JOURNAL OF INTERDISCIPLINARY METHODOLOGIES AND ISSUES IN SCIENCE

Un apport des géodonnées pour l'analyse de cycle de vie de projets urbains : prise en compte des masques solaires dans les simulations thermiques dynamiques de bâtiments

Julien CRAVERO[*1], **Florence JACQUINOD**[1], **Charlotte ROUX**[2]

[1]Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, EIVP, LASTIG, F-75019 Paris, France
[2]Mines de Paris, PSL Research University, CEEP, Paris, France

*Correspondance : julien.cravero@enpc.fr

DOI : 10.46298/jimis.14438
Soumis le 11 octobre 2024 - Accepté le 3 mai 2025
Volume : **12** - Année : **2024**
Titre du numéro : **Sciences de l'information géographique & mesures environnementales**
Éditeurs : *Thierry Badard, Jacynthe Pouliot, Matthieu Noucher, Marlène Villanova*

Résumé

L'analyse de cycle de vie (ACV) peut être utilisée pour évaluer les impacts environnementaux d'un projet urbain, mais nécessite un très grand nombre de données. Or, de nombreuses géodonnées aujourd'hui disponibles sont mobilisables dès la phase de conception. Nous explorons ici l'apport possible de référentiels géonumériques existants à l'amélioration de la précision des simulations thermiques dynamiques (STD) réalisées lors d'ACV de projets urbains. Pour cela, nous avons construit un modèle permettant d'évaluer l'influence des masques solaires sur les besoins énergétiques de bâtiments et sur le confort thermique à l'intérieur de ces derniers. Nous utilisons ce modèle pour évaluer l'intérêt de prendre en compte ces masques. Nous testons ensuite l'utilisation de référentiels IGN existants afin de produire des données sur les masques solaires formés soit par les bâtiments seuls (BD TOPO), soit par les bâtiments et la végétation (LIDAR HD). Après avoir validé notre modèle, nous l'utilisons sur deux bâtiments déjà construits, pour comparer les résultats des simulations sans masque et avec les masques issus des référentiels. Ces premiers tests confirment l'intérêt d'utiliser les référentiels existants. Ils nous invitent également à poursuivre vers la formalisation de recommandations pour les développeurs d'outils STD et ACV, et à explorer l'utilisation de géodonnées pour préciser d'autres paramètres utiles aux STD.

Mots-Clés

analyse de cycle de vie ; projets urbains ; géodonnées ; masques solaires ; besoins énergétiques ; simulation thermique dynamique.

1 INTRODUCTION

L'analyse de cycle de vie (ACV) permet de quantifier les impacts environnementaux d'un produit, d'un système ou d'un service. A l'origine conçue pour l'étude comparative de produits industriels simples, elle est aujourd'hui utilisée pour évaluer les performances environnementales de systèmes plus complexes, comme des bâtiments ou des projets urbains (Peuportier, 2003). Le recours à l'ACV pour l'écoconception des projets urbains a pour objectif de comparer des variantes de conception, afin de limiter les impacts environnementaux des projets réalisés. Ces évaluations environnementales peuvent comporter des simulations thermiques dynamiques (STD). Une STD a pour but de prédire au moyen d'un modèle numérique la réponse thermique, au cours du temps, d'un bâtiment soumis à des conditions météorologiques données. Elle sert ainsi, par exemple, à analyser le confort thermique des occupants tout au long de l'année et à calculer les besoins énergétiques des bâtiments induits par la régulation de la température intérieure (par le chauffage et la climatisation). Ensuite, en précisant les équipements utilisés pour satisfaire les besoins énergétiques, donc en spécifiant les systèmes et leurs rendements, on peut chercher à estimer les consommations énergétiques réelles. Ces dernières peuvent finalement être traduites en impacts environnementaux, à ajouter à ceux des autres contributeurs (impacts environnementaux dus à la fabrication des matériaux, à la consommation d'eau potable, d'électricité spécifique, etc.), comme schématisé sur la figure 1.

Étant donné la longue durée de la phase d'exploitation des bâtiments, l'évaluation précise de leurs besoins énergétiques est essentielle à la quantification de leurs impacts environnementaux. Des outils de STD ont été couplés à l'ACV dans cette optique (Peuportier *et al.*, 2013). Dans cet article, nous cherchons à évaluer un apport spécifique des géodonnées à l'écoconception de quartiers en analysant l'influence des masques solaires (définis dans l'étape 1 de la figure 1) sur les besoins énergétiques et le confort thermique (sorties du modèle de STD à la fin de l'étape 2 de la figure 1).

Simuler les besoins énergétiques d'un bâtiment requiert des données d'entrée qu'on peut séparer en trois ensembles :

- les caractéristiques de l'environnement urbain, c'est-à-dire des données climatiques (la température de l'air, le rayonnement, le vent, etc.) à l'origine de sollicitations thermiques, ainsi que des informations sur le contexte du bâtiment (géométrie des objets proches, propriétés thermo-physiques des surfaces environnantes comme les albédos des surfaces) ;
- les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment (composition des parois définissant les matériaux employés et l'épaisseur des différentes couches d'isolation, taux de vitrages et leurs propriétés) ;
- la définition des usages à l'intérieur du bâtiment, regroupant le programme du bâtiment et le comportement des occupants (consignes de température, présence d'occupants, taux de renouvellement d'air, etc.).

Les masques solaires sont les objets faisant obstruction au rayonnement en direction du bâtiment. La diminution du rayonnement solaire incident modifie la réponse thermique du bâtiment, augmentant les consommations de chauffage en hiver, diminuant les consommations de climatisation et les potentielles surchauffes en été. Actuellement, les masques sont souvent considérés de façon sommaire et renseignés manuellement lors d'études de conception, alors qu'il existe des données géonumériques qui pourraient être mobilisées dans des outils métier. L'automatisation de la récupération des volumes existants (constructions, végétation ou autres objets à proximité) autour d'un projet à partir de géodonnées permettrait de gagner du temps et d'améliorer la précision des résultats de futures études.

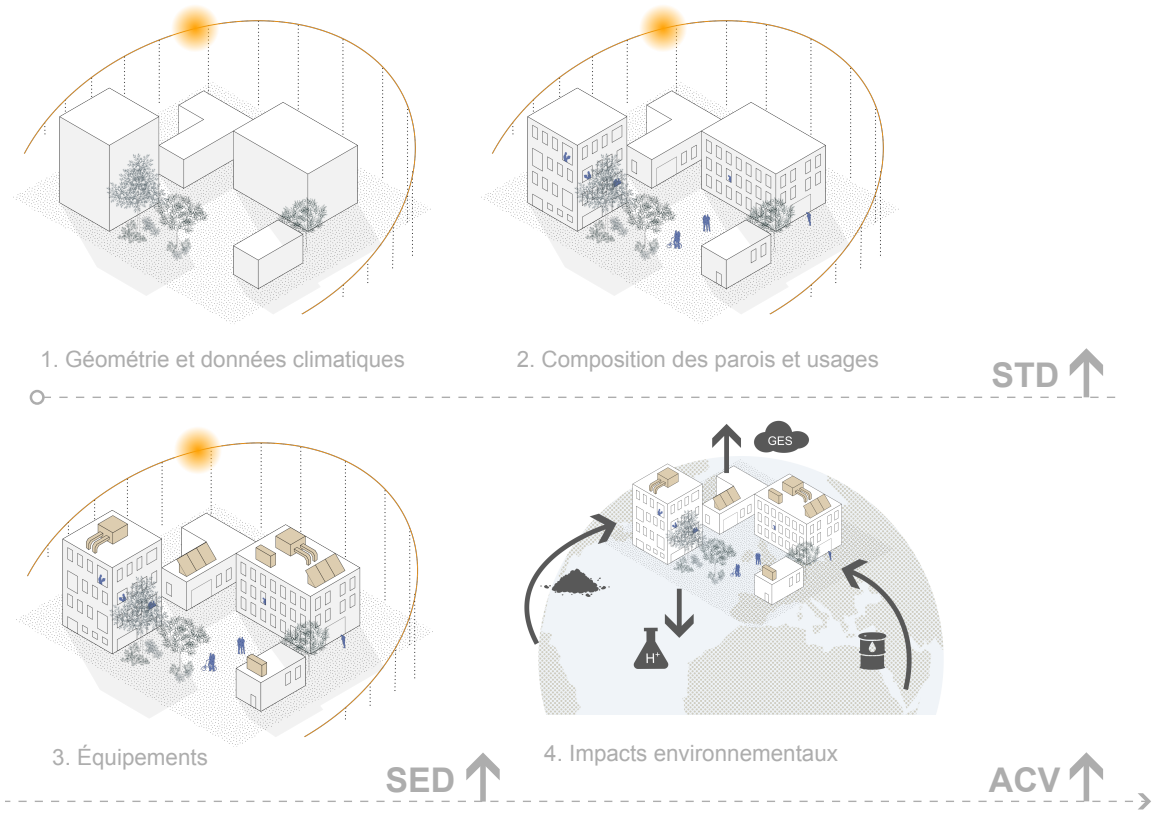


FIGURE 1 – Schéma présentant le contexte global de notre travail, qui est d'étudier les impacts environnementaux de projets urbains. Généralement, divers choix de conception peuvent être comparés sur la base de sorties de modèles de simulation thermique dynamique (STD, étape 2), de simulation énergétique dynamique (SED, étape 3) et d'analyse de cycle de vie (ACV, étape 4), entre autres. Cet article se concentre sur la manière dont les masques solaires, considérés dans l'étape 1, influencent des résultats de STD du bâtiment (étape 2). *Crédit image : Thibault Chevilliet.*

