

Utilisation de données géonumériques pour la thermique du bâtiment et l'analyse de cycle de vie : prise en compte des masques solaires

Julien Cravero¹, Florence Jacquinod¹, Charlotte Roux², Adélaïde Feraille³

¹ *Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, EIVP, LASTIG, F-75019 Paris, France*

² *Mines de Paris, PSL Research University, CEEP, Paris, France*

³ *Navier, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France*

RESUME Les impacts environnementaux de projets urbains peuvent être évalués par la méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV) dans un objectif d'écoconception. Il ressort d'études ACV ayant pour périmètre un quartier que les bâtiments – et, en particulier, les consommations énergétiques (chauffage, climatisation) durant leur phase d'usage – sont d'importants contributeurs aux impacts du quartier. Pour évaluer plus précisément ces consommations, que ce soit à l'échelle du bâtiment, du quartier, voire de la ville, de nombreuses données géonumériques sont disponibles sur l'ensemble du territoire. Elles peuvent nous apporter des informations susceptibles d'améliorer notamment les simulations thermiques dynamiques (géométrie du relief, de la végétation, du bâti, réseaux, matériaux constituant les différentes facettes du quartier, etc.). Ici, nous analysons spécifiquement l'effet des masques solaires (bâti et végétation) sur les consommations énergétiques des bâtiments, le confort thermique à l'intérieur de ceux-ci et en conséquence sur leur évaluation environnementale. Plusieurs méthodes de génération des masques, à partir de différentes bases de données de l'IGN (BD TOPO, LIDAR HD, MNS corrélés), de résolutions variées, sont alors comparées, afin d'éclairer les compromis à faire entre automatisation des études, temps de calcul et précision souhaitée des résultats.

Mots-clefs analyse de cycle de vie, projets urbains, simulation thermique dynamique, masques solaires, référentiels géonumériques

I. INTRODUCTION

A. Contexte

Le domaine de la construction est gourmand en ressources et en énergie. C'est le cas en particulier des villes, dont l'empreinte environnementale reste à mieux cerner (Barles, 2008). L'analyse de cycle de vie (ACV) est une des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux les plus utilisées aujourd'hui. Elle a déjà été appliquée aux bâtiments depuis de nombreuses années, par exemple dans une logique d'écoconception (Peuportier, 2003), puis étendue à l'échelle du quartier, dans l'optique d'aider à concevoir les projets urbains de manière plus sobre. Cependant, l'échelle du quartier est encore peu adressée dans la pratique (Lotteau et al., 2015). Nous nous intéressons à l'apport des données géonumériques pour renforcer la précision des études ACV ou faciliter leur réalisation en automatisant une partie de la collecte des données. Il existe actuellement des référentiels de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) qui décrivent

de nombreux aspects du territoire (relief, infrastructures, occupation du sol, etc.) et sont disponibles sur l'ensemble du territoire national. Il nous semble pertinent de les mobiliser pour plusieurs raisons :

- ces référentiels géographiques permettent d'étudier une zone à différentes échelles, ce qui est intéressant aussi bien dans le cas d'approches *top-down* (grossièrement, le bâtiment vu comme un morceau d'une ville sur laquelle nous aurions des données) que *bottom-up* (la ville vue comme assemblage de briques élémentaires que seraient – entre autres – les bâtiments) pour diviser, agréger et consolider des inventaires ACV (listes de matières, de flux, etc.) ;
- les objets contenus dans ces référentiels sont géolocalisés, ce qui permet de faire des études contextualisées ;
- ces objets ont une géométrie et, en fonction des bases de données, divers attributs (par exemple, la date de construction du bâtiment, son usage, le nombre d'étages, les matériaux des murs et de la toiture, etc.) qui peuvent être des paramètres d'entrée de nos modèles, ce qui permet un gain de temps et de précision puisqu'on n'a pas à remodeler des géométries ou recollecter des informations, et que l'import de ces données peut être automatisé.

B. Positionnement et objectif

Nous nous concentrons sur les consommations énergétiques des bâtiments résultant de leur besoins de chauffage et de climatisation. L'évaluation précise de ces consommations est essentielle à la quantification des impacts environnementaux des bâtiments et des quartiers, étant donné la longue durée d'usage du bâti. C'est la raison pour laquelle des outils de simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment ont été couplés à l'ACV dans des études antérieures (*Peuportier et al., 2013*).

Dans cet article, nous proposons plusieurs méthodes de génération de masques solaires formés par l'environnement proche d'un bâtiment et analysons l'effet de ces représentations des masques sur les résultats de STD. Par *masques*, nous entendons les objets faisant obstacle au rayonnement (principalement solaire) dirigé vers le bâtiment. Nous excluons pour le moment les masques lointains dessinés par le relief (montagnes, falaises...) ainsi que les protections solaires extérieures (brise-soleil, casquettes, volets...) rattachées au bâtiment. Il s'agit donc des constructions adjacentes (bâtiments ou autres) et de la végétation qui lui font de l'ombre. La diminution du rayonnement solaire qui atteint les façades et la toiture modifie la réponse thermique du bâtiment. Elle peut causer une augmentation du besoin de chauffage en hiver (diminution des apports solaires gratuits) et, en été, une baisse du besoin de climatisation – ou une diminution des surchauffes estivales si le bâtiment n'est pas climatisé – ce qui conduit, *in fine*, à une variation des consommations énergétiques et donc à des impacts environnementaux différents. Ce sont ces effets que nous souhaitons quantifier, en adoptant la démarche schématisée sur la figure 1.

A l'échelle du quartier, des logiciels visant à réaliser des STD et à calculer des indicateurs environnementaux, tels *SimStadt2* ou *UBEM/UMI*, n'offrent pas d'import systématique des masques à partir des bases de géodonnées existantes (*Mielniczek et al., 2023*). De même, les

logiciels de STD les plus utilisés à l'échelle bâtiminaire (*EnergyPlus*, *TRNSYS*, *ESP-r*, *Pleiades+COMFIE*, etc.) exploitent peu les géodonnées disponibles, que ce soit pour modéliser la géométrie du bâtiment analysé ou bien pour représenter la géométrie de son environnement. Par exemple, *Pleiades+COMFIE* (Peuportier and Sommereux, 1990) permet de récupérer depuis *Open Street Map* les empreintes des bâtiments adjacents mais les valeurs des hauteurs des bâtiments sont manquantes et doivent être recherchées puis renseignées manuellement.

