



# CADASTRE SOLAIRE DU CANTON DE GENEVE

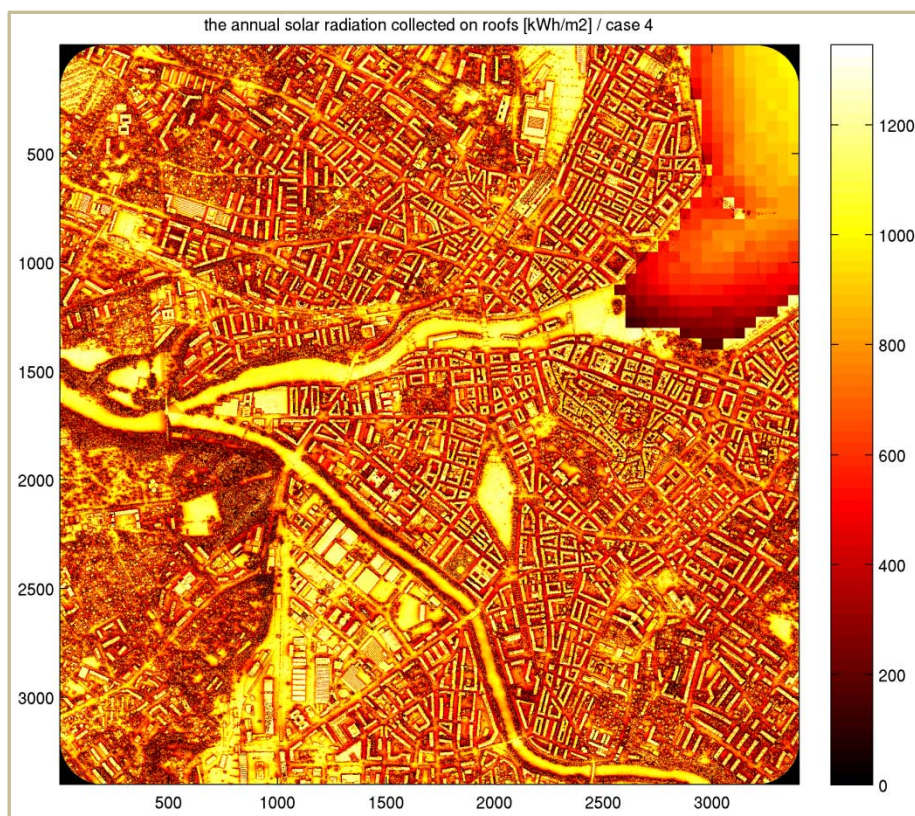
## Rapport final

Etude réalisée par hepia, EPFL et Politecnico di Milano  
pour le compte du Service de l'énergie-ScanE et des Services industriels genevois (SIG)



REPUBLIQUE  
ET CANTON  
DE GENEVE

POST TENEBRAS LUX



Décembre 2011

Auteurs : Gilles Desthieux (hepia), Cláudio Carneiro (EPFL), Eugenio Morello (Polimi)

# Table des matières

1	Références et contexte de l'étude .....	3
2	Présentation de l'outil SIG – Solaire .....	3
2.1	Vue générale sur l'outil SIG-Solaire.....	3
2.1.1	Données sources .....	4
2.1.2	Construction du modèle numérique de surface – 2.5D .....	5
2.1.3	Productions d'images d'input pour le calcul de radiation .....	5
2.1.4	Calcul de l'irradiation horaire sur plan incliné .....	6
2.1.5	Production d'indicateurs .....	6
2.2	Données météorologiques.....	6
2.3	Modèle solaire et ombrage .....	6
2.4	Fiabilité et tolérance .....	7
2.4.1	Valeurs horaires moyennes.....	7
2.4.2	Modèle anisotrope de radiation diffuse .....	8
2.4.3	Modèle numérique de surface reconstruit à 0.5 m de résolution.....	8
2.4.4	Modèle du ciel (demi-hémisphère et Sky View Factor) .....	8
3	Résultats du cadastre solaire genevois .....	9
3.1	Découpage du territoire en tuiles et gestion du recoupement.....	9
3.2	Exemple de Modèle numérique de surface – 2.5D (MNS 2.5-D) .....	10
3.3	Analyse d'ombre portée, selon les périmètres proche et lointain (relief) .....	11
3.4	Irradiation brute .....	13
3.5	Statistiques d'irradiation par vecteur de toit .....	14
4	Discussion des résultats et problèmes relevés .....	14
4.1	Fiabilité du LiDAR en altimétrie .....	14
4.2	Classification imparfaite des points LiDAR sur la végétation .....	15
4.3	Couche vecteur incomplète des toitures.....	16
4.4	'Matching' incomplet entre les couches raster de l'irradiation et les vecteurs des toits/bâtiments.....	16
5	Liste couches d'information délivrées .....	17
6	Liste des manifestations et conférences.....	17
7	Conclusions et perspectives .....	18

# 1 Références et contexte de l'étude

Dans le contexte actuel d'un intérêt marqué pour l'utilisation de ressources énergétiques renouvelables locales, le territoire constitue un *gisement* très important et est encore sous-exploité par manque d'information. En particulier, les surfaces construites comme les toitures des bâtiments offre un potentiel remarquable pour la valorisation de l'énergie solaire.

Trois chercheurs d'institutions académiques différentes ont développé un outil 'SIG-solaire' qui a été mis à disposition de la présente étude sur le Canton de Genève. Il permet d'évaluer de façon systématique l'irradiation solaire accessible sur le territoire et particulièrement sur les toits des bâtiments. Il se base sur les données météorologiques locales ainsi que sur les données géographiques facilement disponibles, par exemple au travers du SITG.

A travers ces outils, les mandants – le Service de l'énergie-ScanE et les Services industriels genevois (SIG) – souhaitent disposer d'une nouvelle couche d'information sur le SITG permettant d'évaluer et découvrir ce potentiel sur le Canton de Genève et de pouvoir répondre à un certain nombre de besoins ciblés :

- Etablir la **cartographie du potentiel solaire** genevois en s'appuyant sur les données 3D des bâtiments et disposer d'informations sur le potentiel de la ressource locale en énergie solaire.
- **Enrichir le Système d'Information du Territoire Genevois (SITG)** avec cette nouvelle couche.
- **Communiquer** au public sur le potentiel des toits
- **Eviter des déplacements** pour les avant-projets
- Découvrir le potentiel solaire sur d'autres objets que les faces de toits (sur le **terrain** par exemple abris, parkings ...etc)

## 2 Présentation de l'outil SIG – Solaire

### 2.1 Vue générale sur l'outil SIG-Solaire

L'outil proposé est issu d'un travail interdisciplinaire mettant en synergie un certain nombre de compétences et techniques dans les domaines de la télédétection, SIG 2D et 3D, analyse d'image et indicateurs environnementaux. Il permet d'évaluer l'irradiation solaire sur le territoire à différentes échelles temporelles avec une précision et fiabilité tout à fait satisfaisante pour les besoins énoncés par les mandants ; ceci grâce à la reconstitution précise du territoire en 3D au travers des données LiDAR et à une intégration des différentes sources d'ombrage.

L'organigramme ci-dessous (figure 1) donne une vision synthétique et transparente des différentes étapes du calcul et des logiciels utilisés.

