

## **Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2020-2021**

# **Cadastre solaire et gisement photovoltaïque**

# **Cadastre solaire et gisement photovoltaïque : Mise en œuvre d'une méthode de calcul solaire par échantillonnage**

**Directeur de recherche : Minjind Maïzia**

**Auteur : Lou Lorient**

**2020-2021**

# AVERTISSEMENT

---

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

# Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

---

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

**Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.**

# REMERCIEMENTS

---

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance au directeur de recherche de ce projet de fin d'étude, Monsieur Minjind MAIZIA, professeur au sein de l'école Polytech Tours, pour l'aide qu'il a fournie et les connaissances qu'il a su me transmettre. Je le remercie également pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Sabrina MADIN, Léonie MICHARD et Maxime OTT, camarades de promotion, pour leur aide précieuse et leur soutien sans lesquels ce projet n'aurait pas abouti.

# SOMMAIRE

---

Introduction .....	7
1. État de l'art.....	8
1.1. Les définitions .....	8
1.2. Les méthodes de calcul solaire .....	9
1.3. Discussion.....	12
2. Problématique et hypothèse .....	12
3. Formulation.....	13
3.1. Définition.....	13
3.2. Méthodologie.....	13
3.3. Réalisation des objets de comparaison .....	14
3.4. Comparaison des deux méthodes .....	15
3.5. Manipulation et nettoyage des données .....	15
3.6. Discussion.....	16
4. Application d'un cas d'étude .....	16
4.1. Echantillons étudiés .....	16
4.2. Résultats.....	17
4.3. Analyse des résultats .....	19
4.4. Discussion.....	19
5. Conclusion .....	20
6. Bibliographie.....	20
7. Annexes.....	21
7.1. Annexe 1 – Code .....	21
7.2. Annexe 2 – Cadastres des échantillons 2,3 et 4.....	21

## Cadastre solaire et gisement photovoltaïque

Lou Lorient

### ARTICLE INFO

Mots clés :

Cadastre solaire  
Echantillonnage  
Corrélation  
Méthodes de calcul  
Potentiel solaire urbain

### RESUME

L'objectif de ce travail est de produire un cadastre solaire grâce à une méthodologie par échantillonnage. Dans un premier temps, trois méthodes de calcul sont analysées puis comparées à travers une revue de littérature. Cette étape permet de dresser un portrait commun à ces méthodologies et d'en tirer des inconvénients. Par la suite, une méthode par échantillonnage est développée puis comparée à une méthode de calcul solaire existante. Les cadastres solaires étant des outils visuels d'aide à la décision, ceux-ci seront donc considérés en tant qu'image numérique afin de permettre leur comparaison. L'analyse des couleurs de chacun des pixels sera alors un moyen d'analyser les méthodes de calcul solaire utilisées. Finalement, le calcul du coefficient de corrélation nous permettra d'en déduire l'intensité de la relation entre les deux images et donc entre les méthodes de calcul solaire.

## Introduction

Le ministère de la transition écologique et solidaire, au travers de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, a fixé la part des énergies renouvelables à 32% d'ici 2030 et une diminution de 20% de la consommation d'énergie finale pour la même période. Par ailleurs, les villes consomment à elles seules plus de la moitié de l'énergie mondiale. En ce sens, les espaces urbains constituent un réel enjeu énergétique.

De manière à réduire ces consommations excessives d'énergie en ville, l'utilisation des rayons solaires semble être une solution. En effet, ceux-ci peuvent avoir de multiples usages. D'une part, l'implantation de panneaux solaires photovoltaïques et/ou thermiques sur les bâtiments constituent une source d'énergie renouvelable inépuisable. D'autre part, ces mêmes rayons solaires permettent de chauffer

naturellement les bâtiments. Le potentiel solaire d'une ville paraît alors être une donnée indispensable pour les aménagements actuels et futurs.

Afin de fournir ces données, de nombreuses collectivités se dotent de cadastres solaires. Ces outils de l'aménagement sont de plus en plus demandés, notamment depuis la mise en place du programme de coopération européen POLIS. Ce programme vise à développer la prise en compte du solaire dans les nouveaux aménagements urbains. Beaucoup de méthodes de production de cadastres solaires existent à ce jour. Certaines sont appliquées sur de petites échelles comme un bâtiment ou un quartier, et d'autres, à l'échelle d'une ville entière. Bien que fondamentaux pour le développement du photovoltaïque à l'échelle urbaine, les cadastres solaires possèdent néanmoins quelques limites. En effet, ceux-ci sont à la merci des éléments naturels. L'énergie solaire reçue par les bâtiments peut être influencée par différents éléments comme la météorologie, l'ensoleillement ou encore l'ombrage, élément

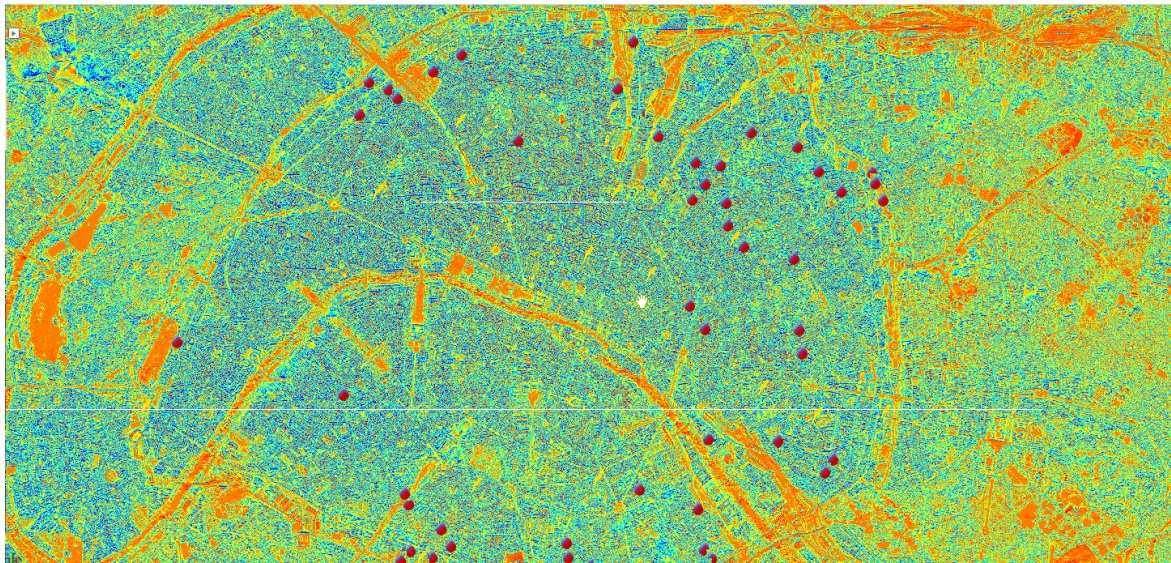
d'autant plus important en milieu urbain. Les méthodes diffèrent donc par leur complexité à appliquer et par les facteurs qu'elles cherchent à illustrer.

## 1. État de l'art

L'objectif de cette revue de littérature est de préciser, dans un premier temps, la méthodologie relative à la production d'un cadastre solaire. Dans un second temps, différentes méthodes de calcul de l'irradiation solaire, élément essentiel à la création d'un cadastre solaire, sont comparées afin d'en soulever les points prédominants et certaines incohérences.

### 1.1. Les définitions

Les cadastres solaires sont des outils cartographiques d'aide à la décision qui permettent d'évaluer le potentiel solaire d'un espace. Ces derniers s'appliquent à des espaces ruraux tout comme à des espaces urbains et sont de plus en plus demandés par les collectivités. Dans la plupart des cas, les cadastres solaires sont développés dans l'objectif d'installer des infrastructures photovoltaïques, comme l'indiquent **Y. Li et al. (2016)** dans leur article, dans les milieux urbains. Ils offrent, à terme, des données sur l'ensoleillement reçu par une surface, le coût d'investissement de panneaux photovoltaïques ou encore l'économie de CO2 réalisable. Afin de les dessiner, des méthodes ont été mises au point ces dernières années. Celles-ci sont nombreuses et diffèrent les unes des autres, cependant certaines étapes essentielles à l'élaboration d'un cadastre solaire peuvent en être dégagées.