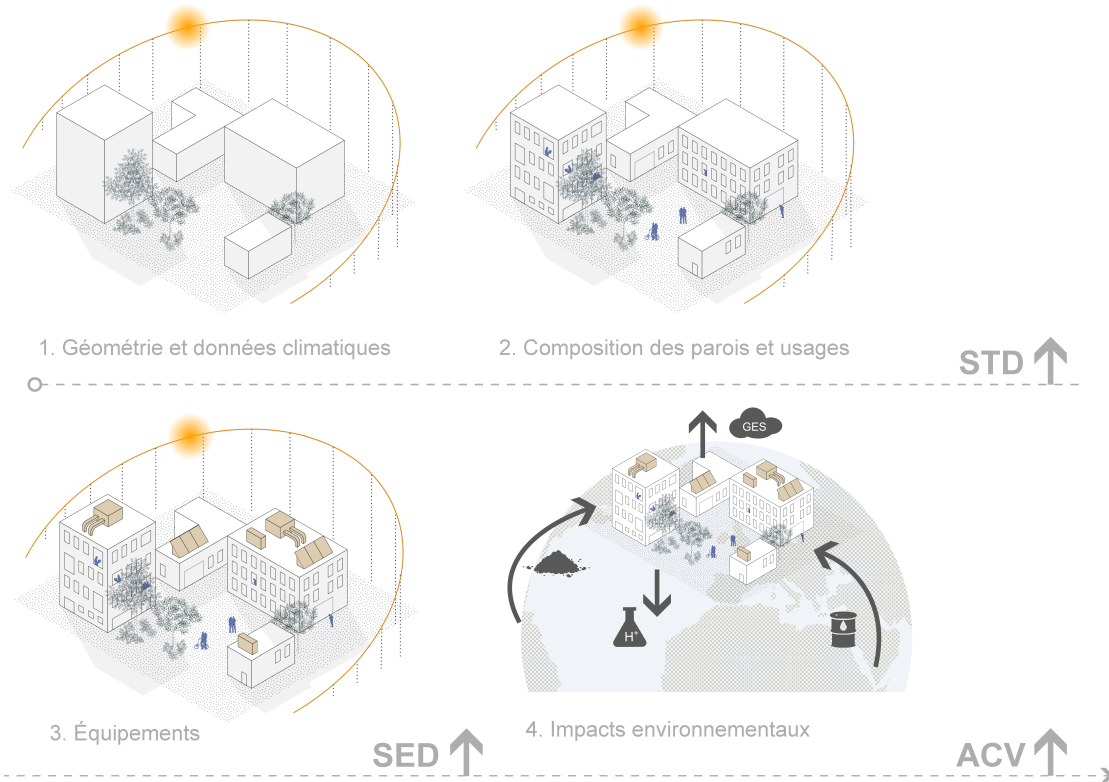


FIGURE 1. Schéma représentant les principales étapes de l'étude : 1) création de la géométrie d'un bâtiment à analyser et de son environnement proche (autres bâtiments et végétation) ; 2) ajout dans le modèle des propriétés du bâtiment nécessaires à la simulation thermique dynamique (STD) ; 3) renseignement des équipements utilisés pour calculer les consommations (simulation énergétique dynamique, SED) ; 4) modélisation des impacts des consommations par la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV). *Crédit image : Thibault Chevilliet.*

II. METHODOLOGIE

A quel point les masques influent-ils sur le confort thermique à l'intérieur du bâtiment, sur les consommations énergétiques et sur les impacts environnementaux qui en découlent ? Comment des études STD et ACV peuvent-elles être améliorées ou facilitées par l'emploi de données géonumériques ? Nous présentons dans cette partie la méthode employée pour tenter de répondre à ces questions.

A. Modélisation numérique

Un environnement de test est nécessaire pour importer les données géonumériques sous différents formats et différentes résolutions, puis étudier l'influence des masques solaires générés par ces données. Nous utilisons *Rhino* et *Grasshopper* (modeleur 3D et son environnement de programmation visuel associé) ainsi que deux plug-ins de *Grasshopper* :

- Le plug-in *Heron* (Washburn, 2020) est utilisé pour importer des géodonnées au format vecteur ou raster : pour notre étude, des empreintes de bâtiments et les géométries 3D de leur environnement proche (bâtiments et arbres) auxquelles sont associées des coordonnées géographiques et des attributs (informations sur l'objet). Les géodonnées proviennent de référentiels de l'IGN (BD TOPO, LIDAR HD, MNS corrélés) disponibles sur l'ensemble du territoire français (cf. section II. D).
- Le plug-in *Ladybug Tools* (Sadeghipour Roudsari et al., 2013) nous sert à importer un fichier météo, définir la trajectoire du soleil tout au long de l'année, renseigner les propriétés physiques des objets (par exemple, les propriétés thermiques des parois du bâtiment), le fonctionnement du bâtiment et de nombreux autres paramètres des simulations. Il fait l'interface entre *Rhino* et les codes de calcul de *Radiance* et *EnergyPlus/OpenStudio* qui sont des logiciels open source permettant de réaliser les simulations énergétiques dynamiques, c'est-à-dire simuler les échanges radiatifs (courtes et grandes longueurs d'onde), les transferts thermiques et les consommations énergétiques du bâtiment sur l'année.

Enfin, les sorties de ces simulations sont utilisées pour évaluer l'impact environnemental des consommations énergétiques. L'ACV est réalisée sur *Brightway 2.5*, une librairie Python open source (Mutel, 2017), et avec *ecoinvent 3.10* qui est une base de données de référence permettant d'évaluer les impacts environnementaux de procédés industriels de secteurs variés (énergie, construction, agriculture, déchets, transport, etc.) (Wernet et al., 2016).