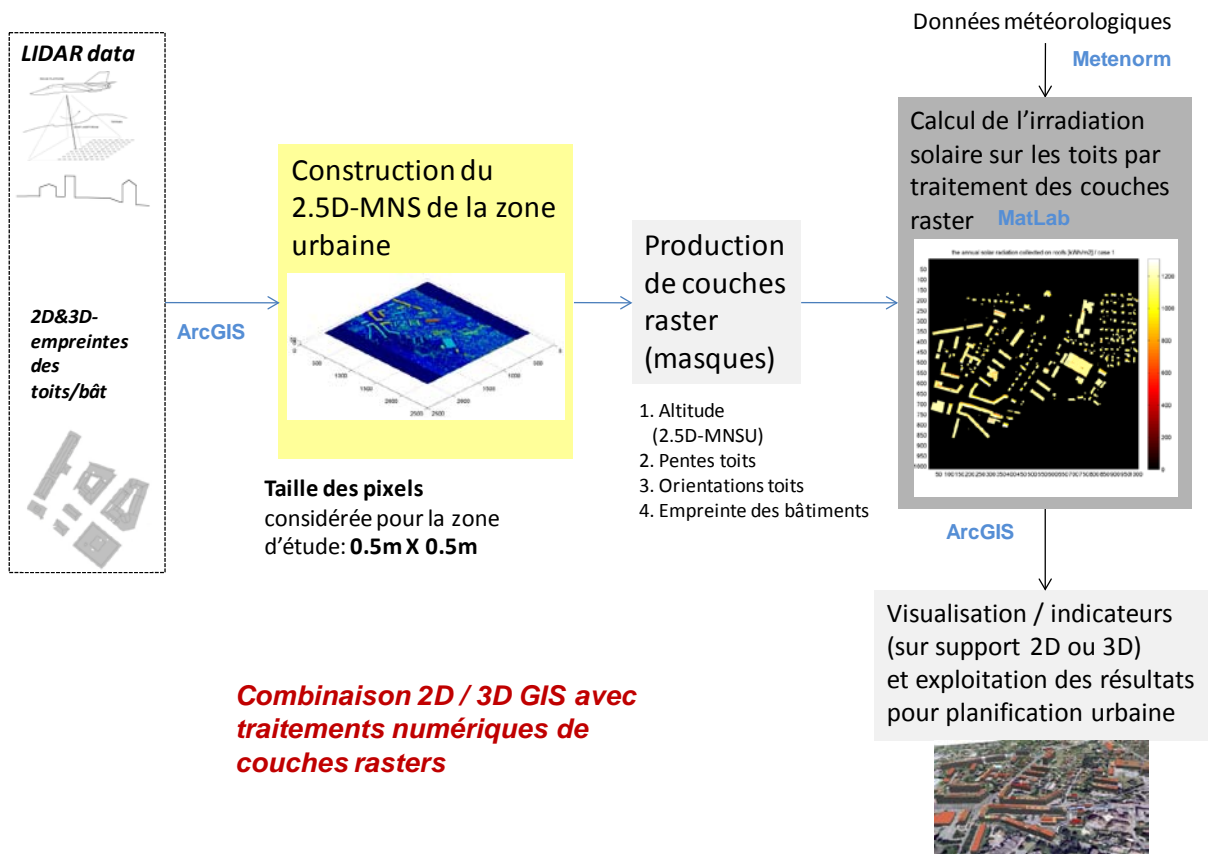


Figure 1 : vue synoptique de la démarche utilisée et des outils pour élaborer le cadastre solaire

### 2.1.1 Données sources

Deux types de données, fournis par la Mensuration Officielle (SEMO), sont utilisés pour la production du modèle numérique de surface :

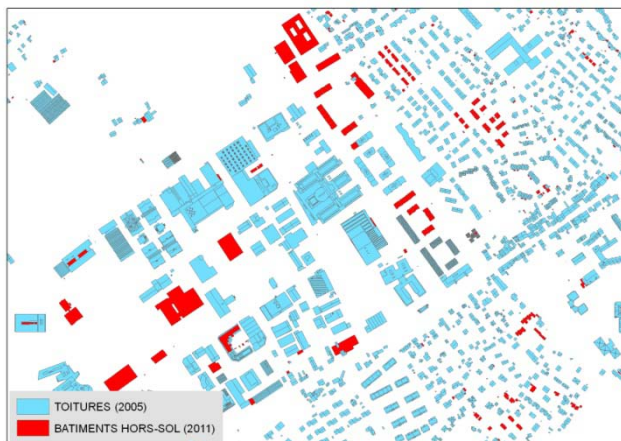


Figure 2 : couches des toitures et des bâtiments hors-sol.

- Données d'élévation issues du LiDAR (année de saisie 2009) : le fichier brut contient 4 à 6 points de mesure par m<sup>2</sup>, classifiés selon 4 classes (1-terrain, 2-végétation, 3-bâtiment, 4-objets particuliers au sol tels que les ponts et viaducs).
- Empreinte au sol des toitures issues du modèle vecteur 3D du bâti sur le canton. Vu que la couche des toitures date de 2005, celle-ci a été complétée par les bâtiments hors sol construits après 2005 (figure 2).

## 2.1.2 Construction du modèle numérique de surface – 2.5D

La construction du modèle numérique de surface – 2.5D<sup>1</sup> (MNS 2.5-D) constitue l'une des principales innovations de la méthode. Elle passe au préalable par une construction séparée du terrain, des bâtiments et de la végétation, à travers l'interpolation des points LiDAR :

- Terrain : sélection des points LiDAR appartenant aux classes 1-terrain et 4-objets au sol, interpolation au préalable des altitudes en TIN (triangulation), puis de TIN en raster de résolution 0.5 X 0.5 mètre. L'interpolation en TIN permet d'améliorer la qualité et précision du modèle.
- Bâtiment : sélection des points LiDAR appartenant à la classe 3 et situé à l'intérieur des emprises au sol des toitures (ou bâtiments si construits après 2005), interpolation en TIN, puis en raster (résolution 0.5 X 0.5 mètre).
- Végétation : sélection des points LiDAR appartenant à la classe 2 et interpolation directe en raster (0.5 X 0.5 mètre)

Comme illustrée sur le schéma ci-dessous (figure 2), l'assemblage de ces trois modèles passe par une normalisation des modèles de bâtiment et de végétation qui sont additionnés au final au modèle de terrain.

Sur la base de l'emprise au sol des toitures ou bâtiments, un processus d'affinage (ou 'enhancement') est également mis en œuvre pour améliorer la qualité de la couche raster produite notamment en bordure des toits et bâtiments (correction de certains 'low points' et façades rendues verticales).

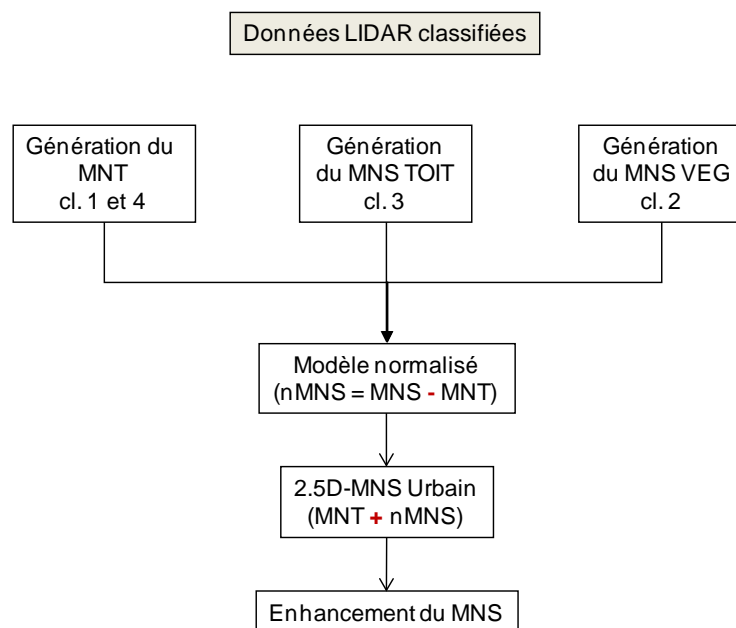


Figure 3 : démarche de construction du MNS – 2.5D.

## 2.1.3 Productions d'images d'input pour le calcul de radiation

Quatre images (masques) sont extraites du MNS 2.5-D comme inputs pour le calcul d'irradiation :

- Altitude via le MNS 2.5-D (données d'altitude nécessaire pour le calcul d'ombrage)
- Pente et orientation (requis pour le calcul de transposition de l'irradiation sur plan incliné)
- Empreinte des toitures et bâtiments (pour l'affinage du modèle raster mentionné au point précédent au niveau de l'altitude et des pentes)

<sup>1</sup> 2.5 dimension (et non 3D), - car on travaille en mode image (grille de pixels avec une résolution de 0.5 mètres, représentant une partie du territoire) et l'altitude de chaque pixel est stockée comme attribut de celui-ci.

