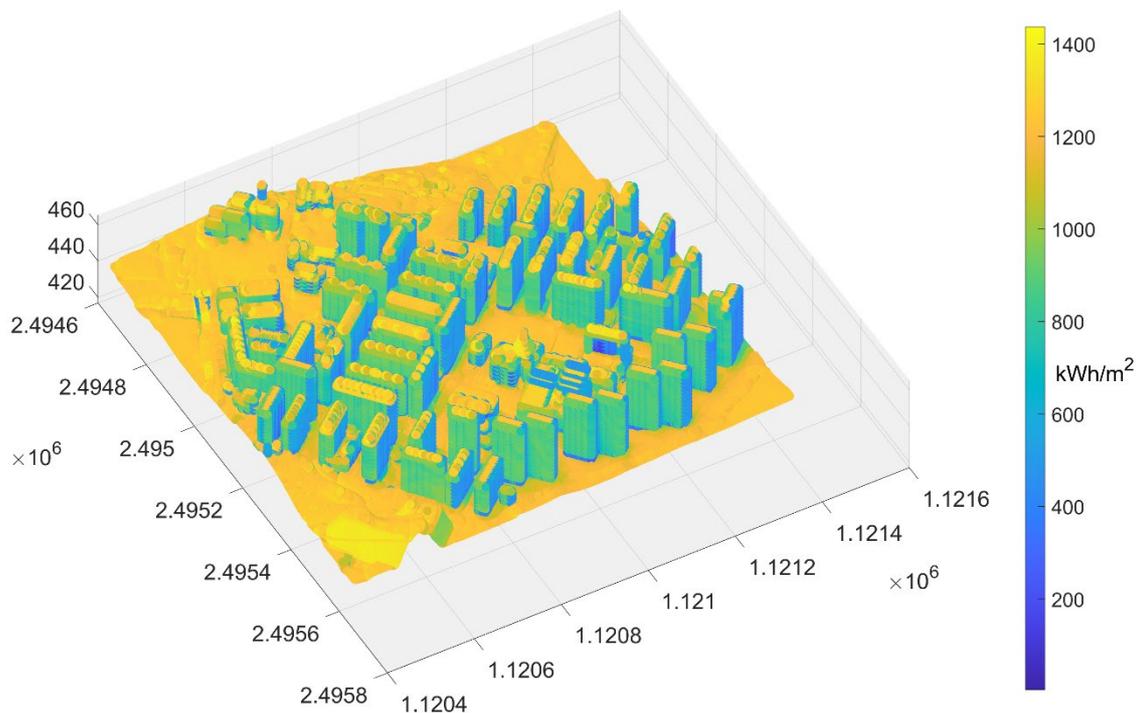


Figure 25 : Irradiance annuelle sur le quartier de Meyrin élargi (1,5km<sup>2</sup>) calculé avec une résolution spatiale de 1m et une résolution verticale de 2m (et modèle de sphère Sphere1\_5). Temps de calcul : approx. 25h (facteurs de forme compris).

#### 4.2.6 Démonstration d'une étude de faisabilité d'un projet solaire

##### ➤ Introduction et périmètre d'analyse

Nous souhaitons démontrer ici l'intérêt de l'outil présenté pour effectuer une étude de faisabilité d'un projet solaire intégrant le potentiel aussi bien en toiture qu'en façade.

L'usage de l'outil consiste à sélectionner les points de façades en vue d'une installation solaire selon deux critères : un niveau de rayonnement minimal (par exemple > 750 kWh/m<sup>2</sup>/an) et des caractéristiques de façade appropriées en fonction de la classification de la texture (par exemple, les points situés sur des surfaces vitrées ne seront pas pris en considération).

Il sera ainsi possible, sur le quartier pilote analysé, de déterminer les meilleures parties de façades pour des installations solaires et ainsi le potentiel de production énergétique avec des panneaux solaires PV adéquats. Le modèle 3D développé dans le projet constitue un support pour une visualisation communicative des résultats à l'échelle du quartier et favorisera la prise de décision sur l'installation solaire en façades.

La démonstration est faite pour l'une des barres d'immeubles du périmètre restreint, située à la rue Prulay n°30-38 (cf. bâtiments sélectionnés en bleu Figure 20), qui contient deux façades bien exposées au soleil et peu ombragées par la végétation : façade sud-ouest en très grande partie opaque (en **violet** sur l'image ci-dessous), façade sud-est alternant des bandes vitrées et des bandes opaques (en **vert**).



Figure 26. Bâtiment pour la démonstration d'étude de faisabilité solaire, en violet la façade sud-ouest, en vert la façade sud-est, en bleu la toiture.

