



HAL
open science

La modélisation 3D : une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme ? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments

Aurélie Prévost, Diana Rodriguez, Nathalie Molines, Benoit Beckers

► To cite this version:

Aurélie Prévost, Diana Rodriguez, Nathalie Molines, Benoit Beckers. La modélisation 3D : une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme ? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments. Revue Internationale de Géomatique, Lavoisier, 2011, 21 (4), 10.3166/rig.21.557-583 . hal-02151112

HAL Id: hal-02151112

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02151112>

Submitted on 7 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La modélisation 3D : une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme ? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments.

Aurélie Prévost* — **Diana Rodríguez *** — **Nathalie Molines*, **** — **Benoit Beckers***

* *Equipe de Recherche AVENUES - GSU, Université de Technologie de Compiègne - 1 rue du Docteur Schweitzer, BP 20529, F-60205 Compiègne cedex*

** *ISTHME – (CNRS -UMR 5600 « Environnement, Ville, Société »), Université de Saint Etienne - 6 rue Basse des Rives, F-42023 Saint Etienne cedex 02*

RÉSUMÉ. Les villes et plus particulièrement le bâti consomment énormément d'énergie. Si en France la réglementation thermique et les principes d'urbanisme destinés à améliorer l'efficacité énergétique existent, on montrera les limites des méthodes de calculs des apports solaires actuelles et la nécessité de réaliser des simulations d'apports solaires sur un contexte urbain modélisé et réaliste. L'article présentera les limites actuelles des modèles 3D urbains pour la simulation solaire, puis un modèle 3D du centre-ville de Compiègne exploitable pour les simulations physiques. On conclura en montrant les différentes perspectives d'application de ce type d'outil au bâti, et à la ville.

ABSTRACT. Built-up areas and more particularly buildings are important energy-consumers. If, in France, energetic regulation and principles of town planning intended to improve the energy efficiency do exist, we will show the limits of the methods of calculation for solar radiation and the necessity of making solar simulations on a realistic urban model. The paper will explain the current lack of 3D urban models for solar simulation, and then will present a 3D urban model of the city of Compiègne, adapted for simulations. The conclusion will show the different perspectives of application of such a tool, on the building, and for urban areas.

MOTS-CLÉS : modèle 3D urbain, simulation solaire à l'échelle urbaine, réglementation thermique, principes d'urbanisme, formes urbaines et ensoleillement.

KEYWORDS: 3D urban model, solar simulation in the urban scale, energetic regulation, principles of town planning, urban forms and solar energy.

1. Introduction

Comme le souligne Grenier, le secteur résidentiel et tertiaire français consomme plus de 43% de l'énergie finale (Données françaises de 2006, dans Grenier, 2007). Au sein même du parc bâti, ces consommations varient selon l'âge, le type de bâti, de chauffage et d'énergie utilisée (Brouant, 2007).

Au-delà des consommations du bâtiment en tant que tel, la forme urbaine est également mise en cause : on connaît l'attrait des français pour la maison individuelle, qui « est un rêve pour 82% des français » (Djefal *et al.*, 2004) et les problèmes liés au développement du périurbain et à la mobilité.

La prise de conscience de cette consommation énergétique excessive a amené à la définition de principes pour une conception du bâti moins gourmande en énergie. Nous connaissons les solutions techniques sur les équipements performants du bâti (techniques d'isolation, matériaux, matériel de ventilation, de chauffage, de refroidissement...) qui permettent de limiter les consommations d'énergie. Ces solutions sont nombreuses et trouvent leur place dans la conception des bâtiments neufs, ainsi que dans la réhabilitation énergétique de l'existant.

Cet article traite principalement du parc bâti à venir et de la réflexion sur l'efficacité énergétique la plus en amont possible qui l'accompagne : la conception doit désormais (ré)intégrer des principes logiques sur la localisation, l'orientation et la disposition des pièces de la construction avant même de penser à l'optimisation par les équipements techniques.

Par ces différents biais, la construction peut devenir « passive », « positive » ou encore « bioclimatique ». Derrière ces appellations se cachent des objectifs de consommations énergétiques chiffrés, encadrés par la réglementation énergétique à l'échelle du bâti.

L'article démontrera également que la question énergétique et sa réglementation doivent être appréhendées aux différentes échelles de la ville (bâti, quartier et ville). Pour cela, il expliquera les limites de calculs thermiques sur un bâtiment « isolé », et présentera les outils qui peuvent être mobilisés à l'échelle de la ville, notamment les documents d'urbanisme susceptibles de conditionner les formes urbaines et architecturales.

A partir de ces éléments de contexte, il abordera la question d'une évaluation énergétique qui prend en compte l'échelle supérieure au bâti, c'est-à-dire l'îlot ou le quartier. La méthode d'évaluation développée par notre laboratoire met en œuvre la création d'une maquette 3D de l'environnement urbain, et un outil de simulation du rayonnement solaire.

A l'échelle urbaine, la radiation solaire a d'abord été prise en compte au moyen de la seule géométrie des trajets solaires (Nobbs, 1922), éventuellement recréée sous forme de maquettes (Dufton *et al.*, 1932). Ces dernières ont lentement évolué de manière à fournir à grand frais des quantifications énergétiques ou lumineuses sur de petits ensembles urbains (Osser *et al.*, 2007). D'autre part, le flux radiatif est l'une des composantes principales des bilans de flux de matières et d'énergies introduits dans le cadre de la physique environnementale (Monteith *et al.*, 2007) et transposés

dans un milieu urbain à la géométrie fortement simplifiée (Oke, 1987), de manière à évaluer le climat urbain, et en particulier le phénomène d'îlot de chaleur (Grimmond *et al.*, 2011). Ces études globales ont été complétées par des études locales, réduites d'abord à l'effet canyon, c'est-à-dire au bilan des flux dans la coupe très simplifiée d'une rue étroite (Pearlmutter *et al.*, 2007).

La mise à disposition de modèles urbains plus réalistes, mais très simplifiés (en France, Bases de données de l'IGN) a ensuite permis à des chercheurs de prendre en compte dans leurs simulations cette géométrie limitée à un cadastre extrudé, c'est-à-dire des prismes droits à toits horizontaux (Unger, 2009). Ponctuellement, des modèles plus élaborés ont été proposés (Jochem *et al.*, 2009), mais, malgré les grands programmes publics (Kassner *et al.*, 2008) et privés, tel que le Projet Terra Dynamica¹, il n'est pas encore possible d'obtenir des modèles 3D réalistes avec la liberté nécessaire sur le choix du niveau de détail.

Les études du rayonnement solaire à l'échelle urbaine restent ainsi cantonnées à des laboratoires très spécialisés comme par exemple le Cerma², qui se sont dirigés ces dernières années vers un bilan complet en ondes courtes et en longues ondes, voire à l'étude du couplage rayonnement/aérodynamique (Bouyer 2009), ou à l'évapotranspiration des plantes en milieu urbain (Robitu M. *et al.*, 2006), sans que ces applications prometteuses, qui commencent juste à être calibrées au moyen de campagnes de mesures ad hoc (Hénon *et al.*, 2011), laissent encore entrevoir la possibilité d'une généralisation à l'ensemble des villes avec des moyens de modélisation raisonnables en coût et en temps. Parmi les connaissances qui manquent encore, il est essentiel de préciser la sensibilité des simulations par rapport au niveau de détail de la géométrie.

Nous verrons ainsi dans une première partie quelques notions fondamentales sur le rayonnement solaire, puis nous expliciterons quelles sont les règles qui cadrent ces problématiques énergétiques. Ensuite, nous soulignerons les pré-requis d'une simulation solaire et les limites des modèles 3D actuels. Nous terminerons cet article en présentant le modèle 3D réalisé pour le centre-ville de Compiègne et ses perspectives d'application.

2. Rappels des fondamentaux de la physique du rayonnement

L'énergie émise par le soleil, en grande partie électromagnétique, forme ce que l'on appelle le rayonnement solaire. Le rayonnement arrivant à la Terre (constante solaire = 1367 W/m^2) est atténué en traversant l'atmosphère, en fonction de l'épaisseur atmosphérique à parcourir, et donc de la hauteur du soleil sur l'horizon. De plus, le rayonnement rencontre un certain nombre d'obstacles atmosphériques et

¹ Porteur : Thalès Services. Partenaires académiques : CNAM – CEDRIC, EPST, ESSEC, Université de Paris 6 – LIP6. <http://www.capdigital.com/projet-terra-dynamica/>

² Laboratoire CERMA, UMR CNRS 1563, ENSA Nantes, 6 quai François Mitterrand, BP 16202, F-44262 Nantes cedex 2, France. <http://www.cerma.archi.fr/>

météorologiques qui modifient ses caractéristiques. Au final, le rayonnement arrive sur la surface terrestre sous deux formes :

- une composante directe, présente uniquement par temps clair. Elle concerne le rayonnement qui parvient en droite ligne du soleil, atténué par sa traversée de l'atmosphère.
- une composante diffuse, résultant de la diffusion du rayonnement par l'atmosphère (ciel bleu) et par les nuages.

