



HAL
open science

Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire

Thibaut Vermeulen

► **To cite this version:**

Thibaut Vermeulen. Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire. Construction durable. Université de Technologie de Compiègne, 2014. Français. NNT : . tel-01095637

HAL Id: tel-01095637

<https://theses.hal.science/tel-01095637>

Submitted on 15 Dec 2014

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.

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

THÈSE DE DOCTORAT

Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire

Thèse soutenue le 8 octobre 2014

par **Thibaut Vermeulen**

Avenues-GSU EA 7284

Spécialité : Physique urbaine

JURY DE THÈSE

Weihong ZHANG (Rapporteur)

Rajan FILOMENO COELHO (Rapporteur)

Rodolphe LE RICHE

Jérôme KÄMPF

Alain RASSINEUX

Catherine KNOPF-LENOIR

Benoit BECKERS (Co-directeur de thèse)

Pierre VILLON (Co-directeur de thèse)

Résumé

Les réglementations thermiques successives poussent les bâtiments à consommer de moins en moins d'énergie. Les performances énergétiques accrues des bâtiments passent notamment par une bonne utilisation du rayonnement solaire en tant que source de chaleur (en évitant les surchauffes), de lumière ou d'énergie pour les panneaux solaires. Si les principes de conception permettant de bien profiter de ce rayonnement sont connus à l'échelle d'un bâtiment, les travaux portant sur la recherche des bonnes configurations de bâtiments à l'échelle du quartier sont en plein développement.

A mesure que les logiciels de simulation du rayonnement solaire ou des besoins énergétiques s'améliorent et prennent mieux en compte la dimension urbaine, de nombreuses études sur la ville voient le jour. Les outils d'optimisation, par ailleurs largement utilisés dans le cadre du dimensionnement des systèmes du bâtiment et des matériaux composant son enveloppe ont cependant été peu utilisés dans l'étude des formes urbaines. Ceux-ci présentent cependant l'avantage de pouvoir explorer de grands espaces de paramètres de manière intelligente.

Ce travail de thèse a porté sur l'optimisation de formes urbaines par rapport au potentiel solaire. Dans ce cadre, un outil reposant sur un algorithme évolutionnaire a été mis en place. Celui-ci permet de trouver le positionnement optimal de volumes correspondant à des bâtiments soumis au rayonnement solaire. Pour cela, différents types de paramètres sont associés aux bâtiments (hauteur, orientation, position), tandis que le contexte urbain du quartier peut être considéré de plusieurs manières : dégagé, fixe (quartier pré-existant), ou périodique.

Les essais d'optimisation effectués cherchent à maximiser l'exposition au soleil pour des latitudes comprises entre 40° et 60°N , différentes périodes de temps et densités bâties. Une extension est de plus réalisée pour étudier les quartiers minimisant les besoins en énergie pour le chauffage. Dans l'ensemble des cas, les résultats montrent qu'il existe de nombreuses configurations quasi-optimales dont l'analyse permet d'identifier des comportements généraux du quartier en fonction du critère d'optimisation. Tous ces résultats sont encourageants et ouvrent des perspectives pour de futurs travaux.

Optimization of urban forms subject to solar radiation

Abstract

The recent thermal regulations lead to more efficient buildings. Their design includes a good use of sunlight as a heat source (while avoiding overheating), light or energy for solar panels. If the principles of design to make the most of this radiation are known at the building scale, studies are still under development at the district level.

As the software tools for the simulation of solar radiation or energy needs improve and better reflect the urban dimension, numerous studies at the district scale emerge. The optimization methods, although widely used to size the building systems and materials, are not common in the study of urban forms. However, these have the advantage of being able to explore large parameter spaces.

This thesis focuses on the urban form optimization with respect to the solar potential. For this purpose, a tool based on an evolutionary algorithm is implemented. Its goal is to find the optimal positioning of volumes corresponding to buildings subjected to sunlight. Different types of parameters are associated with buildings (height, orientation, position), while the urban context can be considered in several ways : open, fixed (pre-existing neighborhood), or periodic.

Optimization tests seek to maximize exposure to the sun for latitudes between 40° and 60°N , different time periods and built densities. An extension is further performed to investigate neighborhoods minimizing energy requirements for heating. In all cases, the results show that there are many near-optimal configurations that can be analyzed to identify general features of the good neighborhoods for each optimization criterion. All these results are inspiring and open perspectives for future works.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Benoit Beckers pour m'avoir attiré vers la recherche en me proposant de travailler dans sa thématique alors que j'étais encore en études d'ingénieur. Nos discussions sur le sujet et ses périphéries auront été pour moi une source d'enrichissement. Merci à Catherine Vayssade pour tout le temps passé à partager ses connaissances et à échanger ses idées. Travailler ensemble aura été un grand plaisir en plus d'être le fil conducteur de ces trois ans. Merci également à Pierre Villon pour son aide, notamment dans la formalisation des problèmes d'optimisation. Ses idées sont belles, qu'elles tapissent ou non les tableaux à portée. Je remercie par ailleurs le Collegium UTC/CNRS INSIS pour m'avoir accordé un financement pour ce travail.

J'en profite pour saluer l'UTC dans son ensemble, qui m'aura alimenté pour le troisième tiers de ma vie à l'heure ou j'écris. J'ai appris à prendre goût à notre relation et à en redemander. Je crois que j'ai gagné des années dans l'intervalle. Pas franchement plus ni moins que ce à quoi on pourrait s'attendre, simplement le chemin parcouru me laisse désormais se regarder. Parfois fièrement, même.

Un grand merci à Jérôme Kämpf pour m'avoir accueilli pendant deux mois au LESO-PB à l'EPFL et pour avoir partagé avec moi ses connaissances et ses outils. Ce changement de cadre au milieu de ma thèse aura été très bénéfique pour l'avancement de mon travail, en plus de me ressourcer dans la bonne humeur dynamique du labo et de la ville de Lausanne.

Je remercie également les rapporteurs de mon manuscrit de thèse, Rajan Filomeno-Coelho et Weihong Zhang, qui ont apporté des commentaires très riches sur mon travail, me permettant d'en affiner la présentation.

Je salue les membres du laboratoire AVENUES et notamment tous ceux avec qui j'ai partagé un bout de bureau. Parmi eux, un merci tout particulier à Luis, Raphaël et Laurent, avec qui travailler aura été un bon plaisir. Et bon courage à Samer pour la suite!

Après trois ans d'une curieuse formation personnelle, j'ai du mal à voir ma thèse autrement que comme le fruit de l'évolution de mon univers, qui inclut et dépasse la réalité de mon travail. J'aimerais remercier du fond du cœur toutes celles et tous ceux que j'ai aperçus, vus, rencontrés, côtoyés, connus et qui ont ainsi indirectement contribué à cet effort. J'ai cependant trop peur en vous citant de ne pas vous citer et préférerais à défaut vous cacher dans mes souvenirs. Amis de jeux (physiques ou non, les jeux). Cosiroteurs de cafés méridiens et de bières vespérales. Compagnons de discussions sans fin (quelque part on y est toujours, tant que l'on n'en renait pas). Colocataires (d'une constance parfois rare et chère). Vieux camarades de Compiègne parfois expatriés. Frère et sœur. Merci bien, c'était une chouette aventure.

Enfin, certainement le plus important, un grand merci à mes parents pour votre présence depuis le début et particulièrement à l'entonnoir de la rédaction. Cette thèse je vous la dois, tant vous m'avez alors soutenu en m'attachant au temps et au monde dans l'effort nécessaire qui me fuyait.

Table des matières

Introduction	1
1 Synthèse bibliographique	7
1.1 Rayonnement solaire	7
1.1.1 Trajets solaires, éléments géométriques	7
1.1.2 Composantes du rayonnement solaire	8
1.1.3 Grandeurs et unités radiatives	10
1.2 Ville et rayonnement solaire	12
1.2.1 Introduction	12
1.2.2 Approche géométrique pour la conception	14
1.2.2.1 Angles et projections	14
1.2.2.2 Les enveloppes solaires	17
1.2.3 Approche énergétique	19
1.2.3.1 Le calcul du rayonnement solaire du bâtiment à la ville	19
1.2.3.2 Modélisation de configurations théoriques	21
1.2.3.3 Modélisation pour l'analyse de cas réels	22
1.2.4 Approche physique pour la compréhension du climat urbain	23
1.3 Optimisation énergétique du bâtiment et de la ville	24
1.3.1 Optimisation de forme : quelques définitions	25
1.3.1.1 Définition mathématique	25
1.3.1.2 Les familles d'optimisation de forme	25
1.3.2 Optimisation énergétique du bâtiment et de la ville	26
1.3.2.1 Problèmes de dimensionnement	27
1.3.2.2 Optimisation de forme à l'échelle de la façade	28
1.3.2.3 Optimisation de forme à l'échelle du bâtiment	30
1.3.2.4 Optimisation de forme à l'échelle urbaine	32
1.3.2.5 Algorithmes d'optimisation employés	33
1.4 Conclusion	34
2 Développement d'un outil d'optimisation de formes urbaines pour le rayonnement solaire	37
2.1 Géométrie	38
2.1.1 Représentation en blocs	38
2.1.2 Représentation par des bâtiments sur des parcelles	39
2.1.2.1 Transformation du bâtiment et paramètres associés	40
2.1.2.2 Gestion des contraintes stériques	44
2.1.3 Cellules	46

2.1.3.1	Définition de la cellule	46
2.1.3.2	Calcul sur la cellule urbaine	47
2.2	Calcul du rayonnement solaire	49
2.2.1	Position du soleil	49
2.2.2	Rayonnement sur la scène urbaine par ciel clair	51
2.2.2.1	Modèle de rayonnement direct par ciel clair	51
2.2.2.2	Calcul des ombres	52
2.2.3	Discrétisation du ciel	54
2.2.4	Facteur de vue du ciel	55
2.2.5	Ciel cumulé	57
2.3	Optimisation	58
2.3.1	Introduction aux algorithmes évolutionnaires	58
2.3.1.1	Bref historique : de la théorie darwinienne...	58
2.3.1.2	... aux algorithmes évolutionnaires	59
2.3.2	Caractéristiques de l’algorithme utilisé	60
2.3.2.1	Opérateur de sélection	60
2.3.2.2	Opérateur de croisement	60
2.3.2.3	Opérateur de mutation	62
2.3.2.4	Opérateur de réparation	62
3	Application à l’optimisation du potentiel solaire de quartiers	65
3.1	Fonction objectif liée au potentiel solaire sur le quartier	65
3.2	Validation sur un cas test de grille orthogonale	67
3.2.1	Le cas “Manhattan” dans la littérature	67
3.2.2	Validation sur le cas d’étude	68
3.3	Optimisation de la forme d’un quartier en milieu dégagé	71
3.3.1	Potentiel maximum sur un quartier	71
3.3.2	Relation entre densité et ensoleillement	72
3.3.3	Quartier hexagonal	76
3.3.4	Quartier hexagonal et facteur de vue du ciel	80
3.4	Optimisation de la forme de bâtiments dans un contexte urbain	81
3.4.1	Présentation du cas d’étude	81
3.4.2	Résultats	83
3.5	Optimisation de cellules urbaines	87
3.5.1	Conditions d’optimisation et cas d’étude	87
3.5.2	Résultats d’optimisation des cellules	90
3.6	Synthèse des résultats	99
4	Optimisation des performances énergétiques d’un îlot urbain avec CitySim	101
4.1	Problème d’optimisation	102
4.2	Méthodologie	104
4.2.1	Conditions de simulation des besoins de chauffage	104
4.2.2	Contenu de la simulation avec CitySim	105
4.2.2.1	Échanges radiatifs	106
4.2.2.2	Modèles d’occupation	109
4.2.2.3	Modèle thermique	109
4.2.3	Méthode d’optimisation	110

4.3	Résultats et analyses	111
4.3.1	Optimisation avec les hauteurs seules	111
4.3.2	Optimisation avec les hauteurs et les fractions de façade vitrées	113
4.3.3	Optimisation avec les fractions vitrées seules	114
4.4	Synthèse des résultats	115
	Conclusions et perspectives	117
	Table des figures	123
	Liste des tableaux	129
	Bibliographie	131

Nomenclature

Abréviations

BBC	Bâtiment basse consommation
BEPOS	Bâtiment à énergie positive
ES	<i>Evolution strategy</i>
FVC	Facteur de vue du ciel
GES	Gaz à effet de serre

Paramètres géométriques

k	Nombre d'étages d'un bâtiment
h	Hauteur d'un bâtiment
r	Fraction de façade vitrée
x_G, y_G	Centre de l'empreinte au sol d'un bâtiment
λ	Coefficient de déformation par affinité d'un bâtiment
θ	Angle de rotation d'un bâtiment
N_{cell}	Dimensions d'une cellule urbaine

Symboles dans la simulation du rayonnement solaire

m	Nombre de masse optique
A_E, A_o	Aire éclairée/à l'ombre d'une surface
G_{sc}	Constante solaire (W/m^2)
I_{bn}	Rayonnement direct normal (W/m^2)
I_{dh}	Rayonnement diffus horizontal (W/m^2)
R	Radiance (ou luminance énergétique, en $W/(m^2.sr)$)
α_s	Hauteur solaire
δ	Déclinaison solaire
γ_s	Azimut solaire, par rapport au sud (> 0 à l'ouest)
ζ	Angle d'incidence moyen du rayonnement provenant d'une tuile de ciel
θ	Angle d'incidence du rayonnement sur une surface
θ_z	Angle solaire zénithal
τ	Transmittance atmosphérique
ω	Angle solaire horaire (pour la position du soleil) ou angle solide (calcul de visibilité)
Φ	Latitude ($^\circ$)
Ψ	Altitude (m)

Paramètres d'optimisation

- λ nombre d'enfants dans le cadre de l'algorithme ($\mu+\lambda$ -ES)
- μ nombre de parents dans le cadre de l'algorithme ($\mu+\lambda$ -ES)

Introduction

Contexte énergétique dans le bâtiment en France

Le thème abordé dans cette thèse concerne les relations entre la géométrie urbaine et le rayonnement solaire. Ce sujet se positionne dans un contexte plus large de réduction de l'impact des bâtiments sur l'environnement et d'amélioration du confort urbain. Le contexte de ce travail hérite de deux décennies de mesures s'échelonnant depuis les engagements internationaux jusqu'aux réglementations nationales.

Le secteur du bâtiment (résidentiel-tertiaire) représente le premier consommateur d'énergie en France, avec 44,5 % des consommations d'énergie finale¹ en 2012 (figure 1). Le secteur résidentiel représente à lui seul les deux tiers de cette tranche (46,0 sur 68,7 Mtep¹ en 2012) (SOeS, 2014b). Depuis 2001, les consommations aussi bien du résidentiel que du tertiaire restent quasiment constantes.

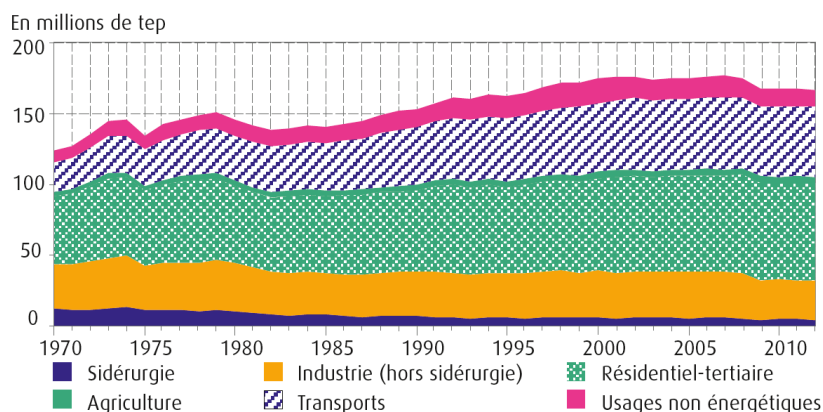


FIGURE 1: Consommation d'énergie finale par secteur. Source : (SOeS, 2014b)

La plupart des engagements à l'échelle nationale, européenne et mondiale définissent leurs objectifs en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les émissions induites par la consommation d'énergie du secteur résidentiel-tertiaire représentent, en 2013, environ

1. L'énergie finale est l'énergie "compteur" consommée par le client et facturée par le fournisseur d'énergie. Elle s'oppose à l'énergie primaire qui inclut les pertes lors du transport et de la production de l'énergie ainsi que les consommations du producteur et du transformateur de l'énergie.

1. tep : tonne équivalent pétrole

21 % du total national (environ 17,2 % par combustion d'énergie et 3,8 % via l'électricité) (SOeS, 2014a).

Au niveau mondial, le protocole de Kyoto, signé en 1997, est l'engagement de référence en ce qui concerne les réductions d'émissions de GES. Il engage entre autres l'Union Européenne à prendre des dispositions en vue de limiter pour la période 2008-2012 ses émissions de gaz à effet de serre (en tonnes équivalents CO₂) à 92 % de leur niveau de 1990. La France est soumise par ce biais à ce même objectif qui a presque été atteint en 2012 (réduction de 7,5 % au lieu de 8 % de ses émissions) (SOeS, 2013).

Plus récemment, en 2008, l'Union Européenne a mis en place le « paquet énergie climat », également appelé 20-20-20. Cet engagement soutient trois objectifs pour 2020 : réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre, porter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen à 20 %, et augmenter l'efficacité énergétique de 20 %. Ces objectifs forment une étape supplémentaire après le protocole de Kyoto qui, lui, n'a pas pour l'heure de successeur (un accord signé à Durban en 2011 le prolonge, sans donner de nouveaux objectifs). Ce cadre est appuyé par des directives européennes plus ciblées, entre autres concernant le secteur du bâtiment.