**Fig.1** – Cadastre solaire de la ville de Paris  
(Source : <http://capgeo.sig.paris.fr/Apps/CadastreSolaire/>)

Les méthodes de pixellisation, SORAM et la méthode développée par **Peronato et al. (2018)** regroupent des éléments communs quant à leur mise en œuvre. En effet, ces dernières disposent toutes de données topographiques, de modélisations du bâti mais aussi d'un calcul de l'irradiation solaire.

Le premier élément indispensable à la conception d'un cadastre solaire est la représentation topographique de la zone d'étude. Pour ce faire, divers moyens offrent la possibilité d'obtenir ces données. Dans leur

méthode de calcul par pixellisation, **Y. Li et al. (2016)** ont choisi une approche très accessible puisque leurs données proviennent directement du site Google Earth. Bien que ceci ne soit pas contraignant du point de vue pratique, la précision d'un tel outil reste néanmoins à prouver et des marges d'erreur peuvent être rencontrées. Pour ce qui est des deux autres méthodes étudiées dans cette revue de littérature, celles-ci utilisent des données obtenues par télédétection par laser, LiDAR. Cette méthode offre une représentation

topographique 2D ou/et 3D accessible directement dans une base de données.

Dans un second temps, le bâti de la zone d'étude est modélisé. Physiquement, un bâtiment correspond à une infinité de points dans l'espace disposant de coordonnées, d'une orientation ou encore d'une inclinaison. Néanmoins, il semble évident qu'il est impossible d'en étudier la totalité au risque de voir cette modélisation ne jamais aboutir. Afin d'obtenir des données, il est donc nécessaire de réduire ce nombre de points, c'est ce qui est appelé une discrétisation. L'enjeu est alors d'avoir une quantité suffisante de points pour garder une précision de modélisation « convenable ». Les trois méthodes étudiées disposent de représentations distinctes qui seront plus amplement expliquées dans la prochaine partie de cette étude. Par ailleurs, la modélisation du bâti peut tout à fait être une représentation 2D tout comme une représentation 3D. La différence apparaît alors dans les coordonnées géographiques des points. Finalement, la dernière étape consiste à calculer l'irradiation solaire reçue par chacun de ces points. Elle se définit par l'ensemble des rayons solaires directs, diffus et réfléchis qui atteignent la surface de la Terre. Les rayons diffus se caractérisent par la réduction des rayons solaires par la couverture nuageuse et les rayons réfléchis, quant à eux, ont déjà atteint le sol et se sont projetés dans de nouvelles directions. Le calcul solaire demeure l'étape la plus complexe à mettre en œuvre lors de l'élaboration d'un cadastre solaire. En effet, il s'agit d'un facteur qui relève directement d'éléments naturels ce qui implique de nombreuses variations dans les calculs. Différents facteurs doivent donc être pris en compte afin d'obtenir une précision maximale. Tout d'abord, les conditions météorologiques peuvent être étudiées, comme dans la méthode SORAM de **R. Erdélyi et al. (2014)**, afin de déterminer, entre autre, la valeur des rayonnements diffus. Enfin, l'irradiation solaire qui arrive en un point peut être directement impactée par son voisinage. Effectivement, les autres bâtiments et la végétation environnante constituent des obstacles et provoquent un effet d'ombrage, ce qui modifie considérablement la valeur de l'irradiation puisque les rayons solaires ne peuvent plus passer. Les différentes méthodes de calcul solaire que proposent **Y. Li et al. (2016)**, **R. Erdélyi et al. (2014)** et **Peronato et al. (2018)** prennent toutes les trois en compte ce

facteur qui semble être un enjeu majeur dans la rigueur des études. D'autre part, ces méthodes de calcul sont appliquées sur les échelles temporelles différentes faisant varier une nouvelle fois la charge des calculs. Dans ces articles, les deux échelles retenues sont les échelles horaires et journalières, l'une favorisant la précision des calculs et l'autre leur légèreté.

Pour toutes ces raisons, la mise en œuvre de cadastres solaires dans les zones urbaines semblent être ardue. Cependant, des méthodes de calcul solaire tentent d'offrir une précision de représentation maximale tout en limitant la lourdeur des calculs.

## 1.2. Les méthodes de calcul solaire

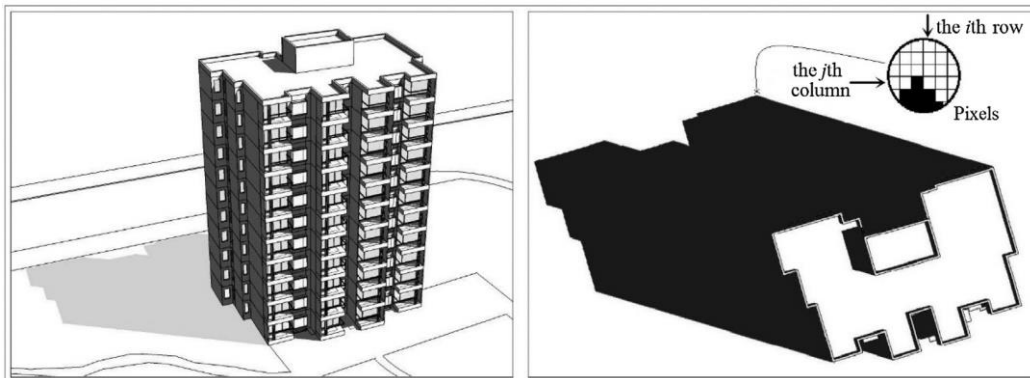
De nombreuses méthodes existent aujourd'hui afin de calculer l'irradiation solaire. Comme il a été énoncé précédemment, elles diffèrent par le type de données, la représentation spatiale : 2D, 2.5D ou 3D, les critères mis en évidence comme l'ombrage ou la météorologie, ou encore par le choix de l'échelle temporelle du calcul. Certaines sont plus facilement mises en œuvre dans de vastes zones urbaines alors que d'autres, plus denses en calculs, ne peuvent s'appliquer qu'à de petites portions de villes. Ainsi, il est intéressant au travers de cette revue de littérature de comparer quelques-unes de ces méthodes. Ceci permet de dégager les atouts mais surtout les inconvénients que celles-ci peuvent avoir. Les trois méthodes qui ont été retenues sont la méthode par pixellisation, la méthode à échelle multiple et la méthode SORAM.

De cette manière, **Y. Li et al. (2016)** ont développé une méthode de pixellisation alliant un modèle 2D et un modèle 3D afin de calculer au mieux l'irradiation solaire reçue par des toits. Dans leur étude, la méthode a été appliquée à une portion d'éco-quartier situé en Chine. La zone d'étude regroupe un total de 26 bâtiments répartis sur une surface de 575x274 m<sup>2</sup>.

Dans un premier temps, l'ombrage des bâtiments est défini grâce au modèle 3D. Les données sont obtenues à partir d'un système d'information géographique puis importées dans le logiciel Sketchup qui crée les zones d'ombre à un instant donné. Grâce au même logiciel, des images aériennes sont produites, avec un point de vue constant, ce qui permet

ensuite de discrétiser la zone en pixels. La dimension des images est de 1916 x 912 pixels et chacun des pixels a une taille de 0.3 x 0.3m. Une valeur numérique variant de 0 à 255 est ensuite attribuée aux pixels selon leur luminosité, un pixel ayant une valeur inférieure à 250 étant considéré comme ombragé. Parallèlement, une image 2D de la zone d'étude est pixélisée, en utilisant les mêmes dimensions que les précédentes, en fonction de l'emprunte au sol des bâtiments. Cette fois un pixel noir représente le bâti et un pixel blanc représente le sol. Finalement, l'irradiation solaire journalière

est calculée sur l'ensemble des pixels sur Matlab. Pour ce faire, l'irradiation des zones d'ombre est calculée séparément de l'irradiation de l'autre zone. En effet, comme explicité précédemment une zone d'ombre ne reçoit pas de rayonnements solaires directs ce qui impacte le calcul de l'irradiation. Chacun des pixels possède alors une valeur d'irradiation solaire pour chacun des jours de l'année. Dans le cadre de l'étude de cet article qui vise à implanter des panneaux solaires sur les toits, seuls les pixels se situant sur le bâti ont eu une valeur d'irradiation solaire.