B. Choix des indicateurs

La figure 2 résume la succession des différents modèles employés pour passer des géodonnées (première entrée des modèles, à gauche) à l'ACV des consommations (dernière sortie, à droite). Les masques, modélisés lors de la première étape, impactent potentiellement toutes les grandeurs qui suivent, mais celles-ci y seront plus ou moins sensibles en fonction des caractéristiques spécifiques à chaque projet. Si le bâtiment est très isolé et sans fenêtres au sud, la prise en compte des masques entraîne bien une diminution du rayonnement incident sur les parois, qui auront donc une température extérieure plus basse que lorsqu'elles étaient exposées au soleil, mais cela jouera peu sur les températures des parois à l'intérieur puisque les échanges thermiques avec l'extérieur sont faibles grâce à l'isolation et que peu de rayonnement pénètre à l'intérieur du bâtiment. Dans ce cas, la présence des masques n'a qu'un effet minime sur la température de l'air à l'intérieur du bâtiment ainsi que les grandeurs suivantes de la figure 2. A l'inverse, sous nos latitudes, un bâtiment sombre (réfléchissant peu le rayonnement solaire), mal isolé, vitré au sud et avec peu de renouvellement d'air sera *a priori* très affecté par la présence d'un masque devant sa façade sud.

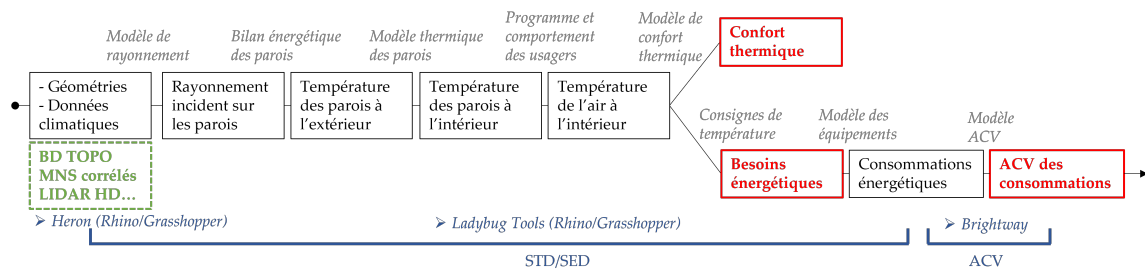


FIGURE 2. Chaînage des modèles et des outils employés pour évaluer l'effet des différents masques (en vert) sur trois types d'indicateurs (en rouge).

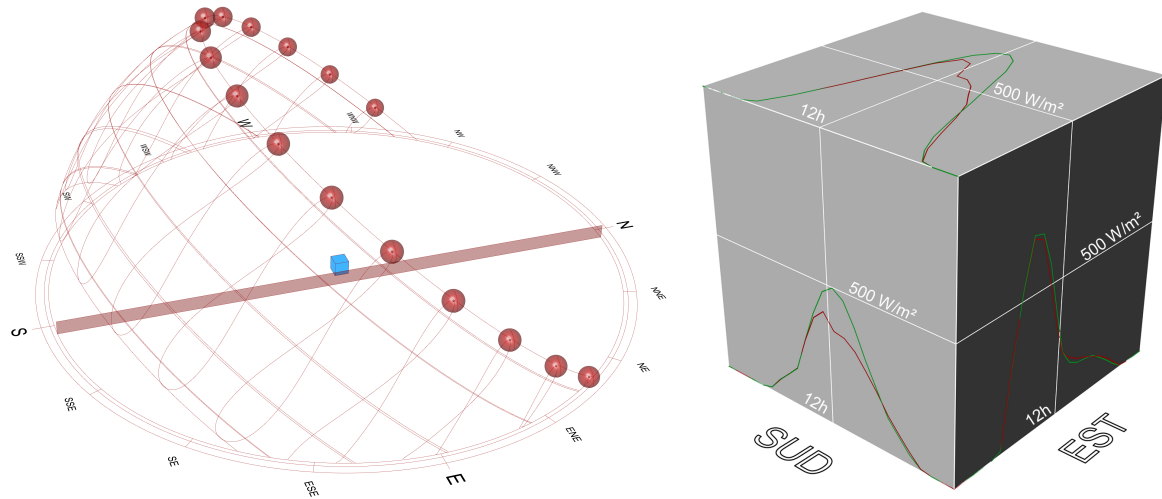
Pour juger de l'importance de prendre en compte de façon suffisamment précise les masques dans nos études STD et ACV, nous avons choisi d'analyser les variations causées par les masques sur trois grandeurs :

- Le confort thermique des occupants en été, au moyen d'un indicateur simple, qui est le nombre de degrés-heure au-dessus de 26 °C, noté DH26 (en °C.h). Il correspond à la somme des différences entre la température de l'air (à l'intérieur du bâtiment) et 26 °C pour chaque heure où la température de l'air est supérieure à ce seuil. Il s'agit d'un indicateur d'inconfort estival – nous considérons que le chauffage du bâtiment permet de maintenir une température de l'air assez élevée pour ne pas générer d'inconfort en hiver.
- Les besoins énergétiques du bâtiment, qui sont des résultats de la STD. Nous distinguons les besoins annuels en chaud et les besoins annuels en froid. Divisés par la surface du bâtiment, ils s'expriment en kWh/m².an. Les besoins énergétiques sont liés au confort puisqu'ils résultent des températures de consignes du chauffage et de la climatisation choisies pour atteindre un certain niveau de confort. L'augmentation du confort se fait donc au détriment des besoins énergétiques ; la réduction des besoins, en coupant les systèmes de régulation de la température, peut générer une dérive de la température du bâtiment causant de l'inconfort.
- L'ACV des consommations. Nous prenons comme méthode d'impacts la norme française NF EN 15804 relative aux ouvrages de construction et ne montrons dans cet article que deux indicateurs : le potentiel de réchauffement global à 100 ans (GWP100, en kg équivalent CO₂) et le besoin en eau (en m³ de privation équivalente dans le monde).