Nous présentons ici les premiers résultats d'un travail interdisciplinaire qui rassemble chercheurs en ACV et chercheurs en sciences et techniques de l'information géographique (STIG). L'objectif est de tester la faisabilité de l'extraction de la géométrie des masques solaires depuis des référentiels de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) disponibles (dès aujourd'hui ou qui le seront bientôt) sur l'ensemble du territoire national. Nous cherchons également à savoir à quel point l'évaluation des besoins énergétiques d'un bâtiment est susceptible d'être faussée lorsque son environnement proche n'est pas ou mal considéré. Pour cela, nous avons développé un environnement de test permettant d'intégrer des géodonnées sous différentes formes et de réaliser des simulations thermiques dynamiques. Cet outil nous permet d'étudier la sensibilité d'un modèle de STD de bâtiment à différentes représentations de masques. Nous l'utilisons pour deux études de cas correspondant à des configurations spatiales existantes dans lesquelles un bâtiment est entouré d'obstacles proches (bâtiments et végétation) qui lui font de l'ombre. Nous commençons par positionner notre démarche avant de présenter la méthode mise en œuvre et les premiers résultats obtenus. Nous concluons avec des perspectives d'approfondissement.

2 POSITIONNEMENT

Les masques correspondent aux objets faisant obstruction au rayonnement dirigé vers le bâtiment. Ces obstructions au rayonnement incident peuvent être de différentes natures ; en se rap-

prochant progressivement du bâtiment étudié, on peut par exemple penser :

- au relief (montagnes, collines...) constituant des masques lointains, et dessinant un horizon distant ;
- aux bâtiments adjacents ;
- à la végétation (arbres, haies...) ;
- aux protections solaires extérieures intégrées au bâtiment (brise-soleil, casquettes, volets, moucharabiehs...), fixes ou mobiles (cf. par exemple Kirimtat *et al.* (2016)), considérées comme appartenant à l'enveloppe.

Les masques qui nous intéressent dans cet article sont ceux faisant partie de l'environnement proche du bâtiment étudié, c'est-à-dire les bâtiments adjacents et la végétation. Des travaux antérieurs ont cherché à simuler leur influence sur le bâtiment en analysant différentes métriques :

- le confort thermique à l'intérieur du bâtiment, caractérisé soit par la température de l'air uniquement, soit par une température dite *opérative* prenant également en compte le rayonnement des parois ou par une *température moyenne radiante* (Calcerano and Martinelli, 2016), ou encore par un nombre de degrés-heures sommant à chaque heure l'écart à une température limite de référence ;
- les besoins énergétiques (besoin de chauffage ou de climatisation nécessaire pour remplir certains critères de confort dans le bâtiment, voir par exemple Berry *et al.* (2013); Calcerano and Martinelli (2016); Palme *et al.* (2020)) ou les consommations (en faisant des hypothèses sur les équipements utilisés et leurs rendements, ou en estimant la contribution des systèmes à la consommation énergétique totale du bâtiment (Donovan and Butry, 2009)).
- le confort visuel et lumineux afin d'évaluer la qualité de l'éclairage naturel des pièces – point qui ne fait pas partie du champ de notre étude.

La finalité de ces simulations est d'estimer les coûts et les bénéfices – monétaires ou environnementaux – induits par ces masques, en pesant le pour et le contre d'une augmentation du chauffage en hiver et d'une réduction de la climatisation en été. Certaines études effectuées dans un climat chaud (comme l'Australie (Berry *et al.*, 2013), l'Italie (Calcerano and Martinelli, 2016; Palme *et al.*, 2020) ou la Californie (Akbari *et al.*, 1997)) ne se concentrent que sur la climatisation et le confort thermique estival. Par ailleurs, l'effet d'ombrage dû spécifiquement aux arbres sur le confort thermique extérieur des passants, dans l'espace public, est de plus en plus étudié dans le cadre de travaux sur les phénomènes d'îlot de chaleur et de surchauffe urbaine, au moyen d'outils de simulation tels SOLENE-microclimat (Musy *et al.*, 2014), LASER/F (Saudreau *et al.*, 2021; Lecomte *et al.*, 2022) ou encore UT&C (Meili *et al.*, 2021), adaptés à une échelle locale (de l'ordre de la centaine de mètres).

A l'échelle urbaine ou métropolitaine, de nombreux outils existent, dont certains s'appuient sur des systèmes d'information géographique (SIG) (Ferrando *et al.*, 2020). Plusieurs travaux visant à l'estimation du potentiel solaire utilisent aussi des géodonnées pour estimer des masques au rayonnement solaire sur des toits de bâtiments (Biljecki *et al.*, 2015; Li and Liu, 2017; Han *et al.*, 2022). Il est d'ailleurs intéressant de noter que ces travaux sont réalisés par des chercheurs travaillant sur l'énergie comme par des chercheurs en STIG. Néanmoins ces travaux concernent de grands territoires (Carneiro *et al.*, 2009; Lee and Zlatanova, 2009; Nguyen and Pearce, 2012; Africani *et al.*, 2013; Jakubiec and Reinhart, 2013; Srećković *et al.*, 2016; Lingfors *et al.*, 2017; Machete *et al.*, 2018; Lukač *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2022; Giorio *et al.*, 2024; Shirinyan and Petrova-Antonova, 2024), parfois jusqu'à un pays entier (Buffat *et al.*, 2018) et ne donnent de résultats que pour les surfaces des toits des bâtiments et non leurs façades, même à des échelles

plus grandes (Martín-Jiménez *et al.*, 2020), alors que l'étude des masques sur les façades est clef à notre échelle de travail. Certains travaux ont exploré la prise en compte des façades (Liang *et al.*, 2014; Desthieux *et al.*, 2018) et de la végétation en décrivant les arbres de manière individualisée grâce à des données LIDAR (Gupta *et al.*, 2010; Burt *et al.*, 2019; Nanda *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Waqas *et al.*, 2023; Shirinyan and Petrova-Antonova, 2024) ou encore l'utilisation de données précises acquises par drônes (Nelson and Grubesic, 2020) mais ces processus sont complexes et chronophages. Ils sont adaptés lorsqu'on réalise une fois une analyse à l'échelle d'un grand territoire ou lorsqu'on travaille sur un projet urbain en phase avancée de conception, mais pas *a priori* pour l'écoconception à notre échelle, où l'utilisateur doit pouvoir réaliser rapidement plusieurs simulations sur des variantes envisagées.

A l'échelle bâtimentaire, les outils de STD fréquemment utilisés – EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r ou Pleiades+COMFIE, par exemple – ne font pas ou peu appel aux géodonnées pour modéliser l'environnement urbain. Parmi ces outils, aucun ne propose une prise en compte systématique des masques en s'appuyant sur des bases de données géonumériques existantes (Mielniczek *et al.*, 2023). Par exemple, Pleiades+COMFIE (Peuportier and Sommereux, 1990) permet de récupérer depuis OpenStreetMap les contours des bâtiments existants proches du projet, mais sans informations sur la hauteur des bâtiments qui permettraient d'avoir une description volumique fiable. Ainsi, les différences de hauteur entre les bâtiments existants masquant le rayonnement solaire sur un ou des bâtiments d'un projet ne peuvent être prises en compte qu'en renseignant les hauteurs manuellement, rendant cette prise en compte peu aisée et chronophage. Le non recours à d'autres bases de données existantes – comme la BD TOPO, qui existe depuis de nombreuses années, ou d'autres référentiels produits par l'IGN – s'explique en bonne partie par la méconnaissance de leur existence. Dans certaines configurations spatiales, leur influence sur le confort thermique, sur les consommations d'énergie pour le chauffage et la climatisation et sur leurs impacts environnementaux n'est pas négligeable. En revanche, le degré de finesse pour la modélisation des masques nécessaire et suffisant pour réaliser des études STD fiables en situation d'écoconception n'est pas connu. De cela découlent deux difficultés pour proposer une amélioration des processus existants :

- la nécessité de développer un protocole pour évaluer l'influence des masques, sachant que cette influence est spécifique aux caractéristiques de chaque projet et de son environnement proche. Un tel protocole est indispensable afin de pouvoir comparer différentes manières de représenter les masques à partir de géodonnées et trouver un compromis entre résolution ou complexité de la représentation des masques, précision des résultats et temps de calcul ;
- la nécessité de développer notre propre environnement de test afin de pouvoir tester différentes sources de données et modes de représentation des masques, en l'absence d'outils de STD permettant d'importer des descriptions des masques sous différents formats géoréférencés.

3 MÉTHODOLOGIE

Cette partie décrit en quatre temps la méthode mise en place pour répondre aux difficultés que nous venons d'évoquer :

- choix des indicateurs (sorties de nos STD) qui nous servent à quantifier l'effet des masques ;
- mise en place d'un environnement de tests : chaînage de modèles au sein d'une interface qui permet d'intégrer divers formats de géodonnées ;
- validation de cet environnement de tests avec des cas élémentaires et comparaison à un autre outil ;

- tests sur des cas réels : deux bâtiments de Loos-en-Gohelle avec leur environnement proche, dont la géométrie est construite au moyen de deux référentiels de l'IGN.