La composante diffuse dépend fortement des conditions météorologiques, sa proportion pouvant varier de 10% par temps clair à 100% par temps très couvert. (Miguet, 2000). La composante diffuse est difficile à quantifier, car elle n'est pas distribuée de manière uniforme sur la voûte céleste et dépend en grande partie de l'état du ciel.

Ainsi, ces deux composantes, provenant des deux sources différentes appelées « primaire » (le soleil) et « secondaire » (le ciel) donnent le rayonnement global (G) qui s'exprime sous la forme :

$$G = D + dn + dc + RD + Rd \text{ (voir la définition des paramètres dans la figure 1.)}$$

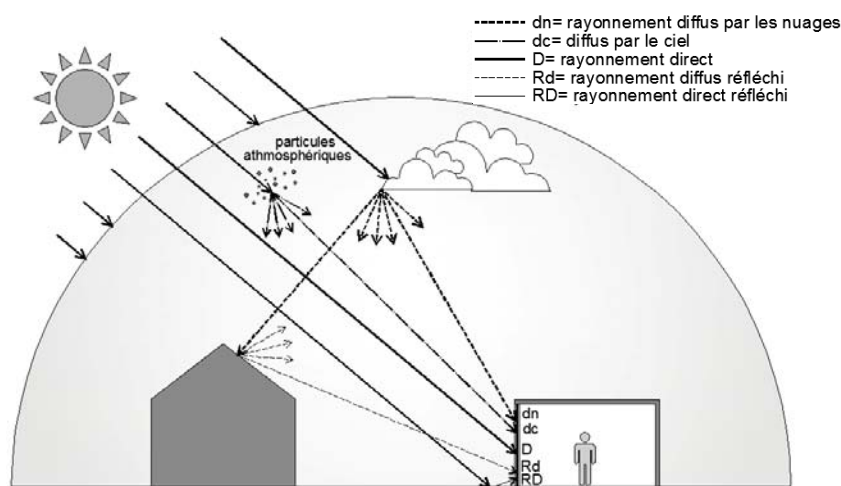


Figure 1. Radiation Globale et ses composants.

La quantité d'énergie reçue par une scène donnée dépend également des caractéristiques du site, à savoir :

- Les paramètres liés au lieu d'implantation pour ce qui touche à la géographie et au climat;
- les paramètres liés aux éléments composant l'environnement : morphologie architecturale et urbaine, relation entre les différentes constructions : les

bâtiments peuvent se masquer le soleil et une partie du ciel, mais leurs surfaces peuvent également réfléchir une partie du rayonnement, de manière spéculaire ou diffuse.

Cette relation entre le rayonnement (notamment la composante directe) et les paramètres environnementaux est à la base de nos travaux.

Les aspects spectraux du rayonnement ainsi que les comportements des matériaux suite à l'incidence du rayonnement peuvent jouer sur les variations de température de ces matériaux, et donc à l'échelle du bâti et même de la ville, sur le bilan énergétique global.

Enfin, lorsque le rayonnement atteint une surface, trois phénomènes peuvent avoir lieu :

- la réflexion diffuse (surfaces mates), spéculaire (vitrage) ou mixte (surfaces polies),
- la transmission (surfaces translucides)
- l'absorption par le matériau, et par conséquent l'élévation de sa température.

La question du choix des matériaux et de leur capacité à réfléchir, transmettre ou absorber va donc jouer sur les effets thermiques du bâti, et donc sur son efficacité énergétique (Cf point 3.1).

Ces quelques notions sur la physique du rayonnement permettent de comprendre l'origine de certains phénomènes énergétiques et thermiques à l'échelle du bâti, mais aussi d'explicitier le lien entre morphologie urbaine, rayonnement solaire et quantité d'énergie reçue.

La partie suivante s'attachera à préciser le cadre réglementaire à l'échelle du bâti et de la ville, et ses modalités d'application aux constructions. L'objectif étant de montrer que les réglementations locales (notamment les plans locaux d'urbanisme) pourraient être utilisées voire adaptées en vue d'optimiser les apports solaires en ville.

3. La réglementation au service de l'efficacité énergétique

Il existe deux moyens réglementaires de traiter la question énergétique : la première est la Réglementation Thermique à l'échelle du bâti et la seconde passe par l'urbanisme réglementaire, c'est-à-dire les règlements des plans locaux d'urbanisme (PLU) qui conditionnent les évolutions de l'urbanisation et plus particulièrement la forme et l'implantation des constructions.

3.1. La réglementation à l'échelle du bâti

Les évolutions de la Réglementation Thermique (actuellement en transition entre la RT2005 et la RT2012) vont dans le sens d'une très forte incitation à l'efficacité énergétique. Issues du protocole de Kyoto visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre en provenance des bâtiments, les Réglementations Thermiques ont pour but de fixer une limite maximale à la consommation énergétique des bâtiments

neufs et existants pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. Le maître d'ouvrage s'engage lors de sa demande de permis de construire à appliquer les règles de construction et donc la réglementation thermique.

Il doit pouvoir justifier du respect de la RT 2005 :

- soit au moyen d'une étude thermique. Le maître d'ouvrage doit dans ce cas pouvoir fournir une synthèse d'étude thermique.
- soit sans calcul à l'aide de solutions techniques agréées par le ministre chargé de la construction et de l'habitation.

Cependant, les modes de calcul des apports solaires associés à ces RT se limitent en fait à l'échelle du bâtiment, en ne considérant les masques produits par l'environnement bâti que d'une manière simplifiée (RT 2005 et RT Existants, 2007, 2008). Ils ne permettent pas d'évaluer correctement un « simple » îlot urbain composé de parties construites à différentes époques et avec des techniques variées. Plus qu'un problème de calcul, on peut penser qu'il s'agit d'une limitation intrinsèque de techniques nécessairement basées sur des valeurs forfaitaires et des calculs simplifiés. La thermique du bâtiment devrait être complétée par une thermique urbaine qui suive ses propres raisonnements et génère une réglementation originale pour le contrôle de l'efficacité thermique à l'échelle urbaine (problème multiéchelle, voir Beckers *et al.*, 2009).

Les plans locaux d'urbanisme (PLU) définissent des règles applicables simultanément à deux échelles : ils contiennent des règles d'urbanisme générales pour toute une zone urbaine, dont les principes concrets s'appliquent à toute nouvelle construction comprise dans cette zone. Si depuis la loi Grenelle 2, les PLU ont désormais la possibilité de fixer des critères de performance énergétique et environnementale, ils peuvent aussi comme auparavant recommander, voire inciter dans leurs règlements à la prise en compte des dispositifs « écologiques » intégrés au bâti tels que toitures végétalisées, panneaux photovoltaïques, etc. Les outils réglementaires tels que les « bonus de densité ou de constructibilité », obtenus sous réserve d'intégrer des équipements de production d'énergies renouvelables au bâti ou de remplir des critères de performances énergétiques peuvent aussi être mis en place par les communes.

De plus, les PLU permettent d'intervenir sur la question de l'ensoleillement du bâti, en conditionnant, par leurs règles deux éléments primordiaux : l'orientation des constructions et la gestion des masques solaires créés par l'environnement urbain.

En premier lieu, la question de l'orientation du bâti est souvent un élément négligé dans les plans locaux d'urbanisme qui se contentent souvent « en milieu traditionnel, de reproduire la règle quasi générale de la ville ancienne, c'est-à-dire l'implantation en bordure de voie. Or cette règle n'est pas la seule. On doit la combiner avec d'autres facteurs locaux, tels que l'orientation par rapport au soleil, aux vents dominants, aux pentes... » (Lassus, 2002). D'une manière générale, on s'accordera à dire que l'orientation Nord-Sud est favorable pour l'ensoleillement et la ventilation traversante.

Concrètement, de manière réglementaire, seuls deux articles des PLU sur les 14 mobilisables sont obligatoires (les articles 6 et 7). Le premier est relatif aux implantations des constructions par rapport aux voies et emprises publiques, et le

second à l'implantation des constructions par rapport aux limites séparatives. L'article 6 permet deux modalités d'écriture : « soit une implantation en limite de la voie ou de l'emprise publique (on utilise alors l'expression, parfois au prix d'un abus de langage, « à l'alignement » et l'objectif est alors de créer un front bâti sur voie), soit à une implantation en retrait de cette limite. » (Pittard, 2008). Quant à l'article 7, il oblige à une implantation du bâti, soit sur une ou deux des limites de l'unité foncière, soit à une distance définie de ces limites. L'orientation est contrainte par la structure viaire lorsqu'on est « à l'alignement », et est en revanche libre lorsque la construction est « en retrait » (s'il s'agit d'un retrait minimal et non imposé) et sous couvert d'une liberté d'implantation par rapport aux limites séparatives. Cependant, même lorsque le demandeur du permis de construire a le loisir de choisir l'orientation qui convient le mieux, on observe de manière générale que les constructions s'alignent les unes par rapport aux autres, selon une orientation certes en retrait, mais en « façade sur rue », même s'il n'y a pas de règle qui y oblige. Cela peut s'expliquer par le fait que les demandeurs des permis de construire s'alignent sur la forme du tissu existant, ce qui est parfois le cas des zones pavillonnaires. La modification des habitudes ne peut se faire que par un rôle de conseil : les instructeurs des permis de construire devraient informer les demandeurs sur ces questions. Le rôle des architectes serait aussi primordial, mais la situation française par rapport à la maison individuelle ne favorise pas de telles innovations : Seules 5% des maisons individuelles sont dessinées par des architectes (Masboungi, 2008).