Parallèlement à ces accords internationaux, la France s'est posée comme objectif en 2003 de diviser par quatre les émissions de GES par rapport au niveau de 1990 d'ici 2050. Cet objectif « facteur 4 », validé par le Grenelle de l'environnement en 2007, concerne l'ensemble des secteurs émetteurs, et notamment le secteur du bâtiment. Dans le cadre d'un exercice prospectif publié en 2012, l'ADEME¹ prévoit que le facteur 4 à l'échelle de la France se répercuterait sur les secteurs du résidentiel et du tertiaire par des baisses respectives des émissions de GES de 86,36 % et de 93,33 % par rapport aux niveaux de 1990 (ADEME, 2012). Ce ne serait ainsi pas un facteur 4 mais un facteur 10 appliqué au secteur qui nous intéresse qui, selon cette étude, permettrait de remplir les objectifs nationaux tous secteurs confondus. Bien entendu, cet exercice suppose des politiques volontaristes fortes, qui impliqueraient d'une part que les nouveaux bâtiments soient tous à des niveaux de consommation faibles ou nuls et que, d'autre part, l'ensemble du parc existant ait été rénové.

Dans ce contexte général incitant à différentes échelles à la création de bâtiments consommant peu d'énergie, des réglementations thermiques toujours plus contraignantes ont vu le jour. La première de ces réglementations est sortie en 1974, en réaction au premier choc pétrolier qui a fait prendre conscience que l'accès à une énergie à faible coût pouvait ne pas être éternel et infini. Cette réglementation introduit notamment des méthodes de calcul de coefficients de déperditions thermiques par les parois et la ventilation. Depuis, des objectifs de consommation chaque fois plus faibles ont été requis par les réglementations de 1982, 1988, 2000, 2005, et 2012. La dernière réglementation en date, la RT2012, impose pour les nouveaux bâtiments un niveau de performance correspondant à l'ancienne certification BBC (bâtiment basse consommation). Cette réglementation, tout en s'inscrivant dans le programme du facteur 4, permet d'anticiper

1. Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie, établissement public français

la directive européenne 2010/31/UE¹ (EPBD, 2013) qui demande que « *les États membres veillent à ce que :*

- a) *d'ici au 31 décembre 2020, tous les nouveaux bâtiments soient à consommation d'énergie quasi nulle ; et*
- b) *après le 31 décembre 2018, les nouveaux bâtiments occupés et possédés par les autorités publiques soient à consommation d'énergie quasi nulle. »*

L'étape suivante, prévue pour 2020, est de faire des bâtiments à énergie positive (produisant plus qu'ils ne consomment) la norme (EPBD, 2013). Au-delà des réglementations thermiques, différents labels permettent de valider des niveaux de performance dépassant les exigences nationales. Ainsi, le label BBC, défini dans le cadre de la réglementation de 2005, est aujourd'hui la règle, tandis que le label BEPOS (bâtiment à énergie positive) permet d'anticiper les exigences de la réglementation de 2020. De plus, dans l'optique de pousser la qualité des bâtiments de manière plus générale, au-delà de leur seule consommation d'énergie, des certifications environnementales ont vu le jour (HQE et H&E, équivalents du LEED américain et du BREEAM britannique). Leurs objectifs s'attachent à améliorer la conception, la gestion, le confort et la santé dans les bâtiments.

L'ensemble de ces pratiques, qu'elles s'alignent sur les exigences réglementaires ou qu'elles visent une certification du bâtiment, demandent de porter un soin croissant à la conception des bâtiments pour les rendre à la fois performants et confortables. Pour parvenir à des niveaux de consommation très faibles, un bâtiment doit s'isoler de l'extérieur de manière à conserver sa chaleur en hiver et sa fraîcheur en été. En hiver, le rayonnement solaire peut combler dans de tels bâtiments une part importante des consommations, tandis qu'en été, quelques rayons de trop, et le bâtiment peut entrer en surchauffe. De plus, depuis quelques années, la part de façades vitrées augmente dans les conceptions architecturales à la faveur des améliorations en matière de performances thermiques des vitrages. La RT2012 impose à ce propos un minimum : la surface vitrée doit représenter 1/6 de la surface habitable de la nouvelle construction. Ces évolutions ont notamment pour effet d'augmenter les potentiels effets positifs et négatifs du rayonnement solaire évoqués plus haut.

La précision de la conception du bâtiment vis à vis des rythmes solaires est dès lors un enjeu de sa qualité. Les bonnes caractéristiques à mettre en œuvre sont plutôt bien connues lorsqu'il s'agit d'un bâtiment en milieu dégagé. Le jeu de conception inclut les protections solaires du bâtiment, couplées à une disposition judicieuse des pièces et éventuellement quelques arbres bien placés. Les contraintes sont plus importantes lorsque l'on passe à l'échelle urbaine. Les bâtiments se masquent alors les uns les autres, et réfléchissent une part du rayonnement. Ainsi, une surface au nord pourrait par exemple recevoir de la lumière réfléchie sur une surface orientée au sud, sous condition que celle-ci ne soit pas à l'ombre. La forme des édifices alentour et leur disposition dans un quartier sont donc implicitement des paramètres impactant la qualité d'un bâtiment construit dans un milieu dense. Cependant, dans la réglementation thermique

1. Directive 2010/31/UE du parlement européen et du conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments

de 2012, les masques solaires sont simplifiés par des angles d'obstruction verticaux définis par tranche azimutale, ce qui réduit la complexité de la scène urbaine et par conséquent les relations potentielles du bâtiment évalué avec elle.

La recherche de qualité dans la conception des espaces bâtis tend à s'étendre à l'échelle du quartier. Le nombre d'écoquartiers, quartiers visant un impact écologique faible, est en effet chaque année plus important, tandis que le ministère du logement et de l'égalité des territoires en fait une vive promotion via un label et des appels à projets¹.

Dans ce contexte, la compréhension de la physique urbaine d'une part, la mise à disposition de nouveaux outils adaptés à la conception à l'échelle urbaine d'autre part constituent des enjeux pour les décennies à venir. L'objectif du présent travail de thèse est de fournir des éléments dans l'une et l'autre de ces directions (en réalité complémentaires), dans le cadre de l'amélioration de la performance énergétique et de l'accès au rayonnement solaire des bâtiments en ville.

Objectifs de la thèse

Quand il s'agit de définir un projet urbain, deux principaux cas apparaissent :

- soit un nouveau quartier (écoquartier ?) doit être créé, avec un nombre de logements à bâtir et un terrain prédéfinis ;
- soit, dans le cadre d'un réaménagement urbain, un nouveau bâtiment (ou un petit ensemble de bâtiments) est créé dans un contexte bâti pré-existant. Les contraintes sont fortes : positionnement, hauteur, cohérence urbaine, et sont consignées notamment dans les règlements d'urbanisme.

L'aménageur a dans chacun de ces cas certaines libertés dans la disposition des bâtiments. La question est dès lors de savoir distinguer quelles sont les meilleures configurations urbaines. Les outils de simulation développés dans les 20 dernières années permettent désormais d'avoir des calculs efficaces d'un grand nombre d'indicateurs notamment en lien avec les apports solaires ou les besoins énergétiques. Ces outils peuvent être précieux pour justement parvenir à comparer et discriminer les quartiers par rapport à une série de critères.

Les objectifs de ce travail de thèse sont de plusieurs ordres, et se sont dans la pratique axés autour de deux approches différentes de la ville.

La première approche considère la ville comme un objet géométrique soumis à un phénomène physique : le rayonnement solaire. Cette première approche est motivée par la **compréhension des réactions de la forme de la ville par rapport à une sollicitation physique**. Elle peut être vue comme une première étape permettant de travailler sur les volumes urbains, en amont du projet de conception. Plusieurs questions sont soulevées dans le cadre de cet axe d'étude :

1. <http://www.territoires.gouv.fr/les-ecoquartiers>

- Étant donné un critère lié à l'énergie ou au rayonnement solaire, existe-t-il des formes urbaines, des motifs repérables, meilleurs que d'autres par rapport à ce critère ?
- Existe-t-il des éléments de ville bons "en soi" vis-à-vis du rayonnement solaire, qui, en les répétant dans un tissu urbain, permettraient de s'approcher du maximum pour un critère donné ?
- Considérant le rayonnement solaire, est-il possible de retrouver d'anciennes préconisations urbaines par le biais de l'optimisation ?
- Autrement dit, comment se positionnent les meilleures configurations urbaines par rapport à notre intuition ?

La seconde approche se place davantage dans le cadre d'un projet urbain hypothétique : un quartier doit être construit, soumis à diverses contraintes propres au projet, mais aussi aux règlements ou au contexte urbain. Dans ce cadre, comment proposer des outils qui permettraient, tout en respectant ces contraintes **d'orienter le choix d'un aménageur ou d'un architecte vers des solutions plus performantes** (moins gourmandes en énergie, plus confortables, etc.) ? Cette approche, plus pratique, est également l'objet de plusieurs réflexions :

- Est-il possible d'avoir un diagnostic d'un quartier qui permette de tirer quelques guides pour la conception ?
- Comment représenter les résultats d'optimisation ?
- Certains paramètres de la ville sont-ils plus importants que d'autres ?
- Est-il possible de séparer les problèmes selon différentes échelles (façade, bâtiment, quartier) ?

Ces deux approches nécessitent de construire des quartiers paramétrés, ce qui pose éventuellement quelques questions supplémentaires :

- Quels types de paramètres peuvent être associés à la génération de bâtiments ?
- Comment générer des quartiers qui soient réalistes ou à défaut interprétables comme tels ?
- Quelles contraintes utiliser sur les paramètres ? Comment les gérer ?

Une méthode d'optimisation numérique a été utilisée pour ce travail comme outil d'exploration des différentes configurations urbaines possibles et de recherche des meilleurs quartiers. Ce choix méthodologique est lui-même associé à un certain nombre de questionnements :

- Est-il possible de trouver efficacement les quartiers optimaux pour un ensemble de paramètres et une fonction objectif donnés ?
- Quels sont les facteurs limitants (nombre de paramètres, contraintes ?)
- Comment paramétrer l'outil d'optimisation pour garantir les meilleures performances ?

Enfin, d'un point de vue pratique, sachant que le recours à une méthode d'optimisation implique bien souvent un nombre important d'évaluations de configurations, la simulation doit être pensée en accord avec les problèmes traités :

- Quels types de critères peuvent être définis à partir d'une simulation du rayonnement solaire? Cette question, pouvant également être laissée au choix du concepteur, est la base de tout travail d'optimisation.
- Jusqu'où le calcul doit aller (rayonnement solaire? besoins énergétiques? consommations?)?
- Quel niveau de détail choisir pour la représentation géométrique?
- Quel finesse de calcul est nécessaire?

Organisation du rapport

Le **premier chapitre** est une synthèse des travaux présents dans la littérature. Après une introduction au phénomène du rayonnement solaire et aux grandeurs associées, les différentes approches dans l'évaluation du potentiel solaire en ville sont évaluées.

Le **second chapitre**, décrit le logiciel d'optimisation de formes urbaines par rapport au rayonnement solaire. Celui-ci comprend trois composantes : un ensemble de formes urbaines paramétrées avec les contraintes associées, un outil de simulation du rayonnement solaire, et un algorithme évolutionnaire adapté pour travailler avec les deux premières composantes.

Le **troisième chapitre** est l'application de l'outil d'optimisation de formes urbaines décrit dans le chapitre 2 pour la recherche de formes urbaines optimales. L'accent est porté sur la compréhension des formes urbaines optimales par rapport au potentiel solaire, défini comme le rayonnement solaire cumulé sur l'ensemble du quartier. Pour cela, différentes conditions de calcul sont évaluées, jouant avec la densité bâtie, les paramètres associés aux bâtiments, la manière de représenter un contexte urbain, et les périodes de temps sur lesquelles est optimisé le potentiel solaire. Ce dernier point permet de définir des sources d'énergies ayant des caractéristiques géométriques variées en fonction des trajets solaires considérés. Les résultats sont analysés de manière à donner une idée non seulement des configurations optimales mais des meilleures et moins bonnes configurations.

Le **quatrième chapitre** présente un cas d'optimisation de formes urbaines par rapport aux besoins énergétiques pour le chauffage. Les outils utilisés aussi bien pour la simulation que pour l'optimisation ont été développés par [Kämpf \(2009\)](#) et repris dans le cadre d'un stage effectué durant la thèse. Contrairement au chapitre 3 qui s'axe sur la génération de résultats pour avoir une compréhension théorique de la réaction de la ville au rayonnement solaire, il s'agit dans ce chapitre d'évaluer les possibilités d'utilisation de l'optimisation en phase de conception architecturale. L'analyse des résultats repose dans ce cas sur l'observation d'un ensemble de bonnes configurations, permettant de définir un sous-espace des variables de conception capables de créer des quartiers performants par la suite.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Après une présentation de la physique du rayonnement solaire, les travaux mettant en relation la ville et le rayonnement solaire seront décrits. Dans ce cadre, une séparation sera faite entre la période menant approximativement jusqu'aux années 1970, et les approches plus récentes, qui font un usage de plus en plus important des ressources informatiques. Dans une troisième partie, différents travaux traitant de l'optimisation énergétique du bâtiment et de la ville depuis les débuts de la thématique dans les années 2000 seront exposés.

1.1 Rayonnement solaire

L'étude de l'exposition de quartiers au rayonnement solaire repose en premier lieu sur la connaissance des caractéristiques de ce dernier. Dans cette partie quelques notions sur la physique et les grandeurs en jeu sont présentées.

1.1.1 Trajets solaires, éléments géométriques

Le mouvement de la Terre autour du soleil suit une ellipse de très faible excentricité dont le soleil est un des foyers. La période de révolution est de 365,25 jours. On appelle écliptique le plan dans lequel s'effectue cette rotation. La distance Terre-Soleil varie entre 147 millions de kilomètres au périhélie, aux environs du 4 janvier, et 152 millions de kilomètres à l'aphélie, aux environs du 4 juillet. Cette variation de distance implique une variation de la puissance du rayonnement solaire reçue au niveau de la Terre hors atmosphère, respectivement entre 1412 W/m^2 et 1321 W/m^2 . Sur l'année, la valeur moyenne du rayonnement solaire, appelée constante solaire, est de $1366,1 \text{ W/m}^2$ ([Gueymard, 2004](#)).

L'axe de rotation de la Terre est incliné de $23,4^\circ$ par rapport au plan de l'écliptique. Cette inclinaison est à l'origine des saisons. Considérons un point de l'hémisphère nord situé à une

latitude ϕ entre le tropique du Cancer ($23,4^\circ$ N) et le cercle Arctique ($67,5^\circ$ N), on peut donner quelques caractéristiques pour des jours clefs :

- Au solstice d’hiver (vers le 21 décembre), la hauteur solaire, angle que fait le soleil avec l’horizon est, au sommet de sa course (à midi), de $\phi - 23,4^\circ$. C’est le jour le plus court de l’année. Au niveau du cercle Arctique, la hauteur solaire est de 0° : le soleil ne se lève pas.
- Au solstice d’été (vers le 21 juin), la hauteur solaire est de $\phi + 23,4^\circ$. C’est le jour le plus long de l’année. Au niveau du tropique du Cancer, le soleil est au zénith. Au niveau du cercle Arctique, le soleil ne se couche pas.
- Aux équinoxes (aux environs du 21 mars, et du 21 septembre), la hauteur solaire est de ϕ . Quelle que soit la latitude (hormis aux pôles), la journée dure 12 h, avec un soleil qui se lève plein est et se couche plein ouest.

En considérant que la Terre reste fixe dans sa rotation autour du soleil sur une période d’un jour, les trajets solaires peuvent être représentés par des arcs de cercle. Une représentation de ceux-ci sur des vues en coupe de la voûte céleste permet d’identifier simplement l’écliptique (figure 1.1).

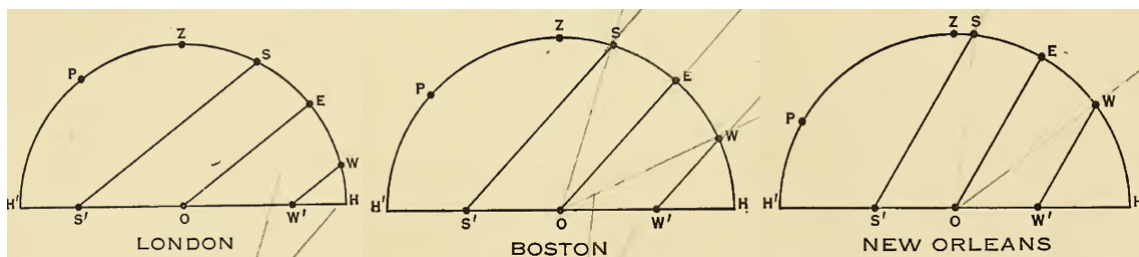


FIGURE 1.1: Vue en coupe Nord-Sud de la voûte céleste avec trajets solaires aux solstices d’hiver (WW’) et d’été (SS’), et aux équinoxes (OE) pour les latitudes de Londres ($51^\circ 30'$ N), Boston ($42^\circ 21'$ N), et la Nouvelle Orléans ($29^\circ 58'$ N). Source : (Atkinson, 1912)

Dans ce travail, on fera en général l’approximation d’une rotation circulaire de la terre autour du soleil. Le rayonnement solaire hors atmosphère est donc constant et égal à la constante solaire, et les solstices et équinoxes tombent exactement le 21 des mois correspondants. D’autre part, tous les problèmes considérés sont situés entre 40° et 60° de latitude nord. Ainsi, on peut considérer qu’à midi, heure solaire, le soleil est exactement au sud.

1.1.2 Composantes du rayonnement solaire

Le soleil, comme tout corps de température non nulle, émet un rayonnement électromagnétique. Son spectre d’émission, tout comme la puissance émise, dépend de cette température. Avec une surface à environ 5750 K, le soleil émet un rayonnement situé majoritairement entre les longueurs d’ondes $\lambda = 290$ nm et $\lambda = 2800$ nm. Le rayonnement ultraviolet (longueurs d’ondes entre 290 et 380 nm), représente la plus petite part du rayonnement solaire (environ 4% au

niveau de la Terre (Escobedo et al., 2011)). L'atmosphère arrête une partie de ce rayonnement, protégeant les organismes vivants pour lesquels il est nocif. Le reste du rayonnement se sépare en deux parts équivalentes. D'une part, le rayonnement visible (entre 380 et 780 nm) constitue la part du rayonnement à laquelle l'œil humain est sensible. Cet intervalle correspond également approximativement à la part du rayonnement dite photosynthétiquement active (entre 400 et 700 nm) nécessaire aux végétaux pour se développer. D'autre part, le rayonnement infrarouge proche regroupe les longueurs d'ondes entre 780 et 2800 nm.