**Fig. 2** – Représentation de la méthode par pixellisation sur un bâtiment

L'approche par pixellisation mise en œuvre par **Y. Li et al. (2016)** permet de soulever quelques éléments essentiels à la compréhension des méthodes de calcul de l'irradiation solaire. Tout d'abord, nous pouvons noter que la taille des pixels de 0.3 x 0.3 m<sup>2</sup> accorde au modèle une grande précision spatiale. En effet, à cette dimension la moindre particularité topographique, comme un simple buisson par exemple, peut être prise en compte lors du calcul de l'ombrage. Les images ainsi produites peuvent alors être considérées comme à haute résolution. Néanmoins, il est indéniable que plus les cellules d'un raster sont petites plus le traitement des données est lourd. Ainsi, une telle rigueur de modélisation 2D n'est peut-être pas essentielle dans l'application de cette méthode. D'autre part, l'irradiation solaire est calculée pour chacun de ces pixels sur une période journalière leur attribuant par conséquent 365 valeurs différentes. L'utilisation de cette échelle temporelle permet au modèle d'exprimer les variations solaires au cours d'une année, et donc de comparer les changements saisonniers qui impactent les résultats. Par ailleurs, cette méthode de calcul solaire, en comparaison à une méthode

impliquant une échelle horaire, allège considérablement les calculs.

Même si cette méthode offre de nombreux avantages du point de vue calculatoire, elle ne s'applique pas aux façades des bâtiments. En effet, la méthode de pixellisation n'a été affectée qu'aux toitures plates de la zone d'étude. Bien qu'une nouvelle fois, ceci permet de réduire l'ampleur des données à traiter, il semble primordial d'y accorder de l'importance. Dans un contexte urbain où la moindre parcelle est exploitée, les murs ont un potentiel solaire non négligeable. Ceux-ci permettent entre autre d'apporter une source naturelle de chauffage, notamment au travers des surfaces vitrées. Afin de mieux cerner cet enjeu, les deux méthodes explicitées dans la suite de cette revue littéraire, quant à elles, prennent en compte ce critère.

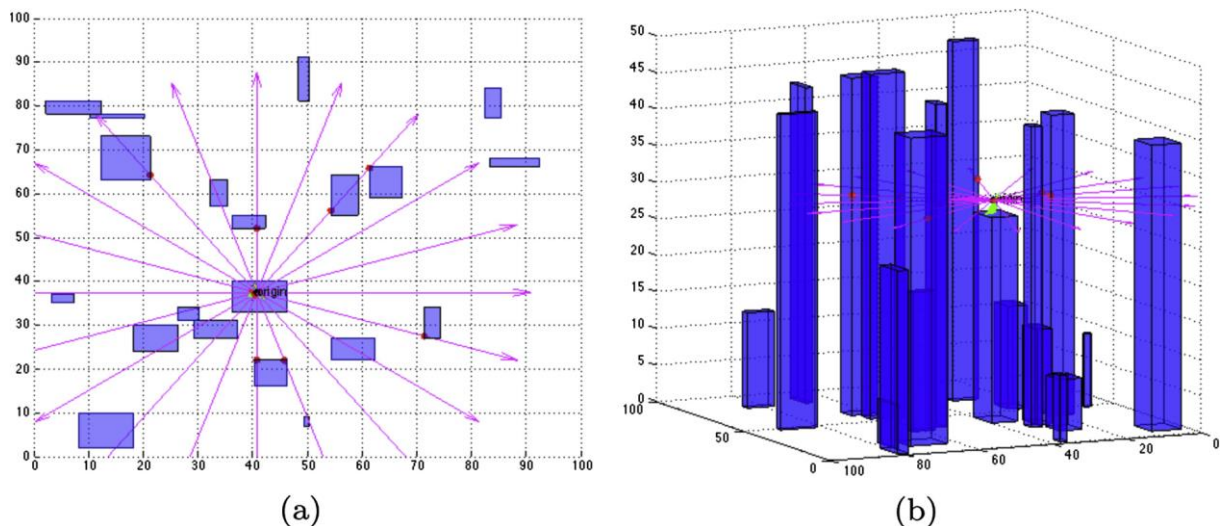
En ce sens, **Peronato et al. (2018)** ont proposé une méthode dans laquelle la représentation de l'espace urbain est réalisée grâce à un modèle 3D composé de points distants de 2 m les uns des autres, créant par conséquent des surfaces de 4 m<sup>2</sup>. Pour les façades de bâtiments qui ne peuvent posséder de données à cause de leur

taille inférieure à  $4\text{m}^2$ , un algorithme de discrétisation leur attribue un point en leur centre. Outre les bâtiments, la végétation est modélisée de la même manière. L'objectif principal de l'étude étant de prendre en compte dans les calculs les obstacles rencontrés par les rayons solaires, la saisonnalité et la météorologie sont davantage mises en avant. En effet, très peu d'études modélisent la variation de densité des espèces végétales dans le milieu urbain alors que celle-ci provoque un ombrage conséquent sur les façades. Dans un second temps, l'irradiation solaire est mesurée par tranche horaire sur l'ensemble de ces points. Ceci implique donc de créer 8760 valeurs pour chacun des points du modèle 3D. Dans leur cas d'étude, les auteurs ont appliqué la méthode sur la ville de Neuchâtel couvrant ainsi une surface totale de  $1.2\text{ km}^2$  sur laquelle se trouve 1450 bâtiments.

Cette approche pourrait être bénéfique d'un point de vue calculatoire car, en comparaison à la méthode de pixellisation, le nombre de points est considérablement plus faible. Cependant, cette méthode consiste également à calculer l'irradiation solaire toutes les heures. Par conséquent, l'agrégation de ces deux approches provoque une surcharge des calculs. En réalité,

chacune de ces deux méthodes ne serait pas gourmande en calcul si l'autre méthode produisait un ensemble de données plus petit. Malgré cet élément contraignant, cette méthode permet tout de même une application sur de grandes échelles permettant ainsi une meilleure précision quant à l'étude de l'ombrage.

**R. Erdélyi et al. (2014)**, quant à eux, ont proposé une méthode de traçage par rayons appelée la méthode SORAM. Cette méthode consiste à diviser le ciel en plusieurs milliers de secteurs afin de pouvoir étudier les rayons solaires provenant de ceux-ci. La méthode SORAM permet, à terme, de déterminer l'ensemble des rayons solaires directs et diffus qui atteignent le bâti. Cette méthode est, de la même manière que la méthode de **Peronato et al. (2018)**, couplée au calcul du rayonnement global horaire. L'avantage principal de cette méthode est la prise en compte de chaque angle d'incidence des rayons solaires diffus et direct. Par conséquent, les calculs permettent d'obtenir une précision importante quant aux variations de rayonnement solaire sur une surface. De plus, la méthode SORAM permet, elle aussi, de considérer l'ombrage causé par les bâtiments et les arbres.



**Fig. 3**– Représentation de la méthode SORAM, (a) vue aérienne, (b) modèle 3D

Afin de calculer le rayonnement solaire que perçoit le bâti, les périodes du lever du soleil au coucher du soleil sont utilisées dans le cadre de cette approche. Ceci permet de réduire les calculs en évitant de prendre en compte les périodes où il fait nuit. De plus, les rayonnements solaires sont mesurés sur des

périodes d'une heure mais également sur des périodes annuelles.

Finalement, la méthode SORAM a été appliquée sur une surface d'étude de  $100 \times 100\text{ m}^2$  avec une résolution de  $1 \times 1\text{ m}^2$  regroupant ainsi un minimum de 10 000 points de mesures sur l'ensemble de l'étude. Mettre en place cette

méthode sur une surface de petite dimension (nettement inférieure à l'échelle d'une ville qui serait alors de l'ordre de 30 km<sup>2</sup>) permet de réduire le nombre de points et par conséquent la complexité du calcul.

### 1.3. Discussion

La méthode SORAM, la méthode par pixellisation et la méthode de **Peronato et al. (2018)** dressent un portrait sommaire de l'ensemble des méthodes de calcul solaire. En effet, il existe en réalité beaucoup plus de méthodes permettant la création de cadastres solaires. Cependant, ces dernières ont permis de relever différents éléments essentiels à la mise en place d'une méthodologie rigoureuse. Il apparaît, dans le but d'alléger ses calculs, que les auteurs jouent sur deux leviers.