Il va de soi que l'on ne peut pas imposer une orientation Nord-Sud sur tout un territoire communal. Premièrement, le choix d'une orientation N-S est à corréluer à la limitation des masques solaires induits par l'environnement de la construction. En effet, privilégier une orientation optimale des façades Nord-Sud n'a plus vraiment d'utilité si le rayonnement solaire est masqué par les constructions voisines. De plus, certains secteurs d'intérêt patrimonial et historique forts ne peuvent pas voir leur paysage urbain évoluer radicalement. En revanche, il s'agit de dépasser un mode de gestion du droit des sols conservateur, sur les secteurs où cela ne se justifie plus. Enfin, notons aussi que les règlements graphiques des PLU permettent d'assouplir le système en offrant la possibilité d'appliquer des règles sur les seules parcelles désignées par les documents graphiques (ADEME, 2006), ce qui permet de travailler à une échelle plus fine que celle du zonage courant.

Si l'ensoleillement du bâti est optimisé par des principes d'orientation adéquats, le PLU devra également permettre l'intégration de dispositifs architecturaux destinés aux protections solaires tels que les brise-soleil (par le biais de l'article 11 relatif à l'aspect extérieur des constructions).

Ensuite, le deuxième enjeu, celui de la limitation des masques solaires sur les constructions, peut être appréhendé par l'urbanisme réglementaire par trois biais : l'alignement des constructions entre elles, la distance les séparant, et leurs hauteurs.

Les principes dépendent évidemment des caractéristiques des zones urbaines concernées, notamment du point de vue de leur densité bâtie.

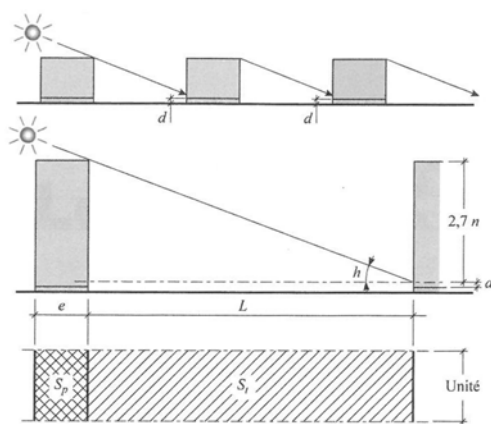
Dans les zones où la densité urbaine est importante et où il est difficile de compenser l'effet des masques par une distance suffisante entre les constructions, il peut être judicieux de garantir un alignement relatif entre les constructions afin de

limiter l'occultation de l'une par l'autre (l'article 6 permet de fixer un recul imposé par rapport à la voie).

Une quantité suffisante de lumière en cœur d'îlot peut être préservée en garantissant une constructibilité moindre à l'arrière des unités foncières. Enfin, dans certaines configurations, il peut être intéressant de limiter la hauteur des constructions voisines (notamment au sud) afin de limiter les masques et d'optimiser le potentiel d'implantation de panneaux solaires sur les toitures (ADEME, 2006).

Dans les zones moins denses, où il n'y a pas de nécessité (ou de possibilité) de densifier, il s'agira de limiter les masques en garantissant une distance minimale entre les constructions. Les PLU ont d'ailleurs les moyens de définir la distance minimale entre constructions en fonction de leur hauteur (ADEME, 2006). Pour les constructions en vis-à-vis, séparées par la voirie, les règlements peuvent soit définir la hauteur des constructions en fonction de la largeur de la voie, soit définir un recul par rapport à la voie selon la hauteur des constructions.

L'intégration d'un paramètre solaire à un calcul simple de distance entre bâtiments selon leur hauteur peut aussi être théoriquement envisagée, en s'inspirant du principe énoncé par Fernandez et Lavigne (Fernandez *et al.*, 2009). Ces auteurs ont montré, sur un cas simplifié de succession de bâtiments parallélépipédiques de même gabarit, une relation entre le Coefficient d'occupation des sols (COS), la hauteur du soleil au moment le moins favorable de l'année (h), le nombre de niveaux des immeubles (n), la distance entre deux immeubles (L) et leur largeur (e).



Les relations déterminées sont les suivantes :

$$\tan(h) = (2,7n - a) / L$$

D'où

$$L = (2,7n - a) / \tan(h)$$

Et le COS,
$$\frac{S_p}{S_t} = \frac{k}{\frac{1}{n} + \frac{2,7 - a/n}{e \times \tan(h)}}$$

Avec a : la hauteur des allèges des fenêtres, k ($k < 1$) qui caractérise la proportion de surface de plancher habitable sur la surface.

Figure 2. Schéma représentant un ensoleillement de façade, premier niveau compris. D'après (Fernandez *et al.*, 2009), p.291

3.2. La gestion de la question de l'énergie par l'urbanisme réglementaire à l'échelle de la ville

A l'échelle urbaine, la loi de programmation fixant les objectifs de la politique énergétique de 2005, dite loi POPE, prévoit de réduire l'intensité énergétique de 2% par an d'ici 2015, puis de 2,5% par an d'ici 2030 et atteindre 10% de la production d'énergie par les énergies renouvelables en 2010. Pour ce qui est de ses orientations effectives, la loi POPE implique directement les collectivités pour agir sur la forme urbaine par des principes d'urbanisation plus « raisonnés ». Les orientations de la politique énergétique définies dans l'annexe de la loi du 13 juillet 2005 précisent que « Les collectivités compétentes définissent des politiques d'urbanisme visant, par les documents d'urbanisme ou la fiscalité locale, à une implantation relativement dense des logements et des activités à proximité des TC et à éviter un étalement urbain non maîtrisé » (Brouant, 2007). Les lois Grenelle 1 et 2 ont renforcé ces objectifs en prévoyant l'instauration d'un certain nombre d'outils de politique énergétique (Schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie ; Plans climats-énergie territoriaux ; outils règlementaires pour les Schémas de Cohérence Territoriale et les Plans Locaux d'Urbanisme...).

En définitive, la loi POPE puis les lois Grenelle 1 et 2 mobilisent la planification urbaine et ses leviers que sont l'urbanisme réglementaire et ses documents-outils : le SCOT (Schéma de Cohérence Territoriale) à l'échelle supra-communale et le PLU (Plan Local d'Urbanisme) à l'échelle communale.

Concrètement, les orientations de planification contenues dans le PLU doivent être compatibles avec celles du SCOT, et ces orientations sont traduites de manière concrète dans le règlement du PLU. Ce dernier conditionne les constructions futures, que ce soit pour l'occupation du sol, la volumétrie, ou encore la disposition. Un zonage du territoire communal permet également l'adaptation des règles dictées selon la morphologie urbaine générale et les caractéristiques des espaces.

Ainsi, le règlement du PLU permet d'agir sur la question de l'énergie, du point de vue de la forme urbaine et des déplacements, par le biais de son zonage réglementaire. Il favorisera, par exemple, la mixité fonctionnelle pour éviter de tomber dans l'écueil du « zoning » cher à Le Corbusier (Le Corbusier, 1971).

Pour augmenter le nombre de logements en ville afin de répondre à la forte attractivité des agglomérations, il peut aussi encourager la densification de certains secteurs géographiques et, éventuellement, apporter dans les tissus périurbains de nouveaux types d'habitat dits « intermédiaires » ou « alternatifs ». Cela peut avoir un effet sur l'efficacité énergétique de la ville, car les bâtiments collectifs, même d'échelle raisonnable, ont globalement une conductance par unité de volume meilleure que la maison individuelle (Fernandez *et al.*, 2009).

Le PLU peut finalement s'attacher à la mise en œuvre d'orientations inter-sectorielles, telles que la cohérence entre transports urbains et urbanisme. Il s'agit de jouer sur des modulations de la densité bâtie à proximité de ces infrastructures. L'idée de construire avec une densité suffisante au voisinage des stations de transport en commun pourrait renforcer l'attractivité de ces modes en facilitant les déplacements des habitants (Jourdan, 2007).

Nous avons dans cette partie mis en évidence les limites des réglementations thermiques pour la prise en compte de l'énergie, et montré les leviers mobilisables d'un point de vue de l'urbanisme réglementaire. Or, si ces règles influent sur la forme des constructions et plus largement de l'urbanisation, il semble nécessaire de pouvoir en quantifier les effets. Disposer d'un modèle 3D urbain est nécessaire pour ce type d'études. Nous verrons au chapitre suivant que les modèles 3D actuels ne sont pas adaptés, et qu'il est nécessaire d'en créer un nouveau type, répondant à des critères spécifiques.

4. Les modèles 3D urbains actuels et leurs limitations pour les études solaires

4.1. Les besoins autour de la simulation solaire

Les enjeux autour du gisement solaire sont, essentiellement, au nombre de quatre. Le premier d'entre eux est celui du potentiel solaire, offert par les toitures et le haut de certaines façades, pour l'installation de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques. La demande actuelle impose à la fois une quantification globale de ce potentiel, y-compris à l'échelle territoriale, mais aussi une connaissance très fine des meilleurs emplacements à l'échelle locale, pour un usage individuel ou mutualisé. Dans le cas du photovoltaïque, la forte sensibilité aux ombrages, même partiels et temporaires (Woyte *et al.*, 2003), exige une modélisation prenant en compte tous les saillants du toit (cages d'ascenseur, cheminées...).