C. Validation du modèle

Les codes de calcul utilisés (*Radiance*, *EnergyPlus*) ont déjà fait l'objet de validations mais nous tenions à vérifier que le modèle que nous avons développé, qui chaîne plusieurs modèles numériques, donnait des résultats cohérents. Des premières simulations ont donc été réalisées sur des géométries basiques (voir figure 3) en étudiant d'abord le rayonnement incident sur les parois, pour comparaison avec des courbes théoriques, puis en complexifiant peu à peu le modèle (ajout de vitrages, scénarios de ventilation/chauffage/climatisation, scénarios d'occupation, variation de résistance thermique de l'enveloppe...). Les résultats des simulations ont alors été

comparés à ceux de Pleiades+COMFIE, ce logiciel ayant lui-même été comparé à des mesures expérimentales (Recht, 2013) ainsi qu'à d'autres logiciels (IEA BESTEST). Les différences sur les besoins énergétiques annuels surfaciques étaient inférieures à 3%, ce qui a été considéré comme suffisamment précis pour l'usage prévu et nous a confortés dans l'idée de tester des cas d'étude plus complexes – en termes de géométrie et de fonctionnement du bâtiment.



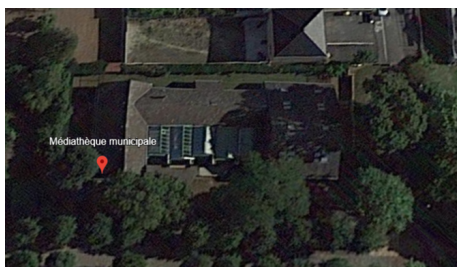
(a) Géométries élémentaires : cube de côté 5 mètres et masque de même hauteur placé à distance variable. Les points indiqués sur l'héliodrom correspondent au solstice d'été (21 juin) pour un bâtiment localisé à Paris.

(b) Densité de rayonnement incident (en W/m^2) sur les faces du cube lors des journées du 21 juin (en rouge) et du 22 juin (en vert) en l'absence de masque.

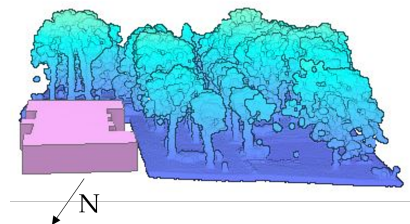
FIGURE 3. Premiers tests avec des géométries élémentaires.

D. Cas d'étude et données géonumériques utilisées

Le bâtiment présenté dans cette étude est un bâtiment existant : la médiathèque de Loos-en-Gohelle (d'une emprise au sol de $680 m^2$ environ), située dans le département du Pas-de-Calais (région Hauts-de-France), représentée sur la figure 4.



(a) Vue depuis ©Google Earth.



(b) Bâtiment modélisé à partir de la BD TOPO et végétation à partir du LIDAR HD (© données IGN).

FIGURE 4. Médiathèque municipale de Loos-en-Gohelle et sa végétation au sud-est.

Pour modéliser sa géométrie, nous avons eu recours à la BD TOPO de l'IGN : la couche bâtiment de la BD TOPO a été sélectionnée pour extraire le contour du bâtiment et sa hauteur sous gouttière, qui nous ont permis de géolocaliser et de créer le volume de la médiathèque dans *Rhino/Grasshopper* par extrusion verticale du contour. Il s'agit donc d'un ensemble simplifié de faces ne prenant pas en compte, par exemple, les différents pans de la toiture et les sheds visibles sur la figure 4(a).

La géométrie de l'environnement proche du bâtiment décrivant les masques peut être extraite de divers référentiels de l'IGN. Dans l'optique de faciliter le recours à ces données existantes, nous voulons dans notre étude tester l'export depuis différentes bases de données, afin d'estimer la précision géométrique obtenue, ainsi que le potentiel de généralisation de l'export pour permettre une utilisation ne nécessitant pas de compétences géomatiques, voire à terme une intégration automatisée dans des logiciels STD existants.

Nous avons utilisé pour cette première phase de l'étude deux référentiels :

- Les modèles numériques de surface (MNS) corrélés, qui décrivent la morphologie du territoire et de ses infrastructures sous forme de raster (grille régulière) de 50 cm de résolution (c'est-à-dire qu'un pixel de l'image raster mesure 50 cm x 50 cm). Ces modèles sont disponibles sur l'ensemble du territoire français.
- Les nuages de points 3D du LIDAR HD avec une densité d'environ 10 points par m², qui seront disponibles sur l'ensemble du territoire français d'ici la fin de l'année 2025.

L'export de la géométrie depuis les MNS corrélés est simple : il suffit de choisir la zone et d'exporter le raster correspondant. Pour le LIDAR HD, il est nécessaire de créer des volumes à partir des points 3D. Les nuages de points étant classifiés, il est possible de filtrer les points décrivant la végétation. Nous avons ensuite testé deux types de modélisation :

- La triangulation des points, puis leur transformation en raster de résolution 40 cm (soit des pixels de 40 cm x 40 cm). Ce masque est nommé « LIDAR HD » par la suite.
- La triangulation des points puis la réalisation d'une « ligne d'horizon » qui calcule pour un point d'observation donné, placé au centre du bâtiment et à 1.7 m au-dessus du sol, les obstacles à la visibilité. Cette ligne d'horizon est ensuite projetée verticalement et le masque est représenté par une surface réglée reliant la ligne d'horizon à sa projection au sol. Ce second export a été choisi pour sa capacité à fournir une géométrie plus légère (beaucoup moins de faces 3D, cf. figure 5). Il est nommé « ligne d'horizon/LIDAR » dans la suite de l'article.

Comme approximation du climat de la zone, un fichier météo de Lille-Lesquin (aéroport situé à 30 km) avec des relevés récents, entre 2009 et 2023, fourni par Climate.OneBuilding (*ClimateOneBuilding, 2022*), a été choisi.

