



POLYTECH[®]
TOURS

Département Aménagement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Le rayonnement solaire à l'échelle urbaine : une approche typologique



2012-2013

Directeur de recherche
MAIZIA Mindjid

GRANGE-GUERMENTE Julien
LOUBOUTIN Thibaud

Le rayonnement solaire à l'échelle urbaine : une approche typologique

Directeur de recherche :

Mindjid MAIZIA

Auteurs :

Julien GRANGE-GUERMENTE

Thibaud LOUBOUTIN

2012-2013

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.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche et projet de fin d'études en génie de l'aménagement

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, 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 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 Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 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 les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Nous voulons remercier tout particulièrement Mindjid MAIZIA, directeur de ce projet de recherche, pour son soutien, sa disponibilité et les conseils qu'il a pu nous apporter tout au long de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui nous ont soutenues pendant toute la durée de ce projet.

Sommaire

Avertissement.....	4
Formation par la recherche et projet de fin d'études en génie de l'aménagement	5
Remerciements.....	6
Sommaire	7
1 Introduction	8
1.1 Origine du Projet de recherche	8
1.2 Objectif du travail de recherche	8
1.3 Définition de la problématique.....	9
2 Etat de l'art	10
3 Variables et définitions.....	12
3.1 Création de la maille.....	12
3.1.1 L'opposé de l'azimut	13
3.1.2 Hauteur solaire	13
3.2 Densité de masque.....	15
4 Méthode de calcul	17
5 Résultats et interprétation.....	18
6 Conclusion et limites de l'étude	23
Bibliographie.....	24
7 Annexes.....	25
7.1 Méthode générale	25
7.2 Mise en forme de la base de données	25
.....	26
7.3 Création des mailles et calcul des densités de masque de chaque bâtiment.....	26
7.3.1 ToasterSyst©.....	27
7.3.2 Matlab©.....	27
7.4 Création des modèles 3D en vue du relevé de rayonnement solaire.	29
7.5 Calcul du rayonnement solaire	30

1 Introduction

1.1 Origine du Projet de recherche

A ce jour, l'évaluation du rayonnement solaire reçu par un nombre réduit de bâtiment est réalisable. En effet cette évaluation peut être faite de plusieurs manières. Par la mise en place de moyens matériels tels que des capteurs installés sur la surface étudiée, permettant de collecter les informations relatives à la réception de ce rayonnement (méthode empirique). Ou par un calcul théorique précis mais fastidieux. Seulement, dans certains cas, le périmètre d'étude ne se restreint pas à un seul bâtiment, un îlot ou un quartier mais a une agglomération qui représente plusieurs dizaines de milliers de bâtiments.

L'origine de l'étude intitulée « *le rayonnement solaire à l'échelle urbaine à partir d'une approche typologique* » provient d'un problème récurrent lorsque l'on s'intéresse à l'évaluation d'une variable à l'échelle urbaine. En effet, à cette échelle le nombre d'informations à traiter devient très important et leur traitement s'avère alors impossible en un laps de temps que l'on jugerait raisonnable. Dans notre cas, ce nombre d'informations, illustrant le rayonnement solaire reçu par un bâtiment, peut-être plus ou moins accru par la précision que l'on souhaite avoir. Plus concrètement, un bâtiment peut-être divisé en dix surfaces de relevé tout comme en dix milles surfaces de relevés. Cette division plus ou moins forte permet de préciser l'étude mais alourdit de manière importante le calcul de l'ensoleillement à l'échelle urbaine, car ce calcul doit être exécuté pour chaque bâtiment de l'agglomération.

Associé à ce nombre important d'informations, il faut remarquer que le calcul de la réception du rayonnement solaire par un bâtiment n'est pas une opération mathématique simple. C'est pourquoi il n'existe à ce jour aucun calculateur permettant d'effectuer le traitement de ces informations à l'échelle urbaine en un temps réduit. Il y a donc là, une nécessité d'alléger le nombre d'informations afin que l'étude du rayonnement solaire reçu par n'importe quel bâtiment composant le tissu urbain de l'agglomération de Tours puisse être établie en un temps que l'on jugerait convenable. Il est donc nécessaire de trouver un moyen de contourner ces difficultés d'évaluation du rayonnement solaire.

1.2 Objectif du travail de recherche

Le travail présenté dans la suite de cet article se propose de présenter **une méthode de simplification** du calcul du rayonnement solaire, sans pour autant dégrader de manière abusive la qualité et la signification des résultats obtenus. En suivant cet objectif de simplification, l'évaluation du rayonnement solaire ne devra pas se faire par le calcul précis de cette énergie reçue, bâtiment par bâtiment. À la place, une typologie, reposant sur certaines variables, sera mise en place afin de réduire le nombre de calculs aux seules catégories issues de cette typification. Cette typologie doit prendre en compte les caractéristiques du bâtiment et de son environnement, le tout en maintenant un rapport étroit avec le rayonnement solaire.

Ce travail de recherche devra donc permettre de **fournir un modèle calculatoire simple**, qui soit **reproductible** à d'autres territoires, ceci afin de s'intégrer au mieux dans une démarche de réduction du temps d'évaluation de la réception du rayonnement solaire à l'échelle urbaine.

1.3 Définition de la problématique

Comme dit plus haut en introduction, pour résoudre la difficulté calculatoire par une approche typologique, il y a une réelle nécessité de caractériser le bâtiment par rapport à son environnement. Afin de construire cette typologie, il est important de prendre en compte des variables en lien avec le rayonnement solaire. Nous sommes alors en droit de nous poser la question suivante : Comment mettre au point une typologie du tissu urbain, applicable au rayonnement solaire ?

Usuellement, le calcul du rayonnement solaire se fait à l'échelle du bâtiment. Or, il est impossible de mener à bien un tel calcul à l'échelle urbaine en un temps raisonnable. De plus, la réduction du temps de calcul de ce rayonnement à l'échelle urbaine est aussi un objectif majeur de cette étude. Alors, quelle méthode originale de calcul peut-on trouver pour mener cette étude à l'échelle urbaine ?

Intuitivement, il semble que **plus la densité du tissu urbain est grande, plus le rayonnement solaire incident est faible**. D'après la figure 1 il semble que les bâtiments situés dans un tissu dense reçoivent moins de rayonnement que des bâtiments situés dans un tissu moyennement ou peu dense.



Figure 1 : Intuitivement, le rayonnement solaire semble être inversement proportionnel à la densité de bâti. On voit donc que là où la densité est forte (à gauche) le rayonnement reçu est faible et là où la densité est faible, le rayonnement reçu est élevé.

Source : Réalisation personnelle

Pour nous aider dans cette démarche, et nous conforter dans le choix de notre hypothèse, nous avons consulté plusieurs articles en lien avec l'évaluation du rayonnement solaire incident à l'échelle urbaine.

2 Etat de l'art

Comme l'entend la problématique de cette étude, il y a bien un problème de grands nombres, puisqu'il est impossible de calculer le rayonnement solaire à l'échelle urbaine de façon précise et en un temps jugé raisonnable en discrétisant le tissu urbain. Le choix de créer une typologie a donc été fait dans un souci de simplicité. Dans ce sens, Dean Hawkes [12] souligne le fait que la création d'une typologie facilite l'exploitation des résultats.

« La typification offre la possibilité de passer les résultats d'une recherche technique à une forme qui les rend accessibles aux urbanistes. » Dean Hawkes, The Environmental Tradition: Studies in the Architecture of Environment

Des études ont déjà été menées sur les performances énergétiques des bâtiments ainsi que sur la forme optimale que doit avoir un bâtiment pour maximiser sa réception du rayonnement solaire. D'après Koen Steemers [9] la densification, qu'elle soit matérialisée par une augmentation du nombre d'étage ou par des constructions mitoyennes, diminue le rayonnement solaire incident. En fait, pour les bâtiments de bureaux, la densification augmente la consommation énergétique à cause de la réduction des apports solaires. L'auteur nuance ce propos en expliquant que l'augmentation de la densité va faire croître les consommations relatives à l'éclairage et au chauffage en hiver tout en diminuant les consommations liées à la climatisation en été. Néanmoins, cette étude étant basée sur des mesures quantitatives pour un échantillon forcément réduit de bâtiments, ces résultats ne peuvent être généralisés sur tout le territoire européen. Aussi, il est question de la consommation énergétique des bâtiments et non pas du rayonnement solaire, même si ces deux grandeurs sont étroitement liées. Dans une autre étude, Stromann-Andersen et Sattrup [10] soulèvent aussi le fait que le ratio entre la hauteur du bâti et la largeur de l'espace entre deux constructions agit sur le rayonnement solaire. Plus précisément, plus ce ratio entre hauteur de bâti et largeur de route augmente, plus la densité est grande. Et plus cette densité est grande, moins le bâtiment reçoit de rayonnement solaire. Cependant, dans le cadre de leur étude, des hypothèses fortes ont été formulées. Toutes les hauteurs des bâtiments ont été considérées comme égales à 15m, chiffre issu du calcul de la moyenne nationale en Grande-Bretagne. Leur étude a ensuite été réalisée sur plusieurs grands types de tissus urbain, afin de limiter le nombre de calculs et de faciliter les comparaisons. Bien que cela semble difficile d'utiliser cette variable dans le cadre de notre étude, cela valide encore le choix de typifier le tissu urbain. De plus, ces deux études pointent le fait que la quantité de rayonnement solaire incident sur un morceau de tissu urbain est inversement proportionnelle à la densité.

D'autres articles traitent de la relation qu'entretiennent densité, forme urbaine et qualités environnementales. Cependant, les manières d'étudier cette relation sont variées. Ji Zhang et al. [11] mettent en avant une variable, le *Sky View Factor (SVF)*, qui représente la portion de ciel visible depuis un point dans la ville. Leur objectif était de chercher une relation entre le *SVF* et la consommation énergétique des bâtiments. Pour ce faire, les auteurs ont sélectionné des îlots représentatifs de la forme urbaine de grandes villes (Amsterdam, Barcelone et Paris) et ont appliqué une démarche de « normalisation + réplique », ce qui permet de créer artificiellement un environnement homogène du point de vue de la forme urbaine. Il ressort de cette étude que l'analyse du *SVF* seul ne peut apporter de réponse complète quant à la consommation énergétique des bâtiments. En effet, si le *SVF* est bas, cela indique que le bâtiment reçoit peu de rayonnement solaire et que ses besoins en chauffages sont augmentés, mais aussi que ses besoins en climatisation sont diminués. De plus, un bâtiment possédant beaucoup d'angles, peut avoir des surfaces qui se cachent mutuellement et donc avoir un *SVF* bas, alors que les surfaces libres fournissent assez d'accès au soleil pour subvenir aux besoins du bâtiment. Dans un autre article, Raphaël Compagnon [1] cherche à développer une méthode permettant de lier rayonnement solaire et texture urbaine. Sa méthode repose sur la modélisation 3D d'un morceau de tissu urbain et sur l'utilisation du *Sky Model* de Richard Perez et al.

[5] permettant de calculer le rayonnement solaire incident. Bien que le *Sky Model* puisse être utilisé dans le cadre de ce projet de recherche afin de simplifier les calculs, la modélisation 3D de l'agglomération tourangelle toute entière prendrait beaucoup trop de temps. De plus, cela irait à l'encontre de l'objectif de reproductibilité de cette étude.