Au niveau de la terre, nous sommes en mesure d'appréhender une partie de la physique du rayonnement grâce à la part visible du rayonnement solaire, que l'on sépare traditionnellement en trois composantes :

- Le **rayonnement direct** est l'énergie arrivant directement du soleil. C'est, par temps clair, la source la plus énergétique du rayonnement solaire.
- Le **rayonnement diffus** concerne l'énergie radiative répartie sur la voûte céleste. Les rayons du soleil, en traversant l'atmosphère, sont en partie déviés par les particules atmosphériques : c'est le phénomène de diffusion, qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement diffusé et de la composition de l'atmosphère. Dans le spectre visible, ce phénomène est plus important pour les courtes longueurs d'ondes, ce qui donne sa couleur bleue au ciel. Lorsque le soleil est à l'horizon, la couche d'atmosphère traversée est plus importante, et la couleur dominante est le rouge, le rayonnement dans les longueurs d'ondes correspondant au bleu ayant déjà été dispersé. On appelle **rayonnement global** la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.
- Le **rayonnement réfléchi** est la part du rayonnement solaire réfléchi par les surfaces qui nous entourent. La capacité d'une surface à absorber, transmettre, ou réfléchir le rayonnement solaire diffère selon les longueurs d'ondes. Par exemple, les plantes absorbent par photosynthèse le rayonnement solaire pour des longueurs d'ondes comprises entre 400 et 500 nm puis entre 600 et 700 nm ; l'intervalle entre ces deux plages n'est pas absorbé et est donc soit réfléchi, soit transmis : ce sont les longueurs d'ondes de la couleur verte.



FIGURE 1.2: Le soleil fournissant la lumière nécessaire au paysage

1.1.3 Grandeurs et unités radiatives

On distingue traditionnellement deux ensembles de grandeurs liées au phénomène radiatif. D'une part, la radiométrie étudie le rayonnement énergétique (toutes longueurs d'ondes), d'autre part, la photométrie étudie le rayonnement lumineux.

L'œil humain a une sensibilité différente selon les longueurs d'ondes, dans le spectre du visible. Il est composé de deux types de capteurs photosensibles : les cônes qui interviennent dans la vision photopique (niveaux de luminance élevés) et permettent de distinguer les couleurs, et les bâtonnets qui interviennent dans la vision scotopique (niveaux de luminance faibles).

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a défini deux courbes de sensibilité de l'œil humain : la courbe $V(\lambda)$ correspond à la vision photopique et la courbe $V'(\lambda)$ est associée à la vision scotopique (figure 1.3). Ces courbes ont ensuite été approuvées par la Commission Internationale des Poids et Mesures (CIPM) pour fixer les grandeurs de la photométrie dans le système international d'unités (Bureau International des Poids et Mesures, 1983).

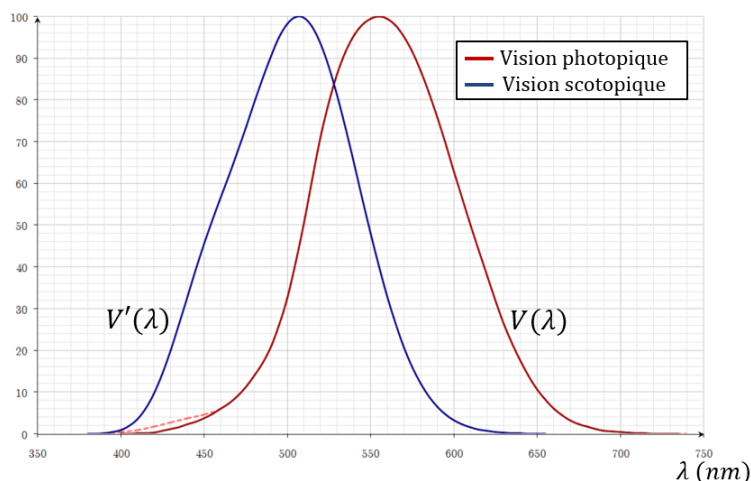


FIGURE 1.3: Courbes de sensibilité de l'œil $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$. Adapté de Alasjourn, Wikipedia.org

La grandeur de base de la photométrie dans le système international est l'intensité lumineuse, dont l'unité est le candela (symbole cd). Sa valeur était jusqu'en 1979 fixée relativement à des étalons physiques (intensité lumineuse d'une bougie, d'un filament incandescent), avant d'être définie par la Commission Générale des Poids et Mesures (CGPM) comme « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian » (Bureau International des Poids et Mesures, 2006).

Les différentes grandeurs radiométriques et photométriques ainsi que leurs unités sont résumées dans le tableau 1.1.

TABLEAU 1.1: Nomenclatures française et anglaise des grandeurs radiométriques et photométriques

Grandeur énergétique	Grandeur lumineuse
Intensité énergétique ¹ <i>Radiant intensity</i> ² watt par stéradian [W/sr]	Intensité lumineuse ¹ <i>Luminous intensity</i> ² candela [cd]
Flux énergétique ¹ <i>Radiant flux</i> ² [W]	Flux lumineux ¹ <i>Luminous flux</i> ² lumen [lm = cd.sr]
Eclairement énergétique ¹ <i>Irradiance</i> ² [W/m ²] incident	Eclairement ¹ <i>Illuminance</i> ² lux [lux = lm/m ²] incident
Exitance énergétique <i>Radiant exitance</i> [W/m ²] émis	Exitance <i>Exitance</i> lux [lux = lm/m ²] émis
Radiosité <i>Radiosity</i> [W/m ²] émis et réfléchi	Luminosité <i>Luminosity</i> lux [lux = lm/m ²] émis et réfléchi
Luminance énergétique ¹ <i>Radiance</i> ² [W/(m ² .sr)]	Luminance ¹ <i>Luminance</i> ² [cd/m ²]

Les termes anglais parfois trouvés francisés dans la littérature française "irradiance, radiance", seront préférés à leurs équivalents français "éclairement énergétique, luminance énergétique", pour leur simplicité d'usage, et leur association directe à des grandeurs radiométriques. De même, on utilisera le terme "radiosité", pour traduire le mot anglais *radiosity*.

Un facteur de conversion appelé efficacité lumineuse (lm/W) permet de passer des unités énergétiques aux unités lumineuses. Ce facteur de conversion dépend du spectre de la source de rayonnement. De constants efforts ont été entrepris pour déterminer l'efficacité lumineuse du rayonnement du soleil et du ciel (Miguet, 2000).

Enfin, il est intéressant de remarquer que l'œil, comme beaucoup de capteurs chez l'être humain, ne réagit pas linéairement aux stimuli, mais plutôt de manière logarithmique (loi de Weber-Fechner). Ce comportement permet de gérer des différences d'intensité lumineuse de plusieurs ordres de grandeur. Par exemple, l'éclairement d'un clair de lune est de l'ordre de 0,1 lux, tandis que le rayonnement solaire direct peut dépasser les 100 000 lux. Entre les deux, le niveau de lumière recommandé pour le travail de bureau est de l'ordre de 500 lux³. En considérant

1. Bureau International des Poids et Mesures. 2006, *Le système international d'unités*, 8^{ème} édition.
2. Bureau International des Poids et Mesures. 2006, *The international system of units*, 8th edition.
3. Norme NF EN 12464-1 « *Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieur* »

une efficacité lumineuse de 130 lm/W (rayonnement diffus par ciel clair (Littlefair, 1985)), il apparaît que l'irradiance correspondant à un minimum pour le confort lumineux est peu significative d'un point de vue thermique : de l'ordre de quelques watts par mètres carrés.

1.2 Ville et rayonnement solaire

Après une courte introduction sur l'historique des relations entre ville et rayonnement solaire, les travaux actuels sur le sujet sont développés selon trois axes thématiques : une approche géométrique axée sur la conception, une approche énergétique pour l'analyse des quartiers, et une approche physique pour la compréhension du micro-climat urbain.

1.2.1 Introduction

L'habitat traditionnel, à travers le monde, répond à un besoin de s'adapter à un ensemble de facteurs à la fois culturels (moraux, sociaux, historiques), et physiologiques (géologiques, climatiques, géographiques) (Olgay, 1963). Des exemples de cette adaptation sont observables sous tous les climats. Dans un climat chaud et aride, l'habitat en terre permettra de se protéger du soleil tout en diffusant la nuit la chaleur accumulée par les murs pendant la journée. Dans un climat chaud et humide, l'habitat est très ouvert, permettant de faire circuler l'air et limiter l'humidité tandis que des toits larges protégeront du rayonnement solaire. A mesure que le climat devient tempéré ou froid, la place de l'isolation devient de plus en plus importante tandis que le rayonnement solaire devient un allié comme source de chaleur. L'igloo est l'exemple d'un bâtiment privilégiant l'isolation en présentant une enveloppe minimale avec l'extérieur (la demi-sphère) et de petites ouvertures pour garder la chaleur autant que possible (figure 1.4).



FIGURE 1.4: Habitats adaptés au climat a) chaud et aride (Aït Benhaddou , Maroc), b) chaud et humide (habitat Yanomami, Amazonie), c) froid (igloo). Source : Wikipedia

Parmi les premières théories architecturales à proprement parler, celles de l'architecte Vitruve ¹, ont eu une influence importante à travers les siècles, notamment dans l'orientation des bâtiments et la disposition des pièces par rapport au rayonnement solaire. Un bon exemple de cette époque

1. Vitruve (environ 90 av. J.-C. - 20 av. J.-C.) est un architecte romain, principalement connu pour son traité d'architecture *De Architectura*.

est donné par les théâtres d'extérieur dont la scène était située au nord tandis que les sièges formaient un hémicycle au sud (Young et Potchter, 2013). Cette configuration permet au public d'être dans l'ombre propre des gradins alors que les acteurs sont éclairés par le soleil.

A l'échelle urbaine, le courant hygiéniste, qui a vu le jour à partir de la moitié du XIX^{ème} siècle, donne une place importante au rayonnement solaire dans la lutte contre les agents pathologiques responsables, entre autres, de la tuberculose. C'est notamment à cette époque et jusqu'à la moitié du XX^{ème} siècle et la découverte de la pénicilline que les sanatoriums ont été construits en dehors des villes pour traiter les tuberculeux par l'air pur et la lumière du soleil.

Les théories architecturales et urbaines visant à offrir un cadre de vie sain ont durant cette période été développées sous l'influence croisée des médecins qui, par des études statistiques, pointaient les liens entre la qualité de l'habitat et la santé de leurs habitants, des ingénieurs et des architectes (Harzallah, 2007). Les principales préconisations émises en France dans ce contexte ont été répertoriées dans la thèse de Harzallah (2007). Celle-ci a classé ces différentes préconisations en trois familles :

- les orientations de voies et expositions de façades ;
- les gabarits de rues, notamment déterminés par le rapport d'aspect hauteur de façade sur largeur de la rue ;
- la forme des bâtiments (cours, gradins, pyramides)

Dans chacun des cas, une grande diversité dans les préconisations dénote une difficulté de consensus causée par une compréhension variable des mécanismes physiques et par des manières différentes de choisir les critères de bon ensoleillement (Harzallah, 2007; Miguet, 2000; Montavon, 2010). Le cas des théories sur les orientations de voies est un bon exemple. S'affrontaient alors les partisans d'une orientation nord-sud, offrant un ensoleillement équilibré sur les façades est et ouest, à ceux favorable à une orientation est-ouest, qui permettait d'avoir une grande façade sud qui capte un maximum de rayonnement en hiver. A celles-ci s'ajoutait une variété d'orientations intermédiaires, et notamment l'orientation à 45°, qui, mise en œuvre par l'urbaniste Idelfons Cerdà pour le quartier de l'Eixample à Barcelone, permet à toutes les façades des blocs de bâtiments de recevoir la lumière du soleil à un moment de la journée (figure 1.5)

Depuis la fin des années 1950, le rayonnement solaire est passé d'un enjeu de santé à une ressource énergétique pour le bâtiment (Siret, 2013). Cette nouvelle considération a été notamment poussée par le développement des réglementations thermiques et des énergies renouvelables, incluant les panneaux solaires. Dans ce nouveau cadre, des outils – très rapidement informatisés – sont apparus.

Dans les parties suivantes, les différentes approches récentes incluant ville et rayonnement solaire sont décrites.

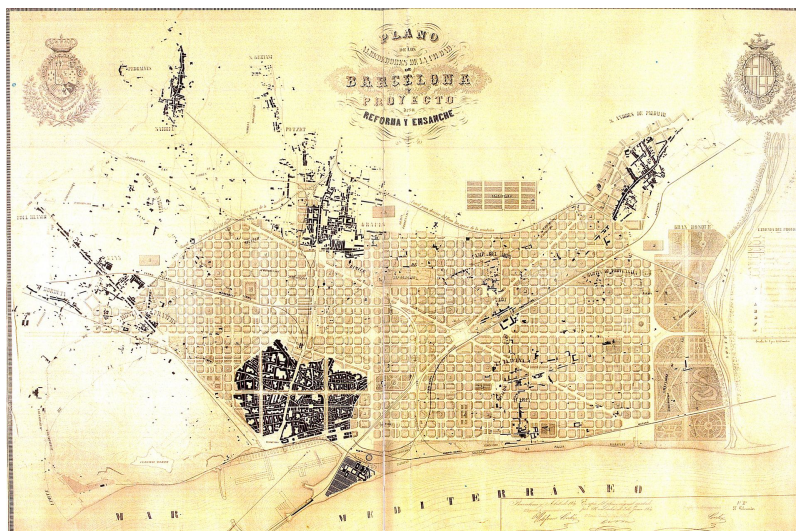


FIGURE 1.5: L'Eixample. Plan d'Idelfonso Cerdà (1859). Le haut correspond au nord-ouest.

1.2.2 Approche géométrique pour la conception

Les méthodes géométriques dérivent de la connaissance des trajets solaires et de la forme des bâtiments. On classera dans cette catégorie les idées d'angles d'obstruction et de projections, ainsi que les enveloppes solaires. Si les premières ne sont pas récentes, l'utilisation de l'informatique a permis de généraliser leur usage. Le point commun à toutes ces méthodes est qu'elles permettent de qualifier l'ensoleillement, ou la visibilité du ciel, sans (ou presque) considérer l'énergie qui leur est associée. Elles présentent ainsi plusieurs avantages : simples, elles peuvent être reprises dans des réglementations ; visuelles, elles permettent de transmettre rapidement un concept architectural.

1.2.2.1 Angles et projections

Lorsqu'il s'agit d'étudier un bâtiment par rapport au rayonnement solaire, les enjeux sont les mêmes, que l'on soit ou non en milieu urbain – lumière, énergie thermique, panneaux solaires –. Dans le cas d'une maison située en milieu dégagé, un ensemble de "bonnes pratiques" sont couramment répandues¹ : de grandes ouvertures au sud permettent de laisser entrer la lumière l'hiver, tandis que des protections solaires adaptées limiteront le rayonnement solaire estival. Les façades est et ouest doivent avoir des ouvertures réduites pour éviter le rayonnement d'été dont il est difficile de se protéger car venant de face. Au nord enfin on placera les pièces les moins utilisées (ou ne nécessitant pas de lumière du soleil) associées à de petites fenêtres pour limiter les déperditions thermiques.

1. En France, l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et les espaces info-énergie qui lui sont rattachés relaient un certain nombre de conseils pour la construction ou la rénovation. Les bonnes pratiques architecturales permettant de profiter ou de se protéger du rayonnement solaire selon les périodes de l'année font partie des informations diffusées.

En milieu urbain, ces pratiques n'ont pas de sens si le contexte n'est pas pris en compte : si les bâtiments alentours masquent le soleil, de plus grandes fenêtres n'y changeront rien. Une méthode simple permettant de donner une idée de l'impact du contexte urbain est de considérer un angle d'obstruction moyen, angle que forme l'horizon avec le contexte urbain. Cette méthode a notamment pu être utilisée dans des méthodes de calcul du bilan thermique telles que la méthode LT¹ (Baker et al., 1995) (figure 1.6). Dans cette méthode, l'angle d'obstruction est rapporté à un coefficient qui entre dans le calcul des besoins énergétiques en fonction de l'orientation de la paroi.

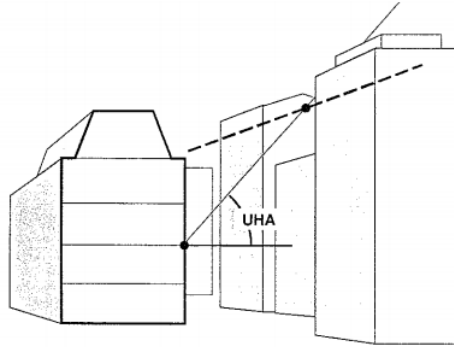


FIGURE 1.6: Angle d'obstruction présenté dans la méthode LT. Source : (Baker et al., 1995)

Cet idée d'angle d'obstruction a également été utilisée dans le cadre de réglementations, comme à Hong-Kong, l'une des villes les plus densément peuplées au monde, où, en 1959, une règle demandait un angle d'obstruction maximal de $71,5^\circ$ pour des besoins de lumière naturelle. Les bâtiments se sont alors adaptés, tels que l'on peut le voir sur la figure 1.7 (Ng, 2012).



FIGURE 1.7: Quartier de très haute densité à Hong-Kong. L'angle au sommet des immeubles permet de respecter l'obstruction maximale de $71,5^\circ$ demandée par la réglementation de Hong-Kong. Source : (Ng, 2012)

La prise en compte d'un angle d'obstruction est réducteur en cela qu'il ne prend pas en considération les bâtiments qui ne sont pas directement en vis-à-vis. D'ailleurs, dans la configuration commune d'un canyon urbain, c'est à dire une rue encadrée par des bâtiments sur toute

1. *Lighting and Thermal energy*, méthode de calcul manuel des besoins en énergie pour le chauffage, la climatisation, la lumière et la ventilation développée dans les années 90

sa longueur, l'angle d'obstruction pour une façade diminue selon l'angle horizontal considéré (Littlefair, 1998). Il est rapidement possible de constater que les arêtes des géométries urbaines ne permettent pas de former des angles d'obstructions constants. Pour pallier ce problème tout en restant dans des méthodes simples, Littlefair (1998) propose de considérer que les obstructions n'ont réellement d'impact que dans un angle de $\pm 30^\circ$ de la direction sud. Il donne alors un angle d'obstruction maximal à respecter en fonction la latitude pour éviter d'impacter une certaine période de l'année.