Le second enjeu est celui des apports solaires, qui participent au bilan énergétique des bâtiments, celui-ci étant fortement modifié dans un environnement dense, où les édifices se font de l'ombre les uns aux autres. Il faut distinguer les apports solaires sur les surfaces vitrées de ceux qui atteignent les façades opaques. Comme nous l'avons mentionné plus haut, il est malaisé d'utiliser ces apports solaires corrigés dans le cadre de la réglementation thermique actuelle. Un point d'entrée à l'échelle urbaine est offert par les études d'impact, qui consistent à évaluer l'impact d'une nouvelle construction sur l'ensoleillement des bâtiments existants. Ce problème devient directement quantifiable lorsque le rendement d'installations thermiques ou photovoltaïques est affecté.

Le troisième problème est celui de l'illumination naturelle, et du « droit au ciel », tel qu'il se manifeste dans les quartiers les plus denses où des réglementations spécifiques peuvent s'imposer (voir le cas extrême de Hongkong, Ng, 2003). Pour l'éclairage, la couleur des façades joue certainement un rôle important, mais qu'il reste encore très difficile de quantifier à l'échelle urbaine, à cause des temps de calcul qui deviennent considérables dès que l'on considère les réflexions multiples de la lumière. Toutefois, des progrès importants sont probables à moyen terme, et des études originales viendront sans doute bientôt enrichir la réflexion réglementaire à ce sujet.

Enfin, l'ensoleillement et l'ouverture des rues sur le ciel jouent un rôle très important dans la constitution des microclimats urbains (Martilli *et al.*, 2003). A cause de la dimension multi-physique du problème (échanges radiatifs, aéraulique,

évapotranspiration,...), les simulations ne sont pas encore assez précises pour pouvoir guider la réglementation, et des progrès marquants ne peuvent raisonnablement pas être attendus avant plusieurs années.

Nous avons montré précédemment que les évolutions récentes de l'urbanisme réglementaire produisent une demande de simulation numérique, touchant en particulier aux différents aspects du gisement solaire. Dans le paragraphe suivant, nous montrerons les progrès récents dans la modélisation 3D des ensembles urbains ainsi que leurs limites, puis nous décrirons un modèle 3D réalisé pour permettre des simulations de l'ensoleillement relatives aux deux premiers enjeux rappelés ci-dessus : le potentiel solaire et les apports solaires.

4.2. Limites des modèles 3D actuels

Les données SIG (Système d'Information Géographique) sont des données géographiques géo-référencées, qui contiennent entre autres les contours au sol, et la hauteur des bâtiments. De telles bases de données permettent de construire une maquette numérique 3D, laquelle est constituée d'un socle élaboré à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), représentant le relief, sur lequel on peut ajouter des informations diverses (photographies aériennes, cartes d'occupation du sol, bâtiments, etc.).

Depuis quelques années, de nombreuses collectivités ont lancé des projets liés à la réalisation de maquettes numériques 3D d'ensembles urbains. Les applications des modèles géométriques sont très variées, par exemple le développement urbain, l'aménagement du territoire, la concertation publique et l'accompagnement de projets architecturaux. On peut aussi les utiliser comme support pour différentes simulations physiques (radiation solaire, illumination, thermique urbaine, etc.).

En 2007, la norme CityGML (OGC, 2008) a été validée sur le plan international par l'OpenGeospatial Consortium, afin de fournir un modèle commun d'information sémantique pour la représentation des objets urbains 3D pouvant être partagé sur différentes domaines d'applications (Koehl *et al.*, 2008). Elle définit cinq niveaux de détails consécutifs (Level of Detail, LOD), étiquetés de 0 à 4.

Le LOD0 est constitué du modèle numérique de terrain (MNT), sur lequel une image aérienne ou une carte peut être drapée. Le LOD1 est le modèle de blocs, les bâtiments sont représentés par des polygones extrudés avec des toitures plates. Le LOD2 contient des bâtiments avec une typologie de toitures et les surfaces thématiquement différenciées. La végétation peut également être représentée. Le LOD3 indique un modèle avec des bâtiments détaillés, comportant des façades (avec ouvertures) et des toitures complexes. Des textures de haute résolution peuvent être drapées sur ces éléments. Il contient aussi de la végétation détaillée. Le LOD4 enrichit le LOD3 en ajoutant une modélisation intérieure des bâtiments (pièces, portes intérieures, escaliers et mobilier) (OGC, 2008).



Figure 3. Les 5 niveaux de détail (LOD) définis par CityGML. D'après (OGC, 2008), p. 9.

Néanmoins, ces modèles ne sont pas forcément adaptés pour les simulations physiques, en particulier pour la simulation du rayonnement solaire à l'échelle urbaine, car il est alors nécessaire de considérer comme objets modélisés les pentes des toitures - pour l'évaluation du potentiel solaire -, les fenêtrages - pour la quantification des apports solaires et l'évaluation de l'éclairage naturel des intérieurs -, et, finalement, les façades - pour les études d'ombrage, d'accès au soleil, de confort des espaces extérieurs et intérieurs et de dispositifs solaires passifs.

Les modèles LOD1 ne sont pas adéquats, car ils sont le résultat d'une simplification très forte, les bâtiments étant représentés sous forme de polyèdres simples (extrusions), en négligeant les fenêtres, les portes et les pentes des toitures. Même les hauteurs des bâtiments sont le résultat d'approximations et de généralisations. Les modèles LOD2 sont encore insuffisants, parce que les toitures sont issues d'une approximation typologique et que les fenêtrages apparaissent comme des textures et non comme des objets. Les modèles LOD3 et LOD4 sont très détaillés, et par conséquent trop lourds à manipuler pour les simulations, le but principal de ces niveaux de détail étant d'obtenir des rendus hyperréalistes.

La simulation à l'échelle urbaine de phénomènes physiques, tels que la lumière naturelle et les échanges radiatifs, est généralement très lourde. La géométrie doit donc être très simplifiée. Les bâtiments doivent être modélisés de manière à maintenir les grandes surfaces (façades et toitures) correctement orientées et sans solution de continuité. Il est également nécessaire de modéliser les fenêtrages, ainsi que, éventuellement, les protections solaires et le terrain. Actuellement, on ne peut obtenir de tels modèles que par l'emploi de méthodes manuelles : il est nécessaire de prendre des mesures *in situ*, des photographies, et de dessiner le modèle dans un logiciel de CAO. Les nouvelles techniques automatisées (type LIDAR) donnent des modèles en nuage de points que l'on ne sait pas encore adapter correctement pour la simulation solaire. L'utilisation de ces types de modèles pour les simulations solaires est cependant en train de se développer. Ainsi, Carneiro *et al.* proposent une approche hybride à partir des données LIDAR et des *vectorial digital maps* (données SIG) de l'empreinte des bâtiments pour l'interpolation d'un modèle de surface en « deux dimensions et demi », en distinguant les façades et les toitures pour calculer l'accès au soleil en milieu urbain et la performance énergétique (Carneiro *et al.*, 2009).

La reconstitution volumétrique d'ensembles urbains pour les simulations physiques est une question difficile. Comme le souligne Siret (Siret *et al.*, 2006) « le nombre, l'hétérogénéité et la complexité des formes bâties sont autant de facteurs rendant généralement laborieuse et coûteuse la réalisation de maquettes 3D de larges zones urbaines ». L'étude à l'échelle urbaine implique une simplification drastique de la géométrie qui permette toutefois de préserver la fiabilité des résultats. Voici donc le problème fondamental : définir le bon niveau de détail d'un modèle 3D urbain pour la simulation du rayonnement solaire.

5. Le modèle GISOL 3 et la simulation du rayonnement solaire sur la ville de Compiègne

5.1. Le modèle GISOL 3: un modèle adapté aux simulations solaires

Afin de dépasser les limitations des modèles 3D urbains disponibles et de réaliser à l'échelle urbaine des simulations de phénomènes physiques, tel que le potentiel solaire, un modèle géométrique 3D du centre-ville de Compiègne a été élaboré. Ce modèle, simplifié mais rigoureux, a été obtenu par l'emploi de méthodes manuelles. Il se compose de 21.735 triangles sous format STL, séparés en trois couches : façades 3759, fenêtres 7.402 et toitures 10.574.

Les façades et les toitures sont réduites aux grandes surfaces, correctement orientées et jointes sans solution de continuité. Les toitures ont été modélisées avec les lucarnes, mais les éléments décoratifs, les cheminées, l'épaisseur du mur et le terrain ont été négligés. Les fenêtres sont des surfaces planes situées à un centimètre au dehors de la paroi extérieure, afin d'éviter la modélisation de l'épaisseur du mur, ce qui augmenterait considérablement le nombre de triangles du modèle. Les limites du modèle sont représentées par une frontière simplifiée, laquelle permettra l'expansion graduelle du modèle sans besoin de répéter les calculs déjà réalisés. (Voir la figure 4).