L'hypothèse est faite que dans la perspective d'une rénovation du bâtiment (tout à fait éligible à ce titre, ayant un IDC = 589 MJ/m<sup>2</sup>/an), il serait intéressant de considérer des installations non seulement en toiture mais aussi en façade sur les parties opaques des deux façades bien exposées.

#### ➤ Sélection des surfaces éligibles

Le principe donc est de calculer de potentiel sur les parties non obstruées (par des éléments techniques en toiture et des fenêtres en façade) et bien irradiées, en considérant les seuils suivants : >800 kWh/m<sup>2</sup>/an en toiture, >750 kWh/m<sup>2</sup>/an en façade.

La Figure 27 ci-dessous donne une représentation 3D sur l'immeuble étudié des niveaux d'irradiation en toiture (couche raster de l'irradiation solaire) et façade (nuage de points).

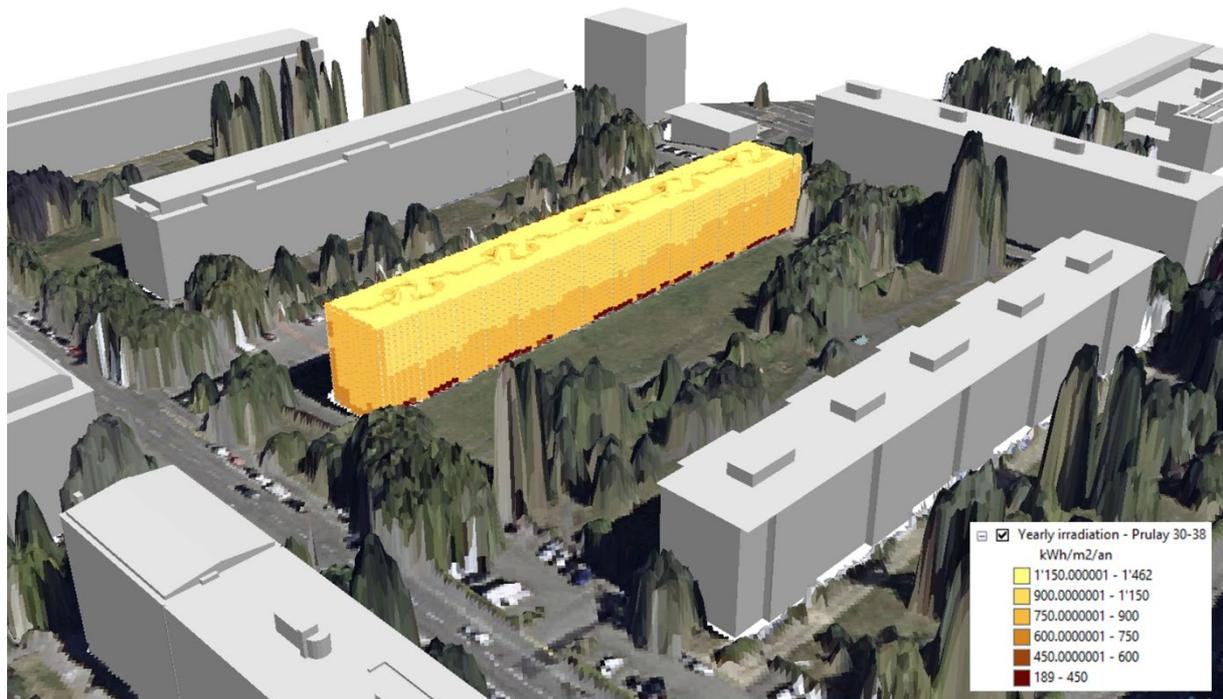


Figure 27. Représentation 3D du potentiel brut solaire en toiture et façade sur l'immeuble étudié.

La variation des niveaux d'irradiation en façade est due aux ombres portées provenant de l'environnement proche, en particulier la rangée de végétation côté sud-est.

Concernant les fenêtres, l'image suivante détaille la détection des fenêtres, selon la méthode présentée plus haut, sur l'immeuble étudié.