Le premier de ces leviers est la discrétisation des bâtiments. D'une part, le choix de la modélisation est fait. La représentation 2D, observée dans l'étude de **Y. Li et Al. (2016)**, permet de réduire considérablement le nombre de points mais néglige le potentiel solaire des façades du bâti. En ce sens, il semble nécessaire d'intégrer une modélisation 3D dans une future approche. D'autre part, cette discrétisation passe également par le pas de distanciation des points. Plus les points sont rapprochés, plus ils offrent une meilleure précision mais plus ils alourdissent les calculs. Il est donc indispensable de trouver un juste milieu entre ces différents facteurs. D'après l'étude de **Peronato et al. (2018)**, un pas de 2 m permet d'obtenir une précision suffisante dans les calculs. Effectivement, à cette échelle, il est tout à fait possible de modéliser la structure complète d'un bâtiment.

Le second levier relève du choix de l'échelle temporelle à laquelle l'irradiation solaire est calculée. Les trois méthodes de cette revue de littérature ont permis de comparer les échelles horaire et journalière. Le pas journalier produit un ensemble de 365 valeurs pour chacun des points du bâti alors que le pas horaire en produit 8760. De plus, ces deux facteurs offrent la possibilité d'observer l'évolution de l'irradiation solaire au cours des saisons. Néanmoins, le pas journalier ne permet pas de rendre compte de la fluctuation des valeurs de l'irradiation au cours d'une journée. Ainsi, un compromis doit également être fait sur le choix de l'échelle temporelle.

Toutefois, les deux leviers relevés précédemment ne peuvent pas être considérés individuellement. En effet, si l'on cherche à minimiser les calculs, augmenter le nombre de points dans un des leviers implique une réduction du nombre de points dans le second levier. En d'autres termes, il y a un effet de balance entre les deux leviers. Par conséquent, l'utilisation d'un pas horaire au cours d'une modélisation ne peut se faire que si le pas de distanciation des points est « grand ». Il apparaît donc qu'il faille faire un choix entre une précision maximale de la représentation du bâti ou celle de l'irradiation dans le but d'obtenir une précision globale suffisante.

## 2. Problématique et hypothèse

Les cadastres solaires représentent un réel enjeu pour les collectivités mais il n'en est pas moins important de réaliser des études rigoureuses et applicables à un maximum de cas d'étude. Cette revue de littérature nous a permis de constater que l'ensemble des auteurs cherchent à minimiser la lourdeur des calculs en jouant sur deux leviers.

Bien que ces deux leviers semblent être les seuls éléments modulables dans la mise en œuvre de ces méthodes, un troisième élément apparaît tout de même dans l'équation. Dans la mesure où les trois méthodes de cette revue de littérature ne sont pas appliquées à un même cas d'étude, la taille et les caractéristiques de ces derniers pourraient impacter les résultats. Effectivement, on pourrait supposer qu'une méthode comme celle par pixellisation destinée à un espace de 1 km<sup>2</sup> serait d'autant moins lourde en calcul qu'une méthode appliquée à l'échelle d'une ville complète. C'est pourquoi la taille de la zone d'étude et donc son échantillonnage pourrait être considérés comme un troisième levier, voire une méthode à part entière.

Il convient de conclure que les méthodes de calcul solaire sont très gourmandes lorsqu'elles sont appliquées à l'échelle urbaine. A quel point la méthode de calcul par échantillonnage se différencie-t-elle des autres méthodes de calcul?

Au vu de ce qui a été expliqué précédemment, nous pouvons formuler l'hypothèse que la méthode de calcul par échantillonnage est plus

précise que les autres méthodes. La suite de ce document cherche à valider ou refuser cette hypothèse à travers la mise en place d'une méthode par échantillonnage. Cette méthode sera par la suite appliquée à un cas d'étude.

### 3. Formulation

De manière à améliorer la précision des calculs lors de l'élaboration d'un cadastre solaire plusieurs méthodes peuvent être envisagées, l'une d'entre elle est la méthode par échantillonnage. En ce sens, afin de pouvoir déterminer si la méthode par échantillonnage est plus précise que les autres méthodes déjà existantes, il est nécessaire de pouvoir les comparer. Par conséquent, l'enjeu est, dans un premier temps, de définir l'approche par échantillonnage puis d'en concevoir une méthode.

#### 3.1. Définition

L'échantillonnage est un processus de sélection par lequel sont produits un ou des échantillons. Ces derniers forment alors des groupes représentatifs d'une entité. Dans le cadre de cette étude, l'entité en question est une ville. L'objectif de ce processus est donc de fournir des échantillons sous la forme d'un ensemble de bâtiments. Plusieurs stratégies d'échantillonnage existent et peuvent être regroupées en 3 catégories : aléatoire, systématique et stratifié.

La stratégie aléatoire s'applique tout particulièrement à des zones d'étude conséquentes afin d'obtenir des échantillons pouvant regrouper un maximum de caractéristiques. Les échantillons sont sélectionnés de manière aléatoire au sein de l'entité totale, ce qui ne prend donc pas du tout en compte les particularités d'un espace. L'échantillonnage systématique, quant à lui, produit des échantillons sur la base d'une division régulière de la zone d'étude. Cette méthode ne considère pas non plus les caractéristiques de la zone d'étude. Finalement, l'échantillonnage stratifié est réalisé selon l'étude de certaines variables. En l'occurrence, ces variables, dans le cadre de cette étude, peuvent être les dimensions du bâti, le volume de végétation présente dans la zone ou encore la forme des toits des bâtiments. Cette dernière

méthode permet d'obtenir des résultats plus précis et réduit les erreurs mais implique une analyse plus fine de la zone d'étude.

Dans le but de mettre en place une future approche par échantillonnage, la stratégie choisie quant aux échantillons sera une stratégie aléatoire. Par conséquent, il ne sera pas nécessaire de réaliser une étude des caractéristiques de la zone d'étude au préalable.

#### 3.2. Méthodologie

L'objectif de ce projet étant de déterminer si la méthode par échantillonnage est plus précise que les autres méthodes, il est nécessaire de pouvoir la comparer à des méthodes déjà existantes. Pour ce faire, la méthode décrite ci-dessous me permet de comparer une méthode de calcul appliquée à un cas d'étude déjà existant à une méthode par échantillonnage théorique. Comme il a été dit précédemment, les méthodes de calcul solaire reposent sur 2 leviers à savoir la discrétisation des bâtiments et le pas de temps choisi pour le calcul du rayonnement solaire. Le but est donc ici de produire un protocole de modélisation précis qui pourra être appliqué à un ensemble d'échantillons.

Les cadastres solaires offrant une représentation cartographique de l'ensoleillement reçu par des toitures, il semblerait judicieux de les analyser afin d'en déduire une corrélation entre les méthodes. En effet, plusieurs éléments peuvent être observés et comparés sur un cadastre solaire. Tout d'abord on peut observer le bâti, visible grâce à l'emprise surfacique des toitures de chacun des bâtiments, puis l'ensoleillement reçu par chacune de ces toitures représenté par une graduation de couleur caractérisant l'intensité du rayonnement reçu.

De manière à pouvoir analyser un cadastre solaire, nous avons considéré ce dernier en tant qu'image numérique de type matriciel. L'image est donc formée d'une grille composée d'un ensemble de pixels. Chacun de ces pixels renferme différentes caractéristiques de l'image: leur taille, la couleur ou la luminosité, ou encore sa transparence. Toujours dans le but de pouvoir analyser le cadastre solaire, il est intéressant de s'attarder sur la façon dont un pixel stocke la couleur d'une image. En effet, il existe plusieurs façons de coder une couleur. La plus commune est le codage RGB (RVB en français): ce système repose sur la superposition des 3 couleurs primaires à savoir le rouge, le vert et le bleu afin de générer une couleur. Chacune de ces couleurs est alors

représentée par une valeur comprise entre 0 et 255. Le plus communément, chaque pixel et donc sa couleur sont codés sur 3 octets, matriciellement on aura alors une matrice à 3 dimensions où chacune des dimensions correspond à une couleur primaire. Grâce à ce système de codage, il est tout à fait possible de comparer 2 images entre elles en fonction de leur couleur. L'objectif est donc de produire un cadastre solaire grâce à un protocole d'échantillonnage. Cette image sera alors comparée à l'image d'un cadastre solaire existant. Cette comparaison se jouant sur la couleur de chacun des pixels, elle pourra alors refléter la méthode de calcul solaire choisie lors du calcul du rayonnement solaire sur les toitures.