3.1 Choix des sorties à analyser

La figure 2 présente la succession des différents modèles à mobiliser pour passer de données décrivant le projet évalué et son environnement (en entrée, à gauche) aux impacts environnementaux des consommations calculés en ACV (dernière sortie du modèle, à droite). La prise en compte des masques intervient dans la première étape et impacte donc toutes les grandeurs dans les étapes qui suivent. Cette première étape rassemble les données d'entrée du modèle de rayonnement utilisé dans la STD ; elle regroupe des géométries d'objets (le bâtiment étudié et l'environnement proche, comme le sol, les autres bâtiments, la végétation) ayant des coordonnées géographiques et des attributs utiles aux simulations thermiques (par exemple des propriétés thermo-radiatives telles que des coefficients d'absorption, de réflexion et de transmission du rayonnement solaire), ainsi que des fichiers météorologiques spécifiques à un lieu, qui contiennent des séries temporelles annuelles de divers paramètres géophysiques (température de l'air, rayonnement, vent, humidité, etc.). Les modèles suivants nécessitent d'autres paramètres en entrée non indiqués sur le schéma – par exemple, le modèle thermique de paroi a besoin d'indications sur la composition du mur (matériaux structurels, épaisseurs d'isolation, etc.), la simulation de la température de l'air à l'intérieur du bâtiment requiert des hypothèses sur les taux de renouvellement d'air ou encore sur l'occupation du bâtiment, elle-même dépendante du programme envisagé.

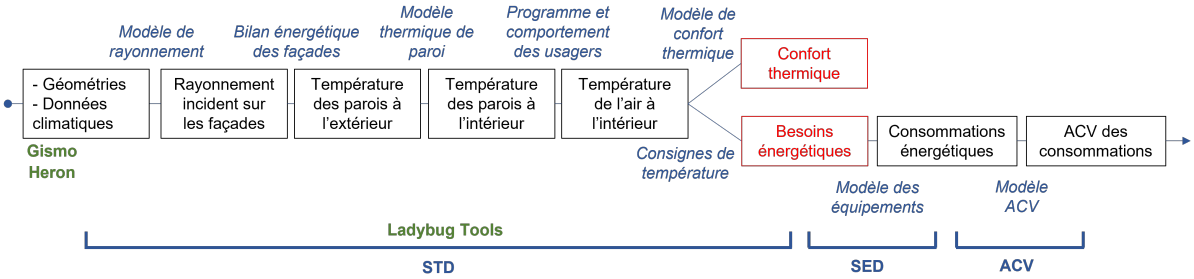


FIGURE 2 – Enchaînement des différents modèles, de la gauche vers la droite, pour aboutir à une estimation du confort thermique des occupants, des besoins énergétiques du bâtiment et des impacts environnementaux dus aux consommations énergétiques.

Les deux sorties indiquées en rouge correspondent aux indicateurs qu'il nous semble pertinent d'analyser pour quantifier l'influence de la prise en compte des masques existants autour d'un projet dans nos études STD et ACV :

- **Le confort thermique des occupants** qui peut être caractérisé par divers indicateurs, agrégeant par exemple la température de l'air intérieur, le rayonnement incident provenant des parois, la vitesse de l'air et l'humidité dans le cas de l'Universal Thermal Climate Index (Jendritzky *et al.*, 2012). Nous choisissons ici une métrique plus simple qui est le nombre de degrés-heures au-dessus de 26 °C, obtenu en cumulant l'écart de température de l'air intérieur à 26 °C pour chaque heure où la température dépasse ce seuil. Il est noté DH26 (en °C.h) et correspond à un indicateur d'inconfort estival ; nous supposons donc qu'il n'y a pas d'inconfort en hiver (le chauffage du bâtiment suffit).
- **Les besoins énergétiques du bâtiment** qui sont une sortie directe du modèle de STD. Nous séparons le cumul des besoins annuels en chaud, normalisé par la surface du bâtiment (en kWh/m^2), du cumul des besoins annuels en froid. Ils sont la conséquence de consignes de température fixées pour satisfaire un certain niveau de confort : une température de

consigne basse qui pilote le système de chauffage, une température de consigne haute qui pilote le système de climatisation.

Besoins énergétiques et confort sont liés puisque les besoins énergétiques résultent des consignes fixées aux équipements de chauffage et/ou de climatisation afin d'atteindre un niveau de confort donné. Selon le type d'équipements prévus dans le projet étudié, un seul de ces indicateurs pourra être pertinent pour évaluer la performance thermique du projet. Si un bâtiment projet est chauffé mais non climatisé, l'indicateur de confort mesuré en nombre de degrés-heures au-dessus d'une certaine température permettra de quantifier l'inconfort subi pendant les périodes chaudes et sera un indicateur pour comparer des projets, en plus des besoins énergétiques. Si le bâtiment projet est chauffé et climatisé, il n'y aura a priori pas d'inconfort, et la performance des variantes de conception sera jugée à l'aune des besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation.

3.2 Mise en place d'un environnement de tests

Comme indiqué, nous avons besoin d'un outil permettant de réaliser une STD et dans lequel nous pouvons intégrer facilement plusieurs types de données géométriques pour tester la représentation de masques (vecteur 2.5D, vecteur 3D ou encore raster). Pour cela, nous utilisons Rhinoceros3D et Grasshopper car ils regroupent un ensemble d'outils pratiques pour faire de la conception paramétrique en architecture et ingénierie. Rhinoceros3D est un modeleur 3D et Grasshopper son environnement de programmation visuel rattaché, utile pour effectuer de manière aisée des études paramétriques (modification par exemple de la géométrie, de la composition des parois des bâtiments, et de nombreux autres paramètres des simulations) et qui permet d'intégrer des modules complémentaires libres. Ce n'est pas forcément possible dans d'autres logiciels de STD et cela confère à la communauté scientifique une grande liberté de développement. Nous nous servons d'un module dédié à l'énergétique du bâtiment, Ladybug Tools (Sadeghipour Roudsari *et al.*, 2013) – qui a lui-même recours à des codes de calcul reconnus : Radiance pour simuler les échanges radiatifs et EnergyPlus pour réaliser la STD –, ainsi que de deux modules servant à traiter des données géonumériques : Gismo (Spasic, 2019) pour importer des shapefiles et Heron (Washburn, 2020) pour importer des fichiers au format GeoTIFF. Ladybug, Gismo et Heron sont des modules open-source de Grasshopper, indiqués en vert sur la figure 2.

3.3 Validation des résultats obtenus dans notre environnement de test

Les premiers tests sont réalisés avec une géométrie très simple, afin de pouvoir comparer les résultats de nos simulations avec des courbes théoriques connues et ainsi valider notre protocole de test. Nous commençons par explorer les résultats concernant le rayonnement reçu par les façades (cf. deuxième étape de la chaîne représentée à la figure 2) en examinant un cube de 5 mètres de côté avec les faces orientées vers les points cardinaux. Un mur de hauteur 5 mètres également et de longueur infinie sert de masque solaire. Il est placé à distance variable d'une façade afin d'étudier son influence sur le rayonnement incident sur le cube.

Dans un deuxième temps, nous conservons cette géométrie basique du bâtiment mais faisons un plus grand nombre d'hypothèses concernant son enveloppe et son fonctionnement (scénarios de chauffage, de ventilation, d'occupation...) en nous intéressant cette fois aux besoins énergétiques et à la température de l'air dans le bâtiment, paramètre clé du confort thermique intérieur. Nous comparons nos résultats à ceux obtenus avec le logiciel de STD Pleiades+COMFIE, qui est un outil métier ayant fait l'objet de validations expérimentales (Recht *et al.*, 2014) et de comparaisons inter-logiciels (IEA BESTEST).

3.4 Utilisation de données géonumériques pour l'étude de bâtiments existants

Une fois le modèle validé, nous passons à la phase de tests sur des bâtiments réels et pour lesquels d'autres bâtiments ou arbres existants masquent en partie le rayonnement solaire. Nous avons choisi deux bâtiments de la commune de Loos-en-Gohelle (cf. figure 3) :

- le foyer communal, dont le masque principal est la mairie (bâtiment attenant, au sud) ;
- la médiathèque municipale, dont les masques principaux sont des arbres.

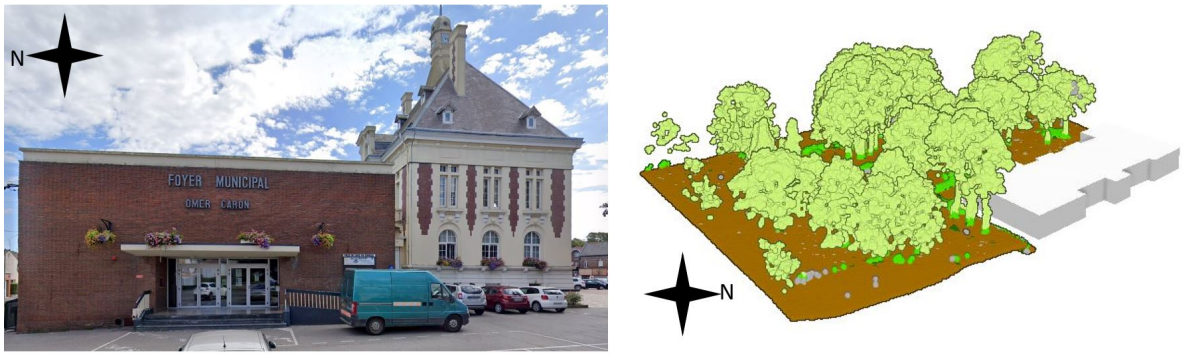


FIGURE 3 – Bâtiments de Loos-en-Gohelle et leurs masques utilisés pour les tests : à gauche foyer communal et mairie attenante (© Google Street View), à droite médiathèque municipale (bâtiment médiathèque BD TOPO et végétation proche LIDAR HD, © données IGN).