#### 2.1.4 Calcul de l'irradiation horaire sur plan incliné

Les formules permettant de calculer l'irradiation horaire sur un plan incliné, à partir de données météorologiques et tenant compte des ombres portées, ont été encodées dans le logiciel de calcul **MatLab**. Les résultats bruts horaires, en mode raster, peuvent être ensuite agrégés sur différents pas de temps : jour, mois, année.

#### 2.1.5 Production d'indicateurs

Les résultats bruts d'irradiation sont ensuite traités, dans une phase de post-traitement, dans des outils SIG (ArcGIS) pour produire des indicateurs utiles pour la communication et l'aide à la planification et décision. Dans le cas de la présente étude, il s'agit de statistiques d'irradiation (moyenne, médiane, minimum, maximum, écart type) calculées sur les vecteurs des toitures à partir des résultats en mode raster.

Cependant, d'autres indicateurs utiles tels que les potentiels thermiques ou photovoltaïques pourront être calculés sur la base de ces résultats.

### 2.2 Données météorologiques

Le calcul d'irradiation nécessite comme source de données des valeurs horaires d'irradiation sur plan horizontal mesurées ou statistiques. Nous utilisons l'outil **Meteonorm** (v6.1) qui établit des valeurs statistiques horaires à partir des données mesurées à Genève-Cointrin sur la période 1980-2000. Mais toute autre source de données, comme celles provenant de la station météo à la Jonction (ou à hepia), peut être utilisé par le modèle.

Cependant, afin d'accélérer le temps de calcul sur des grands périmètres, les **valeurs horaires sont moyennées par mois** (par exemple moyenne de toutes les valeurs d'irradiation à 12h sur le mois de janvier). Il en résulte un calcul sur 288 pas de temps au lieu de 8760. En revanche, le calcul de la géométrie solaire est réalisé sur un jour représentatif par mois (généralement autour du 15 du mois). Comme il sera précisé au niveau du critère fiabilité/tolérance, l'écart sur l'année entre le fait de moyenniser les valeurs horaires ou d'appliquer les valeurs strictes est très faible.

### 2.3 Modèle solaire et ombrage

Le modèle de calcul implémenté dans MatLab introduit les formules usuelles de l'irradiation solaire sur plan incliné. L'irradiation globale est une addition de trois composantes : directe, diffuse et réfléchie.

Pour l'irradiation diffuse il s'agit de prendre en compte l'**anisotropie** (rayonnement non régulier dans l'espace). Parmi les différents modèles d'anisotropie existants, le modèle de Perez est réputé le plus fiable. Cependant, il s'agit d'un modèle sophistiqué qui requiert des données très précises notamment strictement horaires. Par conséquent, le modèle de **Hay**, moins lourd, jugé également fiable a été adopté dans notre algorithme.

Par ailleurs, les composantes du *direct* et du diffus sont multipliées par des **facteurs d'ombrage**. L'ombrage sur le *direct* est évalué à chaque heure d'une journée type à partir d'un voisinage proche (bâti, arbres) ou lointain (relief). Le facteur d'ombrage sur le diffus peut être approché par le *Sky view factor* qui analyse le degré de visibilité ou non obstruction dans le demi-hémisphère centré sur un pixel analysé donné, selon le principe du 'Fisheye' (figure 4).



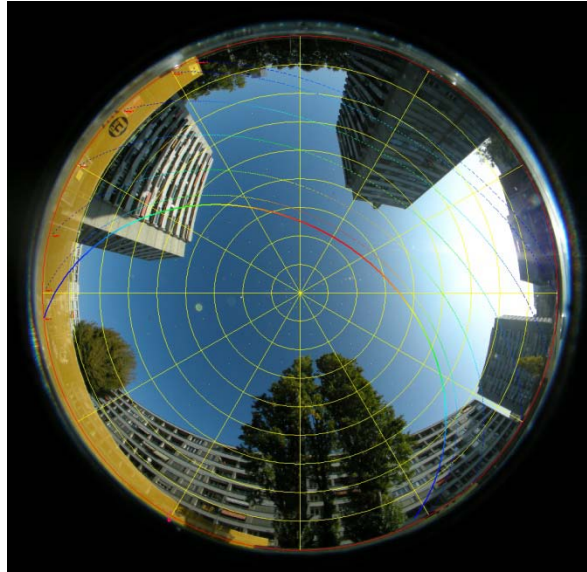


Figure 4 : exemple de fisheye, décrivant l'horizon à 360° à partir d'un point donné (crédit photo Pierre Ineichen)

Les algorithmes utilisés pour calculer ces facteurs d'ombrages sont issus de la thèse de C. Ratti (2001)<sup>2</sup>.

Considérant ces différentes sources d'ombrages, la formule utilisée pour calculer l'irradiation globale est la suivante :

$$I_g = I_{dir} * O_{MNS} * O_{relief} + I_{diff} * \min(SVF_{MNS}, SVF_{relief}) + I_r$$

où:

$I_g$  : irradiation globale

$I_{dir}$  : irradiation directe

$I_{diff}$  : irradiation diffuse

$I_r$  : irradiation réfléchie

$O_{MNS}$  : facteur d'ombrage sur l'irradiation direct, environnement proche (calculé à partir du MNS)

$O_{relief}$  : facteur d'ombrage sur l'irradiation direct, relief (calculé à partir du modèle numérique de terrain de l'agglomération à 50 m)

$SVF_{MNS}$  : Sky View Factor, environnement proche, considéré comme facteur d'ombrage sur l'irradiation diffuse

$SVF_{relief}$  : Sky View Factor, relief

## 2.4 Fiabilité et tolérance

La fiabilité de l'outil est considérée sur quatre aspects.

### 2.4.1 Valeurs horaires moyennes

Le fait de moyenner par mois les valeurs horaires (cf. point 2.2) introduit une certaine erreur par rapport au fait d'utiliser les valeurs horaires telles que fournies par les statistiques météo. Cette erreur a été analysée en détail pour différentes combinaisons de pente et orientation. Il en ressort que, globalement sur l'année, l'écart est plus important (de l'ordre de 2%) pour des orientations nord et des pentes élevées (45°). Tandis que l'écart est quasi nul pour des orientations sud. Ces écarts sont donc tout à fait tolérables, d'autant plus que ce sont principalement les orientations au sud qui constituent un intérêt de valorisation.

<sup>2</sup> Ratti C., 2001. *Urban analysis for environmental prediction*, University of Cambridge.

## 2.4.2 Modèle anisotrope de radiation diffuse

Comme il a déjà été évoqué, le modèle de Hay a été choisi, car il convient très bien si l'on utilise des valeurs horaires moyennées. A Genève, sur un plan incliné avec une pente de 30° et orientation sud, l'irradiation annuelle mesurée est égale à 1'350 kWh/m<sup>2</sup>. Le modèle de Hay donne une valeur de 1'346 kWh/m<sup>2</sup> ce qui est très proche et satisfaisant.

## 2.4.3 Modèle numérique de surface reconstruit à 0.5 m de résolution

Il convient également de tenir compte d'une certaine marge d'erreur sur le MNS construit à partir des points LiDAR. Ceux-ci ont une fiabilité de l'ordre de 25 cm en planimétrie et 15 cm en élévation. En interpolant les points sur des pixels de 50 cm, la fiabilité se situe autour de 20-25 cm en élévation<sup>3</sup>. Il en résulte, sur des surfaces planes comme les toitures, des micro-reliefs qui peuvent induire par conséquent des micro-ombrages et abaisser très légèrement l'irradiation (cf. illustration au chapitre 4.1).

## 2.4.4 Modèle du ciel (demi-hémisphère et Sky View Factor)

Le calcul du Sky View Factor se base une subdivision du ciel utilisé pour décrire l'horizon autour d'un point dans l'environnement proche. Le modèle de Tregenza<sup>4</sup> est généralement celui utilisé (figure 5). Il consiste en une subdivision en segments réguliers définis par 145 coordonnées (azimuth – hauteur). Dans notre cas, il a fallu adapter ce modèle en définissant des hauteurs plus élevées pour les points proche du sol, de sorte à ne pas atténuer les valeurs du SVF à cause des micro-ombrages générés par les imprécisions mentionnées ci-dessus du modèle d'altitude.