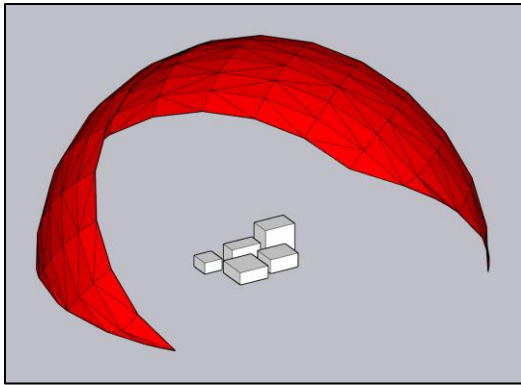
### 3.3. Réalisation des objets de comparaison

L'image d'un cadastre solaire existant sera donc le premier élément de la comparaison des méthodes de calcul solaire. Le cadastre solaire choisi est celui de la ville de Paris qui a été élaboré en 2014 afin de répondre au projet européen visant à déterminer le potentiel solaire de la ville. Celui-ci est disponible sur le site de l'Apure, et peut donc être importé sur le logiciel de SIG ArcGIS. Le cadastre solaire de la ville de Paris permet de visualiser le rayonnement solaire global en kWh/m<sup>2</sup>/an reçu par les toitures de la ville. Lors du calcul du rayonnement solaire plusieurs éléments ont été pris en compte: l'altitude, l'orientation des toitures, et les ombres créées par l'environnement des bâtiments. En ce sens, nous pouvons déjà supposer que la méthode de calcul solaire utilisée a été réalisée sur un bâti sous sa forme 3D permettant de prendre en compte le facteur d'ombrage. De plus, les valeurs du rayonnement solaire ont été obtenues pour chacune des toitures, par conséquent chaque toiture dispose d'une seule et unique valeur d'ensoleillement.

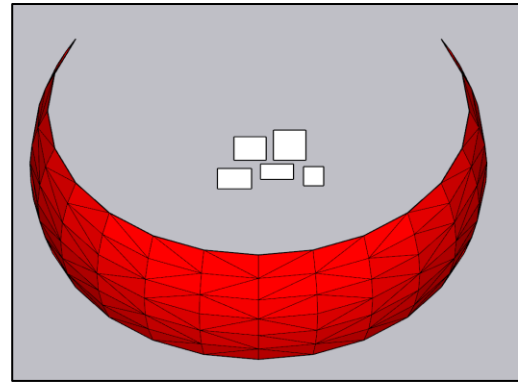
La seconde image découle du protocole d'échantillonnage suivant. De manière à obtenir

un cadastre solaire, il est tout d'abord nécessaire de disposer du bâti de la ville de Paris. Celui-ci est disponible en open data et peut donc être importé dans un logiciel de SIG. La seconde étape de ce protocole est de simuler l'ensoleillement reçu par ce bâti. Pour ce faire, il est indispensable de disposer du diagramme solaire de la ville. Un diagramme solaire est une représentation de la trajectoire du soleil au cours de l'année en fonction de sa position pour une latitude donnée. La latitude de la ville de Paris étant de 48°51.2046' Nord, on obtient alors son diagramme solaire grâce au logiciel Toasterplus. Par la suite, le bâti de la ville et le diagramme solaire sont importés dans Sketchup afin d'obtenir une modélisation 3D de l'ensemble. De manière à obtenir une image semblable à un cadastre solaire, il est important de fixer la vue au-dessus du bâti. Finalement, l'ensoleillement est mesuré grâce au logiciel Twilight Render. Ce logiciel de rendu permet de définir le diagramme solaire obtenu précédemment comme source lumineuse et ainsi reproduire les rayons solaires reçus par une surface. Il nous permet d'obtenir une image à nuances de gris de la dimension souhaitée. Cependant, comme il a été dit précédemment la comparaison entre les 2 images sera réalisée sur la couleur des différents pixels. Ainsi il est nécessaire de traiter cette image afin que ces couleurs soient celles du système RGB. Pour ce faire nous disposons du logiciel Toasteranalysis qui nous permet de créer une rampe de couleur correspondant à l'intensité lumineuse reçue par les toitures. Ainsi on obtient une image en couleur variant du bleu (intensité minimale) au rouge (intensité maximale) semblable à un cadastre solaire. L'ensemble de ces étapes a été appliqué théoriquement sur un échantillon de 5 bâtiments et peut être observé grâce aux images ci-dessous.

De manière à comparer les 2 images obtenues, il est indispensable qu'elles soient de la même dimension et que le bâti des images se superpose parfaitement. Ainsi, les images qui seront produites sur de futurs échantillons seront d'une dimension de 600x800 pixels.



Représentation 3D du bâti et du diagramme solaire sur le logiciel Sketchup



Vue positionnée au dessus de la zone d'étude

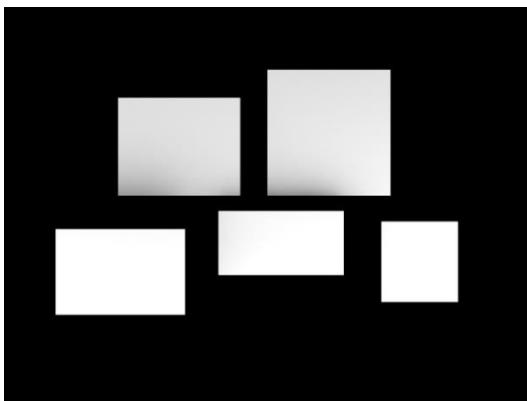


Image en nuances de gris obtenue grâce au logiciel Kerkithea

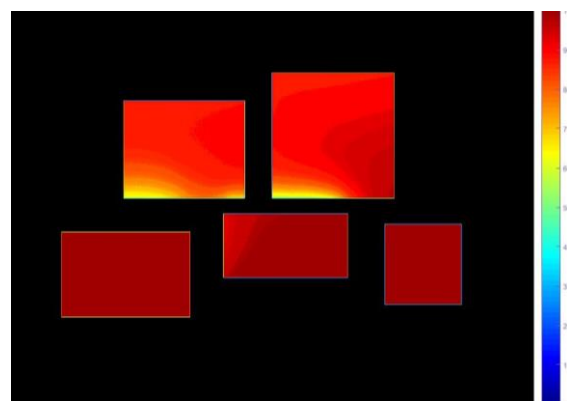


Image en couleur obtenue grâce au logiciel toaster analysis

**Fig 4** – Représentation des étapes du protocole de production d'un cadastre solaire grâce à la méthode par échantillonnage

### 3.4. Comparaison des deux méthodes

De manière à comparer les deux images obtenues, le coefficient de corrélation semble le plus adapté. En effet, celui-ci permet de mesurer la force d'une relation entre deux éléments. Noté  $r$ , il varie entre -1 et 1. Lorsqu'aucune relation n'existe entre les deux éléments celui-ci est égal à 0, et inversement lorsqu'il est égal à -1 ou 1 alors la relation est parfaite.

$$r = \frac{\sum \sum (A - \bar{A}) * (O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (A - \bar{A})^2 * \sum (O - \bar{O})^2}}$$

avec  $\bar{A}$  et  $\bar{O}$  la moyenne des valeurs des pixels. Comme on peut le voir sur la formule du coefficient de corrélation ci-dessus, celui ne peut s'appliquer qu'à des éléments d'une seule dimension. Cependant comme il a été dit auparavant, les images sont stockées sous la forme d'une matrice à trois dimensions. Ainsi, afin d'appliquer le coefficient aux deux images, les trois dimensions de la matrice ont été sommées afin d'obtenir une unique matrice contenant des valeurs variant de 0 à 765.

Parallèlement au calcul du coefficient de corrélation et dans le but de visualiser l'intensité de la relation, il convient de représenter les valeurs des pixels sur un graphique. Plus l'intensité entre les deux images est forte, plus le nuage de points des données suivra la droite affine  $x=y$ .