Au delà de ces méthodes simplifiées conçues pour être utilisables manuellement, une visualisation des masques plus précise est possible en passant par l'utilisation de projections (Beckers et Beckers, 2014). La première des projections associées au rayonnement solaire est la projection gnomonique, du grec *gnômon*, mot utilisé pour nommer la pointe d'un cadran solaire : les trajets solaires sont représentés sur le plan par le tracé que forme l'extrémité de l'ombre de la pointe dans le temps. Un inconvénient majeur de la projection gnomonique est son impossibilité de représenter les soleils bas, l'horizon étant reporté à l'infini par la projection.

Dans le cas d'une projection azimutale, les masques identifiés sont reportés sur l'hémisphère entourant un point de calcul (l'œil de l'observateur, par exemple) puis reportés sur le plan de projection. Dans son livre *Design with climate*, Olgyay (1963) en fait l'usage pour montrer l'impact de différentes protections solaires sur la visibilité de l'extérieur (figure 1.8).

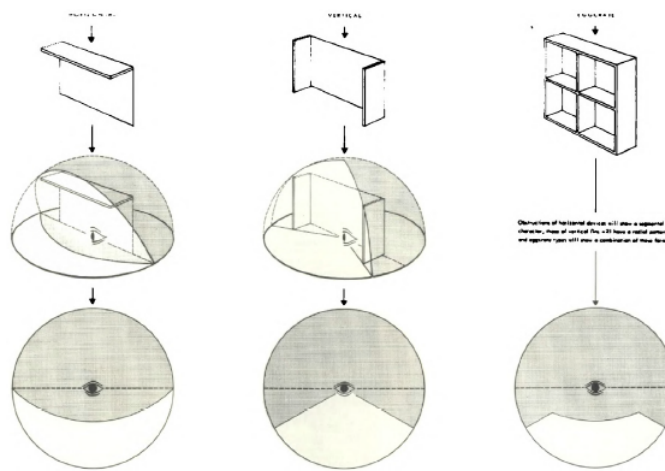


FIGURE 1.8: Forme des protections solaires et projections associées. Source : (Olgyay, 1963)

Tous les logiciels calculant le rayonnement solaire sur un bâtiment effectuent un calcul géométrique, prenant en compte les trajets solaires et une géométrie urbaine simplifiée ou supportant toute sa complexité. L'usage des projections comme représentation graphique est cependant un outil proposé par un petit nombre de logiciels, davantage axé sur la conception, au nombre desquels figurent Heliodon2 (Beckers et Masset, 2011) ou Townscope (Teller et Azar, 2001).

Différents types de projections existent, chacun présentant des avantages visuels ou de construction. On peut notamment citer les projections suivantes (figure 1.9) :

- La **projection stéréographique**, notamment décrite par [Atkinson \(1912\)](#), a pour intérêt que les cercles sur la sphère restent des cercles après la projection sur le plan. Elle est ainsi particulièrement adaptée à la représentation des trajets solaires. De plus, cette projection met en valeur l’horizon, ce qui est utile dans la représentation des masques urbains. Dans le cadre de la conception architecturale, la superposition des trajets solaires avec les masques urbains permet dès lors d’identifier d’un coup d’œil les périodes d’ombres durant l’année.
- La **projection orthogonale** consiste à projeter orthogonalement l’hémisphère sur le disque. Le rapport entre les surfaces de l’hémisphère et du disque est localement pondéré par le cosinus de l’angle d’incidence du rayon (loi de Lambert), propriété très utile dans le calcul des flux énergétiques. En effet, à des surfaces d’aires égales sur la projection correspondent des facteurs de vue égaux.
- La **projection équivalente** conserve les rapports d’aires, c’est à dire qu’à des aires égales sur la projection correspondent des angles solides égaux. Cette projection donne ainsi à toutes les directions la même importance.
- Enfin, la **projection équidistante**, qui présente une décroissance linéaire en angles selon les rayons du disque permet d’effectuer simplement des calculs d’angles. Elle a notamment été utilisée pour les recherches dans le champ du confort visuel par [Hellings et Hordijk \(2014\)](#), qui utilisent des caméras hémisphériques dites *fish-eye* fonctionnant avec cette projection.

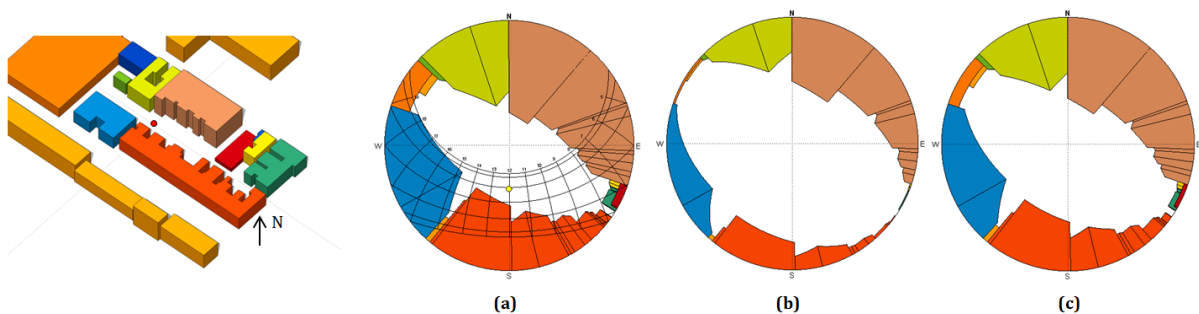


FIGURE 1.9: Quartier à Paris(48,5°N). (a) projection stéréographique, (b) projection orthogonale, (c) projection équivalente. Représentés avec Héliodon2

1.2.2.2 Les enveloppes solaires

L’enveloppe solaire est un cas particulier de traduction en un problème géométrique simplifié de l’exposition au soleil en milieu urbain. La notion a été développée par Ralph Knowles dans les années 1970 avec l’hypothèse que seuls des bâtiments bien exposés au rayonnement solaire permettraient d’encourager l’usage de l’énergie solaire dans le bâtiment ([Knowles, 1980](#)). L’idée de Knowles était de définir un critère d’ensevelissement qui puisse intervenir dans les réglementations d’urbanisme.

L’« **enveloppe pour le droit solaire** » (*Solar Right Envelope* en anglais, ou SRE) est le nom donné par [Knowles \(1980\)](#) au concept de base d’enveloppe solaire. Son principe suppose que

toute nouvelle construction ne doit pas masquer le soleil aux bâtiments qui existent déjà dans le quartier pendant les périodes de temps souhaitées. L'enveloppe solaire est la surface en trois dimensions en dessous de laquelle toute nouvelle construction respectera cette exposition au soleil des bâtiments alentour. Pour la construire, il suffit de découper le volume potentiellement constructible (cadré par les limites de la parcelle et les règles d'urbanisme) en empêchant que pour les dates souhaitées ce volume projette des ombres là où elles ne sont pas souhaitées. Un exemple d'enveloppe solaire tiré des travaux de Knowles (2003) est représenté sur la figure 1.10. Sur chaque parcelle, le volume borné par l'enveloppe solaire prend la forme d'une pyramide pour ne pas masquer les autres parcelles à certaines dates clefs. Les bâtiments peuvent ensuite être dessinés à l'intérieur de ces volumes.

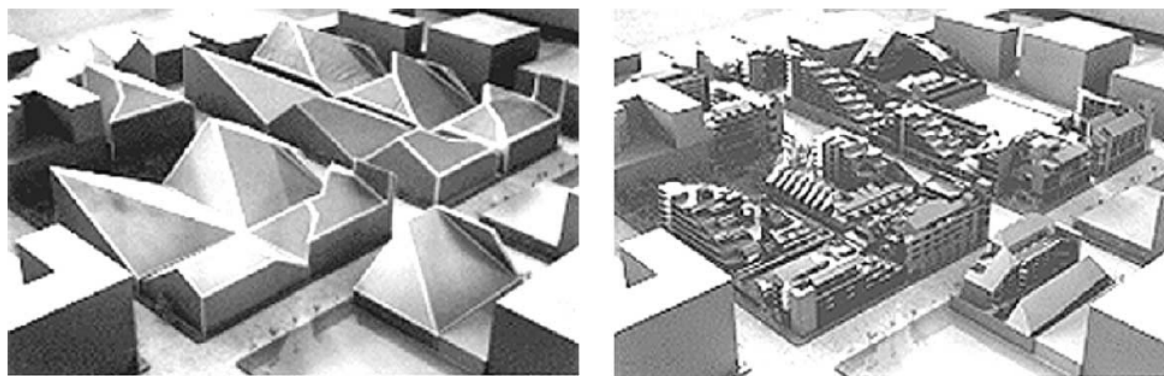


FIGURE 1.10: L'enveloppe solaire définie par Ralph Knowles. Source : (Knowles, 2003)

L'enveloppe solaire a eu une influence notable dans le domaine de la recherche sur l'urbanisme solaire, comme en témoignent les enrichissements réguliers qui y ont été apportés (Siret, 2011). Les principaux exemples d'apports sont décrits ci-dessous.

L'enveloppe pour le droit solaire définie par Ralph Knowles ne garantit pas que la parcelle sur laquelle on construit l'enveloppe ne soit pas elle-même masquée par des bâtiments existants, configuration courante en milieu urbain. Les « **enveloppes pour l'exposition au soleil** » (*solar collection envelope* en anglais, ou SCE), définies en 1997 par Capeluto et Shaviv (1997), correspondent aux surfaces en dessous desquelles les bâtiments adjacents projettent des ombres sur la parcelle. Le volume sous la SCE sera donc à l'ombre à au moins un des instants utilisés pour dessiner l'enveloppe.

Les deux types d'enveloppes, la SCE et la SRE ont permis de développer l'idée de « **volume solaire** » (Capeluto et Shaviv, 1997), qui correspond au volume compris entre SCE et SRE (voir figure 1.11). Les surfaces présentes dans ce volume ne masquent pas les parcelles alentour, tout en n'étant pas masquées par les bâtiments pré-existants.

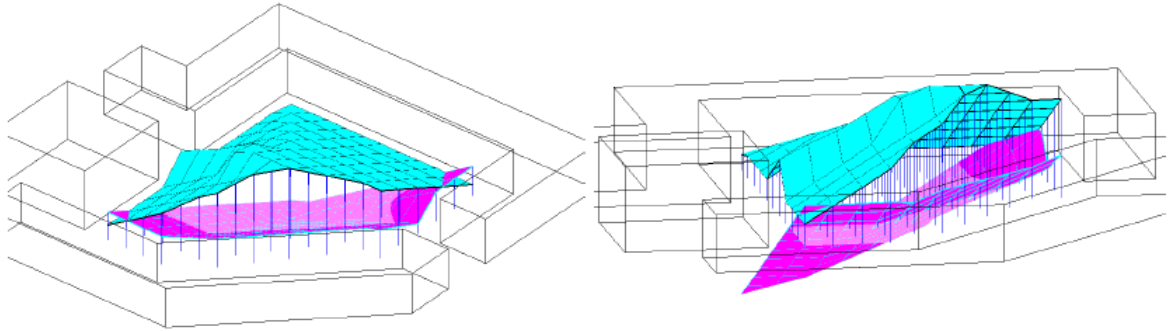


FIGURE 1.11: Volume solaire, encadré par la SRE (bleu) et la SCE (rose). Source : (Capeluto et Shaviv, 1997)

Une apport plus récent a ensuite été fait par [Morello et al. \(2009\)](#) : les « **surfaces iso-solaires** » (*iso-solar surfaces*). Celles-ci ajoutent aux enveloppes solaires un caractère énergétique. En effet, les surfaces iso-solaires correspondent à des surfaces tri-dimensionnelles recevant une certaine quantité de rayonnement solaire durant la période choisie. Sur une parcelle, plusieurs niveaux de surfaces iso-solaires peuvent être construits, correspondant à plusieurs quantités de rayonnement solaire incident. Dans un milieu urbain très dense, il est impossible de faire en sorte que le bâtiment construit ne projette pas d'ombres sur les bâtiments alentour, ou que celui-ci sache s'extraire des zones d'ombres générées par le contexte. Si l'exposition solaire s'avère de toute manière partiellement compromise, les surfaces iso-solaires permettent au moins de quantifier les zones à privilégier, en définissant des niveaux d'expositions au solaire adaptés à l'étude.

En parallèle de ces différents apports conceptuels, des outils informatiques ont été développés afin de tracer et d'analyser les enveloppes solaires ([Morello et Ratti, 2009](#); [Juyal et al., 2003](#); [Siret et Houpert, 2004](#)).

1.2.3 Approche énergétique

L'approche énergétique de la ville hérite de l'énergétique du bâtiment. Elle implique notamment le recours à des outils de simulation à diverses échelles (bâtiment, quartier), et selon plusieurs niveaux d'analyse (rayonnement solaire, besoins énergétiques, consommations).

1.2.3.1 Le calcul du rayonnement solaire du bâtiment à la ville

Un nombre important de programmes de simulation du bilan thermique du bâtiment existe avec des niveaux de complexité variables ([Crawley et al., 2008](#)). Ces logiciels sont largement utilisés dans le domaine de l'ingénierie, que ce soit pour répondre à des besoins règlementaires ou pour évaluer, analyser et comparer le comportement thermique des bâtiments. On appelle simulations thermiques dynamiques les méthodes de calcul du bilan thermique en fonction

du temps, considérant généralement un pas de temps de l'ordre de l'heure ou inférieur. Ces simulations permettent d'inclure les apports solaires avec des degrés de simplification variables sur la prise en compte de la géométrie urbaine ou des propriétés des matériaux (Crawley et al., 2008).

A l'échelle de la ville, le temps de calcul est une contrainte forte dans la simulation du rayonnement solaire. Si certains logiciels conçus pour la simulation thermique du bâtiment tels que DesignBuilder² (EnergyPlus), ArchiWizard³ ou Ecotect¹ permettent de dessiner plusieurs bâtiments, ils ne sont cependant pas adaptés à l'évaluation de quartiers entiers. Pour cela, des codes dédiés ont eu besoin d'être créés, pour le calcul du rayonnement solaire jusqu'aux besoins énergétiques. Sur le premier point, un cahier des charges a été proposé par Mardaljevic et Rylatt (2003) :

- la modélisation du potentiel solaire sur les façades à un pas horaire ou sub-horaire en utilisant des données météo, par exemple des années standards (*typical meteorological year*) ;
- une complexité de la scène *a priori* sans limites (et de grande taille) ;
- un calcul des ombres et inter-réflexion entre les surfaces ;
- l'utilisation de modèles de ciel non-couvert ;
- des résultats présentés sous formes de cartes d'irradiation ;
- la possibilité d'automatiser le calcul.

Dans l'objectif de répondre à ce besoin, Mardaljevic et Rylatt (2003) proposent le programme ICUE (*Irradiation mapping for complex urban environments*), qui permet le calcul d'images d'irradiation en utilisant le logiciel de lancer de rayons Radiance (Lar) pour le calcul des réflexions. Si ces images donnent une représentation visuelle efficace de l'ensoleillement d'un quartier, elles ne permettent cependant pas de connaître l'ensoleillement en tout point de la géométrie urbaine.

Le logiciel PPF-Radiance, développé par Compagnon (2000) permet le calcul de l'irradiation sur les surfaces d'une scène urbaine. Il utilise également des méthodes de lancers de rayon via le logiciel Radiance pour les calculs de visibilité du soleil et du ciel.

Parmi les développements plus récents, le logiciel SunTool (Robinson, 2007), puis, dans sa continuité, CitySim (Robinson et al., 2009), tous deux développés au laboratoire LESO-PB de l'EPFL, ont pour objectif d'effectuer un bilan thermique à l'échelle urbaine.

Dans le cadre de la physique urbaine, on peut enfin citer le logiciel Solene développé au CERMA, qui comprend la simulation de calcul du rayonnement solaire adapté à l'échelle du quartier (Miguet, 2000).

2. <http://www.designbuilder.co.uk/>

3. <http://www.archiwizard.fr/>

1. <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>

1.2.3.2 Modélisation de configurations théoriques

A l'échelle du bâtiment, de nombreux travaux cherchent les caractéristiques optimales d'un bâtiment pour un climat donné (Pacheco et al., 2012). Les paramètres principaux observés dans l'étude de l'ensoleillement d'un bâtiment regroupent le rapport d'aspect des parois (hauteur sur largeur), leur orientation, les caractéristique des surfaces vitrées et les éventuelles protections solaires (Ralegaonkar et Gupta, 2010; Hachem et al., 2011b).

Au niveau urbain, les caractéristiques de la ville déjà identifiées au XIXe siècle comme étant liées à la capacité du tissu urbain à profiter du rayonnement solaire sont réévaluées dans des cas d'étude théoriques. Les cas de bâtiments en gradin de Henri Sauvage, ou les propositions d'aménagements de Le Corbusier ont d'ailleurs été modélisés par Harzallah (2007) avec le logiciel Solene¹ pour mettre à l'épreuve les arguments scientifiques liés au rayonnement solaire des théories. Ses conclusions montrent parfois un décalage entre les prédictions d'alors et la simulation avec des outils actuels. Ces cas d'étude ont cependant eu une influence notable sur l'urbanisme théorique du début du siècle.

Au delà de ces cas particuliers, l'avènement des logiciels de calculs supportant l'échelle urbaine permet l'automatisation des calculs d'un nombre important de configurations. La méthode déductive utilisée avant l'ordinateur, qui cherchait à préconiser des arrangement urbains par l'observation du phénomène solaire, laisse ainsi sa place à une méthode davantage basée sur l'évaluation paramétrique d'un tissu urbain théorique. A partir des résultats, le travail de recherche s'opère de manière inverse en cherchant à comprendre le comportement du quartier par rapport au rayonnement solaire.