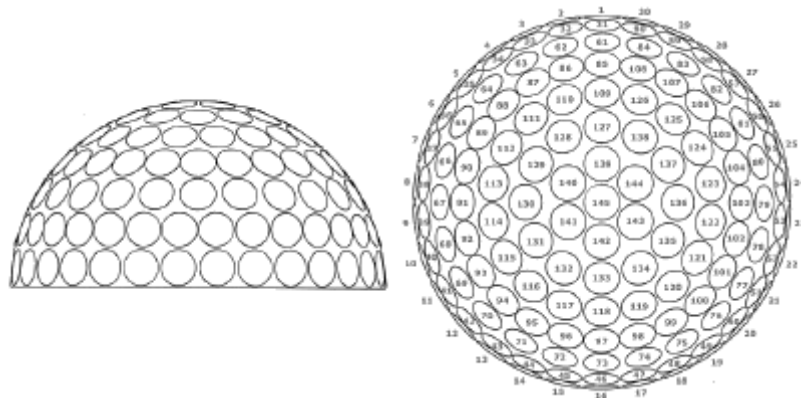


Figure 5 : subdivision du ciel en 145 segments réguliers, selon le modèle de Tregenza. (Source : <http://naturalfrequency.com/wiki/sky-subdivision>)

**Quoiqu'il en soit, ces différentes sources d'erreurs sont plus prononcées dans les zones de discontinuité comme aux pieds des arbres ou des bâtiments, zones qui ne constituent pas d'intérêt pour une valorisation solaire. Tandis que leur impacte est minime dans les espaces ouverts et libres, ayant un fort potentiel solaire.**

<sup>3</sup> Carneiro C., 2011. Extraction of Urban Environmental Quality Indicators using LiDAR-Based Digital Surface Models. Thèse EPFL, no 5050 (2011).

<sup>4</sup> Tregenza P., *Subdivision of the Sky Hemisphere for Luminance Measurements*, Lighting Research and Technology, Vol 19, 1987, pp13-14.





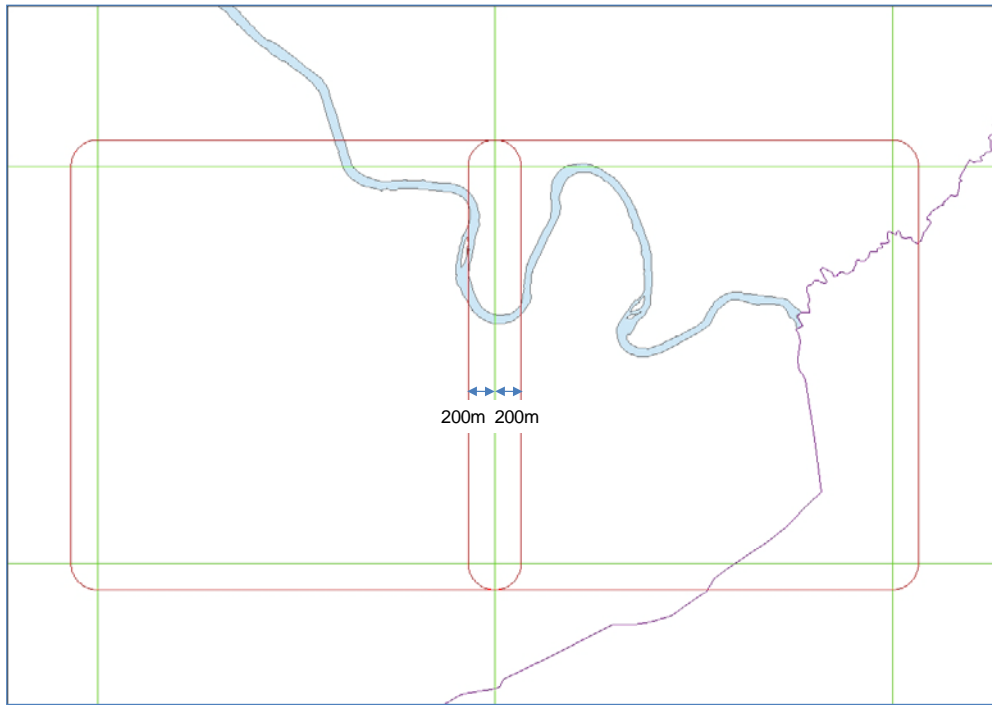


Figure 7 : Exemple de recouvrement entre les tuiles.

### 3.2 Exemple de Modèle numérique de surface – 2.5D (MNS 2.5-D)

La figure 8 ci-dessous présente un exemple de modèle numérique de surface dans le secteur Vernier – Avanchets à Genève. L'on reconnaît facilement l'autoroute en tranchée semi-couverte ainsi que les silos de stockage d'essence.

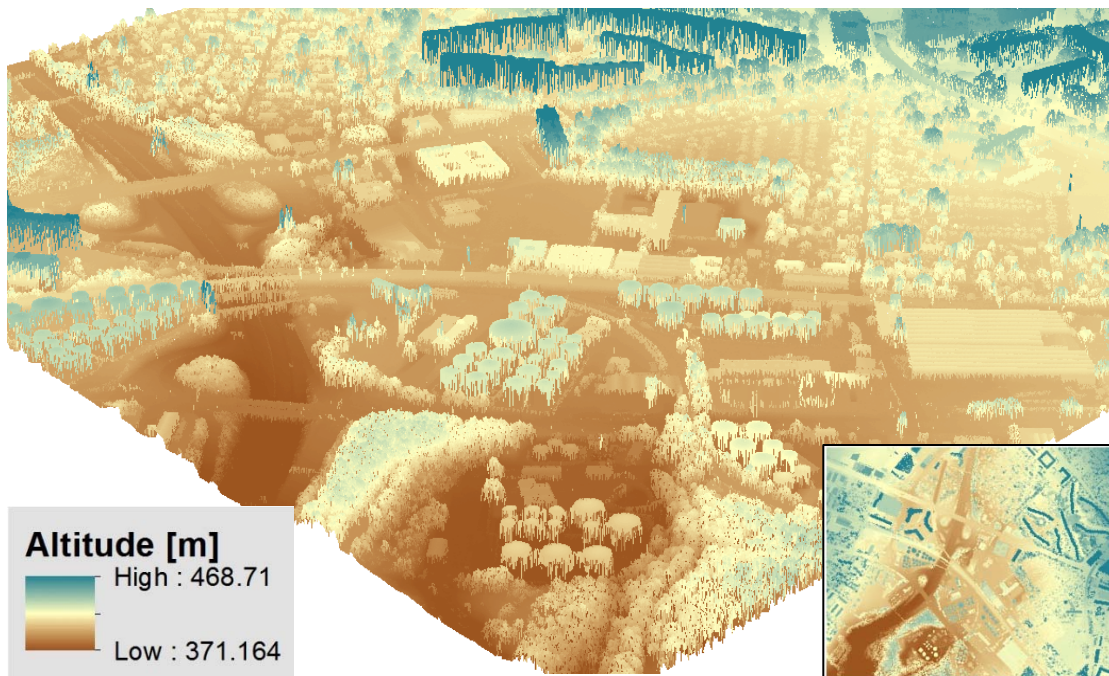


Figure 8 : exemple de MNS dans le secteur Avanchets, Vernier.

### 3.3 Analyse d'ombre portée, selon les périmètres proche et lointain (relief)

La figure suivante l'ombrage liée au relief sur l'irradiation directe à 9h00 et 16h00 le 17 janvier et à 5h00 et 20h00 le 11 juin.