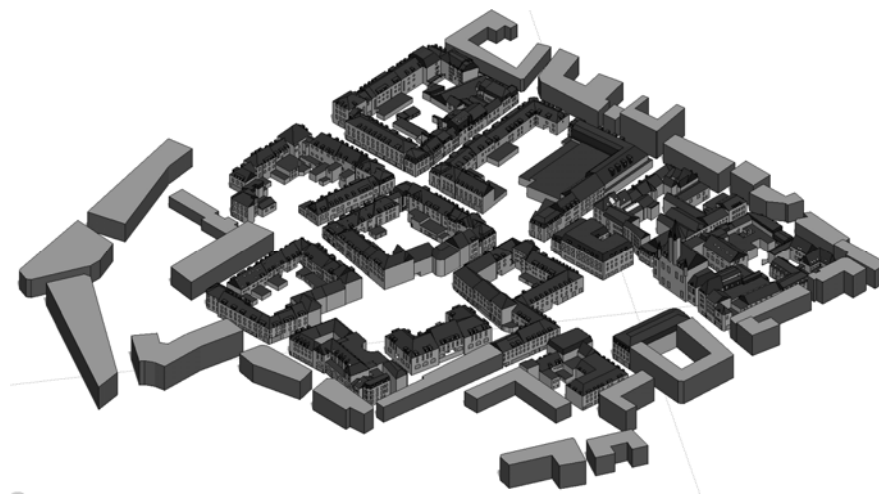


Figure 4. *Vue sud-ouest du modèle GISOL 3 dans Heliodon 2. Surface modélisée : 61900 m², périmètre : 1190 m.*

Les caractéristiques du modèle ont été définies en fonction des besoins autour du gisement solaire ainsi que des temps de calcul. Le niveau de détail proposé ne correspond strictement à aucun des niveaux définis par la norme CityGML. Il est beaucoup plus élaboré que le niveau LOD1 généralement utilisé dans les simulations physiques ; le niveau de détail de la toiture correspond au niveau LOD3, la façade correspond au niveau LOD2, tandis que les fenêtres ne correspondent à aucun niveau. Il s'agit donc ici d'un modèle intermédiaire, spécialement conçu pour la simulation du rayonnement solaire.

5.2. Étude de sensibilité du modèle de GISOL 3: Effet de l'environnement et du niveau de détail des toitures sur les résultats de simulation.

Afin d'évaluer si le niveau de détail du modèle proposé est adéquat, une étude de sensibilité par rapport aux choix géométriques a été réalisée. Pour ce faire, on a décidé d'utiliser deux paramètres physiques, les plus simples, permettant d'obtenir une première caractérisation du rayonnement solaire. Ils donnent des informations différentes, mais complémentaires : l'irradiation solaire directe (dispositifs solaires actifs et passifs) et le facteur du vue de ciel (éclairage naturel dû à la voûte céleste, refroidissement par le ciel en ondes longues).

L'irradiation solaire directe est évaluée à partir de la constante solaire en tenant compte de l'absorption atmosphérique par temps clair, ce qui correspond au modèle isotropique de Liu et Jordan (Liu *et al.*, 1960). Elle dépend de l'orientation du bâtiment et des obstructions. Cette quantification permet d'évaluer les apports

solaires et l'effet de masques produits. Etant donné que, sous les climats tempérés de la France, les apports solaires sont bienvenus pendant l'hiver, mais pas pendant l'été, les calculs du rayonnement direct ont été réalisés pour les solstices, ainsi que pour l'année complète.

Le facteur de vue de ciel (SVF) définit la quantité de ciel visible depuis un point (Souza *et al.*, 2003). Ce facteur ne dépend ni de la latitude, ni de l'orientation, ni même du moment de l'année, mais seulement de la géométrie. Une surface verticale et sans obstruction voit 50% de la voûte céleste, tandis qu'une surface horizontale dégagée voit 100% du ciel. Ce facteur permet d'évaluer le niveau du confort visuel et d'éclairage naturel à l'intérieur du bâtiment, et donc les économies en consommations électriques dues à l'éclairage artificiel. Il joue également un rôle important dans le bilan énergétique en ondes longues.

Ainsi, Ratti *et al.* ont introduit ce paramètre pour mesurer l'ouverture du tissu urbain sur le ciel, laquelle est associée, parmi d'autres indicateurs, à l'augmentation de la température dans le contexte urbain par rapport au contexte environnant rural, dénommé îlot de chaleur urbain (Ratti *et al.*, 2003).

Le rayonnement direct et le facteur de vue de ciel constituent un ensemble minimal de paramètres physiques, suffisant pour l'étude de sensibilité de la géométrie. Pour ce premier objectif, le couvert nuageux et les réflexions ne sont donc pas pris en compte (Beckers *et al.*, 2007); une fois le modèle 3D minimal validé, ce qui est le but de cette communication, le modèle physique pourra être progressivement enrichi.

L'étude de sensibilité de la géométrie a été réalisée avec le logiciel Heliodon 2, un outil de simulation interactive qui permet de quantifier l'impact énergétique et visuel de la radiation solaire dans les projets architecturaux et urbains³. Deux critères de validations sont présentés dans ce chapitre : l'environnement et la modélisation plus précise des toitures.

5.2.1. Effet de la modélisation de l'environnement sur les résultats de simulation solaire

Pour réaliser le bilan énergétique d'un bâtiment, la réglementation thermique française actuelle (RT2005) impose de quantifier les apports solaires. Néanmoins, la quantification des apports solaires et l'effet de masque produit par l'environnement immédiat du bâtiment sont réalisés sur des valeurs forfaitaires et des calculs simplifiés. Ce qui signifie que la forme du bâtiment et de son contexte urbain ne sont pas représentées géométriquement. Cette simplification nuit à la précision des calculs. Le but de ce premier test est de quantifier la marge d'erreur issue de ce type de simplification et de mettre en évidence l'importance de modéliser géométriquement les alentours du bâtiment. Pour ce faire, on a réalisé le calcul d'irradiation solaire directe sur un bâtiment du modèle, en distinguant les surfaces réceptrices (façades, fenêtres et toitures), puis, on a refait le calcul en ajoutant le contexte urbain, afin d'évaluer l'effet des masques produits.

³ Le logiciel Heliodon a été développé par Benoit Beckers et Luc Masset en 2003. La version actuelle Heliodon 2 utilisée ici date de 2009 (www.heliodon.net)

Les résultats de cette simulation (Cf tableau 1) montrent que le bâti environnant réduit considérablement les apports solaires du bâtiment, en particulier sur les façades et les fenêtres. Les toitures présentent une diminution tout-a-fait négligeable, parce que les bâtiments environnants sont de hauteur similaire au bâtiment étudié.

Élément	Energie totale reçue (kWh)		Différences par rapport au bâtiment isolé (Pourcentage)
	Bâtiment isolé	Bâtiment avec le contexte urbain	
Façades	605500	450300	-26%
Fenêtres	227600	173900	-24%
Toitures	1164400	1144300	-2%
Total	1997500	1768500	-11%

Tableau 1. Apports solaires annuels d'un bâtiment sans et avec contexte urbain.

Il faut remarquer que pour les calculs d'apports solaires, pour l'évaluation de l'illumination naturelle à l'intérieur du bâtiment et pour les études d'impact, les fenêtres sont les surfaces les plus sensibles. Afin de quantifier l'impact que produit le contexte urbain sur l'illumination naturelle des fenêtres, on a réalisé une étude de facteur de vue de ciel dans les deux configurations précédentes (voir la figure 5).

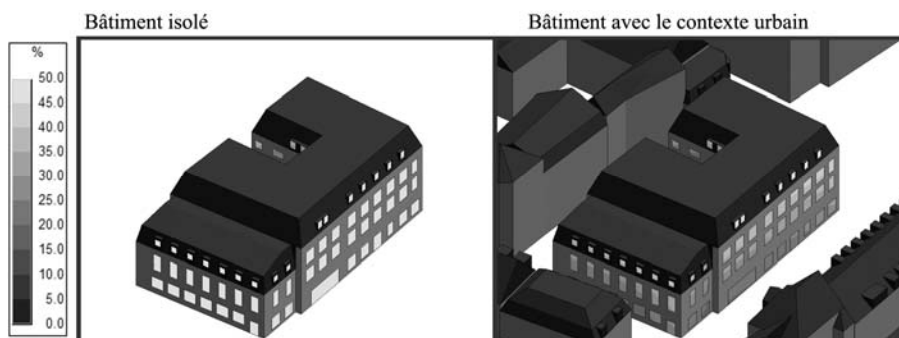


Figure 5. Comparaison des facteurs de vue du ciel sur les fenêtres d'un bâtiment sans et avec contexte urbain (en pourcentage).

L'histogramme suivant montre les valeurs du facteur de vue de ciel pour les 133 fenêtres dans les deux configurations. Par exemple, la fenêtre 1 a un facteur de vue du ciel de 50% dans le bâtiment pris seul et de 24% en considérant le contexte urbain, ce qui signifie une réduction de moitié. Globalement, les réductions

provoquées par le contexte urbain sont de 38%. Remarquons que pour les fenêtres 107 à 133, (fenêtres situées dans le renforcement du bâtiment en forme de U, voir la figure 5) le facteur de vue du ciel est déjà inférieur à 50% dans la configuration isolée, parce que le bâtiment n'est pas convexe et que certaines de ses parties masquent du ciel aux autres.