Différentes formes théoriques sont courantes dans les études paramétriques :

- le canyon urbain (figure 1.12), représentant des rangées de bâtiments face à face, est largement étudié en fonction du rapport d'aspect (hauteur de bâtiments/largeur de rue) et de l'orientation des rues (Kanters et Horvat, 2012; Strømman-Andersen et Sattrup, 2011; Krüger et al., 2010; Van Esch et al., 2012) ;
- la cour (ou l'atrium) est étudiée en fonction de ses longueur, largeur, hauteur et son orientation, pour déterminer en fonction de la latitude la relation entre l'ensoleillement et la forme (Muhaisen, 2006) ;
- des combinaisons de maisons paramétrées formant un habitat pavillonnaire type. Dans ce cas, à la fois la forme des maisons et l'aménagement urbain sont étudiés (Hachem et al., 2011a, 2013).

1. <http://www.cerma.archi.fr/?q=fr/node/80>

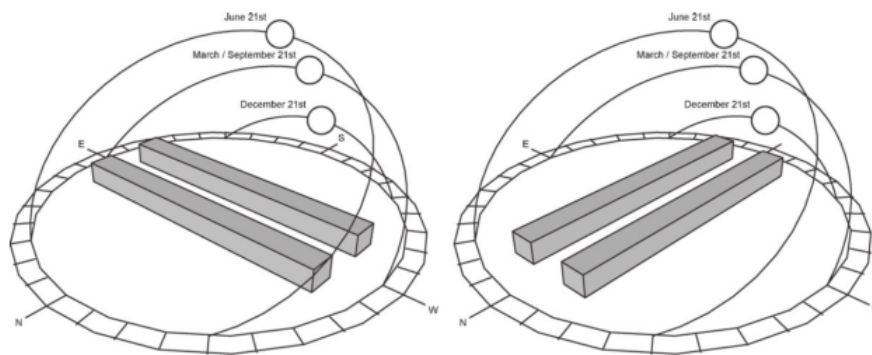


FIGURE 1.12: Canyon urbain (Van Esch et al., 2012)

Les conclusions de ces études sont à chaque fois difficilement transposables dans des conditions différentes : le climat, les habitudes constructives, jusqu'aux notions de confort peuvent varier selon les régions. En revanche, toutes les études confirment une chose : le fait que la géométrie urbaine (régie entre autre par sa densité et son orientation) a un impact sur les besoins énergétiques.

1.2.3.3 Modélisation pour l'analyse de cas réels

L'utilisation d'outils de calcul, au delà de l'analyse de configurations théoriques, peut être utile à la comparaison de différents aménagements urbains (Coccolo, 2012). Dans l'optique de les comparer, les propositions urbaines d'aménagements peuvent être regroupées en fonction de caractéristiques telles que le coefficient d'occupation des sols (Cifuentes, 2012) ou l'orientation (Compagnon, 2004).

Dans ce cadre, des outils ont été développés pour pouvoir qualifier les espaces bâtis. La rose d'orientation de Compagnon (2004) consiste à qualifier par un diagramme les orientations principales prises par les façades du quartier, pondérées par leur facteur de vue du ciel (figure 1.13). Cet outil a notamment permis d'illustrer l'analyse de différents quartiers par Montavon (2010).

Le besoin de critères morphologiques devient déterminant lorsqu'il s'agit d'étudier des zones urbaines plus importantes. Ainsi, Sarralde et al. (2014), dans une étude sur la ville de Londres ont découpé le territoire de la ville en fonction de critères morphologiques regroupant les typologies de bâtiments, la répartition horizontale et verticale des bâtiments, l'usage du terrain, la géométrie des bâtiments et la densité. Cette classification permet de réduire le nombre de calculs à réaliser pour avoir une idée du potentiel solaire à l'échelle d'une agglomération.

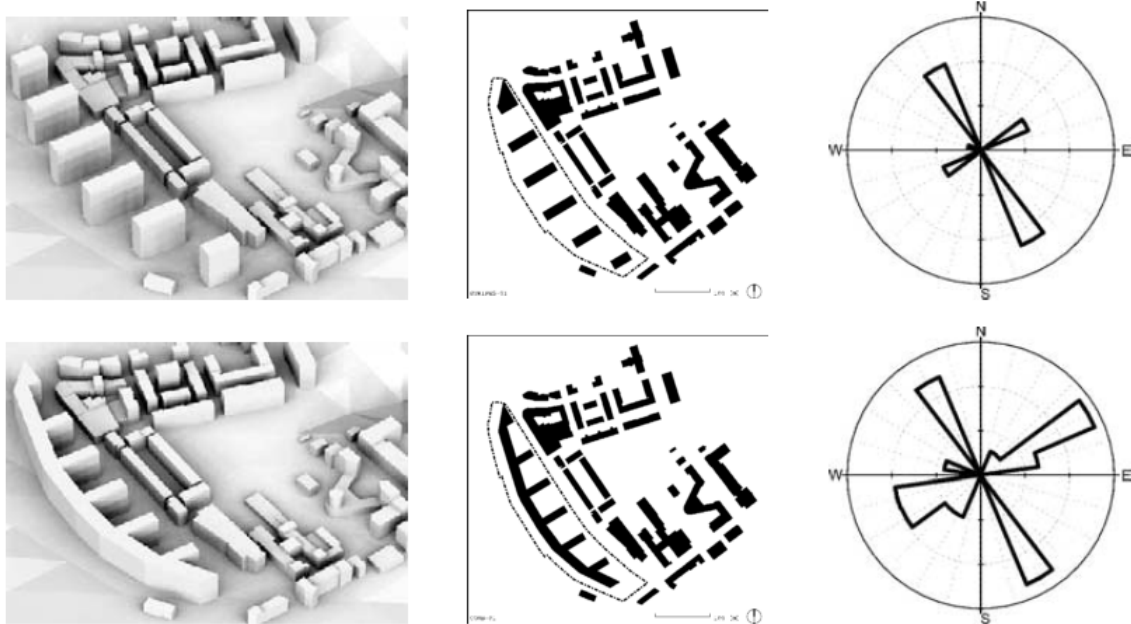


FIGURE 1.13: Rose d'orientation définie par [Compagnon \(2004\)](#)

1.2.4 Approche physique pour la compréhension du climat urbain

La ville, par sa constitution d'un ensemble de matériaux et de formes différents du milieu rural, a un micro-climat qui lui est propre. L'approche physique du rayonnement solaire en ville revient à le considérer comme une composante de ce micro-climat, comme une source d'énergie piégée par la géométrie urbaine.

L'objet principal de cette approche est l'étude de l'îlot de chaleur urbain (ICU), défini par une différence de température entre l'air en ville et dans sa périphérie rurale, notamment en fonction de la taille de la zone urbaine ([Oke, 1973](#)). La principale cause de l'ICU est le remplacement de surfaces naturelles (prairies, bois) par des matériaux ayant une grande capacité à garder la chaleur (béton, asphalte). De plus, la géométrie de la ville composée de canyons et de blocs, piège le rayonnement solaire. Les surfaces réchauffées pendant la journée ne parviennent ensuite pas à évacuer leur énergie par échanges infrarouges avec le ciel, peu visible lorsque la densité est élevée ([Stone et Rodgers, 2001](#)). L'élévation de la température de l'air du fait de l'ICU peut entraîner une hausse des consommations significative en été ([Dorer et al., 2013](#)) ainsi qu'une diminution du confort du fait des hautes températures. Les techniques pour diminuer l'îlot de chaleur, notamment en jouant sur la réflexion des surfaces pour éviter le réchauffement par absorption du rayonnement solaire, forment une thématique de recherche à part entière ([Santamouris, 2014](#)).

Contrairement aux deux approches précédentes, l'étude de l'ICU ne demande pas de connaître ce qui se passe à l'intérieur des bâtiments, en revanche, elle nécessite une identification précise de la géométrie urbaine, pouvant être reconstituée à partir de données LiDAR ¹([Zhou et al.,](#)

1. *Light Detection And Ranging* : système de mesure de distances par laser

2004) ou de caméras *fish-eye* (Chapman et Thornes, 2004). Une part importante des études sur l'ICU repose ainsi sur des campagnes de mesures (Souch et Grimmond, 2006; Voogt et Oke, 2003; Hénon et al., 2011; Lagouarde et al., 2012), qui peuvent être l'objet de biais important dont la gestion est un des enjeux de la thématique (Peterson, 2003).

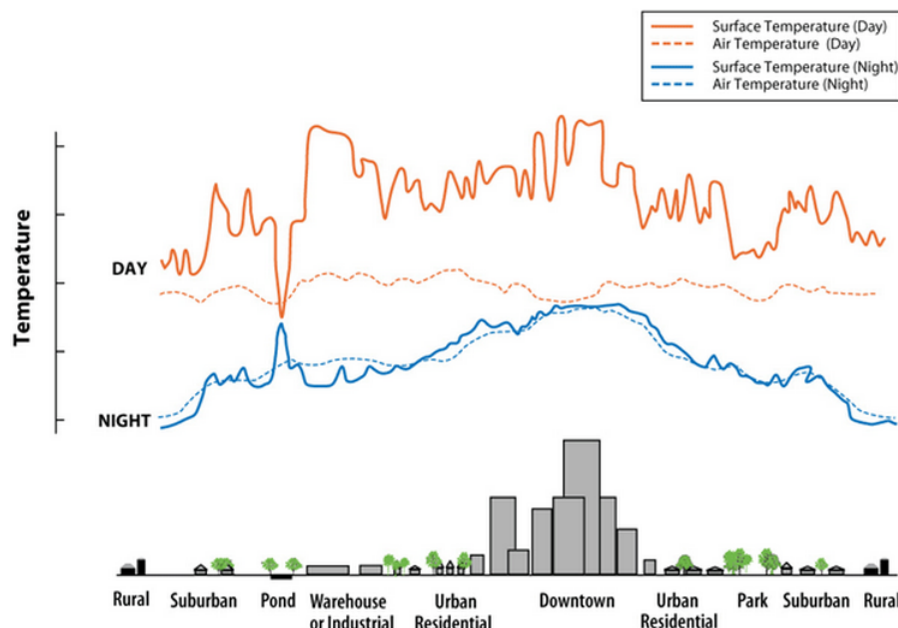


FIGURE 1.14: Profil de température de l'îlot de chaleur urbain. Source : *US Environmental Protection Agency*

1.3 Optimisation énergétique du bâtiment et de la ville

Le terme optimisation est communément employé dans le sens général "trouver le mieux", sans préoccupation quant à la méthode employée. Dans cette partie cependant, nous considérerons le terme d'optimisation dans son sens restreint à l'optimisation numérique, c'est à dire au fait de rechercher les meilleures solutions d'un problème à l'aide d'algorithmes itératifs.

L'optimisation numérique a connu un essor important avec le développement des ordinateurs, dans des champs variés de l'ingénierie. Le traitement de problèmes liés à la réduction des consommations énergétiques des bâtiments avec des méthodes d'optimisation était inévitable pour plusieurs raisons. Premièrement, la ville est un système complexe reposant sur une quantité de paramètres si importante qu'il n'est souvent pas possible de réduire des problèmes de grandes tailles, trop lourds à traiter exhaustivement, à des problèmes manipulables simplement. Deuxièmement, l'avènement de logiciels de calcul des besoins énergétiques efficaces et d'ordinateurs personnels puissants permet le recours à des méthodes d'optimisation souvent coûteuses en temps de calcul, puisqu'elles demandent l'évaluation d'un grand nombre de configurations.

1.3.1 Optimisation de forme : quelques définitions

1.3.1.1 Définition mathématique

Résoudre un problème d'optimisation consiste à minimiser ou maximiser une fonction dont les variables sont soumises à un ensemble de contraintes (Nocedal et Wright, 2006). On définit les termes :

$x \in A$ est le vecteur de *paramètres* ou *variables* du problème d'optimisation. Ces variables peuvent être continues ou discrètes et sont le plus souvent bornées.

$f : A \mapsto \mathbb{R}$ est la *fonction objectif*, permettant l'évaluation d'un vecteur de variables par rapport à un *critère* que l'on souhaite minimiser ou maximiser. La fonction objectif peut être définie à partir des résultats d'un modèle de simulation.

$c = \{c_i : A \mapsto \mathbb{R}\}$ est un vecteur de *contraintes* sur les variables. Ces contraintes peuvent s'exprimer sous la forme d'égalités ($i \in \mathcal{E}$) ou d'inégalités ($i \in \mathcal{I}$).

La formulation mathématique du problème d'optimisation peut s'écrire :

$$\begin{cases} \min_{x \in A} f(x) \\ \text{avec} \begin{cases} c_i(x) = 0 & i \in \mathcal{E} \\ c_i(x) \leq 0 & i \in \mathcal{I} \end{cases} \end{cases} \quad (1.1)$$

Cette notation est également valable pour un problème de maximisation d'une fonction objectif en considérant $\max_{x \in A} f(x) = -\min_{x \in A} (-f(x))$

1.3.1.2 Les familles d'optimisation de forme

On distingue traditionnellement dans le domaine de la mécanique trois familles d'optimisation, qui peuvent être classées de la plus simple à la plus complexe (Christensen et Klarbring, 2008) (figure 1.15) :

Dimensionnement (*sizing* en anglais) : les dimensions à optimiser sont paramétrées, sans modification des points de la géométrie. Les paramètres en question peuvent être la section d'une barre, l'épaisseur d'un matériau, etc.

Forme (*shape*) : les formes géométriques sont ici plus librement modifiées, avec des variables affectant la forme du domaine. Bien que les connectivités définissant la topologie de la géométrie restent fixes (impossibilité de créer des trous), les paramètres de formes peuvent nécessiter de remailler les pièces étudiées (Duysinx et al., 1994).

Topologie (*topology*) : la forme n'est pas définie *a priori* et peut ainsi évoluer librement. Dans un espace géométrique discrétisé, les éléments peuvent ainsi exister, avec certaines propriétés, ou ne pas exister (avoir la valeur 0). Ce type d'optimisation permet notamment de générer des trous dans les géométries et de retrouver ainsi des formes variées en fonction des contraintes appliquées au système. Un bon exemple d'optimisation topologique est l'implantation de Bendsoe et Sigmund (2003) qui trouve la forme optimale en deux dimensions pour un problème de résistance à des charges mécaniques (99 lignes de Matlab) ou de conduction de chaleur.

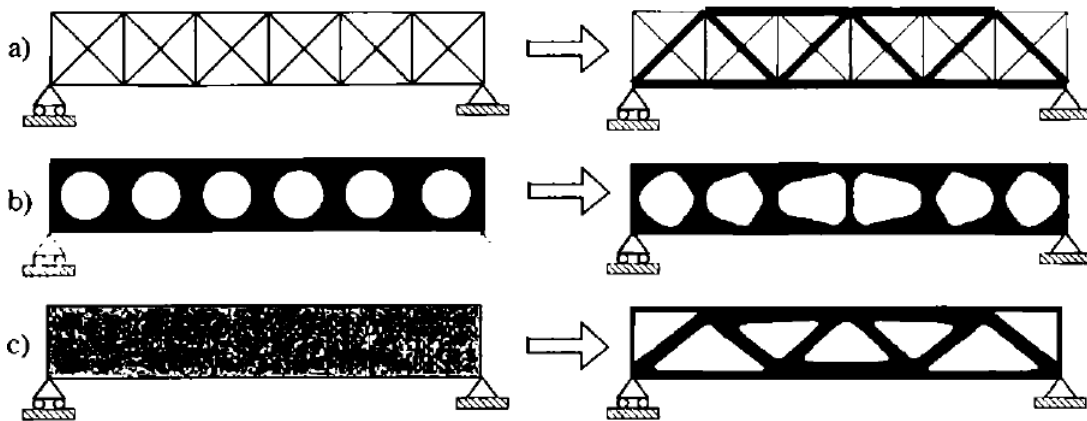


FIGURE 1.15: Les trois types d'optimisation de forme sur un problème de treillis 2D : a) dimensionnement, b) forme et c) topologie. Les problèmes initiaux sont représentés à gauche, leur solution à droite. Source : (Bendsoe et Sigmund, 2003)

1.3.2 Optimisation énergétique du bâtiment et de la ville

Dans le secteur du bâtiment, l'optimisation pour des critères énergétiques est relativement récente. L'accroissement du volume de publications, qu'elles portent sur des méthodes ou des applications, date des années 2000 et les premières revues de littérature du domaine sont sorties dans les années 2010 (Evins, 2013; Stevanović, 2013; Machairas et al., 2014; Nguyen et al., 2014). Cette section a pour objectif de survoler rapidement la thématique de l'optimisation énergétique du bâtiment, par ailleurs bien détaillée dans ces articles. Après une rapide description des études

paramétriques de dimensionnement, on se focalisera sur le cas particulier de l'optimisation de forme aux différentes échelles de la façade, du bâtiment et du quartier.

1.3.2.1 Problèmes de dimensionnement

Les problèmes de dimensionnement sont de loin les plus représentés dans la thématique de l'optimisation énergétique du bâtiment, profitant notamment de modules d'optimisation interfacés avec les logiciels de calcul thermique dynamique tels que TRNSYS ou EnergyPlus. Les problèmes concernés s'axent sur deux composantes principales :

- La constitution de **l'enveloppe**, à savoir les matériaux et leur épaisseur, la fraction de façade vitrée et le coefficient de déperdition associé. De ces paramètres dépendent notamment l'isolation et l'inertie du bâtiment ([Gupta, 1970](#)).
- **Les systèmes techniques** des bâtiments : chauffage, climatisation, ventilation, panneaux solaires, lumière, et autres composantes automatisées. On distingue dans ce cas deux types de variables : celles concernant le dimensionnement à proprement parler du chauffage/climatisation ([Seo et al., 2014](#)), des dispositifs liés à la lumière ([Freewan et al., 2008](#)) ou des panneaux solaires ([Kornelakis et Marinakis, 2010](#)); et celles relevant des paramètres d'utilisation des systèmes ([Fong et al., 2009](#); [Nassif et al., 2005](#); [Siddharth et al., 2011](#); [Stephan et al., 2009](#)).