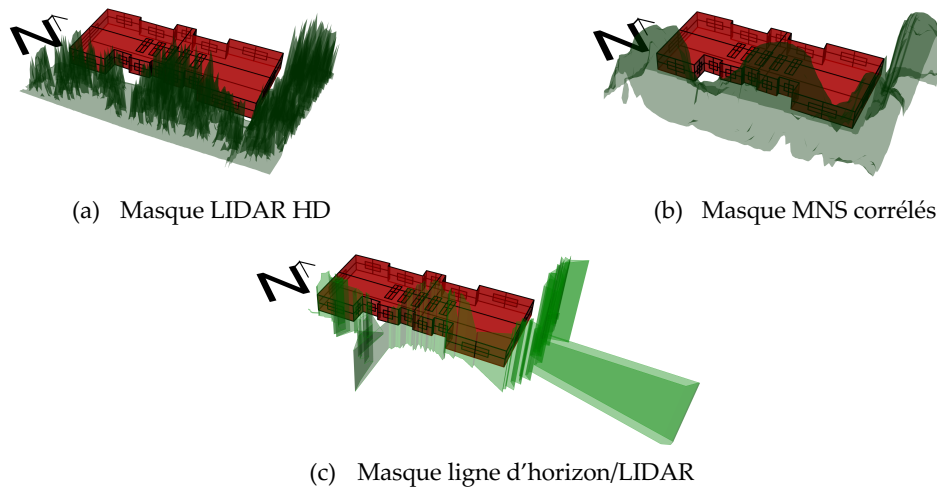


FIGURE 5. Trois géométries de la végétation pour représenter les masques solaires au sud du bâtiment.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Comparaison avec et sans fenêtres

Hypothèses. Afin de réaliser la STD de la médiathèque, il est nécessaire de faire des hypothèses sur l'enveloppe du bâtiment, les scénarios d'occupation, le fonctionnement du bâtiment, etc. L'idée n'est pas de réaliser la STD la plus exacte de la médiathèque telle qu'elle existe actuellement mais de comparer différents cas tests pour évaluer l'influence des masques. Dans le cas d'un diagnostic énergétique, pour lequel il faudrait représenter plus finement l'existant, il conviendrait de collecter ces données ou de les mesurer expérimentalement. Ici, l'objectif est de voir si le fait de représenter les masques peut présenter un intérêt ou si les différences constatées sur les indicateurs choisis sont négligeables, en considérant des hypothèses plausibles. Nous prenons comme hypothèses les valeurs suivantes :

- Enveloppe : les parois sont composées d'un matériau fictif de conductivité 0.05 W/m.K , de densité 1100 kg/m^3 , de capacité thermique 4456 J/kg.K , d'absorptivité 0.7 pour les courtes longueurs d'onde et 0.9 pour le rayonnement infrarouge, et d'épaisseur 10 cm , ce qui induit une résistance thermique de $2 \text{ m}^2.\text{K/W}$ (cela correspond à la paroi d'un bâtiment moyennement isolé). Des simulations sont réalisées pour : (a) une version de la médiathèque sans aucune surface vitrée pour simplifier le modèle du bâtiment étudié ; (b) une version plus réaliste avec un taux de vitrage de 20% sur chaque paroi et des vitrages en toiture qui représentent les verrières que l'on aperçoit sur *Google Earth* (simples vitrages modélisés par une conductance de $3 \text{ W/m}^2.\text{K}$ et un coefficient de gain de chaleur solaire de 0.8).
- Programme : programme standard d'une bibliothèque fourni dans *Ladybug Tools* (2019::SecondarySchool::Library) dont nous détaillons les principaux paramètres – occupation : $0.108 \text{ personnes/m}^2$ durant les heures d'ouverture avec une activité de 120 W/personne (auxquels sont ajoutés 18.9 W/m^2 dus à l'éclairage et à divers

équipements électriques) ; infiltrations : 0.000227 m³/s.m² ; ventilation : 0.0047 m³/s.personne ; chauffage et climatisation pour maintenir la température de l'air entre 21 °C et 24 °C. Le bâtiment est modélisé comme une unique zone thermique.

Ces hypothèses nous permettent de simuler les besoins en chaud et en froid du bâtiment sur toute l'année, pour le fichier météo de Lille-Lesquin (TMYx 2009-2023) considéré, ainsi que la température intérieure (et les degrés-heure d'inconfort estival lorsque l'hypothèse de climatisation sera enlevée). Pour calculer des scores d'impacts environnementaux dus aux consommations (indicateurs ACV), il est nécessaire de faire des hypothèses supplémentaires :

- Équipements : on considère que le chauffage et la climatisation sont assurés par une pompe à chaleur air-eau de puissance 10 kW et de coefficient de performance saisonnier 2.8. Ces valeurs proviennent du procédé « *heat production, air-water heat pump 10 kW* » calibré pour des maisons individuelles en Suisse et disponible dans la base de données ACV *ecoinvent 3.10*, qui comporte actuellement peu d'alternatives pour modéliser les systèmes de chauffage et de climatisation.

Nous comparons les résultats pour quatre types d'environnements proches : (a) pas de masque solaire ; (b) masques LIDAR HD ; (c) masques MNS corrélés ; et (d) masques représentés par une ligne d'horizon/LIDAR.

Besoins énergétiques. Les besoins énergétiques simulés sont consignés dans le tableau 1. Pour la production de chaud comme pour la production de froid, il s'agit du cumul annuel divisé par la surface totale de la médiathèque (679 m²). Ces résultats nous amènent à faire quatre commentaires.

TABLEAU 1. Besoins surfaciques annuels de chauffage et de climatisation (en kWh/m².an) en faisant varier le taux de vitrage des parois.