Ces bâtiments ont été modélisés sous forme d'un ensemble simplifié de faces 3D à partir des informations de la BD TOPO de l'IGN (cf. figure 4). Pour modéliser les masques de ces bâtiments, nous avons choisi de recourir à des référentiels produits à l'échelle nationale et qui fournissent une description des bâtiments et/ou de la végétation existante. Nous avons sélectionné un référentiel déjà disponible sur l'ensemble du territoire français et un référentiel en cours de réalisation :

- la couche bâtiment de la BD TOPO contient des contours et des hauteurs de bâtiment ;
- le LIDAR HD, en cours de réalisation sur l'ensemble du territoire national, est téléchargeable sous la forme de nuages de points classifiés, donnant une description d'un territoire avec ses superstructures.

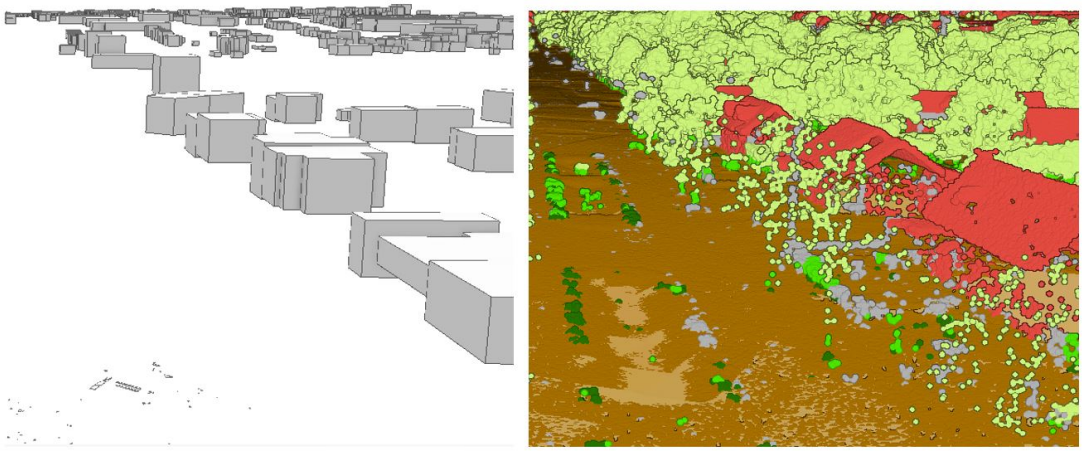


FIGURE 4 – Référentiels utilisés : à gauche la couche bâtiment de la BD TOPO extrudée, à droite le LIDAR HD avec en marron les points décrivant le sol, en rouge les points décrivant les bâtiments et en vert les points décrivant la végétation (© données IGN).

4 RÉSULTATS

Dans cette partie, nous validons nos premiers résultats en les comparant avec les simulations d'un autre logiciel, en utilisant une géométrie élémentaire et des hypothèses simples sur l'enveloppe du bâtiment, les scénarios de chauffage et climatisation, le scénario d'occupation, etc. Nous terminons par deux cas d'étude issus de configurations spatiales existantes qui nous permettent de tester la modélisation de masques à partir de référentiels géonumériques disponibles sur ces zones.

4.1 Simulation thermique dynamique sur une géométrie basique

Comparaison entre deux logiciels. Dans cette partie, nous nous intéressons aux besoins énergétiques d'un bâtiment cubique. Cela nécessite de faire des hypothèses sur l'enveloppe des bâtiments, sur le programme envisagé, sur le comportement des usagers, etc. Afin d'être conforté sur le fait que les simulations produites par notre environnement de tests donnent des valeurs cohérentes, les résultats sont comparés à ceux obtenus avec un autre logiciel de STD (Pleiades+COMFIE). Les hypothèses concernant l'enveloppe du bâtiment et son fonctionnement sont les suivantes :

- Composition des parois : le plancher est considéré adiabatique (pas d'échange thermique) et les 5 autres parois sont composées d'un matériau fictif avec épaisseur de 30 cm, conductivité de 0.15 W/m.K, densité de 1100 kg/m^3, capacité thermique massique de 4456 J/kg.K, absorptivité thermique de 0.9 et absorptivité solaire de 0.7. Cela entraîne une résistance thermique de paroi de 2 m^2.K/W, ce qui correspond à la paroi d'un bâtiment peu isolé.
- Chauffage : déclenché dès que la température intérieure descend à 19 °C.
- Climatisation : pas de climatisation.
- Ventilation : 0.5 vol/h en permanence (jour 1 à jour 365).
- Occupation : 0.05 occupants par m^2 en permanence. Activité : 80 W par personne.

Deux types de variantes sont considérées :

- une version sans masque et une avec un masque représenté par un mur est placé à 50 cm de la façade sud
- une version sans fenêtre et une avec deux fenêtres placées sur la façade sud et dont la surface représente environ 10% de la surface du mur. La présence de fenêtres baisse la résistance thermique de la façade mais permet plus d'apports solaires.

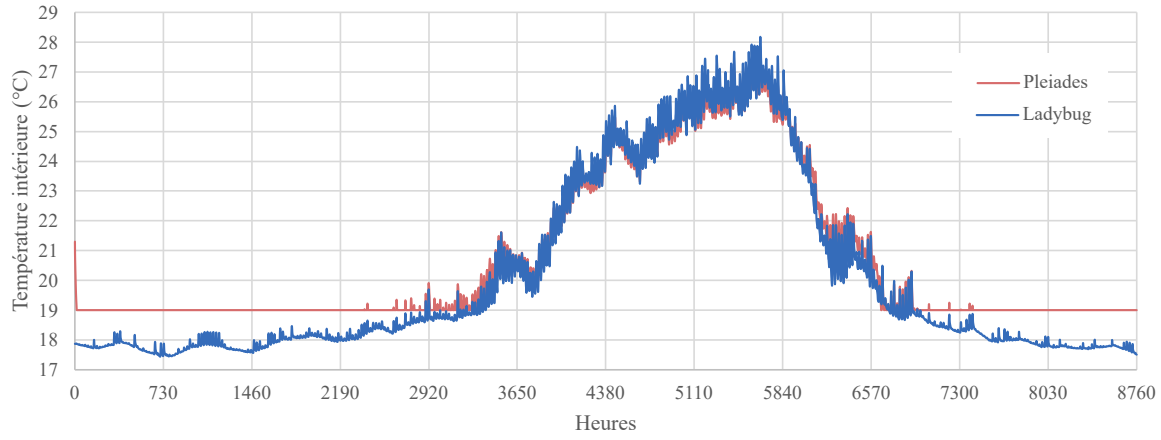
Les résultats des simulations effectuées avec Ladybug et Pleiades, dans les cas avec/sans masque, et avec/sans fenêtres, sont consignés dans le tableau 1, pour un fichier météo IWEC (International Weather for Energy Calculation) de Paris-Orly avec des relevés entre 1983 et 1998 (EnergyPlus, 2008).

	Sans masque	**Avec masque**
Sans fenêtres – Ladybug	142.8	150.9
Sans fenêtres – Pleiades	143.2	151.1
Avec fenêtres – Ladybug	134.3	155.6
Avec fenêtres – Pleiades	137.8	155.6

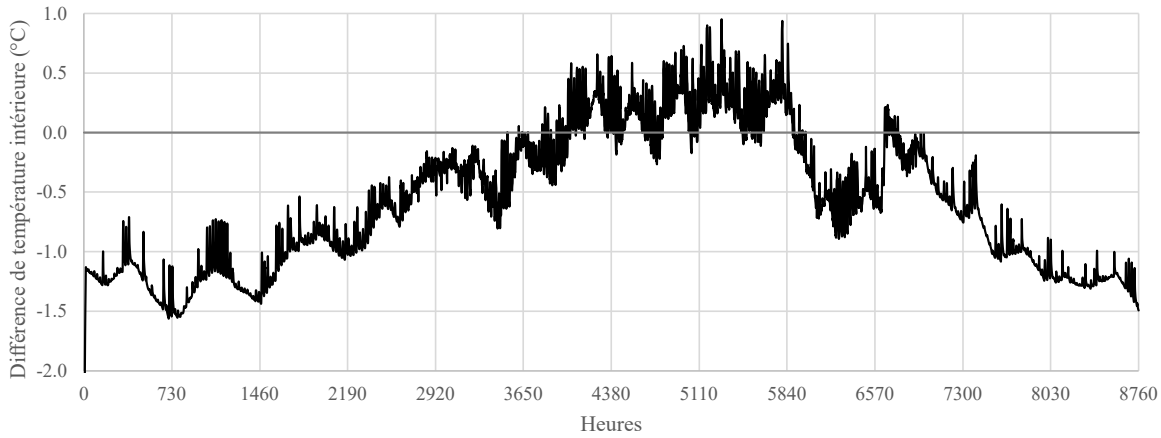
TABLEAU 1 – Besoins de chauffage annuels (en kWh/m^2 par an) du bâtiment cubique avec un fichier météo de Paris Orly simulés avec Ladybug (EnergyPlus) et Pleiades (COMFIE).