Diverses études considèrent ces deux familles de paramètres simultanément, et mettent en place une optimisation multi-critères permettant de confronter des objectifs contradictoires faisant intervenir les besoins d'énergie (ou émissions de carbone), le confort ([Magnier et Haghighat, 2010](#)) et/ou les coûts associés ([Asadi et al., 2012](#); [Hamdy et al., 2011](#))

[Evins et al. \(2012b\)](#) proposent une optimisation de l'enveloppe et des systèmes en trois étapes : un plan d'expérience permet dans un premier temps d'identifier dans un ensemble de paramètres ceux qui ont un impact fort par rapport à deux critères : les émissions de gaz carbonique et le coût. Un premier processus d'optimisation est ensuite effectué pour détecter les variables qui n'ont pas un comportement contradictoire avec les différents critères et les retirer du problème. Enfin un processus d'optimisation plus fin peut être lancé avec un nombre réduit de variables pertinentes pour tirer les conclusions en terme de conception.

En plus des paramètres précédemment cités, certaines études font intervenir la forme du bâtiment, simplifiée par un parallélépipède dont l'orientation est variable ([Peippo et al.](#)).

A l'échelle urbaine, enfin, [Kämpf \(2009\)](#) a cherché à optimiser les performances énergétiques d'un quartier de Bâle par rapport aux détails des enveloppes et au type de système de chauffage des bâtiments en prenant comme contrainte un coût d'investissement global fixe.

1.3.2.2 Optimisation de forme à l'échelle de la façade

L'optimisation de forme, que ce soit à l'échelle de la façade, du bâtiment ou de la ville présente une grande diversité dans la manière de définir les variables d'optimisation. Dans cette section et les suivantes, l'accent est mis sur l'exposition de ces paramétrisations.

Au niveau des façades, les paramètres géométriques principaux sont la forme et la position des parties vitrées, ainsi que des protections solaires qui leur sont associées. Entre lumière naturelle, déperditions par les surfaces vitrées, et risques de surchauffes estivales, les critères de dimensionnement des fenêtres sont souvent contradictoires comme le montre Radford (1981) qui oppose confort d'hiver et confort d'été (figure 1.16).

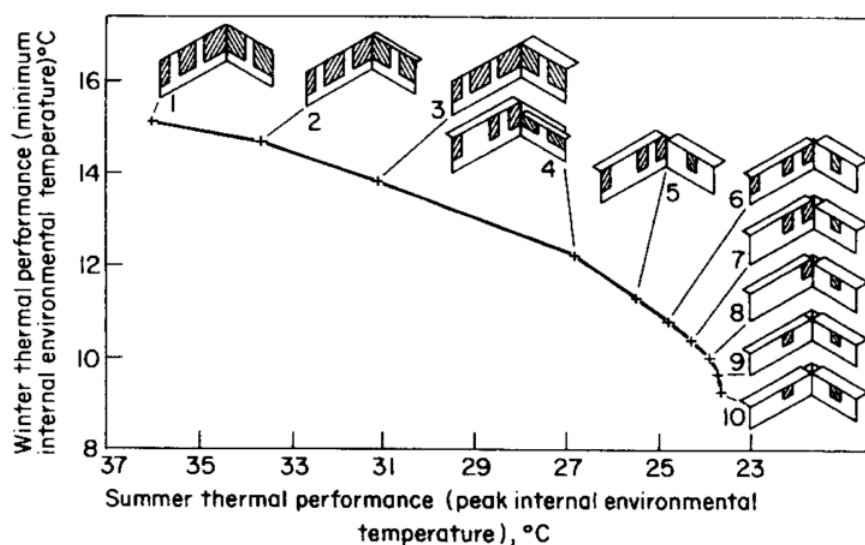


FIGURE 1.16: Exemple de solutions optimales au sens de Pareto pour un problème de performances été/hiver. Source : (Radford, 1981)

Les paramètres contradictoires d'un besoin de la lumière naturelle et de la réduction du besoin énergétique pour le chauffage/climatisation sont mis en évidence dans l'étude de Caldas et Norford (2002) qui cherche les tailles de fenêtres optimales pour les quatre directions cardinales en utilisant le logiciel DOE-2 pour le calcul thermique et lumineux (un capteur fictif est pour cela considéré à 3m à l'intérieur de la pièce). Les résultats exposent l'opposition prévisible dans les résultats optimaux entre une région dominée par les besoins de climatisation (Phoenix, États-Unis) et une région dominée les besoins le chauffage (Chicago, États-Unis). Dans le premier cas, de grandes fenêtres font face au Nord ; dans le second, les plus grandes fenêtres font face au Sud. L'étude montrait également que certaines configurations présentaient des niveaux de performances équivalents pour des formes différentes, par exemple en ce qui concerne les fenêtres est et ouest (figure 1.17).

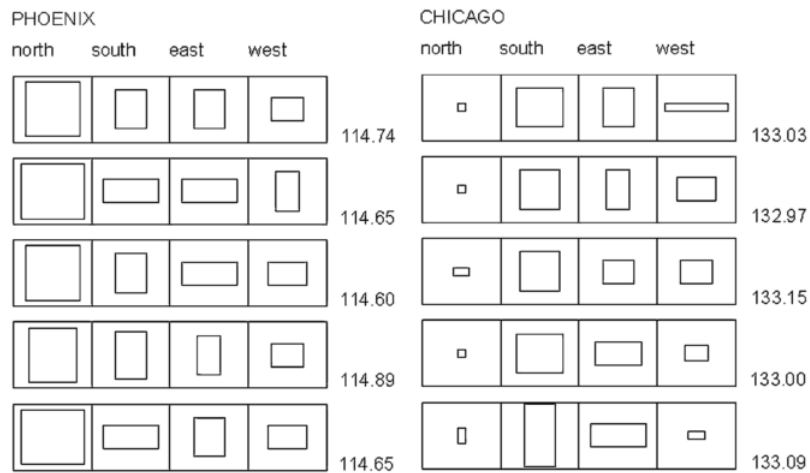


FIGURE 1.17: Formes de fenêtres optimales sur quatre essais d'optimisation pour les villes de Phoenix et Chicago. Source : (Caldas et Norford, 2002)

Par la suite, plus de liberté a été amenée dans la manière de définir les fenêtres, notamment par les travaux de Wright et Mourshed (2009) chez qui les façades sont discrétisées en un ensemble de cellules. Chaque cellule peut alors correspondre soit à une fenêtre, soit à une surface opaque (figure 1.18). En cela, la définition du problème se rapproche d'un cas d'optimisation topologique. La fonction objectif à minimiser dans leur cas correspond aux besoins en énergie pour le chauffage/climatisation et l'éclairage artificiel. Les résultats montrent qu'il existe un nombre de cellules optimal à partir duquel le gain en énergie pour la lumière artificielle dû à l'augmentation de la surface vitrée ne suffit plus à compenser l'augmentation des déperditions thermiques. La répartition des cellules vitrées apparaît comme secondaire dans la réduction des besoins, bien que des contraintes sur l'arrangement des cellules permettent d'obtenir des motifs variés.

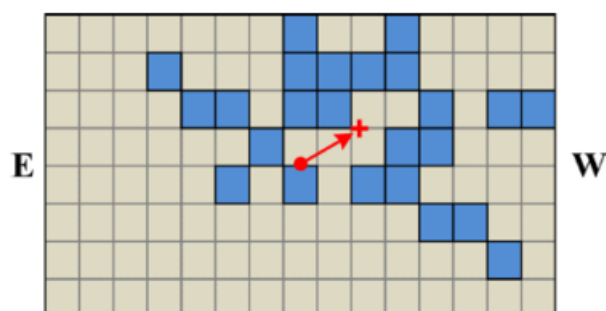


FIGURE 1.18: Exemple de solution de la répartition de d'éléments de fenêtres (en bleu) obtenue par Wright et Mourshed (2009). La flèche rouge pointe vers le barycentre des cellules vitrées.

Source : (Wright et Mourshed, 2009)

Enfin, Gagne et Andersen (2012) utilise un ensemble de règles pour créer les fenêtres sur un bâtiment : une surface vitrée est créée puis découpée en fenêtres qui sont ensuite transformées (modification du ratio hauteur/largeur) et déplacées sur la façade. Dans son étude, la conception de fenêtres et de protection solaires est dirigée par des critères liés à la lumière naturelle :

l'éclairage sur des capteurs à l'intérieur doit appartenir à une certaine plage de valeurs, tandis que les risques d'éblouissement doivent être évités.

1.3.2.3 Optimisation de forme à l'échelle du bâtiment

L'optimisation de la géométrie des bâtiments est le problème intermédiaire entre les détails de façades et l'échelle du quartier. Si on retrouve à cette échelle le même type de critères basés notamment sur le calcul dynamique des besoins de chaleur ou de froid, la grande différence entre les études tient pour beaucoup à la manière de paramétrer les géométries. A cette échelle plus qu'à celle des façades, ces paramétrisations peuvent être considérées comme des sous-systèmes potentiels d'un cas d'optimisation urbaine.

La manière la plus directe de décrire la forme d'un bâtiment paramétré consiste à décrire son empreinte au sol comme un domaine convexe composé d'arcs de cercle (Marks, 1997), de segments formant un polygone (Marks, 1997; Jedrzejuk et Marks, 2002) ou d'un ovale (Adamski, 2007) (figure 1.19). Ces représentations présentent plusieurs avantages : les formes convexes ne nécessitent pas de calculs d'ombres, habituellement coûteux en temps, tandis que la connaissance de la géométrie du bâtiment permet de calculer analytiquement la surface d'enveloppe et les apports solaires.

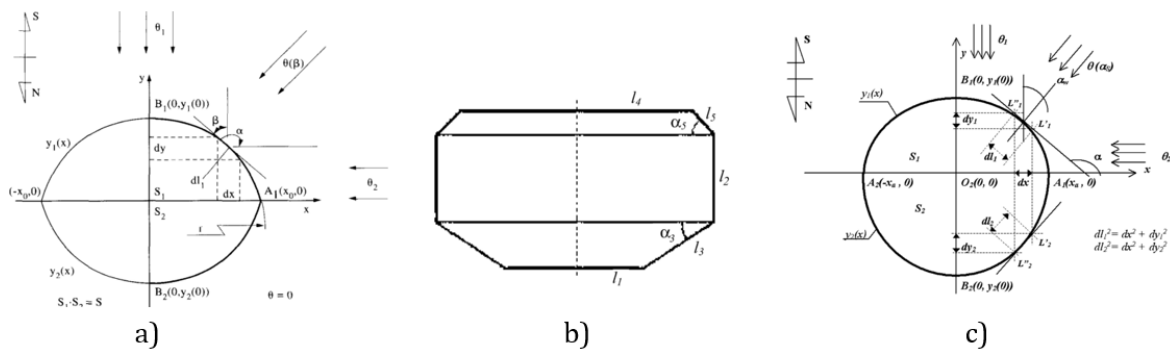


FIGURE 1.19: Formes paramétrées du plan du bâtiment, a) arcs de cercle (Marks, 1997), b) polygone (Jedrzejuk et Marks, 2002), c) ovale (Adamski, 2007)

Dès que la géométrie sort du cadre de formes convexes paramétrées, l'utilisation d'un modèle de simulation devient nécessaire. La paramétrisation de la géométrie peut alors être de plusieurs types :

- Les paramètres correspondent directement à des transformations géométriques, soit dans le plan du bâtiment (Wang et al., 2006), soit dans l'espace pour définir des volumes tridimensionnels plus complexes. Pour le second cas, Yi et Malkawi (2009) ont développé un système de points-agents dont la translation modifie la position d'un ensemble de points qui représentent l'enveloppe du bâtiment, limitant ainsi le nombre de variables décrivant les modifications possibles de la géométrie.

- Les géométries appartiennent à un ensemble de typologies de bâtiments (formes en L, T, H, rectangles, etc.). Ces typologies peuvent également être associées à des paramètres géométriques supplémentaires (largeurs, ou angles) (Tuhus-dubrow et Krarti, 2010).
- Les bâtiments consistent en un ensemble de volumes pouvant être modifiés à travers différentes règles de construction et d'agencement. Un tel système a été mis en place par Jones (2009) pour minimiser les besoins énergétiques du bâtiment (chauffage, climatisation, lumière artificielle) sous contrainte que tous les bâtiments, composés de neuf éléments, aient un volume total fixe (figure 1.20, a)). Un système proche a également été proposé par Caldas (2006) pour qui les bâtiments sont composés de 8 éléments sur une grille tridimensionnelle de 2x2x2 avec des règles d'agencements entre les éléments (figure 1.20, b)).
- La géométrie de bâtiments complexes et plausibles est générée en utilisant des grammaires de formes (Duarte et al., 2006). Un tel système a été employé par Caldas (2011) dans l'étude de patios à Marrakech par rapport aux besoins énergétiques du bâtiment (chauffage, climatisation, lumière artificielle). L'analyse des résultats de cette étude a permis d'interpréter *a posteriori* une caractéristique type (un rapport d'aspect), présente dans l'ensemble des bonnes configurations, pouvant par ailleurs présenter de fortes différences.

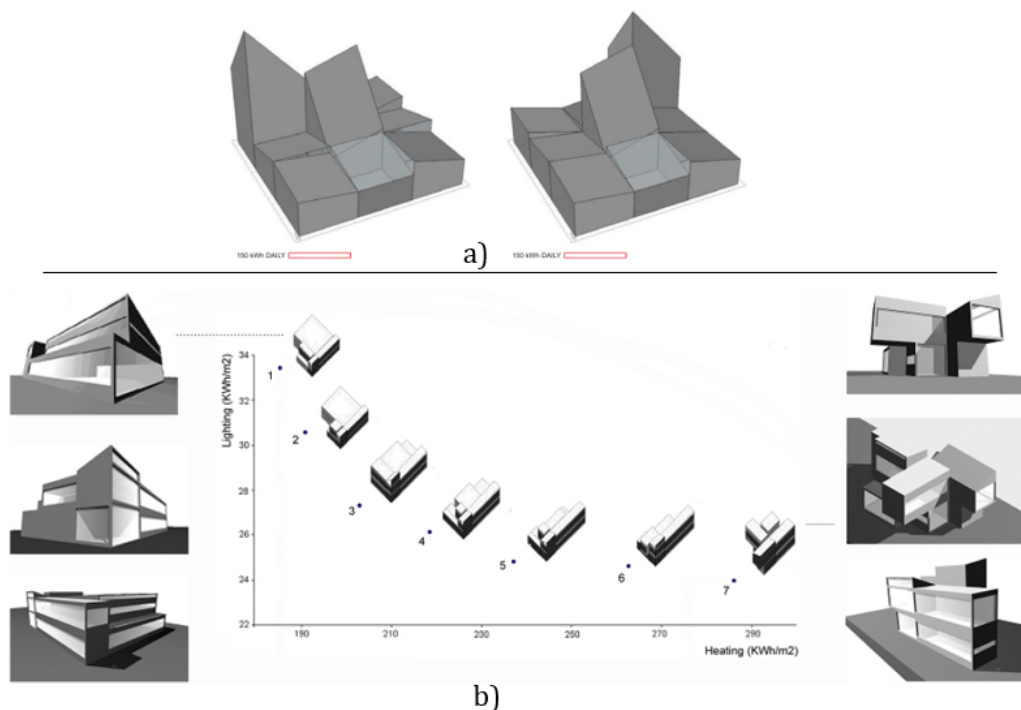


FIGURE 1.20: a) bâtiments composés de 9 éléments sur une grille 3x3 (Jones, 2009) b) bâtiments composés de 8 éléments sur une grille 2x2x2 (Caldas, 2006)

Cette dernière remarque, à savoir que la solution d'un problème d'optimisation peut ne pas être unique mais plutôt correspondre à un ensemble de solutions équivalentes au regard du ou des critères est une opportunité dans la démarche de conception. Ceci revient à dire qu'il existe

un ensemble d'optima proches de l'optimum global potentiellement intéressants à conserver et comprendre, qui permettrait de laisser le choix de la conception finale à l'architecte. Dans cette logique, [Coley et Schukat \(2002\)](#) ont cherché à minimiser les consommations énergétiques, et se sont intéressés aux solutions équivalentes par rapport à leur critère (voir par exemple figure 1.21). Les auteurs proposent dans un second temps de présenter les configurations possibles sous formes de dessins à un ensemble de personnes afin de les discriminer en fonction de leur attrait architectural.



FIGURE 1.21: Solutions architecturales équivalentes du point de vue du besoin de chauffage : a) privilégie l'isolation, et b) privilégie les apports solaires ([Coley et Schukat, 2002](#))

1.3.2.4 Optimisation de forme à l'échelle urbaine

Si la recherche des relations entre la forme de la ville d'une part et le rayonnement solaire ou les besoins énergétiques d'autre part est une thématique largement traitée par des études de cas et des études paramétriques, peu de travaux emploient une méthodologie reposant sur des méthodes d'optimisation numérique. Les premiers travaux sur le sujet s'attachent à montrer des premiers résultats permettant d'introduire l'enjeu et les méthodes qui lui seront associés.

Des études de maximisation du potentiel solaire à l'échelle du quartier ont été réalisées par [Kämpf et Robinson \(2010\)](#). Les cas d'étude consistent soit en un ensemble de bâtiments de hauteurs variables, soit en une ou plusieurs toitures dont la forme est paramétrée. La méthode d'optimisation utilisée, un algorithme évolutionnaire hybride (CMA-ES / HDE) a été proposée par l'auteur dans le cadre de l'optimisation de forme urbaines ([Kämpf et Robinson, 2009](#)). Les résultats présentés montrent qu'il est possible d'améliorer significativement l'exposition au rayonnement solaire en jouant sur la géométrie urbaine. Un cas d'étude dans le contexte réaliste de la ville de Bâle (Suisse) a également été développé par [Kämpf et al. \(2010\)](#), mettant en évidence la relation entre le volume à bâtir et son critère d'optimisation : les déperditions par l'enveloppe dont sont soustraits les apports solaires (figure 1.22). Ces études sont présentées par l'auteur comme des preuves de concepts visant à établir le potentiel de méthodes d'optimisation à l'échelle urbaine dans l'optique de les utiliser par la suite avec des logiciels de simulation urbaine tels que CitySim [Kämpf et Robinson \(2010\)](#); [Kämpf et al. \(2010\)](#).