Une des limites récurrente à ces recherches est l'utilisation de modélisation 3D pour le calcul du rayonnement solaire à l'échelle urbaine. Bien que cette méthode soit précise, elle n'est pas reproductible et est très chronophage. C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, il a été choisi de créer une typologie du tissu urbain qui permettra d'avoir une précision suffisante pour les calculs, tout en permettant d'avoir un modèle reproductible. Cette typologie sera construite sur le critère de la densité, qui semble être un facteur d'influence de la réception du rayonnement solaire. Cependant, et ce pour coller au mieux à la réalité de l'environnement, il a été choisi de créer une nouvelle définition de la densité, que l'on appellera densité de masque.

Cet état de l'art permet de confirmer le choix de l'hypothèse de cette étude qui se formule ainsi : *Le rayonnement solaire incident sur un morceau de tissu urbain est inversement proportionnel à la densité de ce tissu urbain.*

3 Variables et définitions

La formulation de l'hypothèse étant faite, une question supplémentaire se pose, la définition de la densité, telle qu'on l'entend habituellement, est-elle cohérente avec l'évaluation du rayonnement solaire ?

En effet, la densité urbaine habituellement utilisée repose sur un découpage administratif qui n'a aucun lien avec le rayonnement solaire. Le Coefficient d'Occupation du Sol (COS) est calculé comme étant le rapport entre la surface de plancher et la surface au sol de la parcelle, de l'îlot ou du quartier. La limite de cette densité étant que le découpage utilisé reste essentiellement administratif. Il y a donc une réelle nécessité de définir une nouvelle densité cohérente du point de vue du rayonnement solaire. Mais alors, quelle forme donner à ce nouveau découpage ?

3.1 Création de la maille

Habituellement le COS est calculé à partir d'un motif construit par la géométrie du réseau routier ou de la parcelle. La maille ressemble alors bien souvent à un motif rectangulaire. Dans notre cas, la géométrie de la maille doit être corrigée afin de correspondre au rayonnement solaire. Il est à noter que la quantité de rayonnement solaire reçue peut être modifiée par de nombreux obstacles (constructions, végétation, etc.). C'est pourquoi il est nécessaire de créer autant de mailles que de bâtiments à étudier, afin d'avoir une analyse fine du territoire. Cette maille ressemblera d'avantage à une zone tampon autour du bâtiment étudié qu'à un maillage fixe. Alors, si l'étude se focalise sur un bâtiment, il est judicieux de retirer de cette maille toute construction n'ayant aucun impact sur le rayonnement solaire incident sur le bâtiment étudié. En d'autres termes, il convient de sélectionner toute construction qui projette une ombre sur le bâtiment étudié. Nous devons donc procéder à une sélection qui éliminera les bâtiments voisins qui ne projettent aucune ombre sur le bâtiment étudié. La maille est alors constituée par la totalité des bâtiments sélectionnés.

La course du soleil varie selon les jours et les heures de la journée. Son mouvement, semblable à un arc de cercle, peut être décomposé en deux composantes angulaires : une horizontale et une verticale. La composante horizontale est l'opposé de l'azimut¹ et représente l'amplitude du déplacement du soleil sur un plan horizontal. La composante verticale est appelée hauteur solaire et représente l'amplitude du déplacement du soleil sur un plan vertical. L'étude de chacune de ces deux composantes va permettre de réaliser la sélection des bâtiments pouvant avoir un impact sur le rayonnement solaire perçu par le bâtiment étudié.

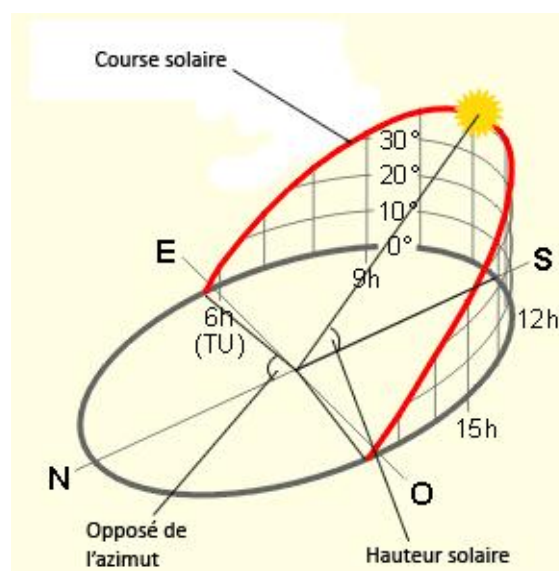


Figure 2 : Course solaire, hauteur solaire et opposé de l'azimut

Source : <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be>

¹ L'azimut étant l'angle mesuré entre le sud et la position du soleil, l'opposé de l'azimut est l'angle entre le nord et la position du soleil

3.1.1 L'opposé de l'azimut

Le terrain d'étude de ce travail de recherche étant l'agglomération tourangelle, les données solaires utilisées sont celles correspondant à la latitude et à la longitude de la ville ($47^{\circ}23'37''\text{N}$; $0^{\circ}41'21''\text{E}$).

Pour une maille centrée sur le bâtiment étudié, il est évident que toute construction qui se trouverait en dehors de la course du soleil ne pourrait projeter une ombre sur le bâtiment étudié. Alors, pour le jour de référence du 21 juin, qui est le jour où la course du soleil est la plus grande, le soleil se lève à un azimut de $55,88^{\circ}$ et se couche à $307,12^{\circ}$, ce qui représente une course de $254,24^{\circ}$.

Pour la construction de la maille, le périmètre où les constructions sont susceptibles de projeter une ombre sur le bâtiment étudié est matérialisé par un disque partiel de rayon infini². Il est donc inutile d'étudier les effets de masque que peuvent avoir tous les bâtiments se trouvant en dehors de ce disque partiel.

Sur la figure ci-dessous est représentée une schématisation d'un morceau de tissu urbain, au sein duquel nous souhaitons relever le rayonnement solaire reçu par le bâtiment orange situé au centre du cercle. En jaune est représenté le disque partiel représentant la course du soleil par rapport au bâtiment étudié. Ici, les bâtiments en dehors du disque jaune sont ignorés pour la construction de la maille. Ce faisant, une première sélection de bâtiments est faite et le nombre de calcul est considérablement réduit.

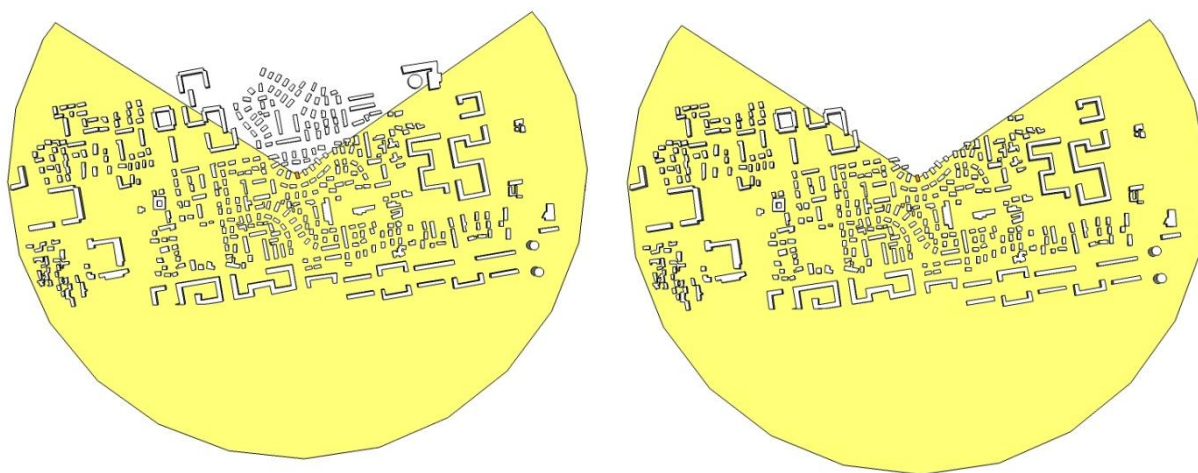


Figure 3 : Sélection de bâtiments par rapport à l'opposé de l'azimut. Les bâtiments en dehors du disque partiel jaune sont ignorés lors des calculs.

Source : Réalisation personnelle

3.1.2 Hauteur solaire

La première sélection faite grâce à l'azimut solaire permet de retirer quelques bâtiments de la maille. Cependant, toutes les constructions se trouvant dans la course solaire ne sont pas susceptibles de projeter une ombre sur le bâtiment étudié. En effet, certaines constructions sont trop loin ou tout simplement trop petites pour avoir un impact sur le rayonnement solaire reçu par le bâtiment étudié. Le soleil a une hauteur angulaire différente à chaque heure de la journée et son mouvement dans le ciel a une amplitude qui dépend du jour de l'année. De plus, les ombres projetées seront les plus grandes lorsque le soleil sera au plus proche de l'horizon. Il convient donc de faire une sélection supplémentaire en rapport avec la hauteur solaire.

² Ce disque débute à $55,88^{\circ}$ du nord (sens horaire) et se termine à $307,12^{\circ}$ du nord (sens horaire)

En considérant toujours un bâtiment et son voisinage, tous les bâtiments dont la hauteur angulaire est trop faible par rapport au bâtiment étudié seront exclus de la maille. Prenons la droite passant par le barycentre de la base du bâtiment étudié et le barycentre du sommet d'une construction voisine (figure 4). Si l'angle formé par cette droite et l'horizontale est inférieur à un seuil qu'il faudra déterminer, alors cette construction ne projettera pas d'ombre sur le bâtiment étudié. Ce seuil sera fixé en fonction de la hauteur solaire. Le seuil à déterminer constitue en fait la limite de hauteur et de distance qui indiquera si oui ou non une construction projette une ombre sur le bâtiment étudié.

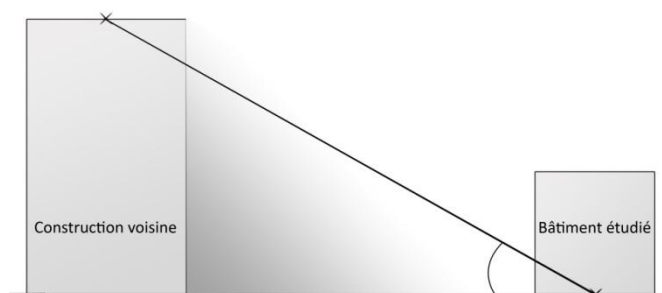


Figure 4 : Angle calculé entre le barycentre de la base du bâtiment étudié et le barycentre du toit de la construction voisine.

Source : Réalisation personnelle

C'est le 21 décembre, au solstice d'hiver, que le soleil est au plus bas sur l'horizon, c'est donc aussi la date où les ombres sont les plus grandes. La valeur du seuil sera arbitrairement fixée à 5° , valeur qui permet de limiter le nombre de calculs sans pour autant dégrader l'exactitude de ceux-ci.