Il s'agit du total, cumulé sur l'année et divisé par la surface du bâtiment, des besoins en chauffage. On constate que les valeurs obtenues au moyen des deux logiciels sont assez proches : en prenant les résultats de Pleiades comme valeurs théoriques, l'erreur relative obtenue avec notre environnement de test est inférieure à 3% dans les quatre cas. Cette comparaison permet une première validation de nos simulations.

De la même façon, les degrés-heures d'inconfort à 26 °C sont également calculés afin de valider les résultats totaux du modèle sur la période estivale. Enfin, une dernière étape de validation consiste à vérifier que le modèle reproduit de façon satisfaisante l'évolution de la température du bâtiment, en particulier en inter-saison ou en été. La figure 5 montre ainsi une comparaison des résultats entre les deux logiciels dans le cas où les différences sont les plus marquées (cf. tableau 1, cas *avec fenêtres/sans masque*). La température tracée est une température *opérative*, qui est une moyenne entre la température de l'air (à l'intérieur) et les températures de surface des parois à l'intérieur du bâtiment. Sur la courbe bleue (simulation avec Ladybug), on constate qu'en hiver, comme attendu, cette température opérative est inférieure à la température de consigne de l'air (fixée à 19 °C) car les parois sont froides (i.e., les températures de surface sont inférieures à 19 °C). Cet effet n'est pas visible sur la courbe rouge en raison de la méthode de calcul utilisée par Pleiades, qui simule une seule température pour la zone thermique (i.e., la température de l'air et les températures de surface ne sont pas calculées séparément ; c'est une



(a) Variation de la température opérative sur l'année.



(b) Différence $T_{Ladybug}$ - $T_{Pleiades}$

FIGURE 5 – Comparaison de la température intérieure simulée avec les deux logiciels dans le cas *avec fenêtres et sans masque*.

température unique entre les deux qui est calculée mais qui est plafonnée par la consigne de température de l'air). Quoi qu'il en soit, la dynamique de la température simulée par les deux logiciels est similaire, avec de faibles différences sur la période mai-septembre (les écarts affichés avant mai et après septembre étant principalement dus au fait que les grandeurs calculées par les deux logiciels ne sont pas tout à fait les mêmes).

4.2 Cas d'étude 1 – masques bâtimentaires

Le premier cas d'étude que nous avons choisi se situe sur la commune de Loos-en-Gohelle. Il s'agit d'un foyer communal attenant à la mairie. Cette dernière fait obstruction au rayonnement solaire auquel est soumis le foyer. Ce cas nous permet de faire des premiers tests sur la prise en compte de masques bâtimentaires. Le toit du masque considéré étant à quatre pentes avec une tourelle agrémentée d'une horloge, sa représentation est assez différente dans la couche bâtiment de la BD TOPO et dans le LIDAR HD.

La géométrie du foyer est extraite de la BD TOPO, qui représente bien ce volume au toit plat. Le procédé de création des masques diffère selon le référentiel mobilisé. Le bâtiment masque de la mairie est extrait directement de la BD TOPO au format shape 3D (format de téléchargement de la donnée). L'utilisation directe du LIDAR HD n'est pas envisageable, car le nuage de points est dense (environ 10 points/m^2) et fournit une donnée discontinue non adaptée à notre usage. Les points du nuage de points correspondant à la mairie sont sélectionnés spatialement parmi les points décrivant les bâtiments. En effet, le LIDAR HD est classifié, c'est-à-dire que les points sont associés à une classe d'objets qu'ils décrivent, facilitant la sélection des points utiles, notamment en écartant des points décrivant des objets non permanents comme par exemple les véhicules présents lors de l'acquisition des données. Les points sélectionnés sont ensuite reliés par des faces 3D par un processus de triangulation de Delaunay afin d'obtenir une surface continue. Enfin, cette surface est rasterisée pour être intégrée dans notre environnement de test, à une résolution de 38 cm par pixel, afin de permettre la représentation du toit à quatre pentes et de la tourelle de la mairie.

La figure 6 montre une photo du foyer et de la mairie ainsi que les points correspondants dans le LIDAR HD et indique les points sélectionnés pour créer le masque. La figure 7 montre les masques une fois importés dans l'environnement de test. Suite aux premiers tests et vu le temps de calcul nécessaire pour obtenir un résultat, nous avons ensuite refait une simulation avec une version géométriquement allégée, discutée à la fin de la section 4.2.

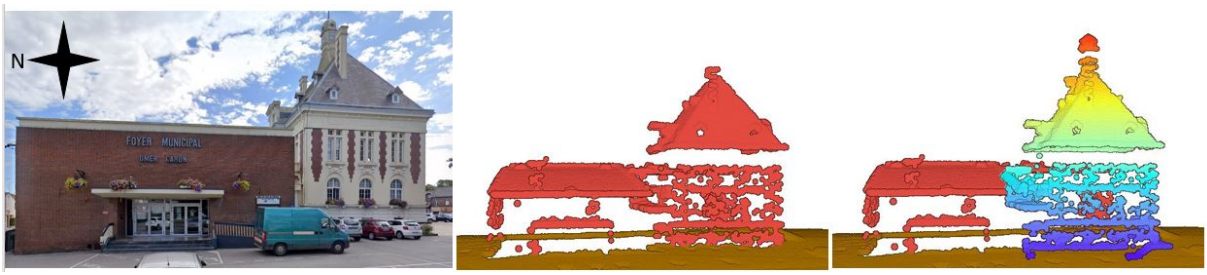
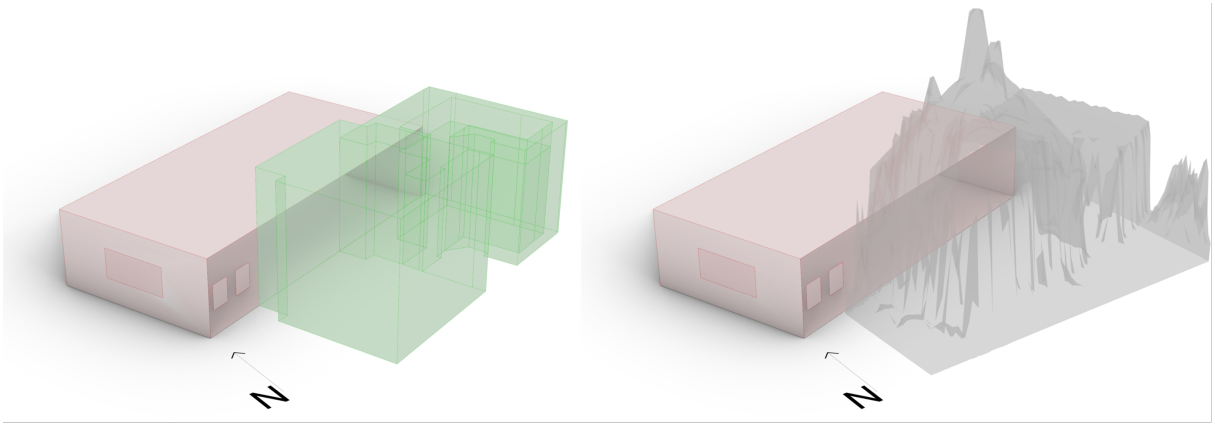


FIGURE 6 – Foyer municipal : à gauche image Google Street View, au milieu points LIDAR HD décrivant le sol (marron) et les bâtiments (rouge) et à droite points LIDAR HD avec les points utilisés pour représenter le masque formé par la mairie en dégradé de couleur (du bleu à l'orange foncé) selon l'altitude des points (© Google Street View et données IGN).



(a) Masque issu de l'extrusion de la BD TOPO.

(b) Masque obtenu par triangulation puis rasterisation à partir du LIDAR HD.

FIGURE 7 – Foyer communal (en rouge) généré par extrusion de la BD TOPO avec comme masque au sud/sud-est la géométrie de la mairie annexe, obtenue de deux manières différentes. Le foyer a une surface au sol de 580 m^2 et fait 7.8 m de haut.

Pour la STD, nous prenons comme hypothèses les valeurs présentées au début de la section 4.1, en modifiant deux paramètres : la condition limite au sol n'est plus adiabatique, et des échanges par conduction avec le sol sont considérés ; la ventilation reste constante mais plus faible, à raison de 0.3 vol/h. Les parois ont une résistance thermique peu élevée ($R = 2\,\mathrm{m}^2.\mathrm{K/W}$) et comportent des fenêtres au nord (33% de la surface de la paroi, d'après des images sur Google Street View), à l'ouest (15%) et au sud (20%), qui ont une conductance $U = 3\,\mathrm{W/m}^2.\mathrm{K}$ et un coefficient de gain de chaleur solaire CGCS $= 0.8$ pouvant correspondre à un simple vitrage. Le foyer se situant à Loos-en-Gohelle, nous prenons cette fois comme approximation de la climatologie un fichier météo de Lille-Lesquin avec des relevés plus récents (2009-2023) fourni par ClimateOneBuilding (2022).