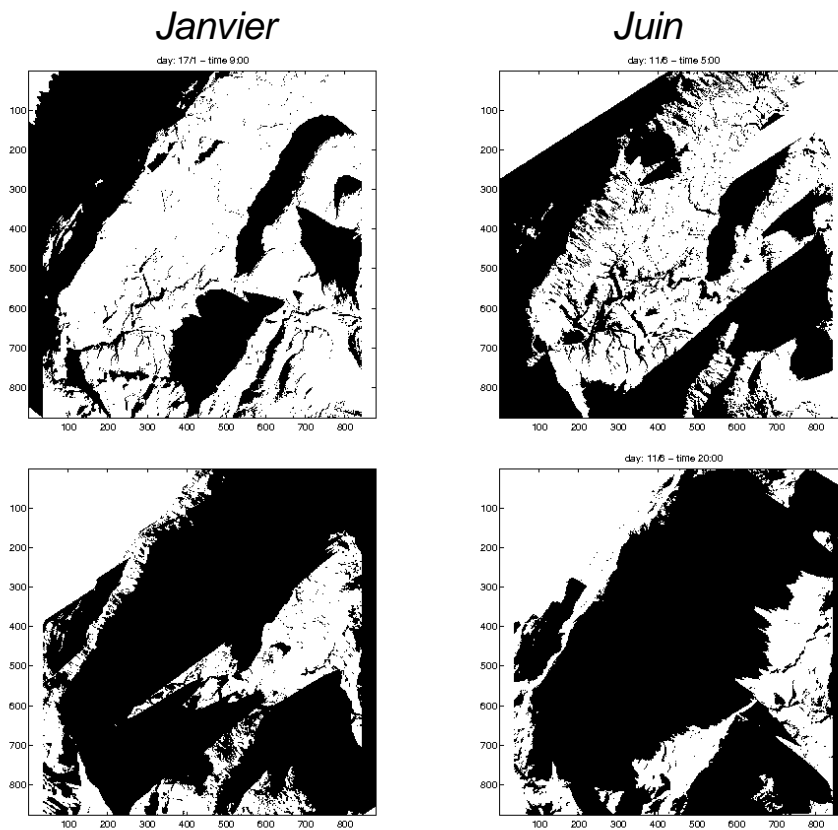


Figure 9 : Ombrage sur l'irradiation directe – relief.

Le SVF de l'agglomération genevoise, constituant en quelque sorte l'ombrage permanent et impactant la composante diffuse de l'irradiation est donnée dans la figure 10 ci-dessous exposée.

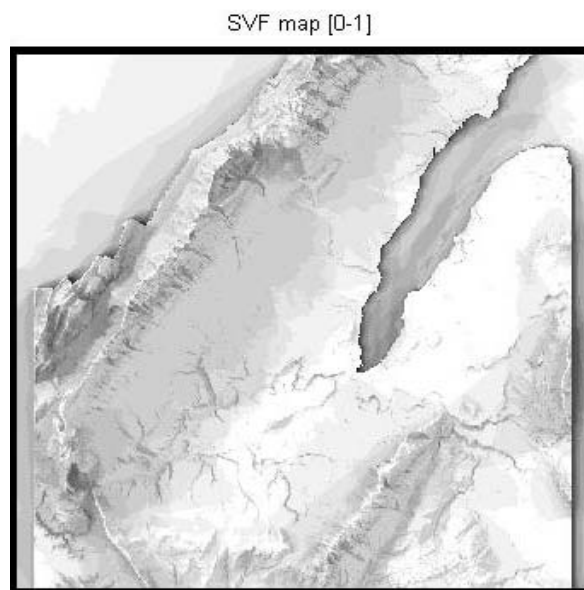


Figure 10 : Sky View Factor – relief.

Comme l'on peut constater à la figure 11, l'ombrage lié au relief a un impact manifeste en janvier sur le secteur de Veyrier situé au pied de la face nord du Salève ; tandis que cet impact est peu perceptible en juillet, du fait de la hauteur du soleil.

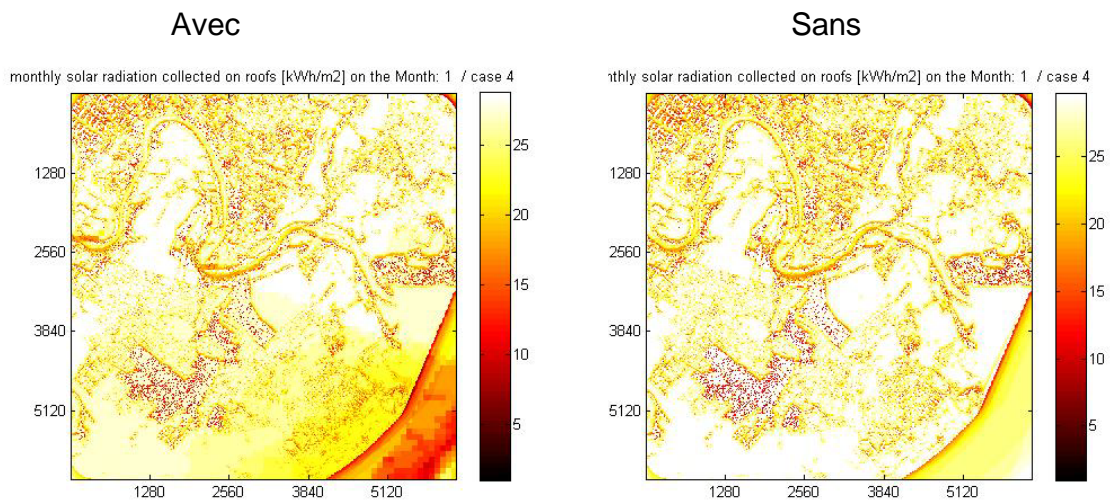


Figure 11 : Avec (gauche) ou sans (droite) prise en compte de l'ombrage lié au relief à Veyrier, en janvier.

La figure 12 illustre l'ombrage sur le direct et le SVF au niveau local, dans le quartier de Moillesulaz à Genève.