Cet angle permet de prendre en compte à la fois la distance d'un bâtiment par rapport à celui étudié, ainsi que sa hauteur. Ainsi les bâtiments trop éloignés ou trop petits par rapport au bâtiment étudié ne seront pas intégrés à la construction de la maille. Sur la représentation graphique ci-dessous, vous pouvez voir que tous les bâtiments présentant un angle inférieur au seuil de 5° ne sont pas pris en compte au sein de la maille.

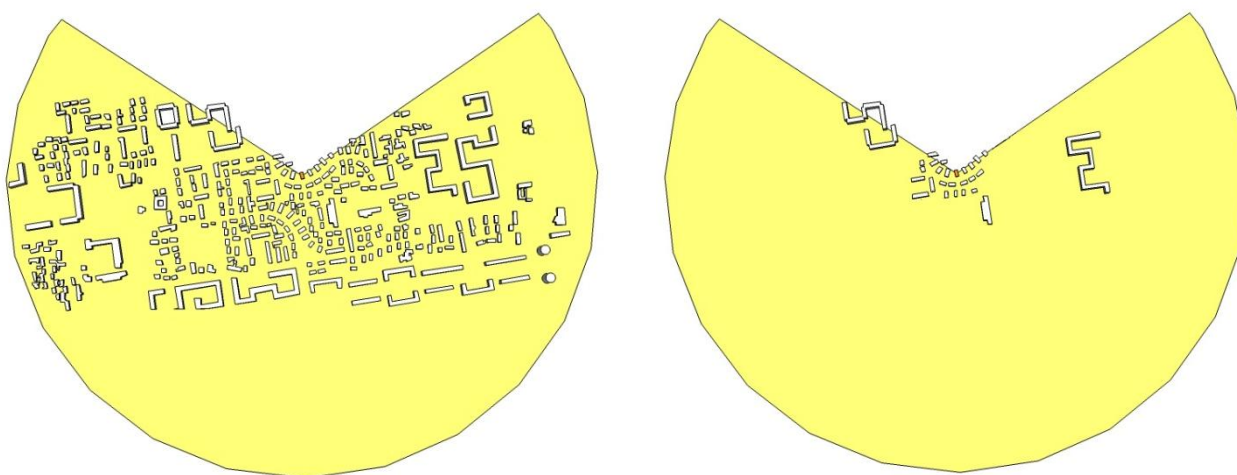


Figure 5 : Sélection de bâtiment par rapport à la hauteur solaire. Les bâtiments dont la hauteur angulaire est trop faible sont retirés de la maille car ils ne pourront jamais projeter une ombre sur le bâtiment étudié, quelles que soient la date et l'heure.

Source : Réalisation personnelle

Une fois ces deux restrictions appliquées, une maille par bâtiment aura été créée. Cette maille sera cohérente du point de vue du rayonnement solaire et il sera alors possible d'effectuer un calcul de densité qui sera donc cohérent pour le rayonnement solaire.

3.2 Densité de masque

La densité urbaine est habituellement calculée comme étant le rapport entre la surface de plancher d'un ou de plusieurs bâtiment et la surface d'une unité urbaine (parcelle, îlot, quartier, etc.). La maille construite grâce aux deux sélections successives crée une nouvelle unité urbaine prenant en compte le rayonnement solaire. Etant donné que la maille n'a pas de surface à proprement parlé, puisqu'elle n'est qu'une sélection de bâtiments disparates, il est nécessaire de réaliser une triangulation de Delaunay entre les bâtiments sélectionnés. Cette triangulation va créer une association de triangles, qui vont relier tous les bâtiments entre eux. La somme de la surface de ces triangles donne alors une surface utilisable pour le calcul de la densité. Pour calculer la densité, il faut donc prendre la somme des surfaces de plancher des bâtiments sélectionnés que l'on divise par la somme de la surface des triangles.

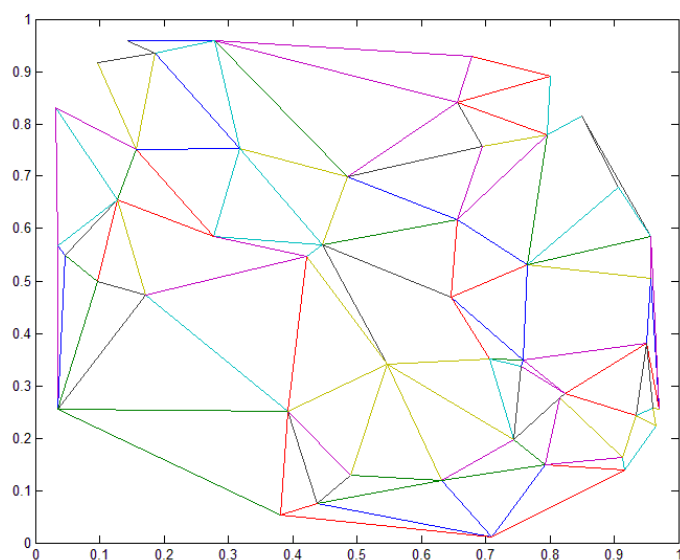


Figure 6 : Exemple de triangulation de Delaunay. Les intersections des segments colorés symbolisent les bâtiments sélectionnés répartis aléatoirement sur le territoire. La surface de la maille est la surface totale de tous les triangles.

Source : Réalisation personnelle (Matlab©)

Cette densité, calculée à partir de la construction de la maille prenant en compte le rayonnement solaire, sera appelée densité de masque :

$$densité_{masque} = \left(\sum_{bât.sélect.} surface\ de\ plancher \right) \div \left(\sum surface\ des\ triangles \right)$$

La construction de la typologie de bâti repose donc à la fois sur la construction de cette maille et sur cette définition de la densité. En effet, la construction de cette maille ainsi que le calcul de la densité de masque pour chaque bâtiment de l'agglomération de Tours représente un calcul beaucoup plus

abordable que si l'on avait voulu calculer le rayonnement solaire incident sur chaque construction. De ce fait, une classification par niveau de densité de masque pourra être établie et pourra ainsi limiter les calculs de rayonnement solaire à ces seules catégories. L'hypothèse de ce travail de recherche est que le rayonnement solaire perçu par un bâtiment est inversement proportionnel à sa densité de masque. La validation de cette hypothèse permettrait d'évaluer la quantité de rayonnement solaire perçu par n'importe quel bâtiment de l'agglomération de Tours.

4 Méthode de calcul

Dans ce projet de recherche, un grand nombre de données et de logiciels ont été nécessaires afin de mener à bien l'analyse du sujet. Afin de ne pas rentrer ici dans des détails manipulateurs trop techniques, la description des protocoles propres à chaque logiciel seront décrits en annexe.

5 Résultats et interprétation

Afin de créer une typologie sur la densité de masque, il a été nécessaire d'effectuer les calculs sur soixante bâtiments tirés aléatoirement. Les résultats de ces calculs permettent de créer plusieurs classes de densité. Le graphique ci-dessous présente le total du rayonnement solaire direct incident en fonction de la densité de masque sur une année.