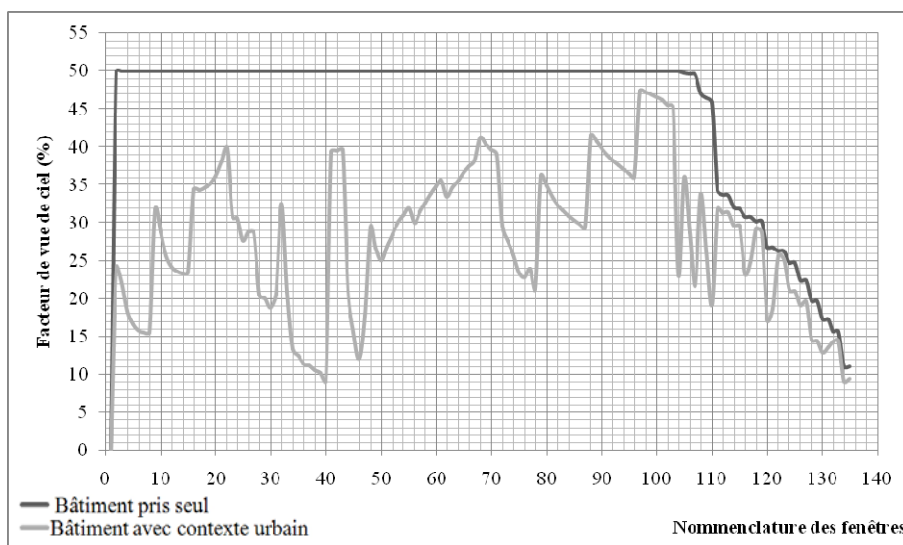


Figure 6. Facteurs de vue du ciel sur les fenêtres d'un bâtiment sans et avec contexte urbain (en pourcentage).

5.2.2. Niveau de détail des toitures pour la simulation du potentiel solaire.

Dans le nord de la France, on peut trouver des toitures très pentues et géométriquement complexes. Néanmoins, la plupart des simulations du potentiel solaire à l'échelle urbaine sont effectuées sur des modèles d'un niveau de détail LOD1, c'est-à-dire que les bâtiments sont représentés avec des toitures plates. Cette simplification de la géométrie introduit généralement une erreur supplémentaire sur la précision quant à la hauteur des bâtiments, car dans les bases de données géographiques (type BD TOPO®) cette précision dépend essentiellement de la source de la donnée, mais aussi de la classe de l'objet (IGN, 2009). Une étude de potentiel solaire a été réalisée afin de mesurer la marge d'erreur de modèles LOD1 et de déterminer le niveau de détail des toitures requis pour l'évaluation du potentiel solaire.

L'évaluation du potentiel solaire dans le modèle avec la toiture détaillée a été réalisée. Ce niveau de détail permet de localiser l'emplacement optimal des panneaux solaires, information impossible d'obtenir à partir des modèles du type LOD1. Néanmoins, on a constaté qu'une modélisation fine (réaliste) des toitures

n'est pas opérable à l'échelle urbaine, car elle est très coûteuse en main d'œuvre et en temps de calcul, et donne un modèle 3D difficile à manipuler.

Afin de réduire les temps de modélisation, et si possible de calcul, on a construit un modèle « intermédiaire » issu d'une réduction de la géométrie. Le but est qu'une seule personne puisse construire le modèle d'un ensemble urbain de ce type en une seule journée, afin d'obtenir une première estimation du potentiel solaire. Le modèle simplifié proposé n'est composé que de toitures à un, deux et quatre versants avec une valeur unique de pente à 45° – valeur moyennée pour le centre-ville de Compiègne. Les toitures plates sont respectées et les toitures en mansarde sont modélisées comme des toitures plates. Les lucarnes n'ont pas été modélisées. (Voir la figure 7.)

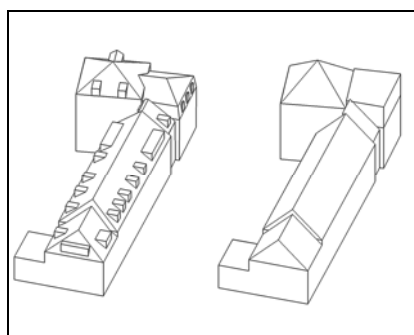


Figure 7. Niveau de détail de la toiture du modèle GISOL 3, à gauche, et de la toiture simplifiée, à droite.

Étant donné que les lucarnes n'ont pas été modélisées et afin de pouvoir comparer les modèles, on retire d'abord les lucarnes du modèle original, voir la figure 8, leur influence pouvant être prise en compte par post-traitement (réduction constante sur tous les îlots de 13% de l'énergie totale reçue).

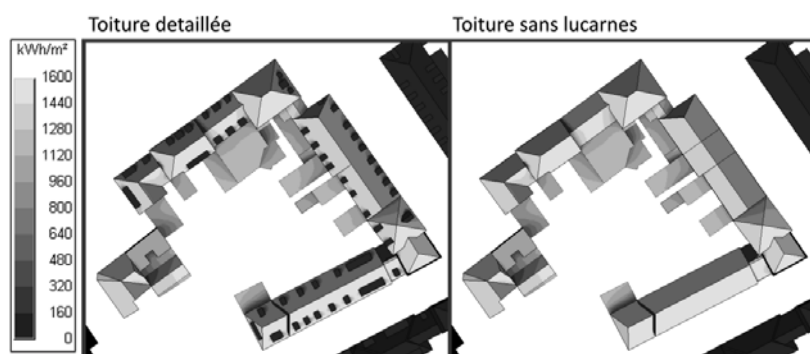


Figure 8. Niveau de détail de la toiture détaillé (modèle GISOL 3) et de la toiture sans lucarnes.

Le test suivant a consisté à comparer les différences d'irradiation sur trois configurations différentes : toiture sans lucarnes, toiture simplifiée et toiture plate. Les calculs d'irradiation ont été faits sur trois périodes : les solstices et le total sur l'année.

Niveau de détail de la toiture	Potentiel solaire (kWh)		
	Annuel	21 juin	21 décembre
Toiture sans lucarnes	9 402 200	50 150	4 380
Toiture simplifiée	9 707 400	51 140	4 730
Toiture plate	8 806 800	49 000	2 800

Tableau 2. *Potentiel solaire (kWh) des toits dans les trois configurations.*

Au vu des résultats, on peut considérer que cette simplification est pertinente et mieux adaptée pour l'évaluation rapide du potentiel solaire que la toiture plate. Celle-ci donne des résultats très acceptables pour l'année complète, ainsi que pour la saison d'été, mais les résultats en hiver deviennent très mauvais, et sont beaucoup mieux évalués par le modèle simplifié (erreur toujours inférieure à 10%, voir le tableau 3). De plus, la configuration avec les toitures simplifiées a permis de réduire le temps de calcul (de 30%) et le nombre de triangles (de 45%), ce qui rend le modèle plus facile à manipuler.

Niveau de détail de la toiture	Différences en pourcentage des valeurs du potentiel solaire par rapport à la toiture sans lucarnes		
	Annuel	21 juin	21 décembre
Toiture simplifiée	3%	2%	8%
Toiture plate	-6%	-2%	-36%

Tableau 3. *Valeurs d'énergie dans les deux configurations par période de calcul, exprimées comme différences en pourcentage par rapport à la toiture sans lucarnes.*

Les résultats obtenus dans le calcul annuel montrent que si l'objectif de la simulation est d'évaluer le potentiel solaire global, il est possible d'utiliser un modèle LOD1 car la différence au niveau du calcul annuel n'est que de -6% entre le modèle aux toitures plates et le modèle sans lucarnes, voir le tableau 3. Néanmoins, le modèle de toiture plate ne permet pas de déterminer l'emplacement idéal des panneaux solaires, problème crucial car l'effet d'ombre affecte sérieusement la performance des systèmes solaires actifs (voir la figure 9). On peut constater que seuls les modèles avec des toitures sans lucarnes et des toitures simplifiées donnent une précision suffisante sur l'emplacement idéal, ainsi que les valeurs d'énergie et leur distribution. Ces modèles avec toitures inclinées deviennent nécessaires et trouvent alors tout leur intérêt.

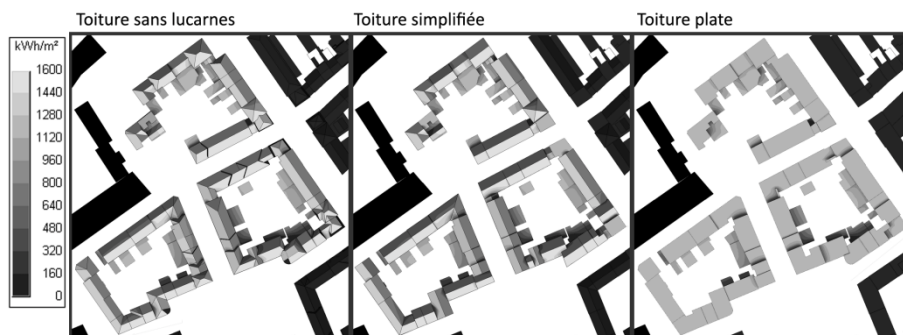


Figure 9. Irradiation solaire annuelle sur les toitures.