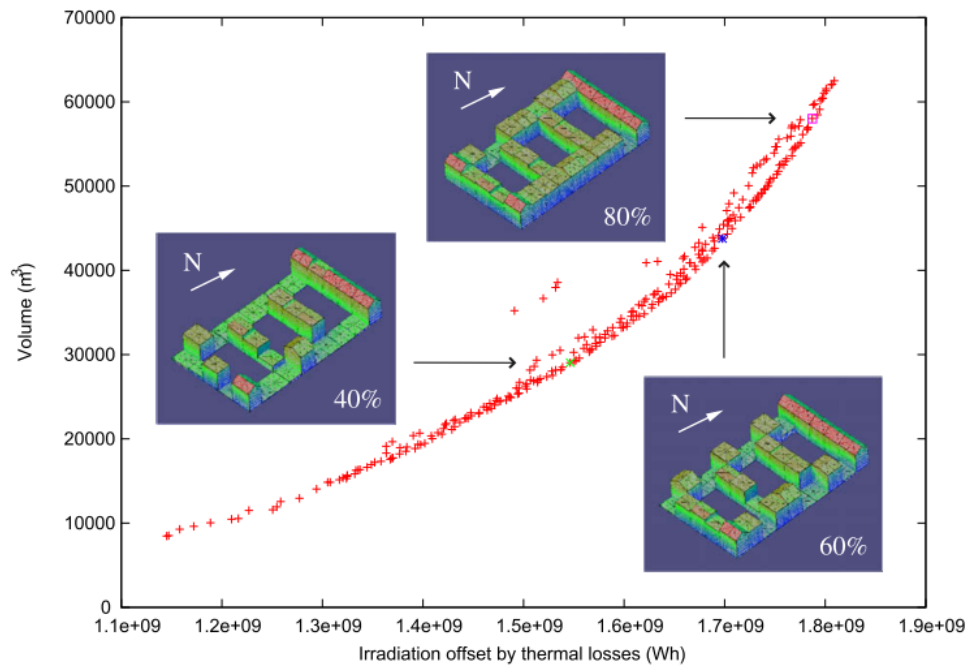


FIGURE 1.22: Configuration optimale d'un îlot urbain à Bâle (Suisse) en fonction du volume à bâtir (Kämpf et al., 2010)

Plusieurs autres travaux cherchent à optimiser la forme de bâtiments à l'échelle urbaine, cependant dans ceux-ci un seul bâtiment est optimisé tandis que le contexte urbain est considéré fixe.

[Kotelnikova-Weiler \(2012\)](#) cherche à optimiser la forme de l'enveloppe d'un bâtiment en répartissant sur celle-ci des panneaux sensibles au rayonnement direct, diffus ou réfléchi. Ses résultats montrent l'influence de l'ajout de bâtiments formant un contexte urbain : l'enveloppe va alors "chercher" le rayonnement solaire direct là où il est disponible.

Enfin, la paramétrisation d'un bâtiment définie par [Yi et Malkawi \(2009\)](#), qui repose sur un ensemble de points pilotant la géométrie de l'enveloppe, a été adaptée à l'échelle urbaine en remplaçant le bâtiment dans un contexte urbain ([Yi et Malkawi, 2012](#)). L'auteur propose de coupler cette paramétrisation avec une simulation dynamique thermique et fluide pour la conception de bâtiments performants énergétiquement.

1.3.2.5 Algorithmes d'optimisation employés

Différentes méthodes ont été employées pour résoudre des problèmes d'optimisation énergétique du bâtiment et de la ville. En 2013, la famille des algorithmes d'optimisation basés sur des populations évoluant au fil de générations était représentée dans environ deux-tiers des travaux d'optimisation ([Evins et al., 2012a](#)). Au sein de celle-ci, les algorithmes génétiques et évolutionnaires ont la part belle, notamment du fait de leur facilité d'implantation et de la documentation importante existant sur le domaine.

1.4 Conclusion

L'avènement durant les dernières décennies d'outils informatiques a été une opportunité pour améliorer la compréhension de l'influence de ce rayonnement sur le confort, le bilan thermique des bâtiments et la physique de la ville.

Depuis les années 2000, des méthodes d'optimisation numérique ont été utilisées pour minimiser les besoins énergétiques des bâtiments et en améliorer le confort. La complexité de l'environnement urbain rend impossible une optimisation exhaustive de toutes ses composantes, à toutes ses échelles. C'est pourquoi les problèmes géométriques sont bien souvent séparés en fonction de l'échelle à laquelle ils interviennent avec à chacune un ensemble de critères qui font sens :

- L'échelle de la façade est principalement liée à la relation entre intérieur et extérieur. Les problèmes d'optimisation de vitrage et des protections solaires prennent systématiquement en compte un niveau lumineux intérieur.
- L'échelle du bâtiment s'intéresse à la relation de l'enveloppe avec son environnement : de sa conception dépendent les déperditions par conduction ainsi que les apports solaires. A cette échelle, la relation intérieur/extérieur n'est plus systématiquement prise en compte pour déterminer le besoin d'énergie pour la lumière naturelle.
- L'échelle urbaine, encore peu représentée, à laquelle le travail porte davantage sur les volumes et les enveloppes des bâtiments, sans rechercher à atteindre le niveau de détail correspondant à l'intérieur du bâtiment.

Les travaux d'optimisation, quelle que soit l'échelle à laquelle ils interviennent, font souvent intervenir plusieurs critères d'optimisation (chaleur/lumière, été/hiver, confort/consommations). La solution de ces problèmes correspond à un ensemble de solutions optimales ou proches qui nécessitent en dernier lieu le choix de l'architecte ou de l'aménageur. La diversité de résultats équivalents par rapport à un critère d'optimisation est également vue par certains auteurs comme une opportunité pour comprendre la ville. En effet l'analyse de ces bonnes configurations pourrait éventuellement permettre d'en extraire certaines caractéristiques communes aux constructions performantes.

En conclusion d'un article sur l'optimisation de la forme de bâtiments, [Coley et Schukat \(2002\)](#) formulent trois questions comme pistes de réflexions :

1. Est-il possible d'améliorer les algorithmes d'optimisation afin de créer une grande variété de designs intéressants ?
2. Quel niveau de sophistication est requis pour le modèle thermique ?
3. A part le besoin énergétique, quels autres types de critères pourrait on vouloir minimiser/maximiser ?

Reformulées à l'échelle urbaine et pour le problème spécifique du rayonnement solaire, ces questions peuvent être reprises de manière à établir une direction à ce travail de thèse : il s'agit de rechercher à l'échelle du quartier les ensembles de configurations de bâtiments intéressantes par rapport à différents critères pertinents, simulés à l'aide de méthodes adaptées.

Le chapitre suivant décrit l'ensemble des méthodes implantées dans le but d'effectuer l'optimisation de la forme d'un quartier par rapport au rayonnement solaire. Dans ce cadre, un algorithme évolutionnaire a été adapté pour répondre aux spécificités des paramètres urbains.

Chapitre 2

Développement d'un outil d'optimisation de formes urbaines pour le rayonnement solaire

Dans le cadre de la thèse, un programme d'optimisation de formes urbaines par rapport au rayonnement solaire a été développé en MATLAB.

Le programme d'optimisation de formes urbaines peut se décomposer en trois composantes qui ensemble définissent le problème d'optimisation :

- La **géométrie** des bâtiments et des quartiers. On considère dans ce travail que les bâtiments sont des volumes dont l'enveloppe capte le rayonnement solaire. Deux types de paramétrisations de bâtiments sont définis. Chaque type de géométrie est construit à partir d'un ensemble de paramètres – les *variables de conception* du problème d'optimisation – soumis à différentes contraintes. Une représentation du quartier comme un ensemble de sous-quartiers qui se répèteraient dans chaque direction est ensuite introduite.
- Le **modèle physique** permettant de simuler les apports solaires sur un quartier. On considèrera trois types de grandeurs calculées sur le quartier : l'énergie du rayonnement direct par ciel clair représentant les conditions idéales, les facteurs de vue du ciel, et l'énergie calculée en utilisant des données météorologiques. Ces grandeurs, associées à un critère (que souhaite-t-on optimiser ?) constituent la *fonction objectif* du problème d'optimisation.
- L'**algorithme d'optimisation**. Une méthode d'optimisation basée sur un algorithme évolutionnaire a été adaptée aux géométries de quartier utilisées et à leurs contraintes, afin de rechercher les meilleures configurations urbaines.

Ce chapitre décrit le fonctionnement de ce programme. Son utilisation dans le cadre de l'optimisation de formes urbaines théoriques est présentée dans le chapitre 3.

2.1 Géométrie

Dans le but d'optimiser la forme urbaine, aux géométries de quartiers doivent correspondre un ensemble de paramètres. Dans cette section, deux paramétrisations géométriques d'un bâtiment sont présentées avec les contraintes qui leurs sont associées :

- Une représentation de quartier par un ensemble de **blocs** forment des piles, et pouvant représenter la répartition d'étages en tours. L'idée sous-jacente de cette représentation est que la hauteur des bâtiments joue un rôle premier dans la construction de masques pour le rayonnement solaire.
- Une représentation de quartier comme un ensemble de **parcelles** sur lesquelles des bâtiments initialement définis peuvent être transformés par des opérateurs de rotation, déplacement et déformation. Chaque bâtiment peut être associé à un sous-ensemble de paramètres (orientation seule, ou déplacement seul par exemple). Cette représentation permet ainsi de prendre en compte des caractéristiques courantes dans les travaux d'optimisation des bâtiments : orientation des façades, rapports longueur/largeur dans le plan.

Un ensemble de bâtiments fixes peuvent être ajoutés aux quartiers pour définir un contexte urbain jouant le rôle de masques au rayonnement solaire. Cependant, la définition d'un contexte relève, dans le cadre d'une étude théorique, d'un choix arbitraire pouvant limiter la portée de l'analyse des résultats. Pour pallier cela, une définition du quartier comme un ensemble de sous-quartiers répétés régulièrement, appelées **cellules urbaines**, est proposée. De cette manière, l'existence d'une cellule optimale pouvant être répétée est considérée comme une hypothèse, ce qui permet d'analyser les formes optimales d'un tissu urbain périodique.

Dans tous les cas de géométries considérés, les bâtiments sont séparés les uns des autres, et les paramètres ne modifient que marginalement leur surface d'enveloppe. Cette condition a été imposée dans la construction des géométries car, dès lors que la surface d'enveloppe d'un bâtiment varie (par une modification de sa forme ou par mitoyenneté avec un autre bâtiment), le bilan énergétique du bâtiment est complètement changé, et il devient justifié de le prendre en compte dans le critère d'optimisation.

2.1.1 Représentation en blocs

La géométrie en blocs se définit comme la répartition d'un ensemble de blocs élémentaires, placés sur une grille de positions possibles. Les blocs peuvent s'empiler pour constituer des tours, et peuvent être interprétés comme des étages. Un quartier est représenté par un vecteur du nombre de blocs k en pile sur chaque emplacement :

$$\vec{x} = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$$

Dans le cadre de l'optimisation d'un quartier, on considère que l'aménageur doit construire une certaine surface habitable, ce qui se traduit par un nombre de blocs N_{blocs} à répartir sur l'ensemble des positions possibles. De plus, afin d'éviter la construction d'une seule tour, chaque tour ne peut contenir qu'un nombre maximal de blocs. Les contraintes associées à la représentation en blocs s'expriment :

$$\begin{cases} k_{min} \leq k_i \leq k_{max} & i = 1, \dots, N_{bat} \\ \sum_{i=1}^{N_{bat}} k_i = N_{blocs} \end{cases} \quad (2.1)$$

Bien que le positionnement de bâtiments dans un quartier en blocs puisse être imaginé de manière moins structurée, le caractère régulier présenté par des grilles de bâtiments permet de voir apparaître des formes type (canyons, cours) et ainsi d'analyser les formes optimales avec des critères morphologiques courants. De plus, les villes ordonnées de manière structurées par une grille orthogonale d'emplacements rectangulaires sont courantes, notamment en Amérique du Nord et en Europe (par exemple, le quartier de l'Eixample de Barcelone).

Un exemple de représentation en blocs est présenté sur la figure 2.1. Le nombre de blocs sur chaque emplacement est représenté par une échelle de gris sur la vue du dessus (à droite).

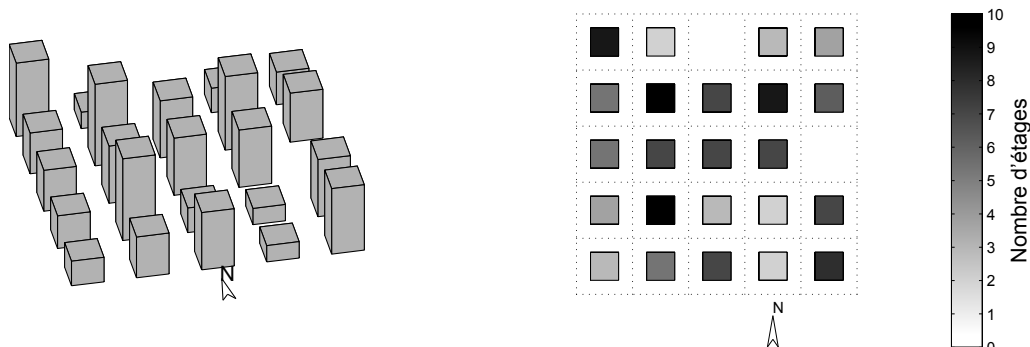


FIGURE 2.1: Représentation en blocs, exemple d'une grille rectangulaire 5x5

Plusieurs exemples d'application utilisant la description géométrique en blocs sont présentés dans la section 3.3.

2.1.2 Représentation par des bâtiments sur des parcelles

La représentation en blocs ne permet pas de faire ressortir la diversité des caractéristiques morphologiques de la ville. Il s'est avéré nécessaire de mettre en œuvre une seconde paramétrisation de la forme du bâtiment afin de représenter un ensemble plus grand de ces caractéristiques. Dans cette formulation, chaque bâtiment est associé à une parcelle convexe. A partir d'une géométrie initiale fournie par l'utilisateur, un ensemble de paramètres permettent de modifier la géométrie du bâtiment tout en conservant certaines de ses propriétés. Un ensemble de

contraintes sur les paramètres, appelées contraintes stériques, empêchent les bâtiments de sortir de leur parcelle, afin d'éviter les collisions avec d'autres bâtiments ou d'éventuelles zones non constructibles. Dans un premier temps, la description des transformations sera présentée, puis la gestion des contraintes stériques sera explicitée. Une application utilisant cette paramétrisation des bâtiments figure dans la section 3.4.

2.1.2.1 Transformation du bâtiment et paramètres associés

On expose dans cette partie les paramètres et opérations de transformation appliqués à un bâtiment. Le quartier est par la suite constitué d'un ensemble de bâtiments, chacun sur sa parcelle. On considère un bâtiment B défini par une forme initiale (rectangle, forme en T, en U, ou autre). L'ensemble des sommets $X \in B$ de ce bâtiment constituent sa géométrie.

On souhaite transformer le bâtiment B en un bâtiment B' par une transformation affine des points de sa géométrie. Cette transformation conserve le nombre de sommets du bâtiment et les connectivités de ses faces. Afin de garantir certaines propriétés de la forme du bâtiment pendant la transformation, on exprime un ensemble de contraintes :

- C1 : la base des bâtiments ne peut pas s'élever au dessus du sol.
- C2 : les bâtiments sont des prismes droits et les transformations doivent conserver la verticalité des faces.
- C3 : les angles initiaux du bâtiment dans le plan sont conservés. Un rectangle ne peut ainsi pas se transformer en losange.
- C4 : le volume du bâtiment doit pouvoir rester constant (si une contrainte sur le volume total à l'échelle du quartier n'est pas définie).
- C5 : les variables de conception sont encadrées par une valeur minimale et une valeur maximale.

Ces contraintes sont utilisées dans la suite de cette partie pour simplifier l'expression de la transformation affine, et finalement en extraire les paramètres du problème d'optimisation. On part pour cela de l'expression générale de la transformation :

$$X' = X'_G + M(X - X_G) \quad (2.2)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_G \\ y'_G \\ z'_G \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x - x_G \\ y - y_G \\ z - z_G \end{pmatrix}$$

où X_G est un point de référence associé au bâtiment initial et X'_G est le nouveau point de référence après translation.

Les contraintes sont gérées séparément de manière à simplifier l'expression du système décrit par la formule 2.2.

Propriété 2.1. La contrainte qui empêche à la base des bâtiments de s'élever du sol (C1) s'exprime :

$$z = 0 \Rightarrow z' = 0, \quad \forall x, y$$

cette propriété conduit à l'équation :

$$m_{31}(x - x_G) + m_{32}(y - y_G) - m_{33} z_G + z'_G = 0$$

d'où on déduit :

$$m_{31} = m_{32} = 0$$

et

$$z'_G = m_{33} z_G$$

Par convention, on considère $z_G = z'_G = 0$ en prenant comme point de référence X_G l'isobary-centre de l'empreinte au sol du bâtiment. Ceci implique, dans le cas général, $z' = m_{33}.z$.

Propriété 2.2. La conservation de la verticalité des parois (C2), s'exprime par :

$$M \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Démonstration. Soient deux points X_1 et X_2 alignés verticalement, c'est-à-dire :

$$X_2 - X_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix}$$

Les points $f(X_1)$ et $f(X_2)$ doivent être également alignés verticalement, c'est à dire :

$$f(X_2) - f(X_1) = M \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix}$$

□

Cette propriété induit ainsi :

$$m_{13} = m_{23} = 0$$

Les propriétés 2.1 et 2.2 permettent d'écrire la matrice M de la forme :

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

En séparant les modifications sur les hauteurs des modifications dans le plan, le système prend la forme :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_G \\ y'_G \end{pmatrix} + T \begin{pmatrix} x - x_G \\ y - y_G \end{pmatrix} \\ z' = m_{33} z \end{cases} \quad (2.4)$$

Par décomposition polaire, la matrice T de l'application linéaire dans le plan peut être transformée en un produit d'une matrice orthogonale et d'une matrice symétrique définie positive. Pour la conservation des angles dans le plan (C3), on définit la décomposition de T comme suit :

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = RD = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La matrice de rotation R est liée à un paramètre, θ , et la matrice diagonale D , qui traduit les affinités dans les deux directions du repère initial, est liée à deux paramètres, λ_1 et λ_2 .