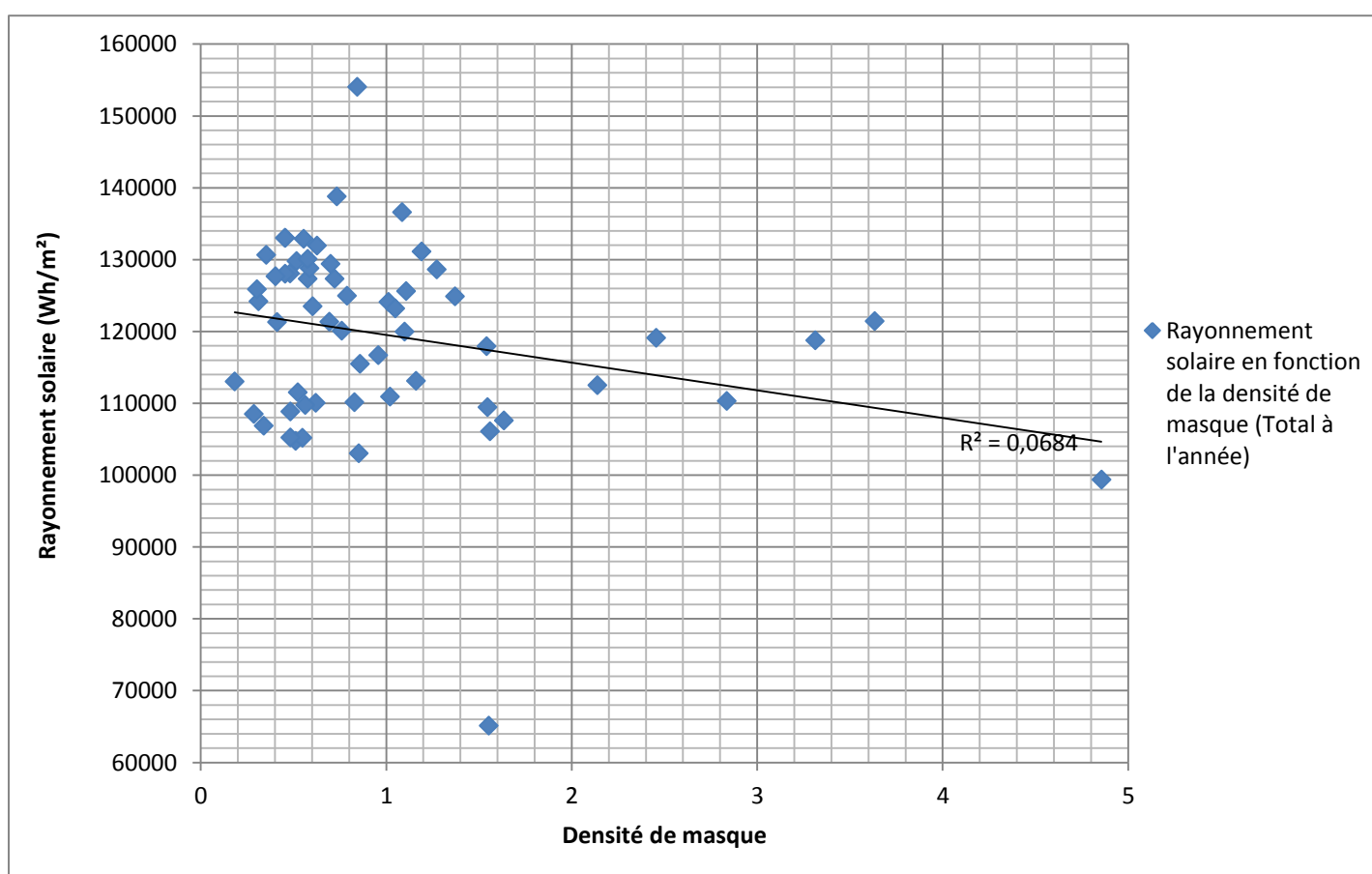
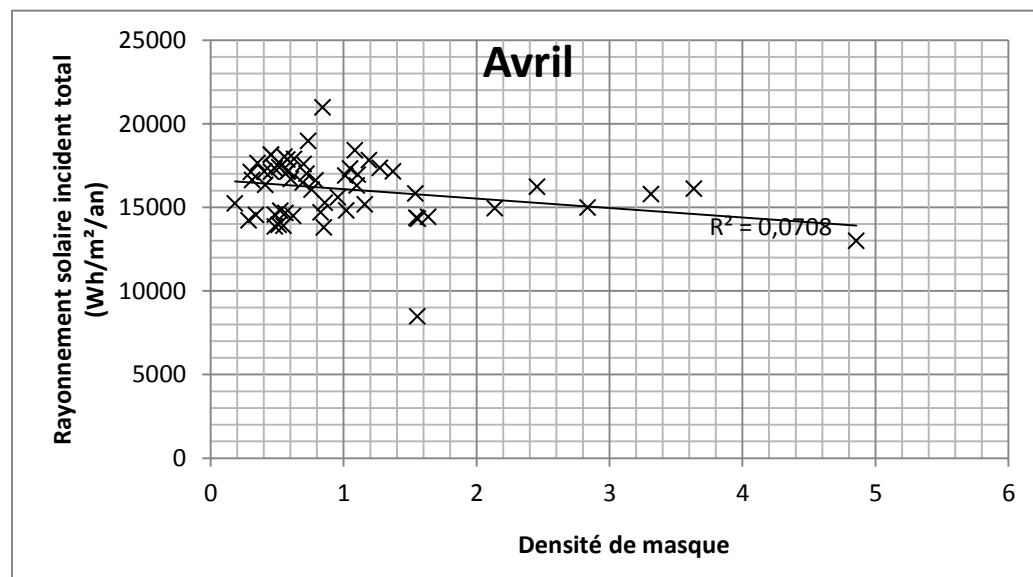
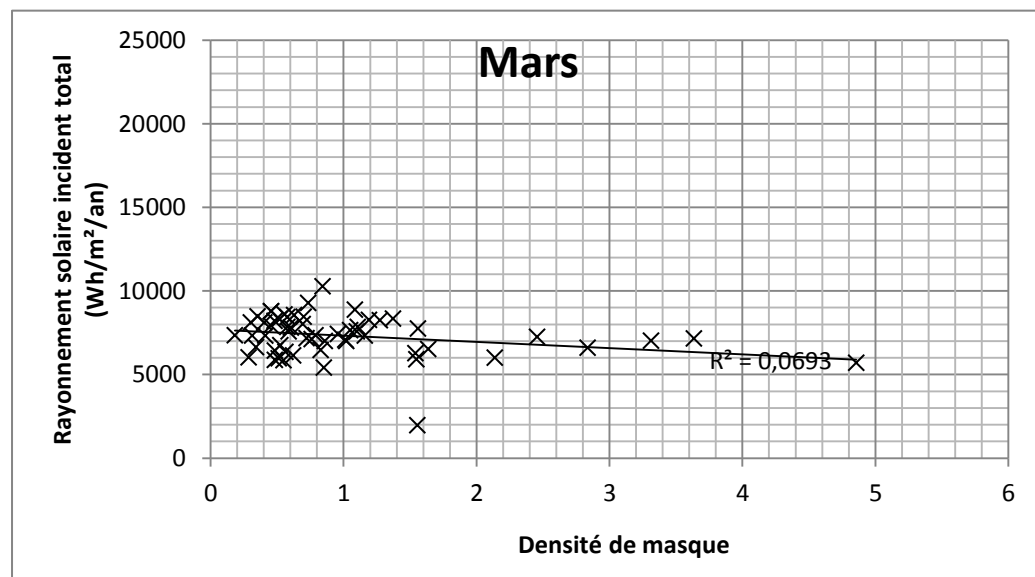
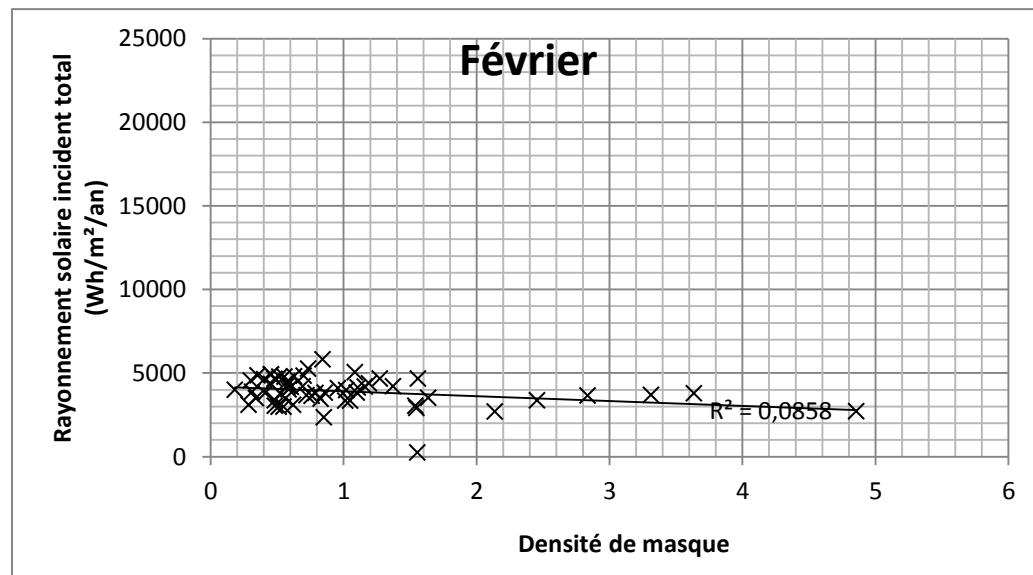
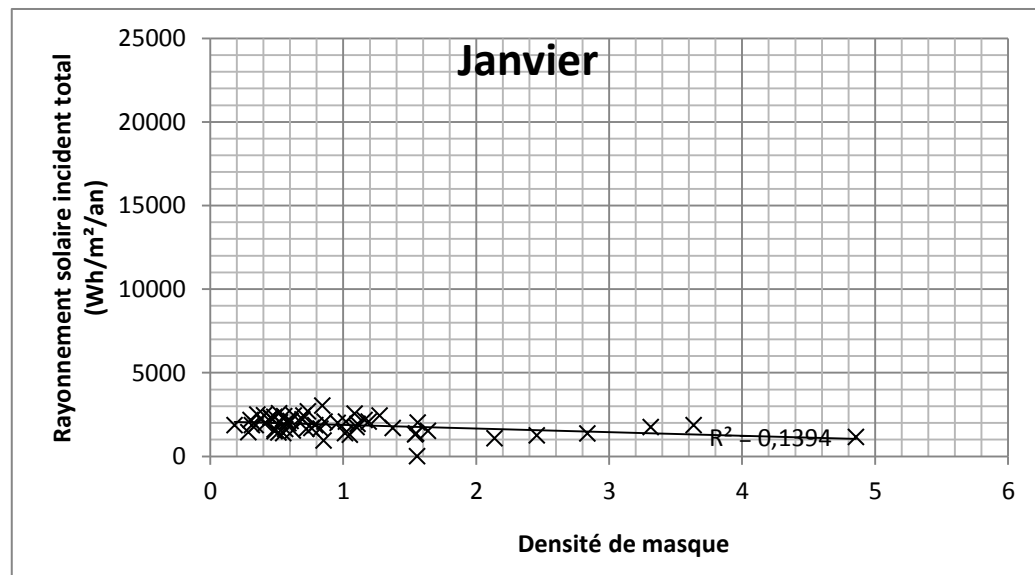


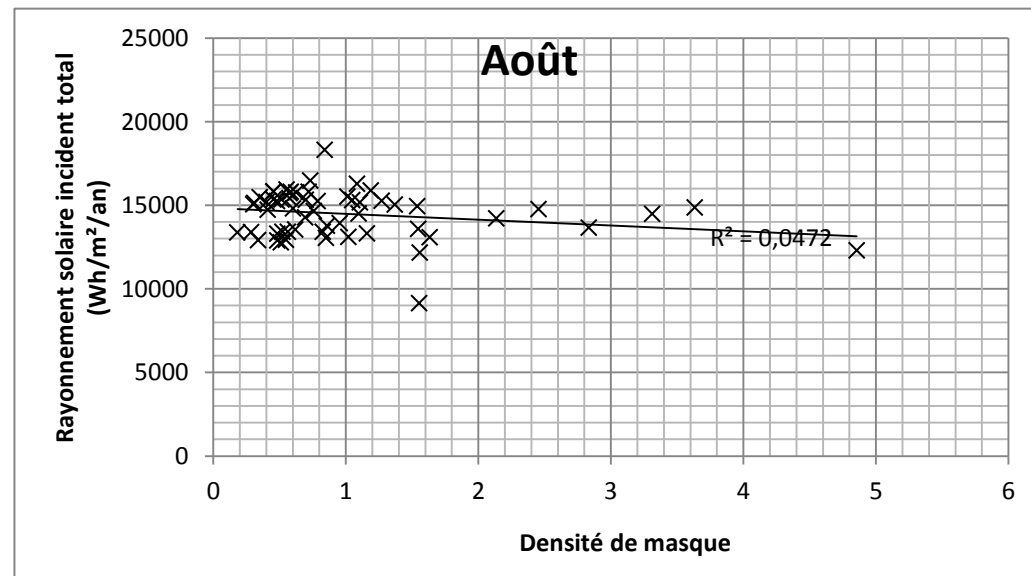
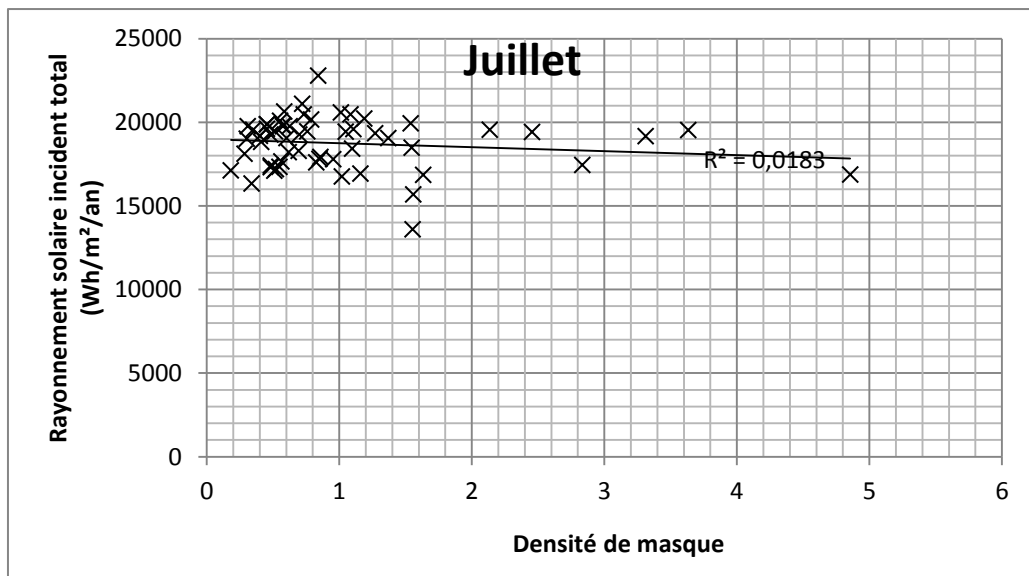
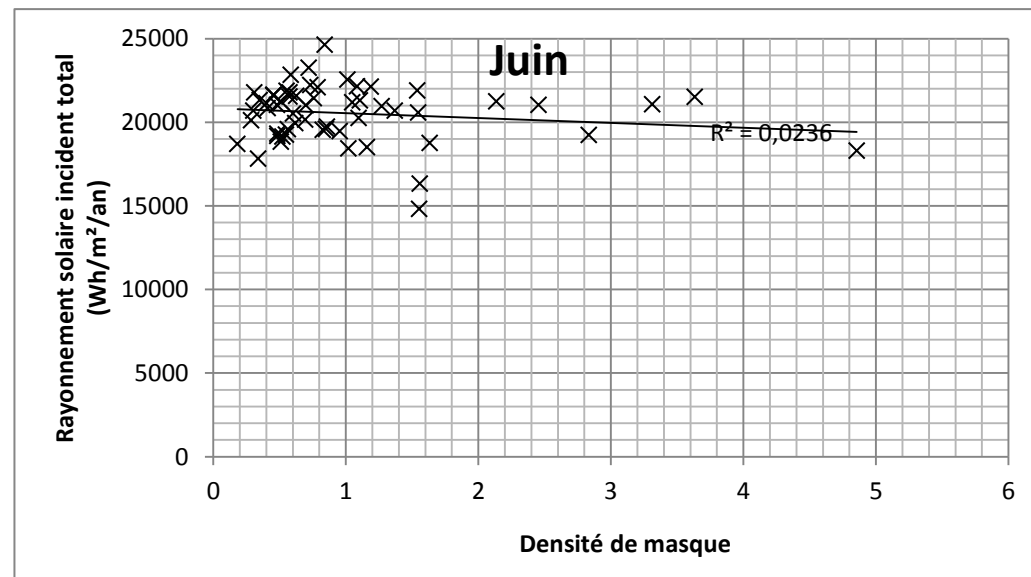
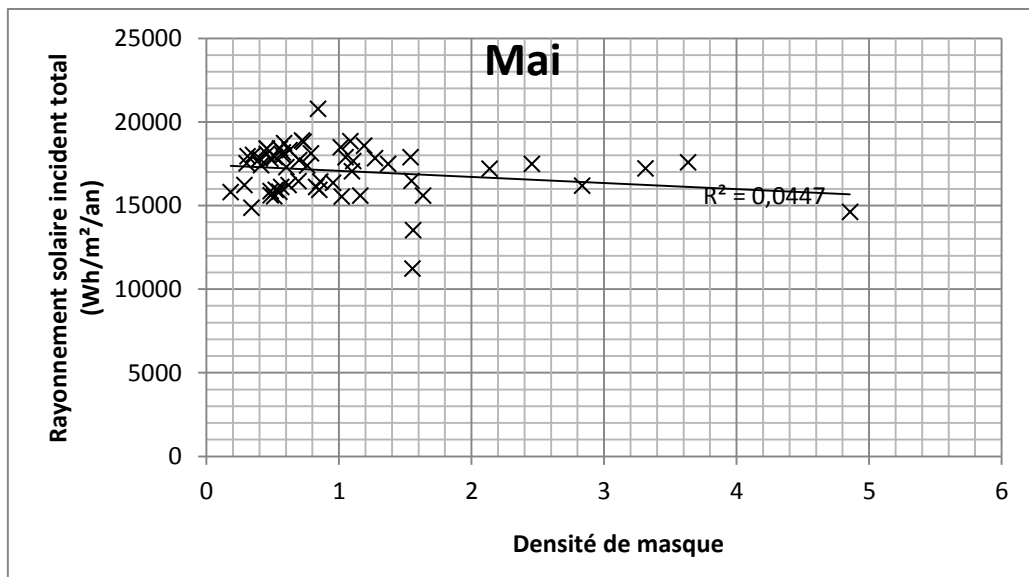
Figure 7 : Rayonnement solaire direct incident total (par an) en fonction de la densité de masque.