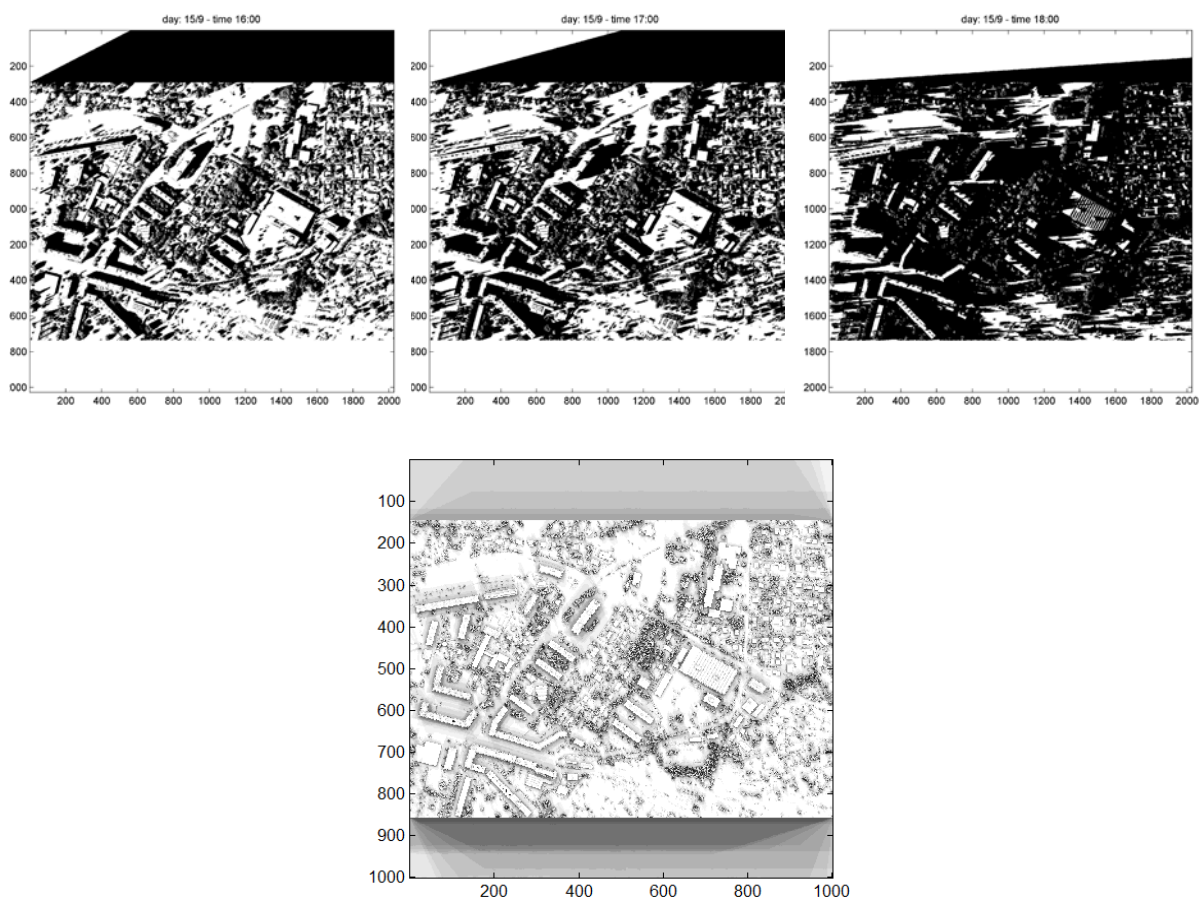


Figure 12 : Ombrages sur l'irradiation directe à différentes heures de la journée (16 à 18h, 15 septembre) et SVF à Moillesulaz.



### 3.4 Irradiation brute

L'irradiation est calculée dans MatLab sur chaque pixel du territoire, tuile par tuile pour l'année et les 12 mois. La figure 13 illustre l'irradiation brute pour la tuile située au niveau du centre ville de Genève :

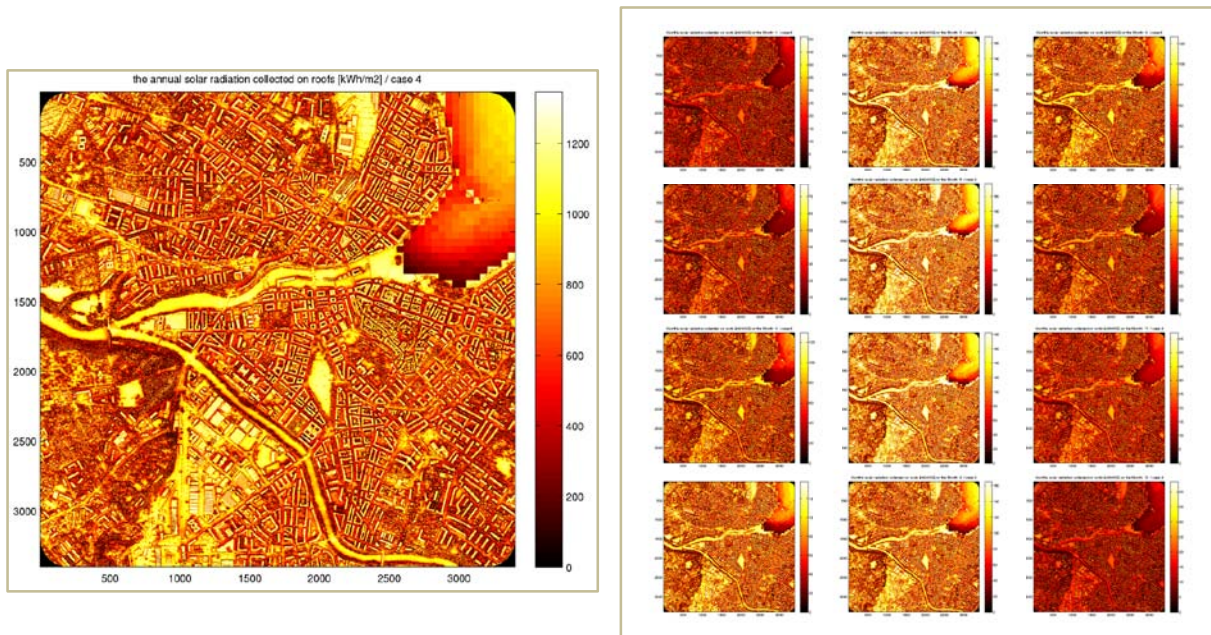


Figure 13 : Irradiations brute annuelle (gauche) et mensuelles (droite) au centre ville de Genève.

Ces résultats par tuiles sont exportés dans ArcGIS en format geotiff. Les tuiles sont assemblées par mois et année (mosaïques) sur tout le canton, tel qu'illustré ci-dessous (figure 12):

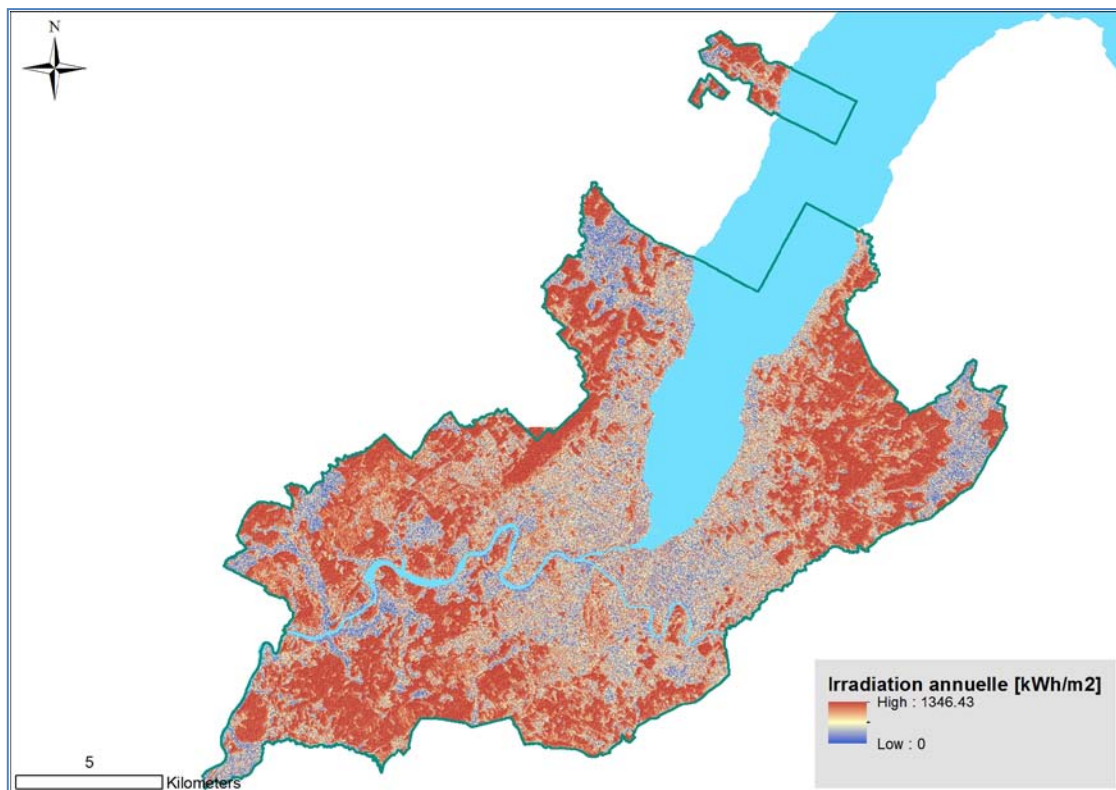


Figure 14 : Mosaïque des irradiations annuelles par tuile sur tout le canton.

### 3.5 Statistiques d'irradiation par vecteur de toit

Au final, à partir des résultats d'irradiation en mode raster assemblés en mosaïque, les statistiques d'irradiation sont extraites sur toutes les toitures du canton, à savoir : l'irradiation minimale, maximale, moyenne, médiane et l'écart-type.

Ces statistiques autres que la moyenne apportent des informations très utiles, étant donné que l'hétérogénéité de l'irradiation, souvent importante sur les toitures, n'est pas reflétée par la valeur moyenne.