### 3.5. Manipulation et nettoyage des données

Bien que le coefficient de corrélation explicité précédemment permette de définir l'intensité entre les deux images, il ne faut pas négliger le fait que certains éléments peuvent impacter le résultat. Tout d'abord, la comparaison souhaitée est uniquement celle entre les valeurs d'ensoleillement reçu par les toitures. Ainsi tous les autres éléments des images pourraient influencer le coefficient. En effet, les images étudiées présentent une zone de couleur blanche autour des bâtiments qui est obligatoirement identique entre les deux images. Par conséquent

il convient de ne pas prendre en compte ces valeurs lors du calcul du coefficient de corrélation puisque celles-ci améliorent considérablement sa valeur. La zone de couleur blanche est définie lorsque la valeur du pixel est supérieure à 760 sur les deux images.

De la même manière, d'autres éléments peuvent influencer le résultat. Le nuage de points précédemment obtenu peut également fournir des informations sur la façon dont les valeurs des pixels sont réparties. Il peut en ressortir que certaines valeurs sont très éloignées de l'ensemble des autres valeurs. Ces valeurs inhabituellement élevées ou basses sont appelées valeurs aberrantes. Elles peuvent être déterminées graphiquement grâce aux nuages de points ou grâce à une étude plus précise des données. Dans le but d'avoir un coefficient de corrélation le plus précis possible, il est donc nécessaire de supprimer ces valeurs atypiques du jeu de données.

Finalement, il convient de dire qu'il ne faut pas baser ces conclusions uniquement sur le coefficient de corrélation initial puisqu'il peut tout à fait être une source d'erreurs.

### 3.6. Discussion

La méthode par échantillonnage qui a été mise en place permet d'obtenir une précision du point de vue de la représentation du calcul du rayonnement solaire. En effet, nous faisons l'hypothèse que le logiciel Kerkythea permet d'obtenir une méthode précise avec un calcul réalisé point par point. La comparaison étant faite sur la méthode de calcul appliquée au cadastre solaire de Paris, nous pouvons déjà supposer que cette méthode appliquée aux polygones permet une application à plus grande échelle.

Même si la méthode par échantillonnage semble plus précise que l'autre méthode étudiée, des marges d'erreur doivent être prises en compte. Effectivement, l'échantillonnage réalisé pourrait ne pas fournir des données similaires à celles de l'entité globale et donc fausserait le résultat. De plus, comme il a été précédemment dit, l'utilisation et l'analyse du coefficient de corrélation seront à balancer fortement. En effet, des erreurs pourront être rencontrées que ce soit dans la précision de la superposition des images ou encore dans le traitement des données aberrantes. La mise en œuvre d'une

telle méthode fournira donc des résultats qu'il faudra nuancer.

## 4. Application d'un cas d'étude

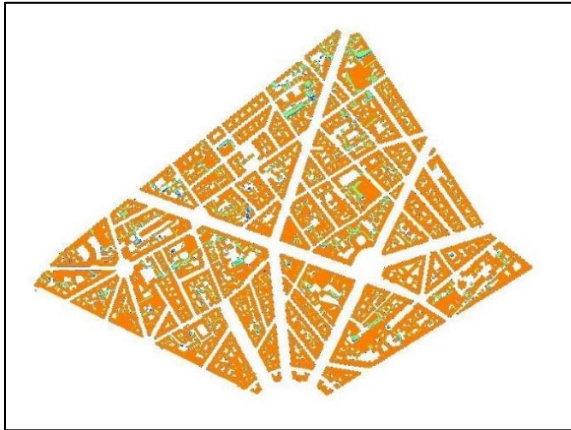
La méthode par échantillonnage énoncée dans la partie précédente sera appliquée à la ville de Paris. La capitale française se situe sur les rives de la Seine et s'étend sur une superficie de 105.40 km<sup>2</sup>. Forte de son titre de commune la plus peuplée de France avec ses quelques 2 millions d'habitants, elle représente un enjeu énergétique conséquent à l'échelle du pays. La densité de son tissu urbain ne faisant que croître, l'utilisation des ressources solaires sur la toiture de ses bâtiments pourrait être une solution quant à une production d'électricité locale et non polluante. Depuis 2014, la ville s'est vue dotée d'un cadastre solaire consultable en ligne dans le but d'estimer au mieux l'ensoleillement exploitable. L'objectif de cette partie est donc de comparer la méthodologie utilisée dans ce cadastre à celle par échantillonnage dans le but de déterminer si cette dernière pourrait être appliquée à l'échelle d'une ville.

### 4.1. Echantillons étudiés

Le protocole par échantillonnage développé dans la partie précédente a été appliqué à un ensemble de quatre échantillons. Ces échantillons ont été sélectionnés aléatoirement dans le tissu urbain de la ville de Paris et ont chacun une superficie totale d'environ 1.5 km<sup>2</sup>. Afin d'illustrer la méthodologie utilisée que ce soit celle du protocole d'échantillonnage ou celle de la comparaison entre les méthodes de calcul, les prochaines illustrations sont celles appliquées pour l'échantillon n°1. L'ensemble des échantillons et leur représentation graphique peuvent être observés en annexe de ce document.

L'échantillon n°1 regroupe un ensemble de 1794 bâtiments et s'étend sur une superficie de 1.65 km<sup>2</sup>. La première étape du protocole vise à produire une image du cadastre solaire d'une dimension de 600x800 pixels. Ainsi j'obtiens l'image 5 ci-dessous représentant le cadastre solaire de l'échantillon par la méthode de calcul déjà existante. La seconde image découle du protocole d'échantillonnage. Cette dernière dispose des mêmes dimensions et de la même échelle de couleur. La valeur minimale de

l'ensoleillement pour chacune des images est représentée par une couleur bleu foncé et la valeur maximale par une couleur orange foncé. Afin de produire une comparaison la plus



**Fig 5** - Cadastre solaire par la méthode d'échantillonnage

précise possible, les classes de couleurs ont été créées de sorte qu'elles soient proportionnelles et donc similaires sur les deux images.

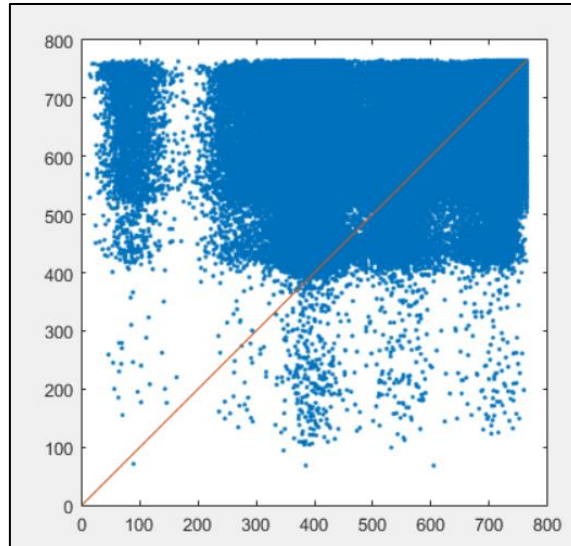


**Fig 6** – Cadastre solaire de la ville de Paris

#### 4.2. Résultats

Une fois les deux images obtenues nous pouvons appliquer le protocole de comparaison entre ces dernières. De manière à pouvoir illustrer l'évolution du coefficient de corrélation à chaque étape de ce protocole, nous l'avons calculé à 4 reprises: dès le début de la comparaison, après avoir retiré les valeurs des pixels blancs sur les 2 images, après avoir considéré qu'un pixel blanc serait d'une valeur supérieure à 760, et enfin après avoir retiré les valeurs aberrantes du jeu de données. Le nettoyage des données quant à la valeur des pixels blancs s'est donc réalisé en 2 étapes : un pixel totalement blanc a une valeur de 765 néanmoins après une analyse des différentes couleurs nous avons pu considérer qu'une valeur de pixels supérieure à 760 était une simple nuance de la couleur blanche. Ainsi nous avons pu les exclure de notre comparaison. Au vu des échantillons réalisés précédemment, nous pouvons déjà supposer que le nombre de points sera diminué drastiquement puisque la zone blanche de chacun des échantillons représente environ la moitié des images étudiées. Par conséquent, le coefficient de corrélation devrait diminuer également.