	Sans masque	Masque LIDAR HD	Masque MNS corrélés	Masque ligne d'horizon/LIDAR
Sans fenêtres	Chaud : 78.6 Froid : 5.6	Chaud : 82.4 Froid : 3.9	Chaud : 82.2 Froid : 4.2	Chaud : 82.0 Froid : 4.6
Avec fenêtres	Chaud : 75.5 Froid : 27.7	Chaud : 96.4 Froid : 11.8	Chaud : 94.0 Froid : 15.3	Chaud : 92.5 Froid : 18.5

- Premièrement, toutes simulations confondues, les besoins de chauffage sont de l'ordre de 90 kWh/m².an : ils correspondent globalement à un bâtiment peu performant, comme prévu – pour comparaison (grossière), un des critères du label *Passivhaus* est que le besoin en chauffage en construction neuve soit inférieur à 15 kWh/m² par an.
- Deuxièmement, dans tous les cas, on peut vérifier que la prise en compte des masques solaires augmente bien le besoin en chauffage et diminue le besoin en climatisation, ce qui est logique puisque les parois reçoivent alors moins de rayonnement solaire et qu'il y a donc moins d'énergie qui pénètre dans le bâtiment. Le cas « avec fenêtres » est plus sensible à la prise en compte des masques (environ +25% de besoins de chaud par rapport au bâtiment sans masque, -40% de besoins de

froid) que le cas « sans fenêtres » (environ +5% de besoins de chaud, -25% de besoins de froid). Ceci est dû à deux phénomènes : quand le taux de vitrage augmente, 1) la résistance thermique de l'enveloppe diminue, donc par conduction la température intérieure subit plus les variations du rayonnement incident sur les parois à l'extérieur, et 2) les apports directs (rayonnement solaire traversant le vitrage) subissent également plus de variations (quand il n'y a pas de fenêtres, il n'y a pas d'apports directs, qu'il y ait un masque ou non, alors que quand il y a des fenêtres, la présence d'un masque peut abattre une partie des apports directs).

- Troisièmement, on s'aperçoit que la prise en compte du masque est susceptible de modifier la logique de conception : s'il n'y en a pas, l'ajout de fenêtres semble diminuer les besoins en chaud (de 3.1 kWh/m².an) alors que s'il a été pris en compte au moyen de LIDAR HD, par exemple, l'ajout de fenêtres augmente les besoins en chaud (de 14 kWh/m².an ici).
- Enfin, si l'on compare les simulations effectuées avec les trois types de masques, les résultats sont assez proches en ce qui concerne le besoin en chaud et un peu plus dispersés pour le besoin en froid. Pour ce dernier, qui apparaît durant l'été, les différences sont probablement dues au rayonnement infrarouge réfléchi par le masque vers le bâtiment, qui serait plus important dans le cas du masque généré par la ligne d'horizon (il forme en effet une paroi verticale proche du bâtiment, cf. figure 5) – ce point reste à vérifier. Il est à noter que la durée des simulations varie énormément selon le type de géométrie utilisée pour représenter le masque : de l'ordre de la minute pour la ligne d'horizon/LIDAR (pour simuler une année complète), environ 2 heures pour le MNS corrélés et près de 24 heures pour le LIDAR HD.

Confort thermique intérieur. La température intérieure étant régulée entre 21 °C et 24 °C, il n'y a ni problème de froid ni problème de surchauffe donc la présence du masque n'a aucun effet sur cet indicateur dans cette configuration.

ACV des consommations. Si l'on se concentre sur le cas « avec fenêtres » qui est plus réaliste, la prise en compte du masque fait augmenter les besoins (chauffage et climatisation) du bâtiment de 3400 kWh/an avec le masque LIDAR HD, 4090 kWh/an avec le masque MNS corrélés et 5280 kWh/an avec la ligne d'horizon/LIDAR par rapport à la situation de référence sans masque. Ces besoins sont ensuite convertis en consommations énergétiques en considérant le rendement de la pompe à chaleur puis traduits en impacts environnementaux. Cependant, plutôt que de donner une valeur unique de l'impact, nous calculons une distribution, par la méthode de Monte-Carlo, pour tenir compte des incertitudes liées, dans le modèle ACV, à l'intensité avec laquelle les procédés industriels sont sollicités, à la quantité des substances que chaque procédé émet ou extrait de la biosphère et à la manière dont les impacts environnementaux sont caractérisés à partir de la liste de ces substances – c'est-à-dire que nous considérons les incertitudes liées à la matrice technologique, à la matrice environnementale et à la matrice de caractérisation, pour reprendre une terminologie classique (*Heijungs and Suh, 2002*). L'objectif de cette démarche est de montrer les incertitudes intrinsèques à l'indicateur ACV considéré – c'est pourquoi nous ne considérons pas toutes les incertitudes sur les besoins énergétiques (dues à la géométrie du bâtiment, les scénarios, les équipements, les usages, etc.) puisque l'enjeu n'est pas tant de réaliser

un diagnostic énergétique juste de la médiathèque actuelle que d'étudier la variation des résultats imputable à la prise en compte des différents masques. Les résultats sont affichés sous forme de boîtes à moustaches sur la figure 6. Pour l'indicateur de changement climatique, par exemple, la prise en compte du masque LIDAR HD occasionne un surplus compris entre 300 et 1000 kg éq. CO₂, avec 50% des valeurs comprises entre 500 et 610 kg éq. CO₂ et une médiane à 544 kg éq. CO₂. Cette médiane s'élève à 654 kg éq. CO₂ dans le cas du masque MNS et à 844 kg éq. CO₂ dans pour le masque ligne d'horizon/LIDAR.

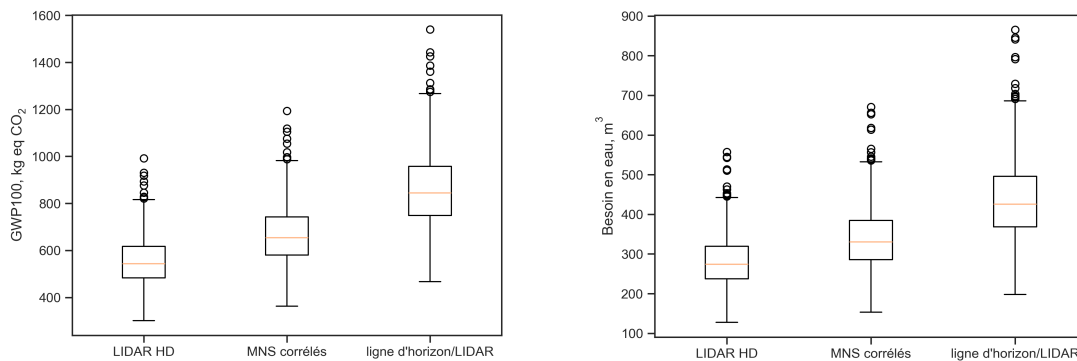


FIGURE 6. Potentiel de réchauffement global et besoin en eau de la différence des consommations énergétiques entre les cas de la médiathèque vitrée « avec masque » et le cas « sans masque ».