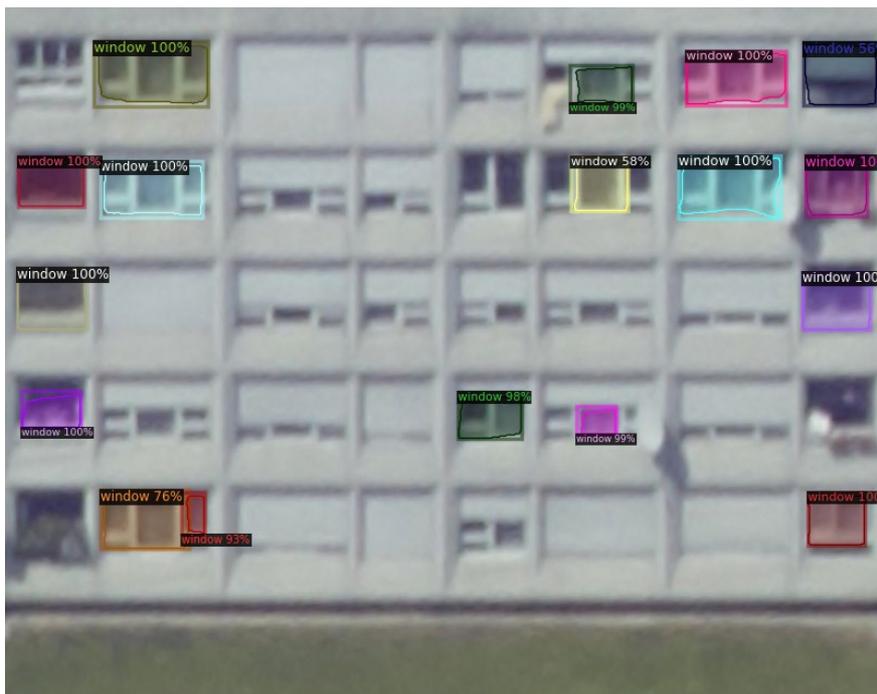


Figure 28. Détail de la détection des fenêtres sur l'immeuble étudié.

Nous constatons que le nombre de fenêtres détectées est bien inférieur à la réalité ; ceci est étroitement lié aux stores baissés qui ont la même couleur que la partie opaque et qui rend donc difficile la détection automatique des fenêtres.

En projetant le nuage de points, logiquement les points intersectant les fenêtres sont peu nombreux (Figure 29, points **rouges**). Les points **violet** (modélisés manuellement) sont ceux qui devraient être en théorie détectés selon la réalité (telle que représentée sur la photographie Figure 26).

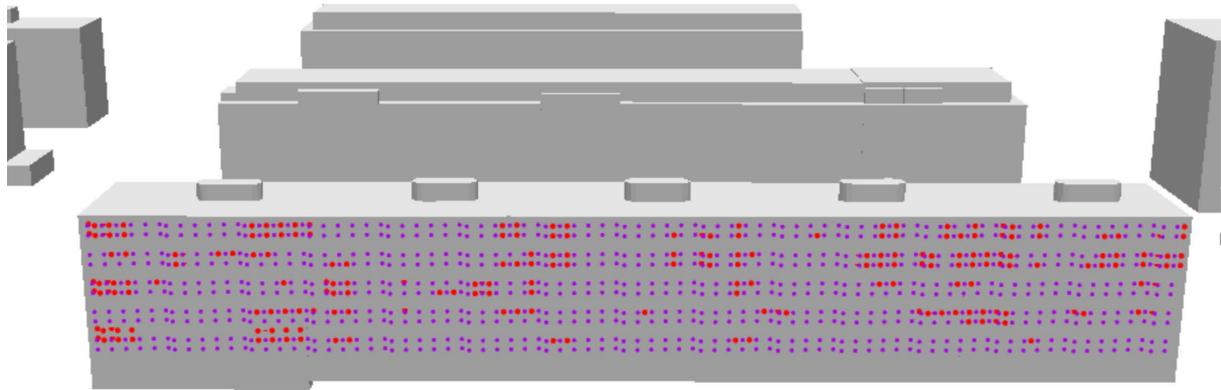


Figure 29. Extrait sur la façade sud-est. Points identifiés (rouge) comme fenêtres selon la méthode de détection automatique, points (violets) qui devraient en théorie être détectés selon une correction manuelle.

Pour la suite, au titre de la démonstration d'une étude solaire, nous utilisons la version corrigée manuellement incluant toutes les fenêtres. Selon les critères exposés plus haut (irradiation minimale et partie opaques), la Figure 30 suivante représente les pixels en toiture et points en façade sélectionnés pour une installation solaire.