Comparaison des besoins énergétiques. Les cumuls des besoins en chauffage sont résumés dans le tableau 2 [1]. La prise en compte du masque fait augmenter les besoins en chaud du foyer, par rapport à la situation sans masque, de 7% dans le cas d'une géométrie 2.5D obtenue par la BD TOPO, et de 12% dans le cas d'une géométrie 3D obtenue par LIDAR. La différence entre les deux types de masques est donc significative.

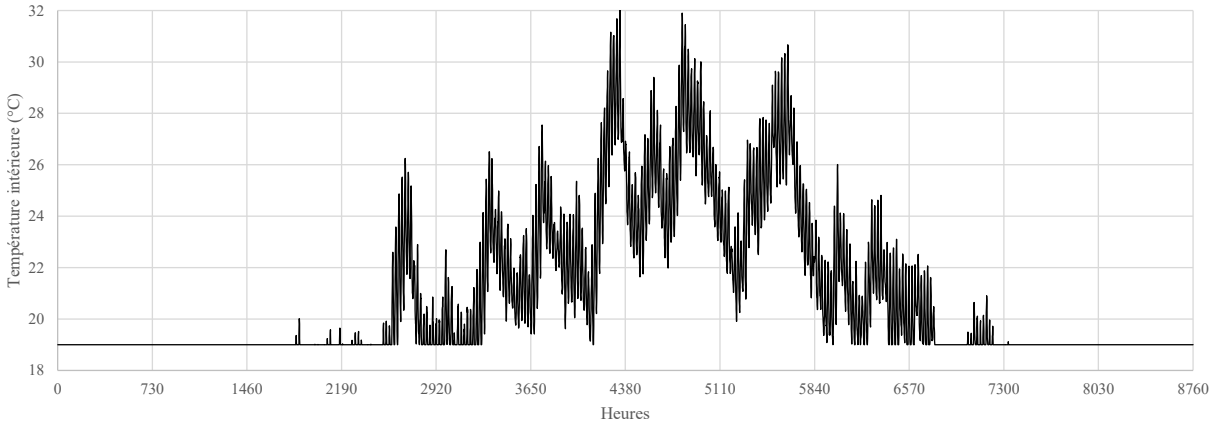
	Besoins en chaud (kWh/m^2)
Sans masque	76.9
Avec masque BD TOPO	82.4
Avec masque LIDAR HD	85.8

TABLEAU 2 – Besoins de chauffage annuels (en kWh/m^2) du foyer communal avec un fichier météo de Lille (TMYx 2009-2023).

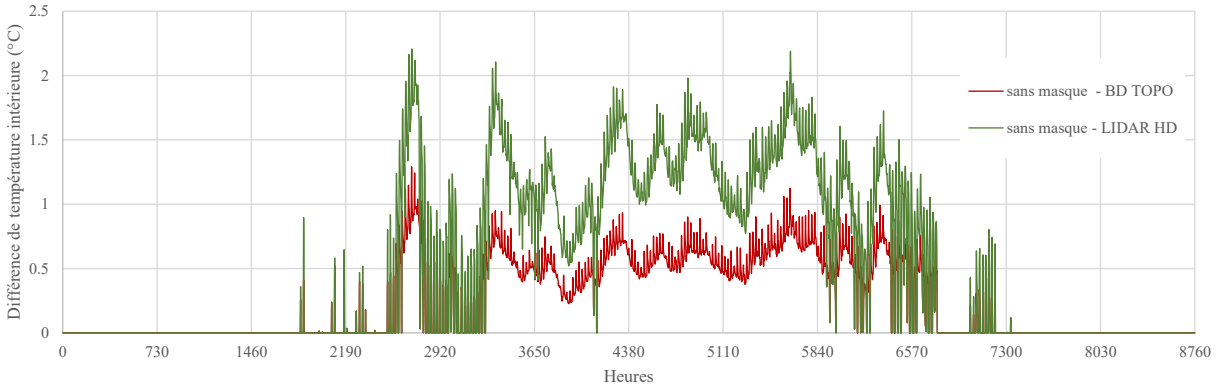
Comparaison de la température de l'air intérieur. La figure 8 montre que, quelle que soit la base de données utilisée, le masque a un rôle non négligeable sur la température à l'intérieur

1. Les besoins du foyer correspondent à environ 50% des besoins surfaciques calculés pour le cube, ce qui s'explique par la différence de compacité des bâtiments, par le taux de renouvellement d'air du foyer qui est plus faible, par la condition limite différente en sous-face, par la différence d'orientation et de localisation du bâtiment et du masque et par la différence du fichier météo.

du bâtiment en été. On note des différences de température pouvant aller jusqu'à 2.2 °C pour le masque obtenu par LIDAR HD, et 1.3 °C pour celui obtenu avec la BD TOPO. L'indicateur DH26 passe ainsi de 440 °C.h dans le cas du masque LIDAR HD à 820 °C.h pour le masque avec la BD TOPO. L'écart est bien entendu plus faible en considérant des degrés-heures au-dessus de 28 °C (de 70 °C.h à 190 °C.h, cf. figure 9).



(a) Cas sans masque.



(b) Différence entre le cas sans masque et les cas avec masques.

FIGURE 8 – Température de l'air à l'intérieur du foyer.

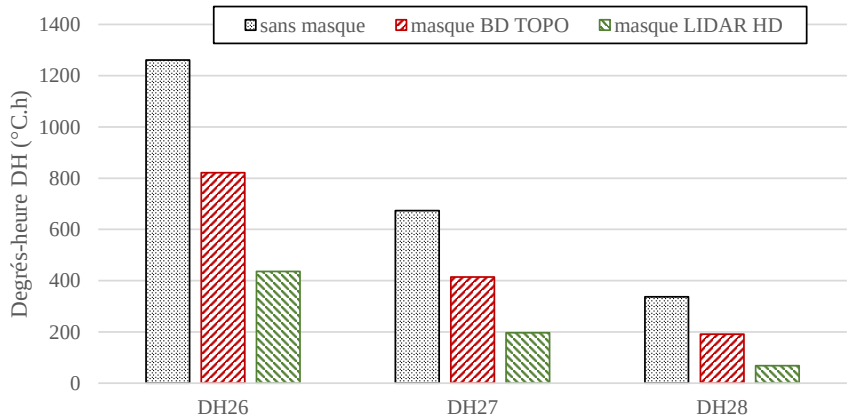


FIGURE 9 – Effets des deux représentations des masques sur l'inconfort thermique estival dans le foyer, pour différents seuils de la température maximale tolérée.

Ces premiers résultats montrent également une différence non négligeable selon que le masque est issu de la BD TOPO ou du LIDAR HD et nous incitent à approfondir cette comparaison

pour la suite de nos tests afin d'essayer d'estimer le gain apporté par des données plus précises que la BD TOPO. Les temps de calcul sont également différents. Pour le masque issu de la BD TOPO, le calcul est quasi immédiat (il ne dure que quelques secondes) alors qu'il dure 3h30 avec les masques issus du LIDAR. La rapidité du calcul est essentielle dans notre cas d'étude, car la comparaison de variantes de projets en phase amont doit pouvoir se faire rapidement. Nous chercherons donc des moyens pour réduire la durée des calculs sans trop affecter les résultats des études STD dans la suite de nos travaux. Nous avons testé une fonctionnalité de Rhino/Grasshopper opérant un lissage automatisé du maillage. Elle a permis de réduire le temps de calcul de presque 30%, pour un écart sur les besoins en chauffage inférieur à 0.1% comparé au maillage non dégradé. Cela nous invite à considérer le recours à des algorithmes de modélisation de bâtiments et toits en 3D à partir de nuages de points. La littérature scientifique sur le sujet est importante et les méthodes possibles nombreuses (Basselin, 2022). Il faudra évaluer si elles sont suffisamment robustes et fiables et si leur mise en œuvre peut être faite de manière assez automatisée et rapide pour convenir aux besoins des praticiens.

4.3 Cas d'étude 2 – masques liés à la végétation

Le deuxième cas d'étude est la médiathèque municipale de Loos-en-Gohelle. Ce bâtiment est entouré de végétation et notamment d'arbres situés à proximité immédiate de ses façades au sud, à l'est et à l'ouest. Ce cas nous permet de tester la prise en compte de masques représentant la végétation. Pour ce cas, nous n'avons pas utilisé la BD TOPO, car les seuils de sélection pour les éléments de la couche végétation ne sont pas adaptés à notre échelle de travail. Nous avons donc extrait le masque du nuage de points du LIDAR HD avec la même méthode que pour la mairie. Dans ce cas, les points ont été sélectionnés spatialement pour ne garder parmi les points décrivant la végétation que ceux à proximité immédiate du bâtiment, sur une bande de 10 mètres autour des façades concernées. Les points ont donc été triangulés puis la surface a été rasterisée à une résolution de 40 cm par pixel, qui permet de garder une morphologie conforme à la triangulation. Dans le cas des arbres, ce processus ne permet pas de prendre en compte la forme des troncs et les masques ainsi modélisés ressemblent plutôt à des murs. Étant donné la densité de la végétation sur la zone, y compris au-delà de la bande de 10 mètres sélectionnée, une telle représentation des masques dans ce cas n'est pas très éloignée de la réalité. Néanmoins, d'autres modes de représentation des masques végétaux pourraient être testés pour mieux correspondre à d'autres configurations territoriales, en présence d'arbres isolés par exemple. La figure 10 montre le bâtiment de la médiathèque modélisé à partir de la BD TOPO avec les points LIDAR HD décrivant la végétation, puis les mêmes éléments avec le raster créé pour représenter les masques. La figure 11 montre la représentation des masques liés à la végétation une fois importés dans l'environnement de test.