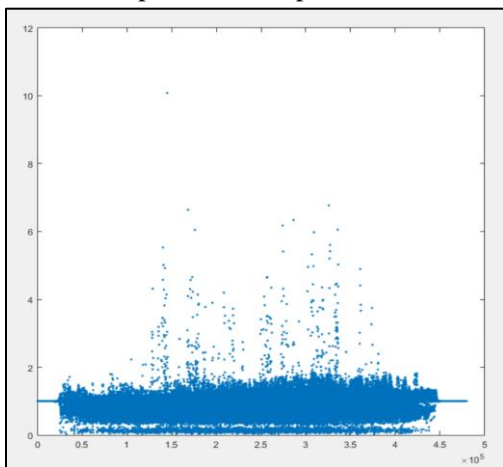
De manière à visualiser les résultats obtenus nous avons tout d'abord tracé, grâce à un nuage de points, l'image une en fonction de l'image deux. Ainsi on observe sur le premier graphique une répartition désordonnée du nuage de points. Notons que si les deux images avaient été parfaitement identiques ce nuage de points se serait concentré sur la droite affine rouge tracée sur le graphique de la figure 7. Bien que visuellement aucune corrélation ne semble exister entre ces deux images, nous obtenons un premier coefficient de corrélation de 0,79. Un coefficient d'une telle valeur indique que l'intensité de la relation entre les deux images est moyennement forte. Sa valeur supérieure à 0 indique également une relation positive entre les 2 jeux de données. De manière à affiner le résultat obtenu, il est à présent nécessaire de retirer les valeurs des pixels blancs communs aux deux images. La première étape visant à retirer les pixels d'une valeur de 765 produit un coefficient de corrélation 0,60. La seconde étape négligeant tout pixel supérieur à une valeur de 760 produit, quant à elle, un coefficient de corrélation d'une valeur de 0,58. Comme nous l'avions supposé précédemment, le coefficient de corrélation a été impacté par la suppression des zones blanches entourant les toitures.



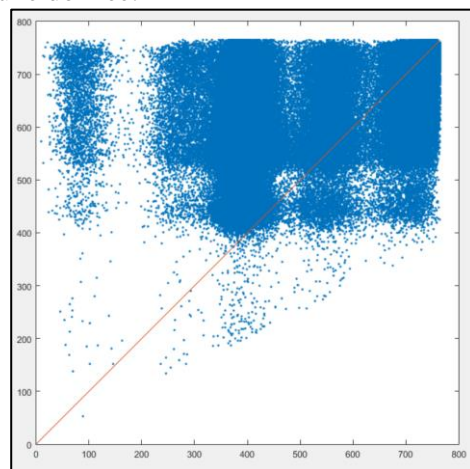
**Fig 7** – Nuage de points de la différence des deux images

Toujours dans le but d'obtenir un coefficient de corrélation reflétant une analyse la plus précise possible, il est à présent nécessaire de supprimer les valeurs aberrantes du jeu de données. Comme il a été dit précédemment, une valeur aberrante ou atypique est une valeur s'écartant anormalement de la moyenne du jeu de données. L'analyse visuelle du nuage de points n'est cependant pas suffisante pour supprimer ces valeurs. En effet, on pourrait supposer que les valeurs des points se situant dans l'angle supérieur gauche du graphique pourraient être considérés comme des points atypiques. Cependant, ceci pourrait découler d'une forte différence entre les 2 images et non pas à des erreurs qu'il faudrait supprimer. Afin de déterminer quelles données sont considérées comme valeur aberrante ou non, nous avons tracé un second graphique permettant de visualiser la répartition des points autour de la

moyenne des données. Ainsi on observe sur le graphique de la figure 8 que l'ensemble des valeurs se concentre autour de la valeur 1 mais que quelques valeurs du nuage de points se détachent considérablement de l'ensemble. Par conséquent, nous avons considéré que toute valeur supérieure à la valeur 2 était considérée comme valeur aberrante dans notre jeu de données. Une fois les valeurs atypiques supprimées du jeu de données, on peut une nouvelle fois calculer le coefficient de corrélation entre les deux images. On obtient alors une valeur finale du coefficient de corrélation égale à 0, 59. De plus, on peut à présent observer la répartition des données en nuage de points sur la courbe ci-dessous. On peut voir que le nombre de points a drastiquement diminué et que la partie inférieure droite du graphique ne présente plus aucune donnée.



**Fig 8** – Nuage de points de la répartition des valeurs de l'échantillon n°1



**Fig 9**- Nuage de points de la différence des deux images après nettoyage des données

L'ensemble de ces étapes pour déterminer le coefficient de corrélation a été appliqué pour chacun des 4 échantillons. L'ensemble des résultats a été regroupé dans le tableau de la figure 10 montrant l'évolution du coefficient corrélation à chacune des étapes.

	Echantillon n°1	Echantillon n°2	Echantillon n°3	Echantillon n°4
$r_{\text{initial}}$	0.7917	0.8010	0.8206	0.6718
$r_{765}$	0.6063	0.6462	0.6347	0.4542
$r_{>760}$	0.5861	0.6205	0.5995	0.4196
$r_{\text{final}}$	0.5948	0.6328	0.6001	0.4261

**Fig 10** – Coefficients de corrélation des quatre échantillons à chacune des étapes

#### 4.3. Analyse des résultats

Le protocole de comparaison nous permet finalement d'obtenir un coefficient de corrélation pour chacun des échantillons. Comme on peut le voir dans le tableau, ces trois coefficients sont compris entre 0.42 et 0.63. Pour les 3 premiers échantillons, le coefficient semble assez similaire. Ces différents coefficients nous permettent de dire que l'intensité entre les deux images peut être considérée comme moyennement faible. La valeur du coefficient de corrélation du dernier échantillon, quant à elle, indique une intensité faible entre les deux images.

Ces résultats pourraient découler de plusieurs explications. Tout d'abord, la méthode de calcul solaire utilisée dans l'élaboration du cadastre de la ville de Paris a été appliquée pour chacune des toitures. En ce sens, chacun des polygones représentant les toitures se sont vus attribuer une unique couleur. Alors que la méthode par échantillonnage, développée dans cet article, s'applique à l'ensemble des points de la toiture. Ainsi, le protocole de calcul solaire appliqué aux échantillons est beaucoup plus précis en termes de calcul du rayonnement solaire. D'un côté on aura donc une valeur de l'ensoleillement moyen par toiture, et de l'autre une valeur de ensoleillement pour chaque point de la toiture. Par conséquent, il est tout à fait concevable qu'une différence apparaisse dans les résultats. Nous pouvons finalement affirmer qu'une méthode de calcul par échantillonnage sera d'autant plus précise que la méthode de calcul utilisée pour le cadastre solaire de la ville de Paris.

#### 4.4. Discussion

La comparaison d'une méthode de calcul solaire appliquée au cadastre de la ville de Paris et

d'une méthode de calcul solaire par échantillonnage développée dans cet article m'a permis de conclure que l'échantillonnage permettait une meilleure précision dans la représentation de l'ensoleillement reçu par les toitures. Cependant, les résultats sont à nuancer. En effet le coefficient de corrélation permettant de mesurer l'intensité de la relation entre ces deux méthodes aurait pu être impacté par de nombreux facteurs. Tout d'abord, la qualité des échantillons que ce soit du point de vue du protocole d'échantillonnage ou du cadastre solaire de la ville de Paris joue un rôle important. Les images étant comparées pixel par pixel, un simple décalage du bâti entre les deux images pourrait dégrader les résultats obtenus. De plus, les données recueillies quant au bâti de la ville de Paris contenaient un ensemble de bâtiments beaucoup plus importants que le bâti représenté sur le cadastre solaire de la ville. En ce sens, le protocole par échantillonnage a calculé le rayonnement solaire reçu par l'ensemble des bâtiments mais pouvait ne pas correspondre au bâti présent dans le cadastre solaire.

D'autres éléments ont pu jouer sur le résultat du coefficient de corrélation comme le traitement des données. Dans un premier temps les pixels blancs ont été exclus du calcul. Bien qu'un pixel blanc ait une valeur de 765, nous avons pris la liberté de dire que tout pixel ayant une valeur supérieure à 760 pouvait être considéré comme un pixel blanc. En plus de cette hypothèse, une seconde a été faite lors de la suppression des valeurs aberrantes rencontrées dans le jeu de données. Dans le cadre de cet article, une valeur aberrante a été définie en fonction d'une analyse graphique. Cependant, une précision quant à ses valeurs aurait tout à fait été possible par un calcul théorique.