La carte ci-dessous (figure 15) illustre l'irradiation moyenne sur les toitures dans le secteur de Vieuxseux-Charmilles et propose également une sémiologie à utiliser pour les représentations cartographiques.

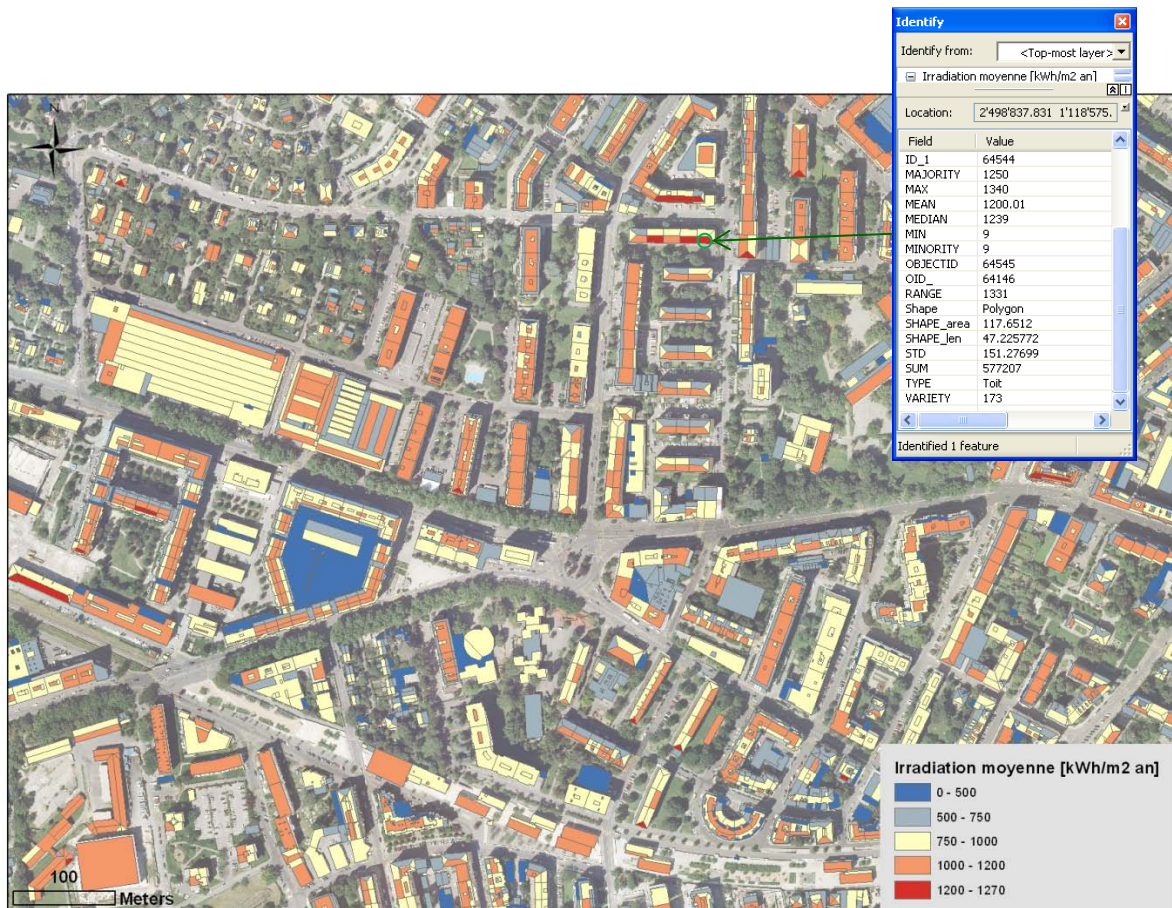


Figure 15 : Irradiation annuelle moyenne par toiture, secteur de Charmilles – Vieuxseux.

## 4 Discussion des résultats et problèmes relevés

Un certain nombre de problèmes ont été rencontrés à travers l'élaboration du cadastre solaire. Ces problèmes, s'ils ont un impact mineur sur la qualité des résultats, ils méritent toutefois d'être relevés et considérés pour l'interprétation des résultats.

### 4.1 Fiabilité du LiDAR en altimétrie

L'aspect de la fiabilité du LiDAR (15 cm) et du modèle raster d'altitude produit (20-25 cm) a été évoqué au chapitre 2.4. La figure 16 illustre l'irrégularité des valeurs d'altitude sur un toit plat situé à la Jonction et l'irrégularité en conséquence sur l'irradiation annuelle. Du fait de ces micro-ombrages, l'irradiation est souvent légèrement inférieure à celle attendue sur une



surface horizontale non ombragée selon nos données météorologiques utilisées (1208 kWh/m<sup>2</sup> an).

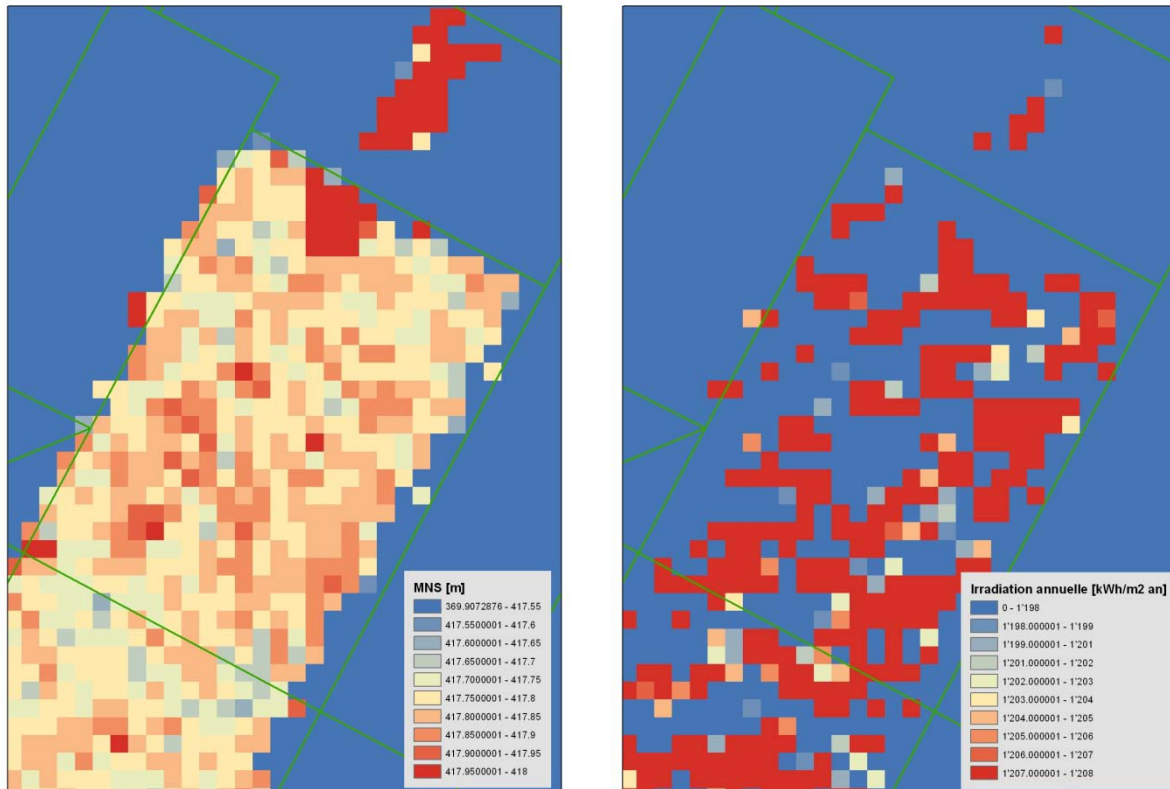


Figure 16 : Variation d'altitude sur un toit (gauche), et variation de l'irradiation annuelle sur ce même toit (droite).

#### 4.2 Classification imparfaite des points LiDAR sur la végétation

Il est fréquent que de la végétation recouvre en partie des surfaces bâties. Ainsi, il pourrait être utile d'adjoindre aux cartes d'irradiation une carte d'indice de végétation sur les toitures.