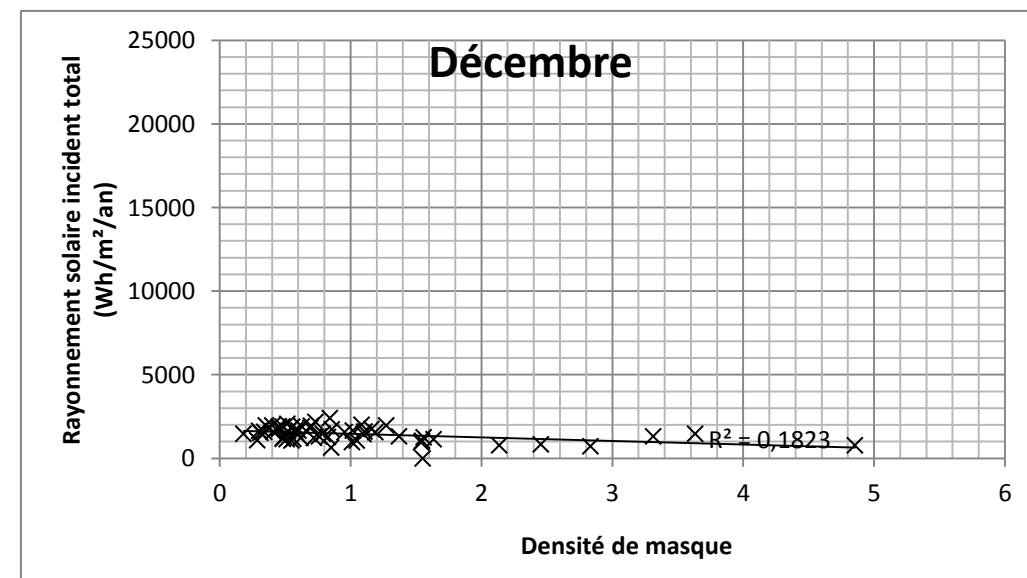
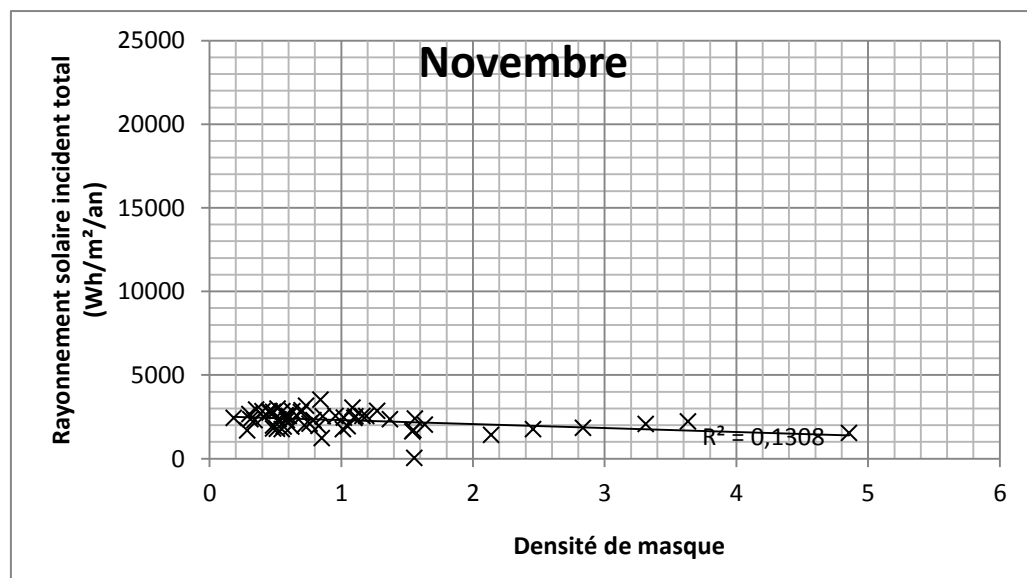
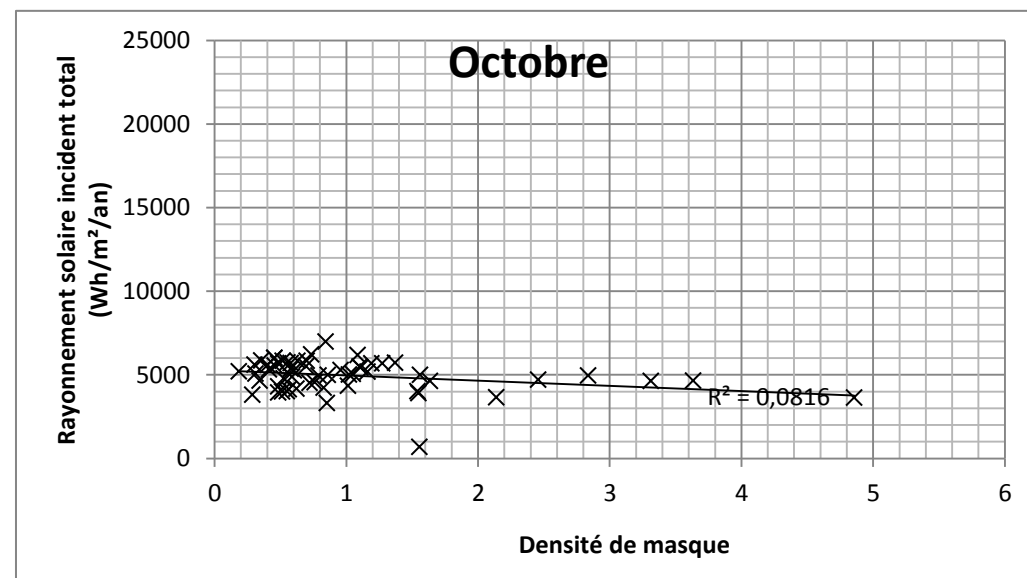
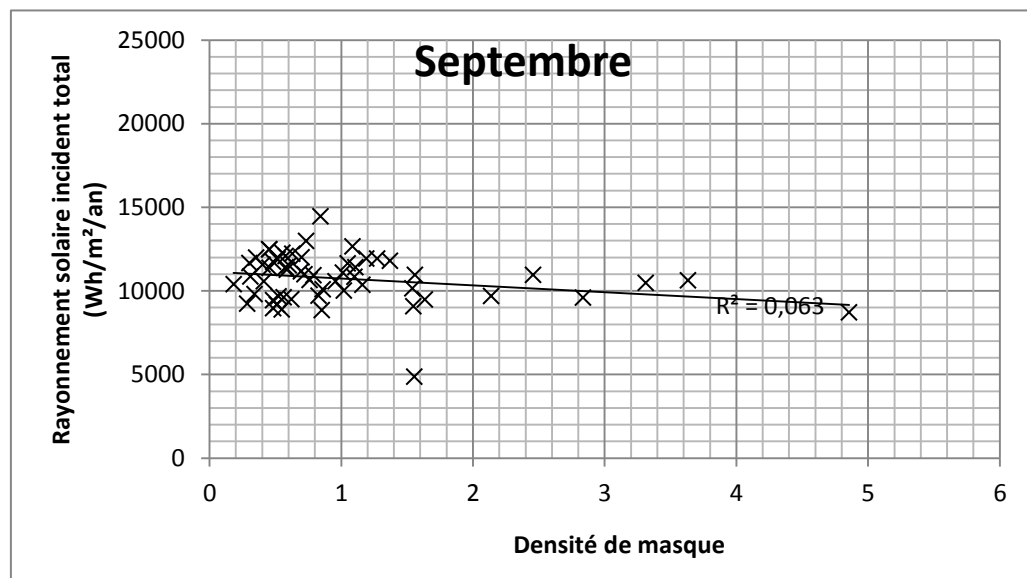
Source : Réalisation personnelle

La droite de corrélation a un coefficient de détermination $R^2 = 0,0684$ et un coefficient de corrélation $R = -0,261448031$. Même si cette corrélation reste mauvaise, il est à noter que ce coefficient est négatif, ce qui indique que l'hypothèse de l'étude semble être validée. Il est possible d'expliquer cette mauvaise corrélation par le fait qu'en été, le soleil étant haut, les ombres sont courtes et l'effet de masque est faible et inversement en hiver. Alors, en été, la corrélation est mauvaise et en hiver la corrélation est meilleure (maximum à $R = -0.426957534$ en décembre). Le fait d'avoir cumulé le rayonnement solaire incident sur l'année dégrade le coefficient de corrélation.