5.2.3. Conclusions sur l'étude de sensibilité du modèle.

Nous avons vu que les modèles géométriques urbains 3D existants n'ont pas un niveau de détail adapté aux critères de modélisation nécessaires pour les simulations solaires, soit par manque de précision (LOD1, et LOD2), soit par excès de détail (LOD3 et LOD4).

Le modèle GISOL 3 nous a permis d'évaluer et de valider le niveau de détail et la simplification nécessaire des modèles urbains pour ces simulations. Pour cela, plusieurs études sur GISOL 3 ont été réalisées, (dont deux présentées ici), la première destinée à valider l'intérêt de la modélisation de l'épaisseur des murs, la seconde concernant la pente des toitures, et la troisième à valider l'intérêt de la prise en compte du contexte urbain.

On conclura cette première étude de sensibilité du modèle en affirmant que le niveau de détail du modèle dépend de la finalité de l'étude envisagée et de la précision des résultats souhaitée. Par exemple, pour l'étude des apports solaires, et sans doute pour les études d'impact et l'évaluation de l'illumination naturelle, il est nécessaire d'intégrer l'épaisseur du mur, car les réductions de valeurs d'énergie et de facteur de vue de ciel sont assez importantes. Néanmoins, on a constaté que les temps de calcul deviennent prohibitifs, car le nombre de triangles dans les façades augmente considérablement. Afin d'éviter ce problème, nous essayons de définir des facteurs de correction pour une prise en compte statistique en post-traitement (Beckers *et al.*, 2010).

Le niveau de détail de la modélisation des toitures dépend aussi de l'étude envisagée : pour les calculs de potentiel solaire, il est évidemment nécessaire d'utiliser le modèle de toitures détaillées lorsque l'on s'intéresse à l'emplacement idéal de panneaux solaires. Ce modèle est indispensable si on veut réaliser des calculs sur les fenêtres des lucarnes. En revanche, pour une évaluation rapide, la simplification des toitures proposée est beaucoup plus facile à mettre en œuvre, et les résultats sont satisfaisants, même à l'échelle saisonnière.

Cette simplification pourrait être aussi utile pour la prise en compte de toitures inclinées sur l’empreinte solaire et le facteur de vue du ciel au sol, ainsi que pour des applications comme les études d’aménagement des espaces publics en considérant le droit au soleil (Capeluto *et al.*, 1997) et l’enveloppe solaire (Knowles, 2003), et pour les études du climat urbain (en particulier pour les rues des quartiers denses des villes du Sud où il peut être intéressant de limiter les apports solaires en été pour conserver la fraîcheur).

L’effet produit par le contexte urbain sur un bâtiment est très important. Les deux paramètres étudiés ont permis de mettre en évidence l’importance des études réalisées à l’échelle urbaine (Littlefair, 2001).

Si ces premiers résultats ouvrent un vaste champ de perspectives d’application, l’outil n’est pas encore complètement abouti et cette étude de sensibilité du modèle nécessitera d’être complétée par des tests plus nombreux, afin de définir des indicateurs à portée générale.

Nous avons présenté dans ce chapitre, par l’intermédiaire de ces deux tests, la nécessité de prendre en compte la ville dans son ensemble pour quantifier de manière réaliste les apports solaires. Si nous avons montré des perspectives d’applications à court terme de cet outil, nous verrons en conclusion de l’article d’autres objectifs prospectifs à plus long terme, en amont de la définition des principes d’évolution des villes.

6. Perspectives

Nous avons vu que les méthodes de calcul des apports solaires imposés par la réglementation thermique française en vigueur ne garantissaient pas des résultats proches de la réalité. Les calculs solaires, pour être valables, doivent intégrer le tissu urbain environnant. La méthode présentée ci-dessus, qui associe un modèle 3D urbain adapté aux simulations physiques à un logiciel de simulation solaire permet de fournir de meilleurs résultats. L’objectif n’est pas tant aujourd’hui de vouloir bouleverser les méthodes de réglementation thermique. Nous pensons cependant qu’à l’avenir, lorsque les modèles de villes 3D adéquats se seront généralisés, ce type d’outil pourra lui-même être généralisé pour les études de conception du bâti, pour les études d’impact d’une nouvelle construction sur les autres, et comme outil de labellisation énergétique spécifiquement urbain.

De plus, l’évolution de l’urbanisation est contrainte par l’urbanisme réglementaire. Nous avons vu à ce propos que les plans locaux d’urbanisme français disposent d’un certain nombre de « moyens » réglementaires pour améliorer la situation urbaine et bâtie par rapport à l’énergie. S’il y a des règlements de qualité, avec des règles a priori bien pensées, il n’y a pas pour autant de moyen de « vérifier » quantitativement l’impact de ces règles.

De ce fait, si on projette les développements possibles d’un tel outil, ce type de méthode pourrait servir à la définition en amont de certaines règles. Ainsi, par exemple, si la pente des toits est couramment définie dans les règlements d’urbanisme, une pente différente mais optimisée pour l’implantation de panneaux solaires pourra être préconisée.

Pour ce qui est de l'implantation des constructions sur l'unité foncière, les règlements d'urbanisme définissent des règles propres à un type particulier de zone. Ces règles (hauteur, emprise au sol, alignement ou retrait par rapport aux voies, distance entre bâtiments...) définissent ce que l'on appelle une « enveloppe » pour les évolutions de l'urbanisation. A l'avenir, on pourra imaginer l'utilisation de ce type de méthode dans la définition de ces « enveloppes ». En effet, par rapport à des orientations d'évolution des tissus urbains, transcrites réglementairement, il serait intéressant de comparer, quantitativement, des scénarios réglementaires par type de zone, par rapport à la question de l'énergie. Si des orientations de développement urbain sont à priori difficilement conciliables (par exemple : densifier, mais limiter les masques solaires), un tel outil pourrait permettre de trouver le meilleur compromis et de définir l'enveloppe réglementaire en conséquence. Ainsi, pour revenir à l'exemple de la pente des toits, si une commune désire optimiser l'utilisation des panneaux solaires, tout en conservant un style de toit proche de l'existant, l'outil pourra déterminer l'ordre d'idée qui permettra ce compromis et quantifier cet apport.

Dès lors que la poursuite du travail en cours aura amené à la définition d'une méthode plus rapide pour la constitution du modèle 3D, on peut imaginer que ce type d'outil, utilisé comme aide à la décision et de communication auprès des élus des villes, pourra favoriser une prise de conscience sur l'impact de règles trop conservatrices ou subjectives définies sur des secteurs géographiques sans réel intérêt patrimonial, et pourrait favoriser la modification de ces règles.

Que ce soit pour la thématique énergétique ou toute autre thématique de développement durable, nous pensons qu'il est indispensable de s'intéresser aux effets et aux possibilités d'optimisation des règlements d'urbanisme. D'une part, l'urbanisme réglementaire, qui joue pourtant un rôle important dans la « fabrique » de la ville de tous les jours, ne fait l'objet d'aucune réelle valorisation. De plus, ces questions d'analyse des effets des documents d'urbanisme du point de vue des apports solaires à l'échelle urbaine s'intègrent parfaitement dans les problématiques avancées par la récente loi Grenelle 2, notamment pour ce qui est de la mise en place des Plans climat-énergie territoriaux par certaines collectivités locales et pour revenir à l'échelle des PLU, de permettre de fixer des obligations en matière de performances énergétiques et environnementales (entre autres). Aussi, ces recherches se justifient aussi par les éléments d'évaluation environnementale que les PLU doivent comporter.

En effet, depuis la loi Solidarité et renouvellement urbain de 2000, tous les documents doivent comporter un « profil environnemental », une analyse des incidences notables prévisibles du plan, ainsi que la justification des orientations du projet urbain de la commune contenu dans le projet d'aménagement et de développement durable du PLU (PADD). Si la précision scientifique et donc la quantification n'est pas exigée pour ce type d'étude environnementale de droit commun, puisqu'il s'agit d'une obligation de moyens et non de résultat (Jegouzo, 2009), on peut supposer que la demande face aux préoccupations environnementales justifiera ce type de simulation.

Depuis la directive plans et programmes de 2001, traduite en droit français en 2004, certains documents d'urbanisme doivent fournir une évaluation

environnementale renforcée, qui prévoit en plus de l'étude de droit commun une présentation des mesures compensatoires aux effets du PLU et une analyse des effets du plan à l'expiration d'un délai de 10 ans après son approbation (délai passé à 6 ans avec la loi Grenelle 2). Face à cette obligation, on assiste actuellement à une effervescence d'études et de travaux d'Évaluation au sein des collectivités⁴. Ce renforcement de l'exigence environnementale ajoutée aux premières obligations relatives à la loi SRU semble conforter le besoin d'outils nouveaux pour la simulation de phénomènes en milieu urbain.