B. Scénario sans climatisation

Hypothèses. Nous nous intéressons au modèle de la médiathèque avec fenêtres mais cette fois, il n'y a pas de climatisation du bâtiment. L'objectif est d'évaluer l'influence des masques sur le confort estival dans le bâtiment en l'absence d'un système actif de rafraîchissement. Toutes les autres hypothèses décrites dans la section précédente sont conservées.

Besoins énergétiques. Les cumuls annuels surfaciques des besoins sont résumés dans le tableau 2. Les besoins en chaud du bâtiment non climatisé sont identiques à ceux du bâtiment climatisé, ce qui était attendu (les très faibles différences sont dues au fait que la température de l'air du bâtiment non climatisé « part de plus haut » avant de décroître et d'atteindre le seuil bas où le chauffage devient nécessaire). Dans cette version « sans climatisation », le bâtiment est plus sensible à la prise en compte des masques (environ +25% de besoins énergétiques totaux par rapport au bâtiment sans masque, contre +6% dans le cas précédent). Les trois types de masques donnent des résultats très proches, ce qui incite, vu les temps de calcul, à privilégier la ligne d'horizon/LIDAR pour ce type d'études.

TABLEAU 2. Besoins surfaciques annuels de chauffage et de climatisation (en kWh/m².an) de la médiathèque vitrée en coupant la climatisation.

	Sans masque	Masque LIDAR HD	Masque MNS corrélés	Masque ligne d'horizon/LIDAR
Avec climatisation	Chaud : 75.5 Froid : 27.7	Chaud : 96.4 Froid : 11.8	Chaud : 94.0 Froid : 15.3	Chaud : 92.5 Froid : 18.5
Sans climatisation	Chaud : 75.3 Froid : 0	Chaud : 95.9 Froid : 0	Chaud : 93.9 Froid : 0	Chaud : 92.4 Froid : 0

Confort thermique intérieur. Cette fois, la température du bâtiment n'est plus contrôlée en été : elle atteint un maximum de 39.1 °C dans le bâtiment sans masque et 34.8 °C dans les trois autres cas. Les nombres de degrés-heure au-dessus de 26°C (DH26) sont montrés sur la figure 7 ; ceux au-dessus de 27 °C et 28 °C sont affichés pour indication. L'indicateur DH26 est assez différent pour les trois représentations de masques, ce qui reflète la différence sur les besoins de froid simulés précédemment, sous l'hypothèse d'une climatisation (voir tableau 2). La différence entre le masque LIDAR HD (DH26 = 1659 °C.h) et le masque ligne d'horizon/LIDAR (DH26 = 2669 °C.h) est ainsi de 1010 °C.h, ce qui est conséquent, alors que ces deux types de masques ont été générés à partir du même référentiel de données géonumériques. L'écart est bien entendu plus faible en considérant les degrés-heure au-dessus de 28 °C (une différence de 526 °C.h) mais confirme que la manière dont les masques sont modélisés impacte fortement l'évaluation du confort thermique. Un indicateur de confort adaptatif, tel que celui préconisé par la norme EN 16798-1 traitant de la performance énergétique des bâtiments, pourrait être également calculé afin de comparer le résultat au seuil de 350 DH fixé par la réglementation mais cela se ferait au prix de scénarios réglementaires peut-être plus éloignés de la réalité, ou moins spécifiques au projet, et donc moins adaptés à un travail de conception.

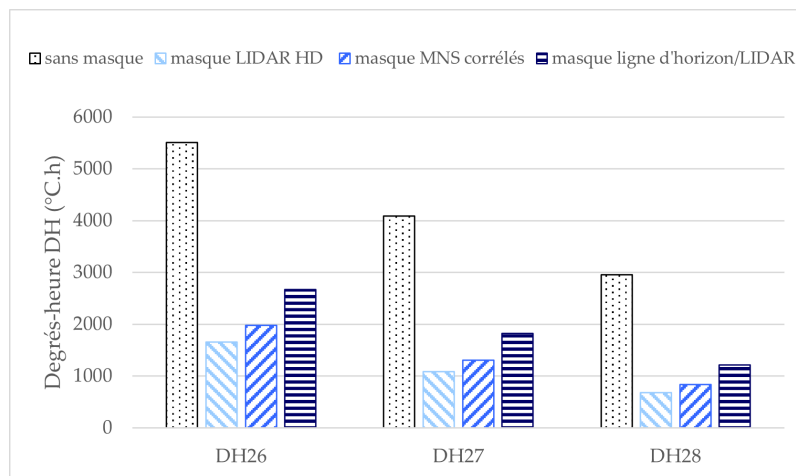


FIGURE 7. Effet des masques sur l'inconfort estival dans la médiathèque pour trois seuils de température maximale.

ACV des consommations. La variation des besoins énergétiques – entre le cas « sans masque » et les cas « avec masque » – étant plus importante en l'absence de climatisation, les indicateurs ACV reflètent également de plus grandes variations, comme on peut le voir sur la figure 8. Ainsi, en reprenant l'exemple précédent, en ce qui concerne l'indicateur de changement climatique, la prise en compte du masque LIDAR HD occasionne cette fois un surplus compris entre 1250 et 4000 kg éq. CO₂, avec 50% des valeurs comprises entre 2000 et 2500 kg éq. CO₂ et une médiane à 2230 kg éq. CO₂ – soit quatre fois plus que dans le cas du bâtiment climatisé. Les masques MNS corrélés et lignes d'horizon/LIDAR donnent des résultats proches.