Pour la STD, nous gardons comme composition de l'enveloppe les valeurs du cas d'étude précédent – en considérant un taux de vitrage de 20% sur chaque paroi et des vitrages en toiture pour représenter les sheds visibles sur Google Street View – et le fichier météo de Lille-Lesquin reste le même. En revanche, les scénarios de chauffage, climatisation, ventilation et occupation ont été modifiés : nous utilisons cette fois un scénario avec des équipements de chauffage et de climatisation qui empêche de trop grandes variations de température. Nous choisissons un programme standard de bibliothèque disponible dans Ladybug Tools (à savoir, *2019-SecondarySchool-Library*) pour lequel la température intérieure du bâtiment doit être comprise entre 21 °C et 24 °C pendant les horaires d'ouverture. En considérant que le confort thermique est assuré de toute façon dans ce bâtiment, nous n'avons pas à comparer les températures de l'air à l'intérieur et seul le calcul des besoins énergétiques nécessaires pour rester dans la plage de températures imposée est utile pour juger de la performance thermique de la médiathèque.

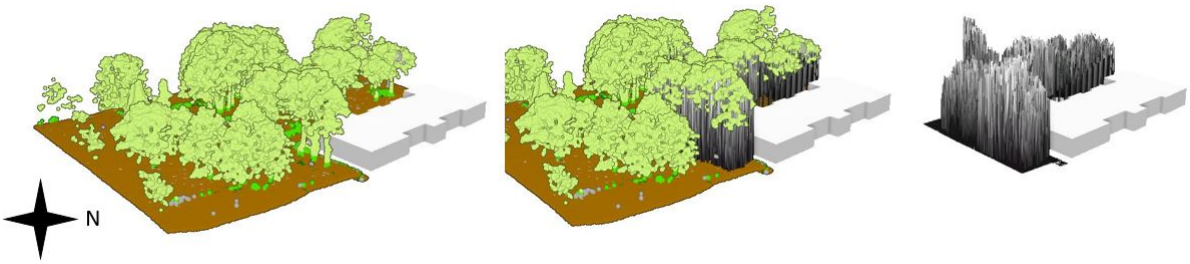


FIGURE 10 – Médiathèque municipale : à gauche image modélisation BD TOPO et points LIDAR HD représentant la végétation, au milieu avec le raster créé pour représenter les masques et à droite avec seulement le raster représentant les masques (© données IGN).

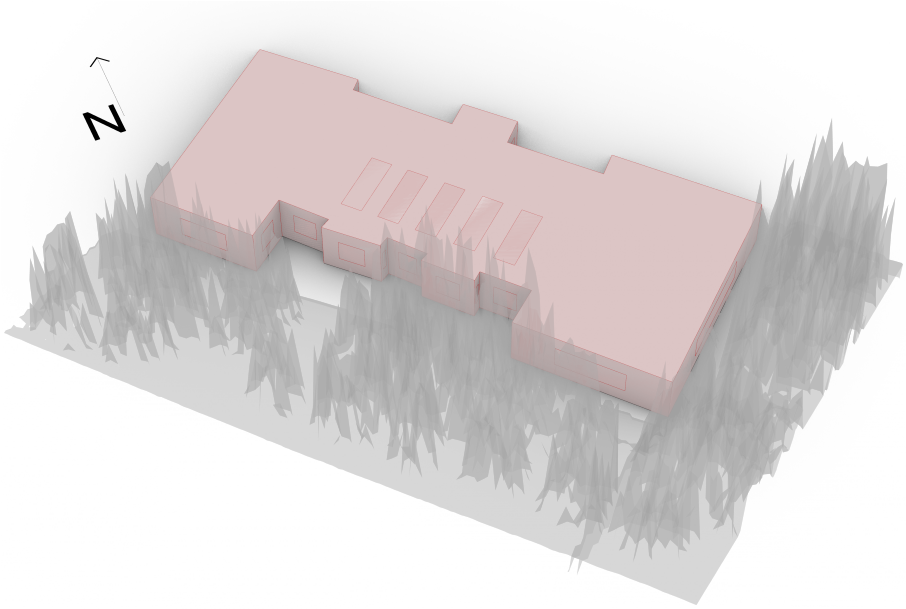


FIGURE 11 – Médiathèque générée par extrusion de la BD TOPO et arbres extraits du LIDAR HD (triangulation du nuage de points puis rasterisation). Le bâtiment a une surface au sol de 679 m^2 et fait 4.2 m de haut.

Comparaison des besoins énergétiques. Le tableau 3 montre que la prise en compte de la végétation proche comme masque solaire fait augmenter les besoins de chauffage annuels de 28% et diminuer les besoins de climatisation de 57%. La présence du masque génère un surplus des besoins en chaud tout au long de l'année, y compris quelques jours en été, et diminue ponctuellement les besoins de climatisation au printemps et en automne, en plus de l'été. Ces résultats dépendent bien entendu du fichier météo utilisé et nous incitent, lors de futurs travaux, à tester de nombreux fichiers afin d'évaluer la performance du bâtiment face à un large éventail de conditions météorologiques possibles.

	Besoins en chaud (kWh/m^2)	**Besoins en froid (kWh/m^2)**
Sans masque	75.4	27.7
Avec masque LIDAR HD	96.3	11.8

TABLEAU 3 – Besoins de chauffage et de climatisation annuels (en kWh/m^2) de la médiathèque municipale avec un fichier météo de Lille-Lesquin (TMYx 2009-2023).

Les simulations que nous avons réalisées, pour calculer les besoins énergétiques et températures à l'intérieur du bâtiment sur un an, prennent quelques secondes à tourner lorsque bâtiment et masque ont été extraits de la BD TOPO. Là encore, les calculs sont bien plus longs quand nous utilisons les géométries de masques très détaillées issues du LIDAR HD et durent 23 heures pour les arbres autour de la médiathèque. Cela nous invite à continuer nos tests en expérimentant différents formats et différentes résolutions pour la modélisation des masques, afin de trouver le bon équilibre entre précision de la définition des masques et temps de calcul.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons étudié comment la performance thermique de bâtiments, évaluée au moyen de simulations thermiques dynamiques, pouvait être affectée par différentes représentations de masques solaires, issues de référentiels géographiques existants. Après une validation de notre modèle sur des exemples élémentaires, deux cas d'étude ont ensuite été choisis pour représenter des situations urbaines existantes, en tentant de rester sur des hypothèses simples à ce stade. Le premier cas nous a permis de comparer deux descriptions de masques bâtimentaires avec comme principale différence la description géométrique du toit. Le second a été l'occasion de tester la représentation de masques végétaux dans deux résolutions différentes (extraction automatisée du LIDAR sans puis avec simplification géométrique automatisée).

Ces premiers résultats exploratoires confirment l'intérêt de pouvoir intégrer une représentation des masques existants dans les études STD et montrent que l'on peut comparer les effets de modélisations de ces masques à des degrés de finesse différents. Nous devons néanmoins continuer les tests pour tester d'autres types de représentation géométrique des masques et pour identifier une résolution optimale : suffisamment précise pour l'écoconception mais qui n'impacte pas trop fortement les temps de calcul. D'autres référentiels existants pourront être testés dans ce but, comme les modèles numériques de surface corrélés de l'IGN, qui offrent une résolution intermédiaire entre la couche bâtiment de la BD TOPO et le LIDAR HD avec une description rasterisée de l'ensemble de la volumétrie relevée par prise de vue aérienne. Les résultats des tests de formats et de résolutions seront utiles aux développeurs d'outils de STD comme Pleiades pour proposer une plus grande automatisation de la prise en compte des masques et ainsi rendre ces outils d'écoconception plus facilement utilisables. Ils pourraient également permettre de proposer des préconisations pour une extraction automatisée des masques depuis le jumeau numérique du territoire national sur lequel l'IGN travaille actuellement.

Ces travaux ouvrent également d'autres perspectives. L'ajout des propriétés thermo-optiques des matériaux (coefficients d'absorption et réflexion des facettes d'un quartier par exemple) dans des bases de données géonumériques pourrait être testé afin de faciliter la simulation des échanges radiatifs dans la ville. Cela serait utile aux modélisations microclimatiques (étude du confort thermique extérieur, de surchauffes urbaines ou de l'îlot de chaleur urbain). De tels tests permettraient de nourrir les réflexions autour des spécifications du jumeau numérique national. Par ailleurs, nous nous sommes restreints à l'étude de masques proches mais certaines configurations territoriales nécessitent la modélisation d'un environnement plus lointain – le relief constituant ainsi un horizon susceptible de masquer également le rayonnement solaire. Des référentiels existants, comme le RGE ALTI, pourraient être mobilisés afin de prendre en compte la topographie (montagnes, collines, falaises, etc.). Des lignes d'horizons ou des résultats d'analyses de visibilité pourraient également être expérimentés pour proposer une description unifiée des masques proches et lointains, à partir d'un ou plusieurs référentiels, en fonction des résultats des tests de résolution sur les masques proches.