Quant au problème physique et numérique, pour terminer, on a montré qu'un modèle géométrique non standard est nécessaire pour une bonne qualité de simulation; le modèle ici proposé n'est pas directement opératoire, à cause du travail considérable que son élaboration requiert, mais il pourra servir comme objectif pour les chercheurs en reconnaissance de formes qui travaillent actuellement à l'élaboration semi-automatique de modèles 3D urbains. L'étude de sensibilité ici décrite a permis de montrer comment optimiser le niveau de détail requis, mais on peut déjà conclure que le modèle d'un quartier urbain comprendra forcément quelques dizaines de milliers de triangles. C'est un ordre de grandeur atteignable pour les simulations numériques actuelles. Il devrait donc être bientôt possible de résoudre complètement le problème radiatif à l'échelle du quartier étendu, voire à l'échelle urbaine. Cependant, les développements numériques complexes impliqués ne seront réellement utiles que s'ils sont réalisés dans le but de mieux quantifier les conséquences physiques de la réglementation urbaine (en termes d'économies d'énergies ou de bilan CO₂, par exemple), de manière à pouvoir guider son évolution. Ce dernier point justifie un travail pluridisciplinaire approfondi dont cette communication présente les tous premiers résultats.

Bibliographie

- ADEME (2006). *Réussir un projet d'urbanisme durable. Méthode en 100 fiches pour une Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU)*.
- Beckers B., Masset L., & P Beckers., (2007). « Una proyección sintética para el diseño arquitectónico con la luz del sol. » *8th Ibero-american Conference of Mechanical Engineering CIBIM08*, October 23-25, Cusco, Perú, Libro virtual: ISBN 978-9972-2885-3-1 (see Conference Proceedings, Aspectos medioambientales)
- Beckers B., & D Rodriguez., (2009). « Helping architects to design their personal daylight. » *WSEAS Transactions on Environment and Development Volume 5 (Issue 7)*: pp 467-477.
- Beckers B., Rodríguez D., Antaluca E., Batoz J-L., (2010). « About solar energy simulation in the urban framework: The model of Compiègne », 3rd International Congress Bauhaus SOLAR, Erfurt, Germany, 10-11 novembre 2010.
- Bouyer J., (2009). « Modélisation et simulation des micro-climats urbains. Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques du bâtiment », Thèse de

⁴ Voir la journée *Journée Réseau PLU 2008* – Evaluation environnementale des documents d'urbanisme organisée par le CERTU et le CGDD ou ont été présentées diverses méthodes.

doctorat. École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture de Nantes.

Brouant J.-P., (2007). « PLU et énergie. Fiche 1 Introduction ». *Séminaire écriture des PLU*, GRIDAUH

Capeluto I., & G.- E Shaviv., (1997). « Modelling the urban grids and fabric with solar rights considerations ». *Solar world congress*. Korea: ISES International Energy Society.

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 ». M. Sester et al. (eds.), *Advances in GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.

Djefal S., & S Eugene., (2004). « Etre propriétaire de sa maison, un rêve largement partagé, quelques risques ressentis. » *revue Consommation et modes de vie, CREDOC N°177*.

Dufton A.-F., Beckett H.-E., (1932). « The heliodon: an instrument for demonstrating the apparent motion of the sun ». *Journal of scientific instruments. Volume 9. Number 8.*: pp 251-256.(August 1932).

Fernandez P., & P Lavigne., (2009). *Concevoir des bâtiments bioclimatiques Fondements & méthodes. Paris, Le Moniteur.*

Grenier A., (2007). « Ville et énergie. Spécificité et complexité de la question en France ». *Les Annales de la recherche urbaine*, © MEDAD, PUCA. n°103: pp.128-136

Grimmond C.-S.-B., et al., (2011). « The international urban energy balance comparison project - Initial results from phase 2 ». *International Journal of Climatology* (2011), vol. 31, no 2: pp.244-272.

Hénon A., Mestayer P.-G., Groleau D., & J Vooght., (2011). « High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. » *Building and Environment* Volume 46, Issue 9, September 2011, pp 1747-1764.

Jegouzo Y., (2009). « Écriture du PLU. L'évaluation environnementale des plans locaux d'urbanisme ». *Séminaire écriture des PLU*, GRIDAUH

Jochem A., Höfle B., Rutzinger M., & N Pfeifer., (2009). « Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airborne Lidar Point Clouds for Solar Potential Assessment », *Sensors* 2009, 9, pp 5241-5262; doi:10.3390/s90705241, ISSN 1424-8220.

Jourdan G., (2007). Débat public sur le projet de grand contournement autoroutier de Toulouse – contribution de Gabriel Jourdan, maître de conférences en urbanisme, université Pierre Mendès France Institut d'urbanisme de Grenoble. Toulouse.

Institut Géographique National. (2009). « BD TOPO® Version 2 – Descriptif de contenu ». p8, 76-112.

Kassner R., Koppe W., Schüttenberg T., & G Bareth., (2008). « Analysis of the solar potential of roofs by using official lidar data. Archives », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing, pp 399-403.

- Knowles R.-L., (2003). « The solar envelope: Its meaning for urban growth and form. » *Energy and Buildings*, 35, 15–25.
- Koehl M., Meyer E., Koussa C., & C Lott., (2008). « SIG 3D ET 3D dans les SIG : Application aux modèles patrimoniaux ». *GéoEvénement 2008*, France (2008).
- Lassus P., (2002). *Harmonie et règle urbaine*, Economica, 369p.
- Le Corbusier., (1971). *La Charte d'Athènes*. Paris, Editions du Seuil (Edition de 1971).
- Littlefair P.-J., (2001). « Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment », *Solar Energy*, Volume 70, Issue 3, Pages 177-185.
- Liu B.-Y.-H., & R.-C Jordan., (1960). « The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse, and Total Solar Radiation ». *Solar Energy* 4, 1-19, 1960.
- Martilli A., Roulet Y.-A., Junier M., Kirchner F., Rotach M., & A. Clappier., (2003). « On the impact of urban surface exchange parameterizations on air quality simulations : the Athens case » *Atmospheric Environment*, 37, 2003, pp. 4217–4231.
- Masboungi A., (2008). « Dix leçons européennes sur le projet urbain ». Dans Cuillier, F (sous la dir. de), *Fabriquer la ville aujourd'hui*, Les débats sur la ville 7, a'urba, édition Confluences.
- Miguet F., (2000). « Paramètres physiques des ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain », Ph.D. Thesis, École Polytechnique de l'Université de Nantes, 360 p.
- Monteith J.-L., & Unsworth M.-H., (2007). *Principles of Environmental Physics. 3rd edition*, Elsevier.
- Ng, E. (2003). « Applying computational simulation results to the development of a design method for daylighting design and regulation in highdensity cities, Eighth Intern ». *BPSA Conf.* Eindhoven, Netherlands.
- Nobbs P.-E., (1922). « Planning for sunlight ». *Journal of the town planning institute. Volume 1.* Numero 9. : pp 6-12. (avril 1922) Montréal.
- OGC (2008). OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. T. H. K. Gerhard Gröger, Angela Czerwinski, Claus Nagel, Open Geospatial Consortium Inc.
- Oke T.-R., (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd edition, Taylor & Francis.
- Osser R., Andersen M., Norford L., (2007). « Development of Two Heliodon Systems and Recommendations for their Use ». *Proceedings of the solar conference 2007*, Volume 2.: pp 685-692. Etats –Unis.
- Pearlmutter D., Berliner P. & Shaviv E., (2007). « Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons », *Building and Environment*, Volume 42, Issue 6, June 2007, pp 2396-2409.
- Pittard Y., (2008). « L'écriture des articles 6, 7 et 8 du règlement des PLU. Fiche 3 Les spécificités de l'écriture de l'article 6. » *Séminaire écriture des PLU*, GRIDAUH

- Ratti C., Raydan D., & K Steemers., (2003). « Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate », *Energy and Buildings*, 35(1), 49-59.
- Robitu M., Musy M., Inard C., & D Groleau., (2006). « Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate » *Solar Energy*, Volume 80, Issue 4, April 2006, pp 435-447.
- RT 2005 - Méthode de calcul Th-CE (janvier 2007): Annexe à l'arrêté du 19 juillet 2006 portant approbation de la méthode de calcul Th-CE.
- RT Existant - Méthode de calcul Th-C-E ex (octobre 2008): Annexe à l'arrêté du 8 août 2008 portant approbation de la méthode de calcul Th-C-E ex pour les bâtiments existants
- Siret D., Musy M., Ramos F., Groleau D and P Joanne., (2006). « Développement et mise en oeuvre d'un SIG 3D en environnement urbain. » *RIG 16/2006*: pp 71-91.
- Souza L., Rodrigues D., Mendes J., (2003). « A 3D-GIS extension for sky view factors assessment in urban environment », *The 8th international Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management "CUPUM'03 Sendai"*, 27-29 May, Japan.
- Unger J., (2009). « Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database », *International Journal of Environment and Pollution* 2009, Vol. 36, No.1/2/3 pp. 59 – 80.
- Woyte A., Nijss J., & R Belmans., (2003). « Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: Literature review and field test results. » *Solar Energy* 74(3), 217-233, 2003