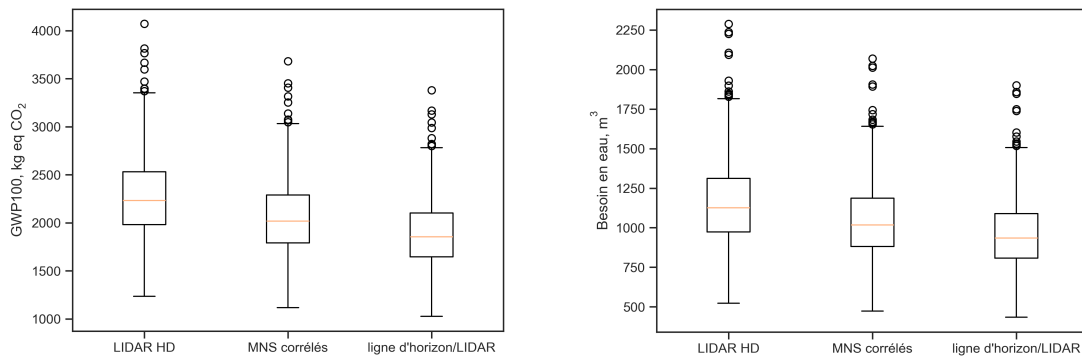


FIGURE 8. Deux indicateurs ACV de la différence des consommations énergétiques entre les cas de la médiathèque vitrée non climatisée « avec masque » et le cas « sans masque ».

IV. CONCLUSION

Dans le cadre d'études STD et ACV, l'effet de masques solaires sur un bâtiment a été analysé, en se concentrant sur trois types de métriques : les besoins énergétiques (chauffage et climatisation), le confort thermique à l'intérieur du bâtiment (température de l'air pouvant dépasser certains seuils) et des indicateurs ACV estimant l'impact environnemental des consommations. Différents modes de représentation des masques, générés à partir de référentiels géographiques de l'IGN, ont été testés pour tenter de mieux appréhender la sensibilité de nos modèles de bâtiments à leur environnement proche.

Une première conclusion est que l'influence des masques n'est pas toujours négligeable. Elle dépend bien entendu de l'indicateur observé et varie fortement selon les caractéristiques du bâtiment étudié : localisation, orientation, performance de l'enveloppe, taux de vitrage, renouvellement de l'air, scénarios de chauffage et climatisation, etc. Plusieurs de ces paramètres ont été modifiés dans les simulations afin de mieux comprendre leur incidence sur les résultats.

Ces résultats montrent l'intérêt d'intégrer les masques existants dans les études STD au moyen de données géonumériques, que ce soit en phase amont de conception ou pour établir le diagnostic d'un bâtiment existant. Ainsi, pour des études de rénovation qui mêlent ces deux cas de figure, l'apport de ce type de données géonumériques semble particulièrement intéressant. Par ailleurs, ce travail devrait aider, à terme, à déterminer le degré de finesse suffisant pour représenter les masques et automatiser leur import. Il est pour l'instant difficile de savoir, sans confronter les résultats des simulations à des mesures expérimentales, quelle représentation des masques donne les résultats les plus justes, mais cette étude offre déjà quelques pistes. Ainsi, d'un point de vue pratique, l'utilisation « directe » des données du LIDAR HD que nous proposons peut être disqualifiée au vu du temps de calcul requis pour la STD avec cette représentation de masque. La géométrie simplifiée obtenue en générant une ligne d'horizon à partir du LIDAR HD est largement avantageuse en termes de temps de calcul mais demande potentiellement plus de manipulation de la géodonnée fournie par l'IGN. Le recours aux MNS corrélés, déjà disponibles sur l'ensemble du territoire français, peut dès lors être un compromis si l'on souhaite importer directement la donnée géonumérique sans la pré-traiter. A partir de ces premiers résultats, d'autres méthodes de modélisations issues des référentiels géographiques pourront être testées et comparées, sur le cas de la médiathèque et sur d'autres configurations.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives. Des données géonumériques avec des attributs sur les propriétés thermo-optiques des matériaux pourraient servir, de façon similaire, à améliorer les modèles microclimatiques urbains simulant les surchauffes en ville et le confort thermique extérieur. Il est également envisageable de modéliser la végétation de manière plus fine, par exemple pour des arbres à feuillage caduc, en distinguant les troncs des feuilles, afin de faire varier l'opacité d'une partie du masque au cours de la saison. En outre, les masques plus lointains, comme ceux formés par le relief, pourraient également être pris en compte par des référentiels existants, tel RGE ALTI. Enfin, la préoccupation du changement climatique nous invite, dans les simulations, à soumettre nos modèles de bâtiments à des fichiers météo représentatifs de la climatologie future, ce qui induira probablement des effets des masques plus importants sur le besoin en climatisation et sur l'inconfort estival.

FINANCEMENT

Cette étude a été financée par le projet ExcellencES City-FAB dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir bénéficiant du soutien de l'ANR par conventionnement référencé ANR-21-EXES-0007.

REFERENCES

- Barles, S., 2008. Comprendre et maîtriser le métabolisme urbain et l'empreinte environnementale des villes. *Responsabilité et environnement* 21–26.
- ClimateOneBuilding, 2022. Region 6 - Europe - France climate files.
- Heijungs, R., Suh, S., 2002. *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*. Springer Science & Business Media.
- Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufresnes, E., Sonnemann, G., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment* 93, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.029>
- Mielniczek, A., Roux, C., Jacquiod, F., 2023. Benchmark of ecodesign LCA tools at neighborhood scale, in: *LCM 2023-Innovation for Sustainable Construction in Buildings and Cities*.
- Mutel, C., 2017. Brightway: an open source framework for life cycle assessment. *Journal of Open Source Software* 2, 236.
- 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, 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., 2013. *Analyse de la fiabilité de Pléiades+ COMFIE par comparaison à des mesures*. Master Thesis. Ecole des Mines de Douai.
- 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*. IBPSA, pp. 3128–3135.
- Washburn, B., 2020. Heron.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 1218–1230.