Une vue beaucoup plus fine de ce phénomène se fait lorsque l'on ne s'intéresse qu'aux valeurs cumulées mois par mois :







Pour chaque mois de l'année, les coefficients de corrélation sont les suivants :

Tableau 1 : Coefficients de corrélation en fonction du mois de l'année.
Source Réalisation personnelle

Mois	Coefficient corrélation (R)
Janvier	-0.373318408
Février	-0.292856533
Mars	-0.263341966
Avril	-0.26599961
Mai	-0.211478618
Juin	-0.153716437
Juillet	-0.135195185
Août	-0.21734352
Septembre	-0.25094114
Octobre	-0.28569534
Novembre	-0.3616226932
Décembre	-0.426957534
Total sur l'année	-0.261448031

Le coefficient de corrélation des mois d'hiver, notamment le mois de décembre, apparaissent bien meilleurs que ceux des mois d'été. Cela valide bien le fait que lorsque le soleil est rasant, les ombres ont un effet plus important sur le rayonnement solaire incident que lorsque le soleil est haut dans le ciel. En d'autres termes, la densité de masque affecte d'autant plus le rayonnement solaire reçu que le soleil est bas sur l'horizon.

Ces résultats permettent de conclure sur le fait que plus la densité de masque augmente plus le rayonnement solaire incident diminue. Cependant, les coefficients de corrélation étant relativement bas, l'effet de la densité sur le rayonnement, même s'il existe, reste assez faible. De plus, cette étude s'intéresse uniquement au rayonnement direct du soleil et ne prend pas en compte le rayonnement issu de la voûte céleste. Néanmoins, il paraît logique que si le rayonnement de la voûte céleste, ainsi que les effets d'albédo et de réflexion sont pris en compte, la corrélation entre densité de masque et rayonnement solaire incident sera encore plus faible. En effet, avec ces nouvelles « sources » de rayonnement, cela homogénéisera d'autant plus les effets de masque. Alors la corrélation entre densité de masque et rayonnement solaire sera elle aussi diminuée.

6 Conclusion et limites de l'étude

Les résultats de cette étude nous ont permis de conclure que l'augmentation de la densité de masque ne réduit pas significativement la quantité de rayonnement solaire incident sur un bâtiment étudié. Cependant la méthode utilisée pour arriver à cette conclusion a ses limites³.

La définition de la densité de masque présente une limite forte qui est due à la façon de calculer la surface de la maille. Une fois que la sélection des bâtiments est faite, il faut réaliser une triangulation de Delaunay afin d'obtenir des surfaces triangulaires, dont la somme représente la surface totale de la maille. Or, dans le cas où la sélection se résume à quelques bâtiments qui sont presque alignés sur une même droite, les triangles les reliant seront très écrasés. Alors, la surface de la maille sera quasiment nulle et la densité tendra vers l'infini. Cela crée quelques problèmes lors de l'évaluation du rayonnement solaire car des bâtiments peuvent être caractérisés par des densités de masque très élevées alors que ce sont des maisons individuelles en R+1 avec deux voisins en R+1 (exemple : maisons dans un lotissement). Cette limite, une fois qu'elle a été comprise, apporte tout de même une information supplémentaire par rapport à une densité classique. En effet, une étude ultérieure pourrait s'intéresser à cette densité en cherchant une valeur limite au-delà de laquelle la densité de masque témoigne d'une forme urbaine particulière. En d'autres termes, chercher jusqu'à quelle valeur de densité celle-ci est représentative du niveau de masque et analyser ce que signifient des chiffres supérieurs à cette valeur en terme de topologie.

Au-delà de ces limites, il paraît intéressant de continuer ce travail de recherche en étudiant de façon plus fine le rayonnement solaire à l'échelle urbaine. Une étude qui s'occupe de mettre en lien la densité de masque, non plus avec le rayonnement solaire incident, mais avec la consommation énergétique, peut être envisagée. En effet, Koen Steemers [9] a d'ores-et-déjà étudié les consommations énergétiques des bâtiments et des transports en fonction de la densité. Cependant, sa définition de la densité ne prend pas en compte le rayonnement solaire. Il paraît donc intéressant de pousser l'analyse en ce sens. De tels travaux trouveraient leur utilité dans bien des domaines d'application comme l'aménagement durable, l'architecture, l'exploitation de gisements solaires, etc.

³ Des limites issues des hypothèses de travail et du fonctionnement des logiciels de calculs ont été mises en évidence. Les explications liées à celles-ci sont disponibles en annexe.

Bibliographie

- [1] Raphaël Compagnon. "Solar and daylight availability in the urban fabric." *Energy and buildings* no. 36 (2004): 321–328.
- [2] Stuart Gadsden, Mark Rylatt, Kevin Lomas, and Darren Robinson. "Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS." *Energy and buildings* no. 35 (2003): 37–48.
- [3] Arbi Gharakhani Siraki, and Pragasen Pillay. "Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications." *Solar energy* no. 86 (2012): 1920–1928.
- [4] Eugenio Morello, and Carlo Ratti. "Sunscares: 'Solar envelopes' and the analysis of urban DEMs." *Computers, Environment and Urban Systems* no. 33 (2009): 26–34.
- [5] Richard Perez, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, and Ronald Stewart. "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance." *Solar energy* no. 44 (1990): 271–289.
- [6] Carlo Ratti, Koen Steemers, and Nick Baker. "Energy consumption and urban texture." *Energy and buildings* no. 37 (2005): 762–776.
- [7] Darren Robinson. "Urban morphology and indicators of radiation availability." *Solar energy* no. 80 (2006): 1643–1648.
- [8] Darren Robinson, and Andrew Stone. "Solar radiation modelling in the urban context." *Solar energy* no. 77 (2004): 295–309.
- [9] Koen Steemers. "Energy and the city: density, buildings and transport." *Energy and buildings* no. 35 (2003): 3–14.
- [10] J. Stromann-Andersen, and P.A. Sattrup. "The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains." *Energy and buildings* no. 43 (2011): 2011–2020.
- [11] Ji Zhang, Chye Kiang Heng, Lai Choo Malone-Lee, Daniel Jun Chung Hii, Patrick Janssen, Kam Shing Leung, and Beng Kiang Tan. "Evaluating environmental implications of density: A comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure." *Automation in construction* no. 22 (2012): 90–101.
- [12] Dean Hawkes. "The environmental tradition: studies in the architecture of the environment." 1st ed., Taylor & Francis, (1995)

7 Annexes

Dans les annexes qui suivent sont décrits les protocoles qui ont permis l'extraction, l'utilisation, le calcul et l'interprétation des données. Sont aussi décrites les limites propres aux méthodes et aux logiciels employés pour l'exécution de ce travail de recherche.

7.1 Méthode générale

Le développement, les calculs et leur interprétation ont été réalisés en plusieurs étapes. Tout d'abord, les données brutes ont été nettoyées à l'aide de l'interface d'ArcMap®, qui a permis de supprimer ou de modifier toutes les entrées erronées. En parallèle de la mise en forme de ces données a eu lieu l'élaboration du système de variables qui ont servis à construire la maille et à calculer la densité de masque propres à chaque bâtiment. Une fois ces deux étapes réalisées, l'importation et le traitement de ces données s'est fait à l'aide du logiciel Matlab®.

C'est lors du passage à Matlab® que se fait la construction de la typologie. En effet, il n'y a aucun intérêt à effectuer la totalité des calculs pour tous les bâtiments de l'agglomération tourangelle. Un échantillon aléatoire de 60 bâtiments est donc constitué sur lesquels la totalité des calculs est réalisée (création de la maille et calcul de la densité). Le résultat de ces calculs est donc une liste de constructions pour chacun des soixante bâtiments (les constructions ainsi listées sont uniquement celles ayant une influence sur le rayonnement reçu par le bâtiment étudié). Une modélisation 3D de ces soixante bâtiments ainsi que de leur environnement est faite à l'aide d'ArcScene®. Ces modèles 3D sont ensuite importés dans Ecotect Analysis® qui permet de calculer le rayonnement solaire incident sur le bâtiment étudié. Les résultats sont mis en forme et interprétés à l'aide d'Excel®.

7.2 Mise en forme de la base de données

Afin de poursuivre notre étude, et de valider ou non nos hypothèses, l'étude d'un cas concret nous a paru utile. Pour ce faire nous avons pu nous appuyer sur les informations issues de la base de données graphique construite par l'IGN. Grâce à la BD TOPO® du bâti édité en 2008, les emprises au sol de chacun des bâtiments que nous souhaitons étudier, est dessiné. De ce fait il nous a été possible d'extraire de ce fichier informatique, une base de données référençant pour chacun des bâtiments :

- **un ID unique**
- **Sa hauteur**
- **L'altitude de son plus haut sommet**

En important cette base de données référençant les 49154 bâtiments qui font partie de l'agglomération de Tours, sur le logiciel Arcgis – ArcMap®, nous avons pu compléter cette base de données. En effet ce logiciel nous a permis de créer les champs suivants :

- **La coordonnée en X de son centroïde** (par calcul géométrique proposé par le logiciel Arcgis®)
- **La coordonnées en Y de son centroïde** (par calcul géométrique proposé par le logiciel Arcgis®)
- **L'altitude de sa base** (par calcul numérique : différence entre le Zmax et la hauteur du bâtiment)

- **Son nombre d'étage** (par calcul numérique : nb étage = Hauteur du bâtiment/ hauteur d'un étage, en faisant l'hypothèse qu'un étage mesure en moyenne 3 m,. Pour les calculs d'étage fournissant un résultat non entier, celui-ci a été arrondi.)
- **L'aire de sa base** (par calcul géométrique proposé par le logiciel Arcgis©)

Au sein de ce logiciel nous avons pu aussi nettoyer la base de données afin d'obtenir un ensemble propre. Pour ce faire nous avons supprimé les bâtiments présentant une hauteur nulle.

Une fois ces différentes opérations effectuées, il nous est possible de présenter pour chacun des bâtiments, une table contenant les informations précédemment citées.