FINANCEMENT

Ce travail a été financé par le projet CityFAB labellisé "ExcellencES" dans le cadre du programme d'investissements d'avenir bénéficiant du soutien de l'ANR par conventionnement référencé ANR-21-EXES-0007.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Thibault Chevilliet pour son aide sur les figures et la définition du protocole, Aurore Wurtz pour son secours sur l'utilisation de Pleiades et Romane Boutillier pour son assistance sur Grasshopper.

RÉFÉRENCES

Africani P., Bitelli G., Lambertini A., Minghetti A., Paselli E. (2013). Integration of lidar data into a municipal gis to study solar radiation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40*, 1–6.

Akbari H., Kurn D. M., Bretz S. E., Hanford J. W. (1997). Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and buildings 25*(2), 139–148.

Basselin J. (2022). *Reconnaissance de bâtiments à partir de nuages de points 3D*. Ph. D. thesis, Université de Lorraine.

Berry R., Livesley S. J., Aye L. (2013). Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Building and environment 69*, 91–100.

Biljecki F., Heuvelink G. B., Ledoux H., Stoter J. (2015). Propagation of positional error in 3d gis : estimation of the solar irradiation of building roofs. *International Journal of Geographical Information Science 29*(12), 2269–2294.

Buffat R., Grassi S., Raubal M. (2018). A scalable method for estimating rooftop solar irradiation potential over large regions. *Applied energy 216*, 389–401.

Burt A., Disney M., Calders K. (2019). Extracting individual trees from lidar point clouds using treeseg. *Methods in Ecology and Evolution 10*(3), 438–445.

Calcerano F., Martinelli L. (2016). Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. *Energy and Buildings 112*, 234–243.

Carneiro C., Morello E., Desthieux G. (2009). Assessment of solar irradiance on the urban fabric for the production of renewable energy using lidar data and image processing techniques. In *Advances in GIScience : Proceedings of the 12th AGILE Conference*, pp. 83–112. Springer.

ClimateOneBuilding (2022). *Region 6 - Europe - France climate files*. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/FRA_France/index.html.

Desthieux G., Carneiro C., Camponovo R., Ineichen P., Morello E., Boulmier A., Abdennadher N., Dervey S., Ellert C. (2018). Solar energy potential assessment on rooftops and facades in large built environments based on lidar data, image processing, and cloud computing. methodological background, application, and validation in geneva (solar cadaster). *Frontiers in Built Environment 4*, 14.

Donovan G. H., Butry D. T. (2009). The value of shade : Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. *Energy and Buildings 41*(6), 662–668.

EnergyPlus (2008). *All Regions - Europe (WMO Region 6) - France*. https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/FRA/FRA_Paris.Orly.071490_IWEC.

Ferrando M., Causone F., Hong T., Chen Y. (2020). Urban building energy modeling (ubem) tools : A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society 62*, 102408.

Giorio M., Manni M., Desthieux G., Köker N. I., Lobaccaro G. (2024). An interoperability approach for solar cadaster at high latitudes. In *Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction (2024 EC3), 14-17 July 2024, Chania, Crete, Greece*, Volume 5.

Gupta S., Weinacker H., Koch B. (2010). Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-d single tree detection using airborne fullwave lidar data. *Remote Sensing 2*(4), 968–989.

Han J.-Y., Chen Y.-C., Li S.-Y. (2022). Utilising high-fidelity 3d building model for analysing the rooftop solar photovoltaic potential in urban areas. *Solar Energy 235*, 187–199.

Jakubiec J. A., Reinhart C. F. (2013). A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on lidar and gis data combined with hourly daysim simulations. *Solar Energy 93*, 127–143.

Jendritzky G., de Dear R., Havenith G. (2012). Utci—why another thermal index ? *International journal of biometeorology 56*, 421–428.

Kirimtat A., Koyunbaba B. K., Chatzikonstantinou I., Sariyildiz S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 53*, 23–49.

Lecomte V., Macher H., Landes T. (2022). Combination of thermal infrared images and laserscanning data for 3d thermal point cloud generation on buildings and trees. In *7th International Workshop LowCost 3D-Sensors, Algorithms, Applications 15–16 December 2022, Würzburg, Germany*, Volume 48, pp. 129–136.

Lee J., Zlatanova S. (2009). Solar radiation over the urban texture : Lidar data and image processing techniques for environmental analysis at city scale. In *3D Geo-information sciences*, pp. 319–340. Springer.

Li Y., Liu C. (2017). Estimating solar energy potentials on pitched roofs. *Energy and Buildings 139*, 101–107.

Liang J., Gong J., Li W., Ibrahim A. N. (2014). A visualization-oriented 3d method for efficient computation of urban solar radiation based on 3d–2d surface mapping. *International Journal of Geographical Information Science 28*(4), 780–798.

Lingfors D., Bright J. M., Engerer N. A., Ahlberg J., Killinger S., Widén J. (2017). Comparing the capability of low-and high-resolution lidar data with application to solar resource assessment, roof type classification and shading analysis. *Applied Energy 205*, 1216–1230.

Liu H., Dong P., Wu C., Wang P., Fang M. (2021). Individual tree identification using a new cluster-based approach with discrete-return airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment 258*, 112382.

Lukač N., Špelič D., Štumberger G., Žalik B. (2020). Optimisation for large-scale photovoltaic arrays' placement based on light detection and ranging data. *Applied Energy 263*, 114592.

Machete R., Falcão A. P., Gomes M. G., Rodrigues A. M. (2018). The use of 3d gis to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy and Buildings 177*, 290–302.

Martín-Jiménez J., Del Pozo S., Sánchez-Aparicio M., Lagüela S. (2020). Multi-scale roof characterization from lidar data and aerial orthoimagery : Automatic computation of building photovoltaic capacity. *Automation in Construction 109*, 102965.

Meili N., Manoli G., Burlando P., Carmeliet J., Chow W. T., Coutts A. M., Roth M., Velasco E., Vivoni E. R., Fatichi S. (2021). Tree effects on urban microclimate : Diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects. *Urban Forestry & Urban Greening 58*, 126970.

Mielniczek A., Roux C., Jacquinod F. (2023). Benchmark of ecodesign lca tools at neighborhood scale. In *LCM 2023-Innovation for sustainable construction in buildings and cities*.

Musy M., Bozonnet E., Briottet X., Gutleben C., Lagouarde J.-P., Launeau P., Lemonsu A., Maro D., Rodriguez F., Sabre M. (2014). *Rapport final Projet ANR-09-VILL-0007 VegDUD Programme Villes Durables 2009*. Ph. D. thesis, IRSTV FR CNRS 2488.

Nanda V. M. V., Tateosian L., Baran P. (2020). Gis-based estimation of seasonal solar energy potential for parking lots and roads. In *2020 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pp. 136–141. IEEE.

Nelson J. R., Grubesic T. H. (2020). The use of lidar versus unmanned aerial systems (uas) to assess rooftop solar energy potential. *Sustainable Cities and Society 61*, 102353.

Nguyen H. T., Pearce J. M. (2012). Incorporating shading losses in solar photovoltaic potential assessment at the municipal scale. *Solar Energy 86*(5), 1245–1260.

Palme M., Privitera R., La Rosa D. (2020). The shading effects of green infrastructure in private residential areas : Building performance simulation to support urban planning. *Energy and Buildings 229*, 110531.

Peuportier B. (2003). *Eco-conception des bâtiments : bâtir en préservant l'environnement*. Presses des MINES.

Peuportier B., Sommereux I. B. (1990). Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *International Journal of Solar Energy 8*(2), 109–120.

Peuportier B., Thiers S., Guiavarch A. (2013). Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production 39*, 73–78.

Recht T., Munaretto F., Schalbart P., Peuportier B. (2014). Analyse de la fiabilité de comfie par comparaison à des mesures. application à un bâtiment passif. In *IBPSA 2014*.

Sadeghipour Roudsari M., Pak M., Viola A. (2013). Ladybug : a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In *Building Simulation 2013*, Volume 13, pp. 3128–3135. IBPSA.

Saudreau M., Triollet L., Laille P. (2021). *Les résultats du programme de recherche ANR COOLTREES, une fenêtre ouverte vers l'aménagement des villes de demain*. Ph. D. thesis, INRAE ; Plante & Cité, 26 rue Jean Dixméras, 49066 Angers Cedex 01 ….

Shirinyan E., Petrova-Antonova D. (2024). Large-scale solar potential analysis in a 3d cad framework as a use case of urban digital twins. *Remote Sensing 16*(15), 2700.

Spasic D. (2019). *Gismo*. https://github.com/stgeorges/gismo.

Srećković N., Lukač N., Žalik B., Štumberger G. (2016). Determining roof surfaces suitable for the installation of pv (photovoltaic) systems, based on lidar (light detection and ranging) data, pyranometer measurements, and distribution network configuration. *Energy 96*, 404–414.

Waqas H., Jiang Y., Shang J., Munir I., Khan F. U. (2023). An integrated approach for 3d solar potential assessment at the city scale. *Remote Sensing 15*(23), 5616.

Washburn B. (2020). *Heron*. https://github.com/blueherongis/Heron.