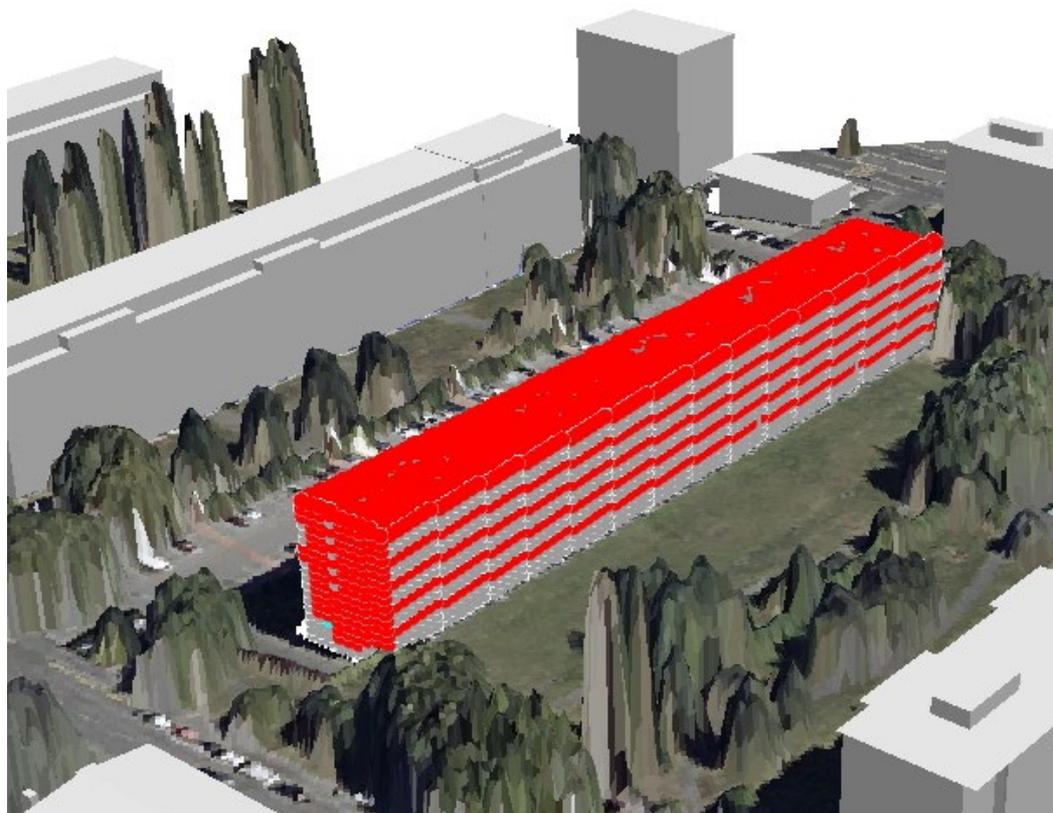


Figure 30. Représentation 3D du potentiel brut solaire avec les fenêtres (image de gauche), sélection des pixels de toiture et points façade en rouge (image de droite).

Les données géométriques correspondantes aux surfaces totales et à celles sélectionnées en rouge sont les suivantes :

	Toiture	Façade sud-ouest	Façade sud-est
Surface totale (m <sup>2</sup> )	1'678	206	1'445
Surface fenêtres (m <sup>2</sup> )	N.A	5	850
Surface éligible (selon critères) (m <sup>2</sup> )	1'337	157	477

Tableau 4. Caractéristiques géométriques de la toiture et des façades. Critères de sélection pour surface éligible : irradiation minimale de >800 kWh/m<sup>2</sup>/an en toiture, >750 kWh/m<sup>2</sup>/an en façade, éléments opaques en façade.

#### ➤ Etude de faisabilité solaire

L'étude de faisabilité porte sur l'analyse technico-économique d'un projet solaire en toiture et façade, privilégiant l'autoconsommation du courant solaire produit avec bon rendement économique.

A ce titre, nous utilisons la nouvelle [application Web](#) du cadastre solaire du Grand-Genève qui permet d'effectuer cette analyse<sup>5</sup>. Le calcul de base est réalisé uniquement sur les toitures. Mais en reprenant la même méthode de calcul, nous élargissons l'analyse ensuite aux façades.

Les extraits du site Web (Figure 31) fournissent toutes les données de potentiel solaire en toiture concernant l'un des bâtiments constituant la barre d'immeubles<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Cette application a été développée dans le cadre du projet INTERREG France-Suisse V G2-Solaire qui a permis d'étendre le cadastre solaire genevois au Grand Genève et de développer la nouvelle application Web. Le projet a été notamment porté en Suisse par HEPIA (USMB en France) et associé étroitement SIG.