Table													
Batiment_ColonneSelectionne													
OBJECTID *	Shape *	ID	hauteurReelle	Z MIN	Zmax	nbEtage	Zbase	Xcentre	Ycentre	Shape Length	surfBatSol	densiteDeMasque	
1	Polygon ZM	BATIMENT0000000031177504	5	107.9	108	1,666667	103	526887,760277	6708202,010756	47,457075	134,61	0,54275	
2	Polygon ZM	BATIMENT0000000031177979	3	104.6	104.6	1	101,599998	527173,463575	6707226,711438	22,668401	31,51	0	
3	Polygon ZM	BATIMENT0000000031178319	10	109.9	110.5	3,333333	100.5	527197,436866	6705814,903827	93,073319	439,53	0	
4	Polygon ZM	BATIMENT0000000031179047	2	103.2	103.2	0,666667	101,199997	526480,737495	6704969,133807	23,778444	34,775	0	
5	Polygon ZM	BATIMENT0000000031179737	5	106.1	106.9	1,666667	101,900002	526866,719518	6704704,826953	134,153877	512,48	0,834861	
6	Polygon ZM	BATIMENT0000000031181562	4	96,599998	96,699997	1,333333	92,699997	526446,377425	6703620,655766	45,409041	121,7	1,176335	
7	Polygon ZM	BATIMENT0000000031182882	7	55,299999	57,799999	2,333333	50,799999	526022,684085	6702778,690043	43,486137	93,775	4,624934	
8	Polygon ZM	BATIMENT0000000031182893	4	86,300003	86.5	1,333333	82.5	526624,801711	6703173,292192	31,916716	62,47	1,440084	
9	Polygon ZM	BATIMENT0000000031182941	9	61,599998	62.5	3	53.5	525755,985847	6702778,032674	83,862832	388,82	2,584878	
10	Polygon ZM	BATIMENT0000000031183097	6	56,400002	56,400002	2	50,400002	527198,092403	6702107,385601	30,264653	59,79	2,251128	
11	Polygon ZM	BATIMENT0000000031184181	5	94,699997	96,300003	1,666667	91,300003	524359,159105	6707617,200638	61,885969	194,18	0	
12	Polygon ZM	BATIMENT0000000031185133	4	96,699997	99,300003	1,333333	95,300003	524125,844226	6705753,91873	52,350226	145,075	0	
13	Polygon ZM	BATIMENT0000000031185140	4	95	95	1,333333	91	523448,227464	6706340,327318	86,109942	425,74	0	
14	Polygon ZM	BATIMENT0000000031185268	4	93,400002	94,599998	1,333333	90,599998	522341,7871	6705697,289097	50,990283	144,005	0	
15	Polygon ZM	BATIMENT0000000031187673	7	96,900002	99.5	2,333333	92.5	525015,215045	6703658,03354	72,768013	197,345	0,855304	
16	Polygon ZM	BATIMENT0000000031188449	5	80,199997	80,599998	1,666667	75,599998	523046,798588	6703579,299404	65,760354	198,74	0,43726	
17	Polygon ZM	BATIMENT0000000031188501	4	58,900002	58,900002	1,333333	54,900002	522836,440177	6703381,243156	53,476515	163,325	0	
18	Polygon ZM	BATIMENT0000000031192721	6	100.9	100.9	2	94,900002	519699,025813	6703500,095665	60,489241	136,56	0	
19	Polygon ZM	BATIMENT0000000031195840	3	99,900002	100.3	1	97,300003	515629,476099	6704250,204354	32,628371	58,97	0	
20	Polygon ZM	BATIMENT0000000031196160	3	100.9	101.2	1	98,199997	515915,331011	6703491,809096	36,257582	76,635	0	
21	Polygon ZM	BATIMENT0000000031196644	2	94,300003	94,699997	0,666667	92,699997	516784,560953	6702961,20308	22,72507	29,61	0	
22	Polygon ZM	BATIMENT0000000031196752	3	100.8	101	1	98	515587,374248	6702914,917662	45,378948	127,565	0	
23	Polygon ZM	BATIMENT0000000031197411	4	92,099998	92,300003	1,333333	88,300003	514473,490129	6704407,777488	41,330492	93,325	0	
24	Polygon ZM	BATIMENT0000000031197665	5	97,099998	98	1,666667	93	514862,105604	6702231,264809	38,706632	92,87	0,591926	
25	Polygon ZM	BATIMENT0000000031228636	5	90,300003	90,400002	1,666667	85,400002	529364,444628	6697302,81584	53,261337	143,68	0	
26	Polygon ZM	BATIMENT0000000031233075	3	50,799999	50,799999	1	47,799999	527164,609077	6701322,560312	57,188339	106,26	0,593062	
27	Polygon ZM	BATIMENT0000000031233853	4	50,599998	50,700001	1,333333	46,700001	526579,817584	6700934,52677	85,232631	238,42	1,29943	
28	Polygon ZM	BATIMENT0000000031234149	3	52,099998	52,099998	1	49,099998	528208,653305	6700601,469889	79,770864	160,065	0	
29	Polygon ZM	BATIMENT0000000031236168	5	82,400002	83,199997	1,666667	78,199997	528147,65614	6698394,337574	28,853902	48,865	0,468219	
30	Polygon ZM	BATIMENT0000000031237269	5	90,599998	90,599998	1,666667	85,599998	526311,545081	6697479,36116	28,260913	49,375	1,343149	
31	Polygon ZM	BATIMENT0000000031238395	5	87,599998	87,800003	1,666667	82,800003	527027,112667	6697079,158424	46,192381	134,7	15,046517	
32	Polygon ZM	BATIMENT0000000031239763	7	91,400002	91,400002	2,333333	84,400002	527389,862375	6696361,042765	56,104627	182,475	0,728589	
33	Polygon ZM	BATIMENT0000000031240559	4	94,800003	95,099998	1,333333	91,099998	527560,730535	6695620,46293	37,138751	73,15	0,825816	
34	Polygon ZM	BATIMENT0000000031241375	5	79,800003	79,800003	1,666667	74,800003	527479,67385	6693708,223943	38,404865	91,41	0,6092	
35	Polygon ZM	BATIMENT0000000031244899	14	56,299999	61,900002	4,666667	47,900002	524495,656319	6701224,679616	134,266685	620,33	4,471896	

Figure 8 : Extrait de table attributaire.

Source : Réalisation personnelle

7.3 Création des mailles et calcul des densités de masque de chaque bâtiment

La création des mailles et le calcul des densités de masque de chaque bâtiment de l'agglomération de Tours ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab© et du logiciel ToasterSyst©.

7.3.1 ToasterSyst©

La première étape de ce travail de recherche a été de formaliser le problème afin qu'il puisse être traité informatiquement. Les variables ont donc été organisées sous la forme d'un système recensant de manière exhaustive.

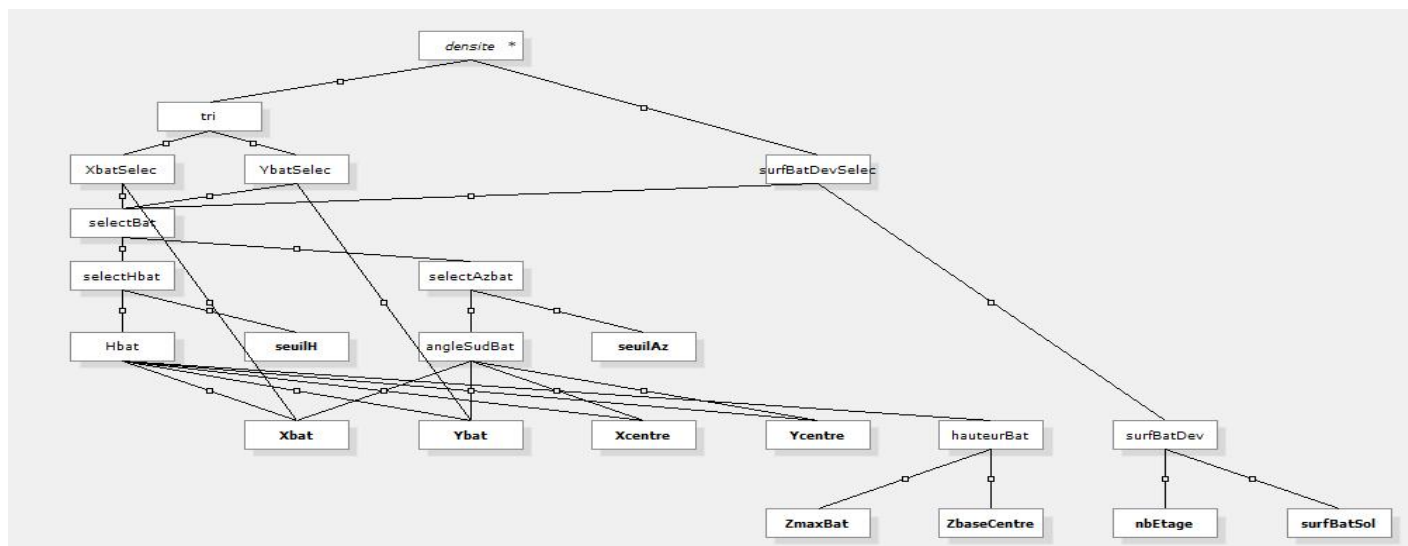


Figure 9 : Capture d'écran du logiciel ToasterSyst©. Le système représenté ici contient toutes les variables utilisées pour le calcul de la densité. En gras sont indiquées les variables exogènes. Chaque liaison entre deux variables symbolise une opération mathématique.

Source : ToasterSyst© - Réalisation personnelle

Une fois la topologie du système établie, il est nécessaire d'indiquer le nom, l'unité, la plage de variation et la dimension de chaque variable. Par exemple, l'emprise au sol d'un bâtiment est appelée « surfBatSol », son unité est le m², sa plage de variation est fixée à [0, 10000] (en m²) et sa dimension est [1, 50000] (la dimension indique le nombre de valeurs qui pourront être rentrées au minimum et au maximum. Ici on indique qu'il faut au moins une valeur d'emprise au sol et au maximum 50000, ce qui correspond environ au nombre de bâtiments de l'agglomération de Tours).

Une fois que toutes les informations relatives aux variables ont été rentrées, il est nécessaire d'indiquer les relations mathématiques reliant chacune de ces variables. Par exemple, la surface de plancher d'un bâtiment est son emprise au sol que multiplie son nombre d'étage :

$$surfBatDev = nbEtag * surfBatSol$$

Une fois que toutes les relations ont été définies, le logiciel s'occupe d'organiser les différentes étapes du calcul entre elles afin qu'il n'y ait pas de problème. Par exemple, le logiciel vérifie que la surface de plancher a bien été calculée avant de vouloir calculer la densité.

7.3.2 Matlab©

Les données traitées sous ArcMap© sont importées sous Matlab à l'aide de l'outil d'importation. Elle se retrouve donc dans la table « data ». Le code tel qu'il est issu de ToasterSyst© ne permet pas d'effectuer des calculs en boucle sur un grand nombre de données. Un ajout de code, lançant une boucle, est nécessaire.