Or sur la base de la classification des points LiDAR mise à disposition, cela est difficile, car les points classés végétation englobent réalités d'autres éléments de toiture, tels que les bordures et marquises, selon la figure ci-dessous (figure 17). Cela n'a en outre pas eu d'influence sur la modélisation du MNS-2.5 D.



Figure 17 : Illustration de la classification imparfaite des points LiDAR sur la végétation (points rouge sur la photo, La Praille-Genève).

### 4.3 Couche vecteur incomplète des toitures

Il a déjà été mentionné au chapitre 2.1 que la couche vecteur des toitures issues du modèle 3D du canton reflète l'état du bâti en 2005. Cette couche a donc été complétée par les bâtiments construits après 2005. Par conséquent, les statistiques d'irradiation sur ces bâtiments doivent être interprétées avec prudence, étant donné que l'hétérogénéité de l'irradiation est très importante du fait du non découpage par toiture.

### 4.4 'Matching' incomplet entre les couches raster de l'irradiation et les vecteurs des toits/bâtiments

Le calcul de statistiques d'irradiation sur les toitures ou bâtiments, implique d'extraire les valeurs d'irradiation à partir de la couche raster sur la couche vectorielle.

Sur 295'000 objets de toitures (et bâtiments) considérés, le 'matching' entre raster et vecteur n'a pas pu être fait sur 2'000 objets, ceci pour deux raisons (figure 18):

- Le 'matching' nécessite que le vecteur toit englobe totalement au moins un pixel. Or certains toits de très petite surface sont de largeur si fine, qu'ils n'englobent aucun pixel entier.
- Lors de l'élaboration du modèle 3D du bâti, il y a probablement eu des erreurs de vectorisation : en effet nous remarquons qu'il n'est pas possible de sélectionner individuellement certains objets. Dans ce cas, le 'matching' n'est pas possible.

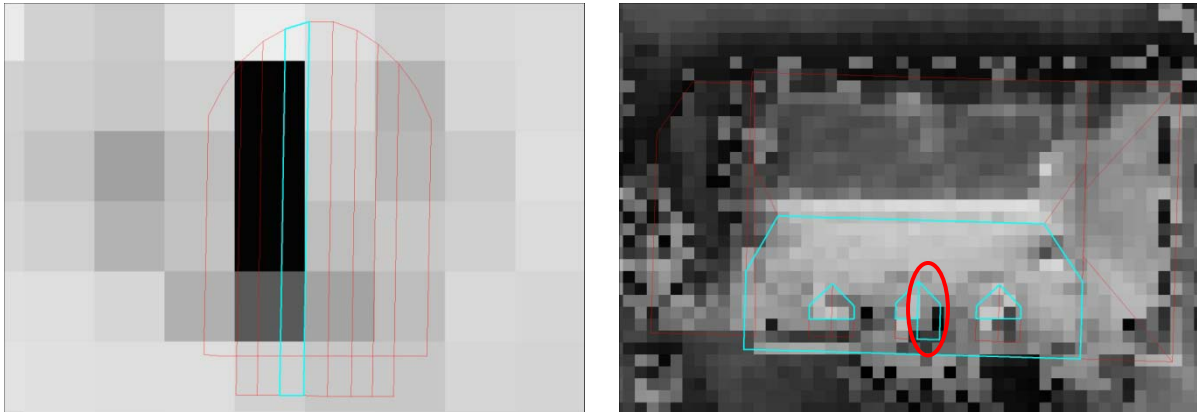


Figure 18 : Exemple de petites toitures (gauche) et de sélection multiple de toitures (droite). En voulant sélectionner la partie de toit entourée de rouge, ce sont plusieurs objets voisins qui sont sélectionnés en même temps, pour lesquels le matching n'est pas possible.

## 5 Liste couches d'information délivrées

### Format raster

- *Mosaïque\_MNS\_Canton.tif* : Mosaïque du MNS – 2.5D sur tout le canton
- *Mosaïque\_radiation\_an.tif* : Mosaïque des résultats bruts de l'irradiation annuelle sur le tout le canton, pour l'année
- *Mosaïque\_radiation\_m\_mois.tif* : Mosaïque des résultats bruts d'irradiation sur le tout le canton, pour les 12 mois.

### Format vecteur

- Couche des toitures complétée par les bâtiments (construits après 2005), pour l'année et pour chaque mois  
*CAD\_BATIMENT\_HORSOL\_TOIT\_BAT\_AN.shp* /  
*CAD\_BATIMENT\_HORSOL\_TOIT\_BAT\_m\_mois.shp*  
avec les statistiques d'irradiation issues du raster (outil *Zonal stat as table* dans ArcGIS) :
  - Moyenne (MEAN)
  - Médiane (MEDIAN)
  - Minimum (MIN)
  - Maximum (MAX)
  - Somme (SUM)
  - Ecart-type (STD)
- Couche des toitures complétée par les bâtiments (construits après 2005)

## 6 Liste des manifestations et conférences

Ci-dessous est donnée la liste des manifestations et conférences où la démarche du cadastre solaire a été ou sera présentée :

- Journée SITG, 24 juin 2011, Unimail, Genève.
- SIG2011, Conférence francophone ESRI, 4-5 octobre, Versailles.
- GIS day ESRI, 16 novembre, Nyon.
- Solar Meeting, 30 novembre, Chambéry.
- *Soumission d'une communication pour le Geo Summit, 19-12 juin 2012, Berne.*  
*Soumission d'une communication pour le ESRI International User Conference, 23-27 July, San Diego.*

## 7 Conclusions et perspectives

L'outil SIG-solaire a pu être mis en œuvre pour élaborer le cadastre solaire à l'échelle régionale (Canton de Genève), grâce aux puissances de calcul et au traitement spatial systématique et automatisé propre aux SIG, tout en gardant une grande précision d'analyse (pixel de 0.5 m) nécessaire à une analyse fine de l'irradiation solaire sur les toitures. La combinaison – processus d'image (MatLab) et SIG (Arc-GIS) est facilitée par la génération de fichiers d'inputs et de résultats aux formats compatibles.

Un grand intérêt de l'outil réside dans sa **transparence** et sa capacité de scinder les résultats en distinguant les parts du direct et diffus. Ceci est très utile notamment pour le choix des technologies PV (par exemple la technologie PV amorphe est plus sensible au rayonnement diffus, tandis le PV monocristallin est sensible au rayonnement direct).

Les applications de des résultats du cadastre solaire sont multiples dans le cadre de la planification énergétique territoriale : implications sur le marché immobilier en redéfinissant la valeur des bâtiments par rapport à leur potentiel énergétique solaire en toiture, leviers d'actions pour les collectivités pour inciter à l'accroissement de l'installation des panneaux solaires à travers différentes mesures et actions.

La planification de l'énergie solaire à l'échelle urbaine nécessitera de recourir à d'autres **indicateurs** qui pourront être élaborés sur la base du cadastre solaire et d'autres informations sur le tissu bâti disponible dans le SITG :

- Facteur d'ombrage en mode raster (rapport entre l'image incluant l'ombrage et celle ne l'incluant pas). Cette information est très utile dans la perspective de l'installation de collecteurs PV.
- Extraction des morceaux de toit ayant une irradiation annuelle supérieure à 1000 kWh/m<sup>2</sup> et n'étant pas ombragés (surfaces potentielles pour l'installation de collecteurs). Le calcul de la surface de ces morceaux permet ensuite de retenir ceux qui ont une surface minimale requise pour les différentes technologies.
- Statistiques globales sur le quartier des surfaces totales par tranche d'irradiation
- Evaluation des potentiels de production d'énergie photovoltaïque et thermique, en croisant en particulier pour le thermique, les informations d'irradiation avec les informations sur les utilisations et caractéristiques des bâtiments. Analyse de bilan environnemental lié à l'installation de collecteurs solaires (émissions GES évités).

Enfin, étant donné l'évolution relativement rapide du tissu bâti à Genève, une **mise à jour périodique** du cadastre solaire, ainsi que des données de base (LiDAR et modèle vecteur des toitures) doit être envisagée afin de prendre en compte le potentiel solaire des constructions récentes.