<sup>6</sup> Le bilan se fait par entrée ou EGID et non pas sur plusieurs bâtiments à la fois. Dans notre cas où souhaitons faire un bilan plusieurs entrées à la fois, nous recourons à la base de données utilisée par l'application Web et disponible sur le SITG. Dans les développements futurs de l'application Web l'intention sera notamment de permettre de faire un bilan sur plusieurs entrées à la fois comme dans le cas présent.

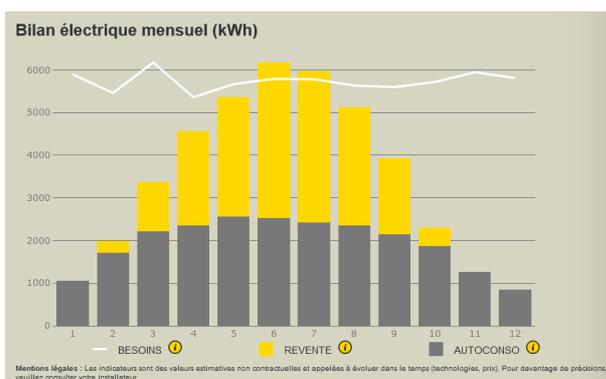
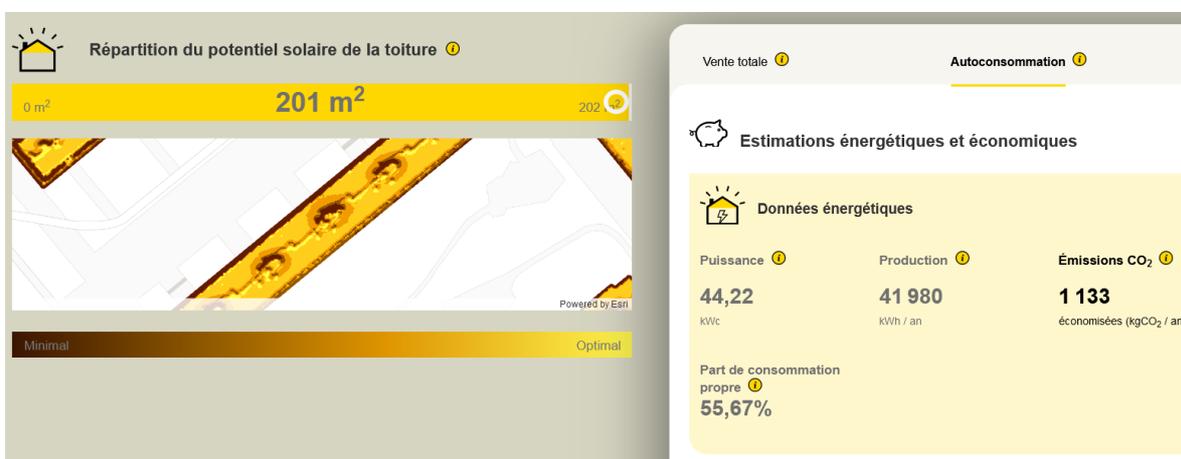
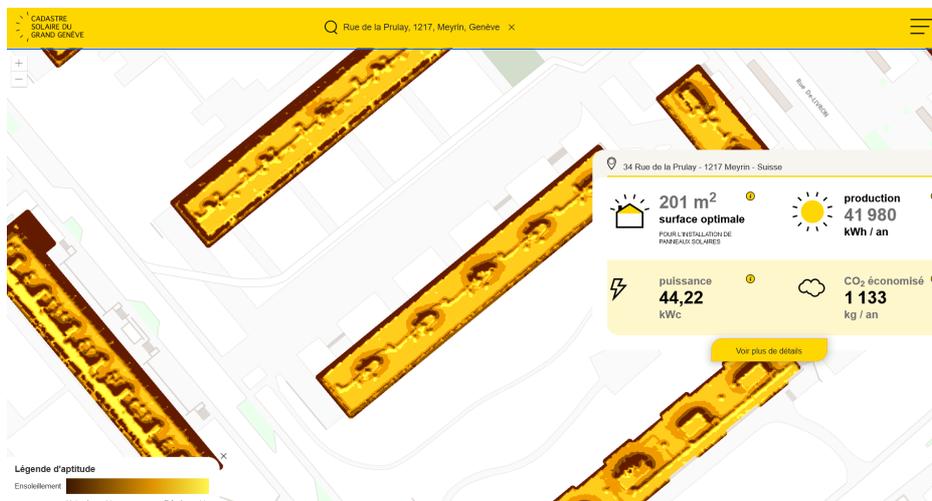


Figure 31. Extrait de l'application Web du cadastre solaire avec les données concernant l'un des immeubles du bloc étudié.