Le code complet pour l'exécution du calcul de la densité et la création de la maille est le suivant :

Fichier 'echantillon.m'

```
%Fonction permettant de mener le calcul en boucle sur un échantillon
%aléatoire (p=x/nbr, où x est la taille de l'échantillon) ou sur la
%totalité des données (p=1). Ici nous avons pris la totalité des données
nbr=49154;
p=49154/nbr;
nbr=rand(1,nbr);
echant=find(nbr<p);
DENSITE=[];
SELECTBAT={};
for i=1:length(echant)
    n=echant(i);
    [densite,selectBat]=calculDensite(n,data);
    DENSITE=[DENSITE;densite];
    SELECTBAT=[SELECTBAT;{selectBat}];
end
%Fin du code
```

Fichier 'calculDensite.m'

```
%Appel de la fonction 'calculDensite'
function [densite, selectBat]=calculDensite(n,data)

%Appel des données de la matrice data
nbEtage=data(:,4);
surfBatSol=data(:,9);
ZbaseCentre=data(:,5);
ZmaxBat=data(:,3);
Xbat=data(:,6);
Ybat=data(:,7);
seuilH=3;
seuilAz=53.8;

%Création de la boucle, pour tout 'n' dans un intervalle fixé
X=Xbat(n,1);
Y=Ybat(n,1);

%Calcul de la surface de plancher
surfBatDev=surfBatSol.*nbEtage;

%Calcul de la 'hauteur réelle' de chaque bâtiment (différence d'altitude)
hauteurBat=ZmaxBat-ZbaseCentre;

%Calcul de la distance deux à deux entre le bâtiment 'n' et tous les autres
for i=1:length(Xbat)
    dist=((X-Xbat(i,1)).^2+(Y-Ybat(i,1)).^2).^0.5;
    tangenteBat=hauteurBat(i,1)./dist;
    angle=atan(tangenteBat);
    angle=angle*180/pi;
    Hbat(1,i)=angle;
end

%Calcul de l'angle formé par la droite passant par le bâtiment 'n' et
%chaque autre bâtiment par rapport au nord
for i=1:length(Xbat)
    a=atan2((Xbat(i,1)-X),(Ybat(i,1)-Y))*(180/pi);
    angleSudBat(1,i)=a;
end
```

```
%Première sélection de bâtiments faite sur l'opposé de l'azimut. Sont
%gardés tous les bâtiments dont 'angleSudBat' est compris entre + ou -
%seuilAz
selectAzbat=find(angleSudBat(1,:)<=-seuilAz | angleSudBat(1,:)>=seuilAz);

%Deuxième sélection faite sur l'angle entre les bâtiments. Sont gardés tous
%les bâtiments dont la hauteur angulaire est inférieure à 'seuilH'
selectHbat=find(Hbat(1,:)>=seuilH);

%La sélection finale est l'intersection des deux sélections précédentes
selectBat=intersect(selectAzbat(1,:), selectHbat(1,:));

%Calcul de la somme des surfaces de planchers des bâtiments sélectionnés
surfBatDevSelec(1,1)=sum(surfBatDev(selectBat(1,:)));

%Stockage des X et Y des bâtiments sélectionnés
XbatSelec=Xbat(selectBat(1,:));
YbatSelec=Ybat(selectBat(1,:));

%Triangulation de Delaunay des bâtiments sélectionnés et calcul de la
%surface de la maille
if length(XbatSelec)>4
tri=delaunay(XbatSelec(:,1),YbatSelec(:,1));
aireMaille(1,1)=sum(polyarea(XbatSelec(tri)',YbatSelec(tri)'));
densite(1,1)=aireMaille(1,1)./surfBatDevSelec(1,1);
else
densite=inf;
selectBat=[];
end

clear X Y XbatSelec YbatSelec a angle dist i surfBatDevSelec Hbat Xbat Ybat
ZbaseCentre ZmaxBat aireMaille angleSudBat hauteurBat nbEtage surfBatDev
surfBatSol tangenteBat tri

%Fin du code
```

Le résultat de ce calcul est constitué de deux matrices. Une matrice de matrice appelée 'SELECTBAT' et qui contient, pour chaque bâtiment, les constructions qui projeteront une ombre sur celui-ci et une matrice appelée 'DENSITE' regroupant les densités de masque de chaque bâtiment.

Ces données sont ensuite extraites afin d'être utilisée dans ArcScene© afin de créer les modèles 3D de notre échantillon.

7.4 Création des modèles 3D en vue du relevé de rayonnement solaire.

Dans notre démarche de vérification de la corrélation possible entre la densité et la réception du rayonnement solaire, nous avons cherché à calculer le rayonnement solaire reçu par une soixantaine de bâtiment au sein de leur maille (construite à partir des restrictions géométrique intégrées dans le processus de construction des mailles). Le calcul de la réception du rayonnement solaire reçu par ces soixante bâtiments se fera par le biais du logiciel Ecotect Analysis©. Mais avant de pouvoir utiliser cet outil, la construction des modèles 3D de chacun des bâtiments et des constructions sélectionnées par le processus de construction de la maille propre à chacun des bâtiments, est nécessaire. Pour ce faire nous avons décidé d'utiliser l'outil ArcScene© proposé au sein du pack ArcGis©.

Une fois que la base de données, construite précédemment, a été importée, nous avons pour chacun des soixante bâtiments, créer une couches rassemblant le bâtiment origine de la maille et les bâtiments sélectionnés lors de la construction de cette même maille. Nous avons donc créé soixante couches différentes. Ces couches ont pu être créées grâce à la commande « sélection par attribut » proposé dans le volet « Sélection » du logiciel, sachant que l'attribut choisit pour effectuer cette sélection est l'OBJECTID.

Afin de faciliter l'écriture de la sélection par attribut, nous avons lors de la création des mailles sous le logiciel MatLab© importé sous forme de fichier texte (.txt), les ID de chacun des bâtiments sélectionnés pour chacun des bâtiments étudiés. Ainsi, grâce au logiciel Notepad++© nous avons pu construire rapidement un fichier texte de 60 lignes, pour lequel chaque ligne correspond aux codes SQL à inscrire au sein du procédé de « sélection par attribut » que l'on souhaite effectué sous le logiciel ArcScene©.

Les soixante couches étant créées, nous avons pu construire les modèles 3D de chacune des mailles. Cette opération est rendu possible par la commande extrusion proposée dans les propriétés de ces couches. Ainsi l'emprise au sol de chaque bâtiment est extrudée de sa hauteur. En répétant soixante fois la manipulation, nous avons obtenu soixante modèles 3D au format .wrl, pouvant être importés dans le logiciel Ecotect Analysis©.

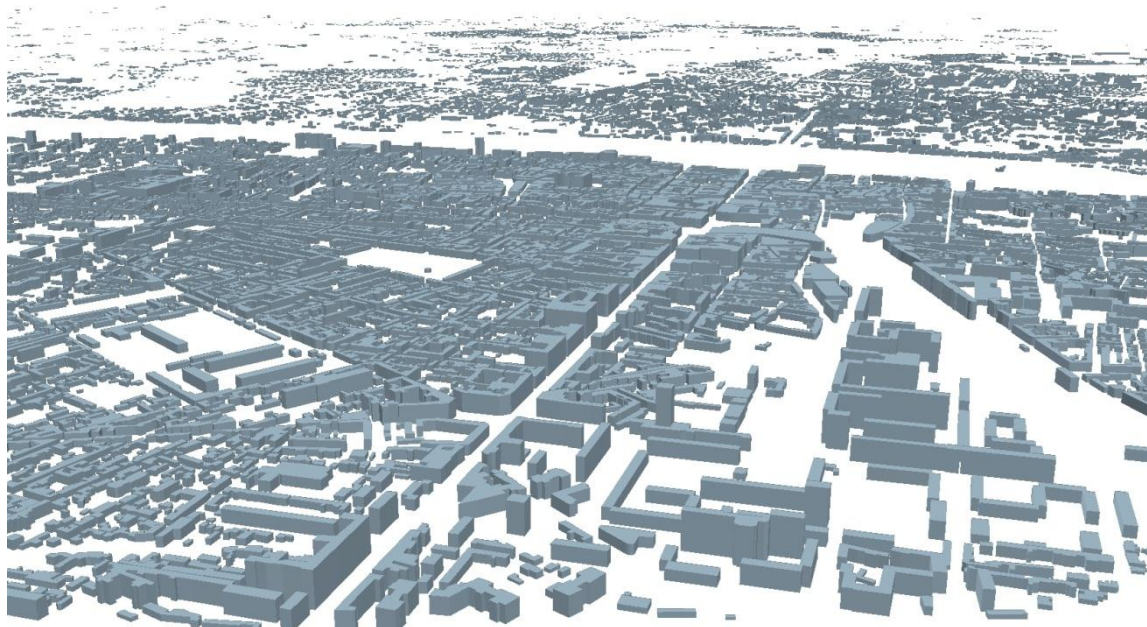


Figure 10 : Modélisation de l'agglomération de Tours. L'extraction des bâtiments étudiés ainsi que les constructions sélectionnées permet d'effectuer les calculs de rayonnement solaire à l'aide du logiciel Ecotect Analysis©

Source : Réalisation personnelle

7.5 Calcul du rayonnement solaire

Le calcul du rayonnement solaire a été effectué à l'aide du logiciel Ecotect Analysis©. Ce logiciel permet d'effectuer divers calculs directement à partir d'un modèle 3D.

En important les modèles 3D créés à l'aide d'ArcScene©, il suffit de sélectionner le bâtiment sur lequel nous voulons calculer le rayonnement incident et de calculer le « *solar exposure* ».

Dans notre cas, nous avons donc souhaité évaluer et calculer le rayonnement solaire reçu par un bâtiment localisé dans un tissu urbain plus ou moins dense, toujours dans le but de vérifier si oui ou non, il existe un lien entre densité de masque et rayonnement solaire reçu. Nous avons donc importé un à un les fichiers 3D (.wrl) dans Ecotect Analysis©. Une fois l'importation d'un fichier effectuée, le calcul peut être lancé.

CITERES

UMR 6173

*Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés*

*Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement*

Département Aménagement
35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
MAIZIA Mindjid

GRANGE-GUERMENTE Julien
LOUBOUTIN Thibaud

Projet de fin d'études
DA5
2012-2013

Le rayonnement solaire à l'échelle urbaine : une approche typologique

Résumé :

Ce projet de recherche vise à trouver une nouvelle méthode pour évaluer le rayonnement solaire à l'échelle urbaine et ce de façon rapide. De plus, cette étude se propose de valider l'hypothèse qui dit que le rayonnement solaire est inversement proportionnel à la densité. L'évaluation du rayonnement solaire, qui se fait usuellement à l'échelle du bâtiment, ne peut être réalisée de la même façon pour un tissu urbain complexe, du fait du trop grand nombre de données. La création d'une typologie semble être nécessaire. Cette typologie repose sur une nouvelle définition de la densité qui prend en compte le rayonnement solaire dans sa construction. En effet, tous les bâtiments de l'agglomération tourangelles ne projettent pas leur ombre sur tous les autres. De ce fait, il est nécessaire de sélectionner, pour chaque bâtiment, toutes les constructions projetant leur ombre sur ce dernier. Le bâtiment étudié ainsi que les constructions sélectionnées forment une maille, qui constitue une nouvelle unité urbaine (différente de l'îlot ou du quartier). Une nouvelle densité peut être calculée sur cette maille, la densité de masque, qui prend en compte le rayonnement solaire dans son calcul et qui indique la « densité d'ombres » qui seront projetées sur le bâtiment étudié. La mise en lien du rayonnement solaire et de cette densité permet de conclure que l'augmentation de la densité de masque a une influence réduite sur le rayonnement solaire.

Mots Clés : Rayonnement solaire, masque, maille, densité