## 5. Conclusion

Les méthodes de pixellisation, SORAM et la méthode développée par **Peronato et al. (2018)** ont été comparées à travers une revue de littérature. Cette dernière a permis de dresser un portrait commun à ces différentes méthodes. Dans le but de produire un cadastre solaire, différentes étapes sont donc suivies : la collecte des données topographiques, la modélisation de la zone d'étude et enfin le calcul de l'irradiation solaire. Par ailleurs, l'étude de ces méthodes a révélé leur gourmandise en calculs, surtout lorsqu'il s'agit de la dernière étape. Afin de minimiser ces inconvénients, les auteurs jouent sur plusieurs leviers. La réduction de l'échelle temporelle et du pas de distanciation des points permet donc d'alléger les calculs. Cependant, plus ces valeurs sont réduites moins le résultat est précis. La difficulté est en réalité de trouver un compromis entre la gourmandise du calcul et la précision de la modélisation.

Finalement, il semblerait que ce compromis pourrait être trouvé au travers d'un troisième levier qui est la taille de la zone d'étude. Ainsi, une méthode par échantillonnage a été développée dans le but d'améliorer la précision des calculs. Cette méthode repose sur la production d'un cadastre solaire où l'ensoleillement est mesuré point par point sur la toiture des bâtiments. Enfin, le cadastre solaire obtenu est comparé à un cadastre solaire découlant d'une autre méthode de calcul solaire afin d'en estimer les différences. Les couleurs d'un cadastre permettant de visualiser l'intensité de l'ensoleillement reçu par une surface, la comparaison entre les deux méthodes s'est donc effectuée sur chacun des pixels de l'image. Nous avons alors obtenu un coefficient de corrélation entre chacune des méthodes pour les quatre échantillons traités. Il en est ressorti que les deux méthodes utilisées avaient une relation d'une intensité moyenne. Cet élément permet de confirmer qu'une différence existe entre les méthodes : la précision du calcul du rayonnement solaire. En effet, l'une des méthodes est appliquée à des points et la seconde à des polygones.

Bien que ce résultat nous permette de valider l'hypothèse initialement posée, il ne faut pas pour autant négliger la fébrilité du résultat. En effet, de nombreux facteurs ont pu dégrader la valeur du coefficient de corrélation au cours du protocole de comparaison qui a été mis en

œuvre. Des limites peuvent donc ressortir de la méthodologie qui a été appliquée. La superposition des deux images produites a été réalisée de manière visuelle et pourrait donc comporter de nombreuses erreurs dans la précision. De plus, les différentes étapes de nettoyage du jeu de données n'ont pas été réalisées sur des analyses précises et pourraient donc ne pas représenter la réalité. En effet, une première hypothèse a été faite quant à la valeur d'un pixel blanc. Puis une deuxième hypothèse, permettant de supprimer les valeurs atypiques du jeu de données, a par la suite été suggérée. Même si la méthodologie développée dans cet article permet de produire un cadastre solaire plus précis à l'échelle des échantillons, ses résultats doivent cependant être nuancés.

Pour conclure, bien que la méthodologie par échantillonnage permette une meilleure précision quant au calcul du rayonnement solaire, elle ne peut s'appliquer qu'à des échantillons. Un futur objectif serait donc de trouver une méthode qui permettrait une précision maximale à l'échelle d'une agglomération entière.

## 6. Bibliographie

- Ministère de la transition écologique et solidaire, URL : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/>
- Programme de coopération européen POLIS, URL : <http://www.polis-solar.eu/>
- Erdélyi, R.; Wang, Y.; Guo, W.; Hanna, E.; Colantuono, G. Three-Dimensional Solar Radiation Model (SORAM) and Its Application to 3-D Urban Planning. *Sol. Energy* **2014**, *101*, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.023>.
- Li, Y.; Ding, D.; Liu, C.; Wang, C. A Pixel-Based Approach to Estimation of Solar Energy Potential on Building Roofs. *Energy Build.* **2016**, *129*, 563–573. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.025>.
- Peronato, G.; Rastogi, P.; Rey, E.; Andersen, M. A Toolkit for Multi-Scale Mapping of the Solar Energy-Generation Potential of Buildings in Urban Environments under Uncertainty. *Sol. Energy* **2018**, *173*, 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.017>.

## 7. Annexes

### 7.1. Annexe 1 – Code

```
% Ouvrir les deux images
imc=imread('C:\Users\loulo\Documents\Polytech Tours\DAE4\Semestre 8\PFE\Echantillon 3 analysis.jpg');
imt=imread('C:\Users\loulo\Documents\Polytech Tours\DAE4\Semestre 8\PFE\Echantillon 3 cadastre.JPG');

imc=sum(imc,3); % Somme les 3 couleurs pour avoir des matrices à une dimension
imt=sum(imt,3);

% Calcul du coefficient de corrélation
RHO = corr2(imc,imt);

% Tracer l'image 1 en fonction de l'image 2 en nuage de points
plot(imc(:),imt(:),'.')
axis square

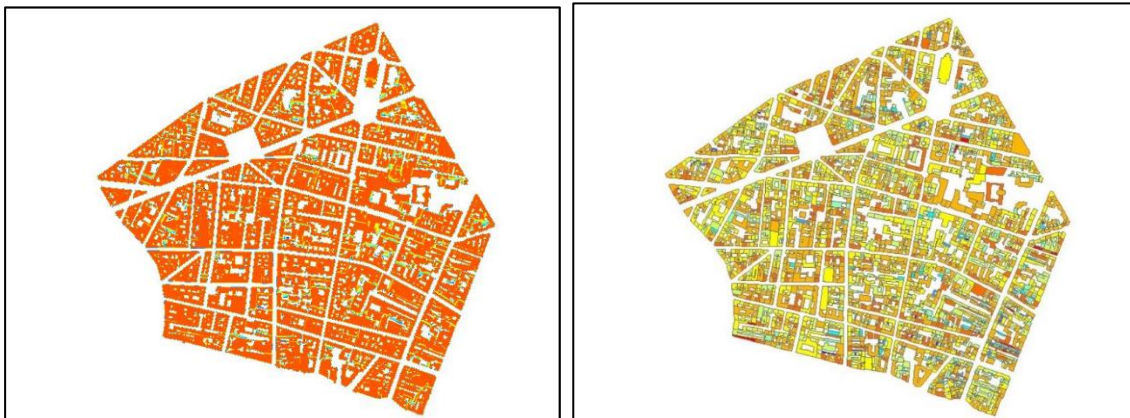
% Tracer la droite affine x=y
hold on
x=1:1:765
y=x
plot(x,y)

% Retirer les pixels blancs
for i=1:480000
    if data(i,1)==765 & data(i,2)==765
        data(i,:)=[];
    end;
end;

% Nettoyer le nuage de points des données aberrantes
for i=1:480000
    if abs(data(i,3))>2
        data(i,:)=[];
    end;
end;
end;
```

### 7.2. Annexe 2 – Cadastres des échantillons 2,3 et 4

Echantillon n°2 :



Echantillon n°3 :



Echantillon n°4 :



**Directeur de recherche :**

**Minjind Maïzia**

**Lou Loriot**

**PFE/DAE5**

**UIT/Option RESEAU**

**2020-2021**

## **Cadastre solaire et gisement photovoltaïque : mise en œuvre d'une méthode de calcul solaire par échantillonnage**

**Résumé :** L'objectif de ce travail est de produire un cadastre solaire grâce à une méthodologie par échantillonnage. Dans un premier temps, trois méthodes de calcul sont analysées puis comparées à travers une revue de littérature. Cette étape permet de dresser un portrait commun à ces méthodologies et d'en tirer des inconvénients. Par la suite, une méthode par échantillonnage est développée puis comparée à une méthode de calcul solaire existante. Les cadastres solaires étant des outils visuels d'aide à la décision, ceux-ci seront donc considérés en tant qu'image numérique afin de permettre leur comparaison. L'analyse des couleurs de chacun des pixels sera alors un moyen d'analyser les méthodes de calcul solaire utilisées. Finalement, le calcul du coefficient de corrélation nous permettra d'en déduire l'intensité de la relation entre les deux images et donc entre les méthodes de calcul solaire.

**Mots Clés :** Cadastre solaire – Echantillonnage – Corrélation - Méthodes de calcul - Potentiel solaire urbain