Les résultats de l'analyse technico-économique avec les toitures seules (sur la base du cadastre solaire) et toitures + façades (selon les parties sélectionnées en rouge, Figure 30) sont résumés dans le tableau ci-dessous. Les valeurs économiques sont calculées dans le cas d'une installation groupée à l'échelle de la barre d'immeubles (principe d'économie d'échelle), considérant les tarifs d'électricité (achat et reprise) et subventions valables en 2022. Le bilan d'autoconsommation est calculé pour une consommation approximative d'électricité (ménages + communes) de 300'000 kWh/an totale pour toutes les entrées.

Avenue Prulay 30-38 Meyrin avec/sans Façade		sans Façade	avec Façade	Différence sans - avec
<b>Données installations</b>				
Surface modules	m <sup>2</sup>	1'195	1'829	53%
Puissance installée	kWc	263	358	36%
Production annuelle	MWh/an	277	347	25%
Puissance par emprise bâtiment	W/m <sup>2</sup> Sol	162	220	36%
<b>Bilan énergétique</b>				
Consommation électricité	MWh/an	300	300	0%
Taux d'autoconsommation	%	50%	42%	-15%
Taux autonomie énergétique	%	46%	49%	7%
<b>Indicateurs économiques</b>				
Investissement brut	CHF	317'367	512'862	62%
Coût spécifique	CHF/kWc	1'207	1'433	19%
Subventions	CHF	94'657	143'007	51%
Déductions fiscales	CHF	-	-	-
Investissement net	CHF	222'711	369'855	66%
Coûts d'exploitation (ch. fiscales comprises)	CHF/an	3'174	5'129	62%
Recettes liées à l'autoconsommation	CHF/an	32'683	34'993	7%
Recettes liées à la revente	CHF/an	19'447	27'830	43%
Annuités	CHF/an	12'790	21'240	66%
Surplus investisseur	CHF/an	36'166	36'454	1%
Temps de retour sur investissement	ans	5.0	7.2	46%
Taux de rentabilité interne (25 ans)	%	17%	9%	-46%

Tableau 5. Synthèse de l'étude technico-économique sur les toitures seules et toitures + façades, valeurs totales pour toutes les entrées d'immeuble. Le revenu annuel (surplus) est calculé ainsi : Recettes – frais – annuités.

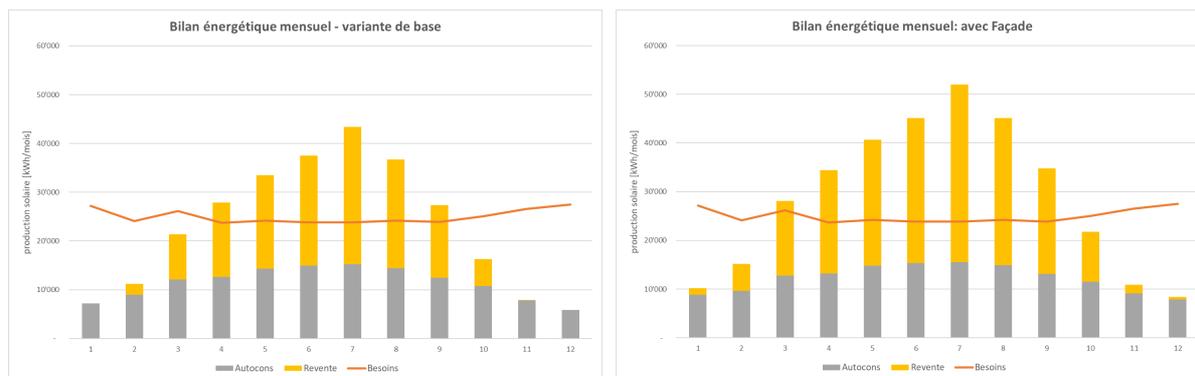


Figure 32. Bilan d'autoconsommation mensuel toitures seules (gauche) et avec façades (droite)

Nous constatons ainsi, à travers cet exemple, que les installations solaires sur les façades permettent d'augmenter la puissance totale installée de 36%. La part de consommation propre baisse un peu par rapport à une installation en toiture seule (de 50% à 42%) mais le niveau reste très élevé quand-même. Nous voyons sur les graphiques les parts mensuelles de courant revendu au réseau (en orange) augmente avec l'installation en façade. En optimisant l'utilisation des appareils électriques durant les heures ensoleillées ou à travers l'augmentation de la mobilité électrique, il sera certainement possible d'améliorer davantage la part de consommation propre (pas de perspective de pompe à chaleur puisque l'immeuble est raccordé au réseau CAD SIG).

Du fait du tarif de rachat avantageux du courant solaire en surplus à Genève, l'installation en toiture + façade permet un revenu annuel plus important que celle en toiture seule, et le temps pour rentabiliser l'investissement n'augmente que très peu (de 5 à 7.2 ans).

Ces résultats montrent aussi la part d'apport non négligeable de l'énergie solaire durant les mois d'hiver (décembre à février) : dans l'exemple présenté, les toitures permettent de **couvrir 28% des besoins durant ces mois, et toitures + façades 33% des besoins**. Ainsi si le solaire ne suffit à l'autonomie totale, il permet toutefois de fortement alléger la charge sur le réseau électrique (chaque kWh solaire autant de m<sup>3</sup> d'eau préservée dans les barrages !).

Cette démonstration montre ainsi la perspective d'élargir l'application Web aux façades lorsque la donnée cadastrale sera disponible (moyennant aussi un autre développement prévu sur l'application Web consistant à pouvoir réaliser un bilan sur plusieurs entrées d'immeuble à la fois, comme c'est le cas ici).

## 5. Mesures d'ensoleillement en situation réelle

La question est de savoir si la modélisation du rayonnement solaire donne des résultats fiables par rapport aux phénomènes physiques observés.

C'est pour cette raison que nous entreprenons depuis décembre 2022 une campagne de mesures d'ensoleillement à la rue des Grottes à Genève. Nous pourrons comparer les résultats du modèle avec les mesures réalisées pendant 1 an et ainsi améliorer la qualité du modèle en fonction des écarts observés.

La rue des Grottes constitue un « canyon » typique avec des façades orientées sud-ouest (n°18) et nord-est (n°11). Cette disposition nous permettra d'observer l'effet des inter-réflexions entre les deux façades et du sol vers les façades. En effet, le rayonnement réfléchi constitue un apport d'énergie solaire important sur les façades.

De plus, les immeubles choisis appartiennent à la Ville de Genève particulièrement engagée sur la transition énergétique et climatique.

Le bilan énergétique se fait généralement sur une année entière en comptant les kWh obtenus par an. De plus, nous pourrons aussi relever les mesures sur des journées typiques représentatives des différentes saisons comme aux solstices d'hiver et d'été, ainsi qu'aux équinoxes du printemps et d'automne.



Figure 33. Installation des instruments de mesure en façade aux n°11 et 18 rue des Grottes

Comme illustré ci-dessus, le dispositif contient principalement deux éléments :

- Pyranomètre : c'est l'élément central du dispositif disposé à chacun des 3 étages. C'est un capteur qui convertit le rayonnement solaire global qu'il reçoit en un signal électrique qui peut être mesuré. Les mesures se font toutes les 10 minutes. La mesure à chaque étage permet d'observer l'évolution du rayonnement en fonction de la hauteur.
- Kit d'alimentation autonome installé au deuxième étage : le dispositif nécessite de l'électricité pour fonctionner. Afin de ne pas déranger les locataires, les pyranomètres sont alimentés (à travers les câbles jaunes) par une batterie elle-même rechargée par un panneau solaire.

L'installation a été réalisée avec succès le 21 décembre 2022 par l'entreprise ABV Corde depuis les toitures.

*Précision importante : l'installation sert uniquement à faire des mesures d'ensoleillement. Mais aucun projet d'installation solaire n'est prévu à la rue des Grottes !*

## 6. Communication et valorisation

Le projet VALES a fait l'objet de deux valorisations dans les médias :

- A travers le programme de [Fonds Vitale Environnement et Innovation](#) : page Web dédiée et capsule vidéo.
- Le projet a été présenté dans le cadre de l'émission « [GO solutions](#) » du Léman bleu (diffusée en février 2022), et de l'émission [Radio Lac : Réinventons demain](#) (diffusée le 16.12.22)

Le projet a fait l'objet de deux publications scientifiques : Thebault et al. (2021), et Raybaud et Desthieux (2022).

Enfin, HEPIA est partenaire scientifique du projet [HELIOS](#) coordonné par l'Université de Trondheim en Norvège (NTNU) qui s'intéresse à développement des solutions innovantes pour intégrer l'énergie solaire dans les villes nordiques. Les résultats du projet VALES seront valorisés dans le cadre de HELIOS.

## 7. Conclusions et perspectives

Ce rapport a présenté les résultats d'un projet ayant pour intention de cartographier le potentiel solaire des façades des bâtiments à large échelle, tout en caractérisant de façon suffisamment fiable la composante du rayonnement réfléchi qui est la plus complexe à modéliser, et améliorant le niveau de détail des façades, par rapport aux modèles 3D urbains usuels.

Pour ce faire, une méthode simplifiée de radiosité a été introduite pour calculer le rayonnement réfléchi, travaillant sur l'intervisibilité entre les points d'une scène à travers une sphère virtuelle (plutôt que via des intersections entre les points impliquant un volume de stockage et temps de calcul prohibitif à large échelle). Une analyse de sensibilité (faisant varier la résolution spatiale de la scène et des points de la sphère) a permis de déterminer une configuration optimale permettant un bon compromis entre un résultat suffisamment précis et un temps de calcul et volume de stockage des données de sortie raisonnables (résolution 1m et modèle de Sphère 3).

De plus, sur le volet de la modélisation 3D, une approche photogrammétrique a été développée, à partir d'images obliques aériennes et des modèles 3D de bâtiments, pour permettre de générer de façon automatique sur tout un quartier des ortho-images de façades, permettant la détection des fenêtres par DeepLearning. Ceci afin de mieux caractériser l'albédo des façades et d'identifier les zones où des panneaux solaires peuvent être installés (les fenêtres constituant les principaux obstacles).

Les outils ont été développés et testés à travers deux quartiers pilotes : le premier ayant pour objectif de mettre au point les méthodes, le quartier des Bergues à Genève sans objectif de valorisation solaire particulière, le deuxième, le quartier Meyrin Cité représentatif d'une valorisation solaire possible en façade dans le cadre notamment de rénovations en cours ou à venir.

Le développement et l'application des méthodes présentées a permis de soulever certaines limites constituant des axes de travail pour la suite :

- Géoréférencement imparfait des images obliques aériennes (en vue de créer le modèle 3D des façades) : cette limite se situe du côté du producteur de la donnée et a pour conséquence un travail important de notre part pour corriger ce géoréférencement. Dans la perspective d'un cadastre solaire à plus large échelle, le producteur (via l'Etat de Genève) devra corriger cette lacune.
- Détection imparfaite des fenêtres : comme illustré sur le cas de Meyrin, l'algorithme de détection de fenêtres par DeepLearning pourrait être amélioré en réalisant un apprentissage spécifique sur des images obliques de Genève. Dans le cadre d'un cadastre à large échelle, il faudrait donc prévoir de faire un nouvel apprentissage en sélectionnant au préalable des échantillons représentatifs des différents types de fenêtres sur la zone considérée.
- Temps de calcul et volume de stockage : le prototype informatique pour calculer le rayonnement réfléchi a été encodé avec le langage Matlab, qui n'est pas optimal en matière de temps de calcul. Il en résulte un temps de calcul prohibitif pour un quartier élargi de 1 km<sup>2</sup> (25h avec une configuration à faible résolution). Un travail au niveau informatique est en cours pour calculer des zones plus larges. Cependant, quelle que soit la puissance de calcul, il s'agira de gérer un grand volume de données.

Le projet présenté s'inscrit dans la perspective de [réaliser un cadastre solaire des façades à large échelle](#), en vue de compléter le cadastre solaire existant des toitures à l'échelle du Grand Genève. Il sera ainsi possible d'enrichir le bilan d'autoconsommation avec la composante façade, comme cela a été démontré au chapitre 4.2.6, et constituer une aide à l'investissement.

Dans cette perspective, il s'agit de déterminer les [zones prioritaires](#) à Genève faisant l'objet d'un tel cadastre (sans doute les zones villas ne sont pas très pertinentes, ni les secteurs historiques classés au patrimoine).

Des travaux sont en cours de démarrage pour migrer le code Matlab vers un code C++ permettant d'utiliser les [machines GPU](#) et [accélérer sensiblement le temps de calcul](#). Les zones prioritaires ne seront pas calculées en une fois mais découpées en tuile (autour de  $1\text{km}^2$ ), pour gérer le volume de stockage notamment, pour être ensuite assemblées.

Enfin, nous souhaitons poursuivre la validation de la méthode simplifiée de la radiosité développée dans le projet. Pour ce faire, les résultats théoriques seront comparés à des données d'irradiation mesurées sur deux sites :

- L'une des tours des Vergers à Meyrin équipée de panneaux solaires en façade et faisant l'objet d'un monitoring.
- Simulation d'un canyon urbain dans le quartier des Grottes : comme présenté au chapitre 5 des pyranomètres ont été installés en décembre 2022 sur deux façades en vis-à-vis (une installation à chacune des 3 étages), ce qui permettra de mesurer l'irradiation solaire toutes les 10 minutes pendant 1 an.