Propriété 2.3. *La conservation du volume de chaque bâtiment nécessite*

$$\det(M) = 1$$

Démonstration. Soit P un polyèdre de volume $V(P)$ et $f(P)$ son image par l'application linéaire f de matrice M . On appelle (x, y, z) le repère de P et (x', y', z') le repère de $f(P)$. Ces deux repères sont liés par la relation suivante :

$$dx' dy' dz' = \det \left(M \begin{pmatrix} dx \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, M \begin{pmatrix} 0 \\ dy \\ 0 \end{pmatrix}, M \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ dz \end{pmatrix} \right) = dx dy dz \det(M)$$

De cela, on déduit le volume de $f(P)$:

$$V(f(P)) = \int_{f(P)} dx' dy' dz' = \int_P \det(M) dx dy dz = \det(M) \int_P dx dy dz = \det(M) V(P)$$

□

De la propriété 2.3 découle :

$$\lambda_3 = m_{33} = \frac{1}{\det(T)} = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2}$$

Dans le but de conserver des hauteurs discrètes pour représenter plus fidèlement les étages d'une géométrie urbaine, une paramétrisation par bloc peut également être considérée. La contrainte

du nombre de blocs à bâtir, évoquée dans le cas des géométries en blocs (partie 2.1.1), peut être transposée dans le cadre de bâtiments définis par des paramètres de forme. La variation de surface induite par les affinités nécessite de l'adapter en une surface totale à bâtir, A_{totale} :

$$\sum_{i=1}^{N_{bat}} k_i A_{initial,i} \lambda_{1,i} \lambda_{2,i} = A_{totale} \quad (2.6)$$

L'ensemble de six paramètres permettant de piloter les modifications du bâtiment est résumé dans le tableau 2.1. Les transformations correspondantes, dans l'ordre dans lesquelles elles sont appliquées à la création des géométries sont présentées sur la figure 2.2.

TABLEAU 2.1: Paramètres de transformation des bâtiments

Paramètres	Notation	
Affinités	λ_1, λ_2	Le bâtiment initial est déformé par des affinités opérant dans les deux directions principales du plan dans le repère absolu.
Rotation	θ	Le bâtiment est tourné autour de son centre (isobarycentre de ses sommets dans le plan).
Translation	x'_G, y'_G	Le bâtiment est déplacé dans le plan, les paramètres correspondent à la nouvelle position du centre de gravité du bâtiment. La translation à proprement parler correspond à la différence entre la nouvelle et l'ancienne position du bâtiment : $(t_x, t_y) = (x'_G - x_G, y'_G - y_G)$
Hauteur	k ou λ_3	La hauteur du bâtiment peut être définie par un nombre d'étages (k , paramètre discret), ou par un paramètre d'affinité s'appliquant à la définition initiale du bâtiment (λ_3)

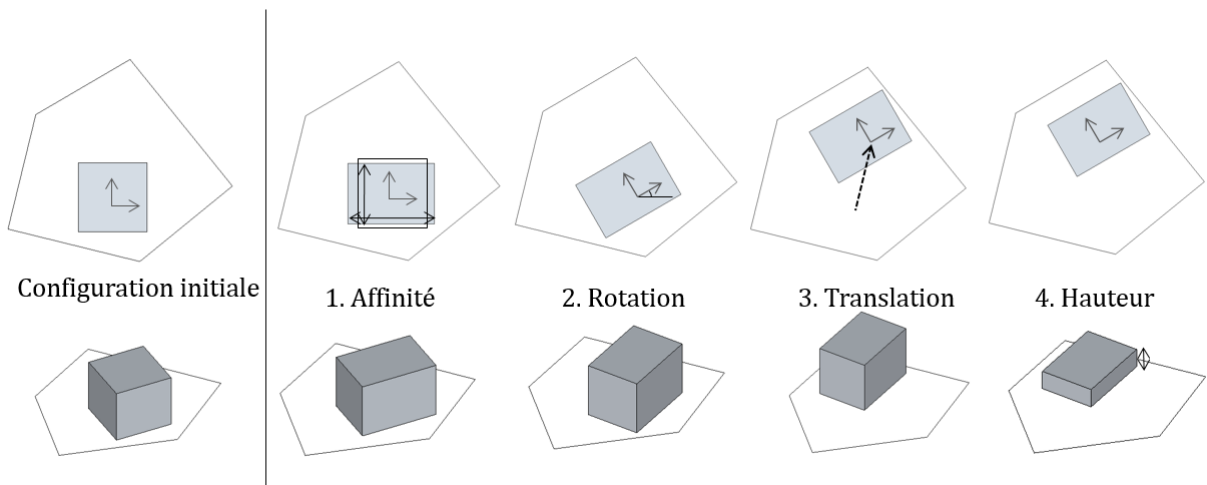


FIGURE 2.2: Transformations

Un quartier composé de plusieurs bâtiments correspond à un vecteur des paramètres de chaque bâtiment. Dans le cas de hauteurs pilotées par un nombre d'étages, ce vecteur s'écrit :

$$\vec{x} = (x_G^1, y_G^1, \theta^1, \lambda_1^1, \lambda_2^1, k^1, \dots, x_G^{N_{bat}}, y_G^{N_{bat}}, \theta^{N_{bat}}, \lambda_1^{N_{bat}}, \lambda_2^{N_{bat}}, k^{N_{bat}})$$

2.1.2.2 Gestion des contraintes stériques

On appelle contraintes stériques la conservation du bâtiment à l'intérieur de sa parcelle. Cette partie décrit la manière dont on vérifie si un bâtiment est bien à l'intérieur de la parcelle. On doit pour cela résoudre un système d'inéquations qui expriment que les sommets du bâtiment qui aurait été modifié par un vecteur de paramètres doivent rester du bon côté des droites formant la limite de la parcelle (voir figure 2.3).

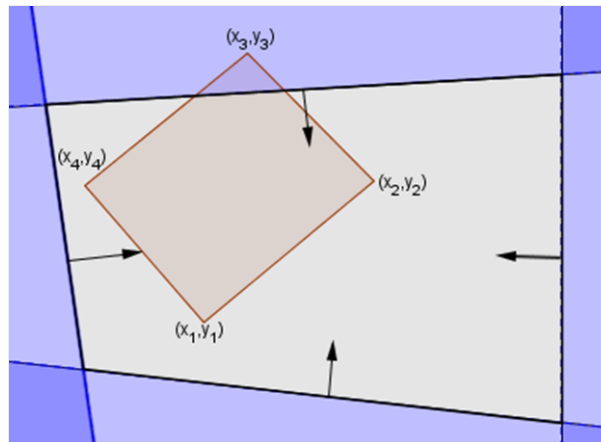


FIGURE 2.3: Bâtiment sur une parcelle. Chaque sommet doit être du bon côté des lignes de bordure

On note B le bâtiment dont on doit vérifier qu'il est à l'intérieur du domaine D représentant sa parcelle. On note $(x_1, y_1), \dots, (x_j, y_j), \dots, (x_p, y_p)$ les sommets de l'enveloppe convexe \underline{B} de l'empreinte au sol du bâtiment B . On note par l'équation $f_{i1}x + f_{i2}y = g_i$ l'équation d'une droite constituant la bordure de D de telle manière que l'on ait :

$$(x, y) \in D \Leftrightarrow f_{i1}x + f_{i2}y \leq g_i, \quad \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.7)$$

Les contraintes stériques pour un bâtiment donné se traduisent par :

$$\underline{B} \subset D \Leftrightarrow f_{i1}x_j + f_{i2}y_j \leq g_i, \quad \forall j \in 1, \dots, p, \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.8)$$

Soit un bâtiment B' modifié par un ensemble de paramètres $t_1, t_2, \theta, \lambda_1, \lambda_2$. On cherche à vérifier que $\underline{B}' \subset D$, c'est-à-dire :

$$f_{i1}x'_j + f_{i2}y'_j \leq g_i, \quad \forall j \in 1, \dots, p, \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.9)$$

ce qui revient, par la formule 2.4, à :

$$f_{i1}(x'_G + t_{11}(x_j - x_G) + t_{12}(y_j - y_G)) + f_{i2}(y'_G + t_{21}(x_j - x_G) + t_{22}(y_j - y_G)) \leq g_i \quad (2.10)$$

Le système à résoudre consiste donc en un système d'inéquations dont le nombre correspond pour chaque bâtiment au nombre de sommets de son empreinte au sol que multiplie le nombre de côtés de sa parcelle. Le système est de la forme :

$$Fa \leq g \quad (2.11)$$

où la matrice F et les vecteurs a et g sont définis comme suit :

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & (x_1 - x_G) & (y_1 - y_G) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & (x_p - x_G) & (y_p - y_G) \end{bmatrix}$$

où \otimes correspond au produit de Kronecker, c'est à dire :

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{11}(x_1 - x_G) & f_{11}(y_1 - y_G) & f_{12} & f_{12}(x_1 - x_G) & f_{12}(y_1 - y_G) \\ f_{11} & f_{11}(x_2 - x_G) & f_{11}(y_2 - y_G) & f_{12} & f_{12}(x_2 - x_G) & f_{12}(y_2 - y_G) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{11} & f_{11}(x_p - x_G) & f_{11}(y_p - y_G) & f_{12} & f_{12}(x_p - x_G) & f_{12}(y_p - y_G) \\ f_{21} & f_{21}(x_1 - x_G) & f_{21}(y_1 - y_G) & f_{12} & f_{22}(x_1 - x_G) & f_{22}(y_1 - y_G) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{i1} & f_{i1}(x_j - x_G) & f_{i1}(y_j - y_G) & f_{12} & f_{i2}(x_j - x_G) & f_{i2}(y_j - y_G) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n1}(x_p - x_G) & f_{n1}(y_p - y_G) & f_{12} & f_{n2}(x_p - x_G) & f_{n2}(y_p - y_G) \end{bmatrix}$$

$$g^T = [g_1 \quad \dots \quad g_1 \quad g_2 \quad \dots \quad g_2 \quad \dots \quad g_n \quad \dots \quad g_n]$$

$$a^T = [x'_G \quad \lambda_1 \cdot \cos(\theta) \quad -\lambda_2 \cdot \sin(\theta) \quad y'_G \quad \lambda_1 \cdot \sin(\theta) \quad \lambda_2 \cdot \cos(\theta)]$$

Seul le vecteur a dépend des paramètres. La matrice F et le vecteur g peuvent de ce fait être calculés à partir des coordonnées initiales du bâtiment. A noter que si les paramètres de rotation sont fixés, le système d'inéquations devient linéaire en fonction du vecteur des paramètres.

2.1.3 Cellules

Lors de l'évaluation du potentiel solaire d'un quartier, le contexte urbain (bâtiments environnants) joue un rôle en tant que masques et que réflecteurs (si les réflexions sont prises en compte). Il paraît de ce fait logique de prendre en compte cette frontière dans le cadre d'un problème d'optimisation : la configuration optimale du quartier doit éviter de déranger l'exposition au soleil des bâtiments pré-existants.

Dans le cas de l'implantation des bâtiments optimisés dans un quartier réel, la frontière peut être logiquement définie par les bâtiments et masques alentour. Pour ce qui est d'un quartier théorique, plusieurs situations existent :

- le quartier est situé dans un environnement ouvert, et les masques sont négligés ;
- un contexte urbain arbitraire est considéré : par exemple, tous les bâtiments alentours sont fixés à une hauteur moyenne ;
- le contexte urbain est généré aléatoirement sur les bases de la typologie du quartier même, comme cela a pu être réalisé par [Cheng et al. \(2006\)](#).

Dans le second cas, le choix peut empêcher de généraliser les résultats : pourquoi les bâtiments à optimiser ont-ils des hauteurs variables et pas le contexte ?

Dans le troisième cas, l'influence du contexte aléatoire sur les bâtiments à optimiser doit également être évaluée. Mais là encore : le contexte aléatoire, même s'il représente une diversité plus en accord avec la variabilité des bâtiments optimisés, n'est pas un cas général.

Afin de prendre en compte un contexte indépendamment d'un choix arbitraire, le quartier peut être dessiné comme un tissu urbain périodique dont l'élément de base, appelé cellule, est soumis à optimisation. Dès lors, le contexte urbain est homogène au sous-quartier auquel on s'intéresse : il s'agit de copies de lui-même. Une application de la formalisation en cellules est présentée dans la section [3.5](#).

2.1.3.1 Définition de la cellule

Dans ce travail de thèse, la cellule est associée à la représentation d'un quartier en blocs sur une grille rectangulaire. Le quartier est donc de la même manière défini comme une grille de $n_x \times n_y$ emplacements. La cellule est ensuite répétée sur les côtés en tant que masques. Un exemple de cellule de dimensions 3x3 est présenté sur la figure [2.4](#).

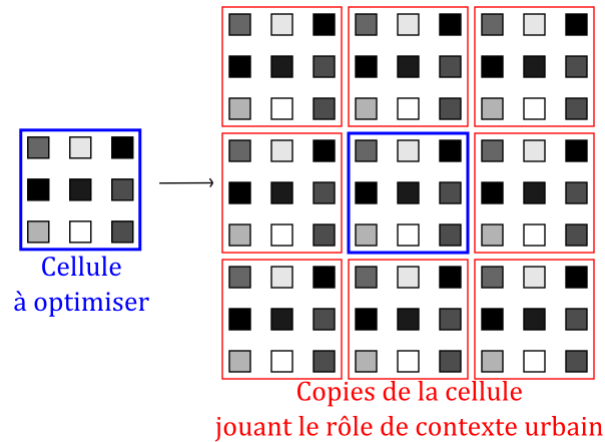


FIGURE 2.4: Cellule urbaine (vue en plan, les niveaux de gris représentent des hauteurs de bâtiments)

La représentation en cellules est un outil particulier, puisque le contexte et le bâtiment optimisé sont fortement liés : un bâtiment dont la hauteur augmente génère également des masques autour de lui dont la proximité dépend de la taille de la cellule. L'influence des masques sur l'exposition au soleil d'un bâtiment diminue avec la distance des masques. La taille de la cellule est donc susceptible d'influencer *a priori* l'énergie solaire que pourra capter un bâtiment, et pourra représenter un paramètre intéressant avec lequel jouer. Pour donner un exemple des régularités générées, trois cellules de dimensions 2x2, 3x3, et 4x4, reproduites de manière à générer un quartier de 7x7 bâtiments sont présentées sur la figure 2.5.

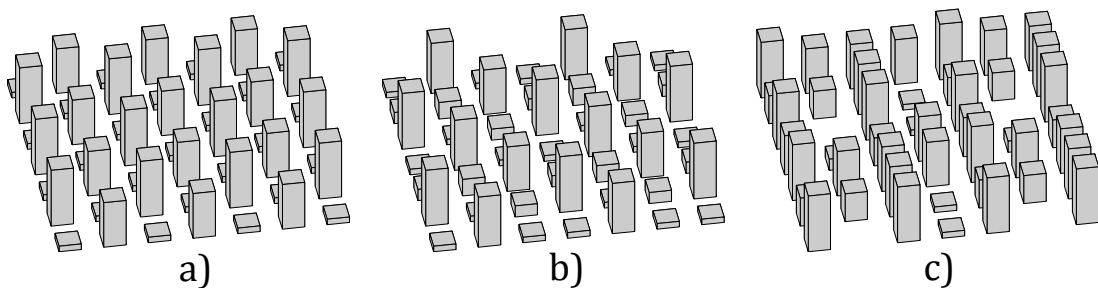


FIGURE 2.5: Représentation sur une grille de 7x7 bâtiments d'une cellule a) 2x2, b) 3x3, c) 4x4

Note : bien que la cellule ait été implantée pour le quartier en blocs, il est également possible d'envisager d'autres types de représentation du quartier, par exemple en considérant une grille de parcelles, telles que décrites dans la section 2.1.2.

2.1.3.2 Calcul sur la cellule urbaine

Si la cellule urbaine est *a priori* considérée comme une reproduction à l'infini d'un contexte urbain, le calcul de l'énergie solaire sur les bâtiments ne considère les masques que dans un

périmètre réduit afin de limiter le temps de calcul (le temps de calcul pour tester la visibilité du soleil dépend grandement du nombre de masques de la scène urbaine).

Le calcul s'effectue bâtiment par bâtiment. Pour chacun, un quartier est créé dont le bâtiment est le centre. La taille du quartier généré dépend d'un paramètre appelé rayon de calcul, R_{calc} , qui représente le nombre de bâtiments pris en compte dans le calcul des masques dans chaque direction (voir figure 2.6).

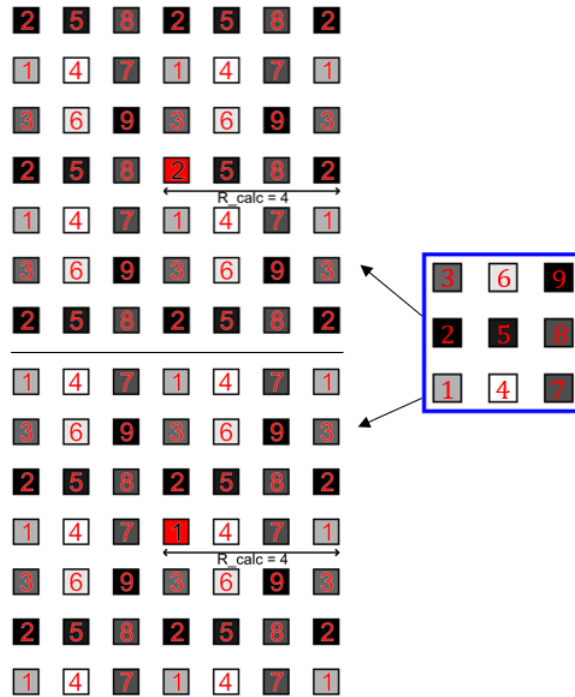


FIGURE 2.6: Exemple de quartiers créés pour le calcul du rayonnement solaire avec une cellule de dimensions 3x3 et $R_{calc} = 4$. (vue en plan, les niveaux de gris représentent des hauteurs de bâtiments)

Pratiquement, la procédure appliquée pour calculer le rayonnement solaire sur l'ensemble des bâtiments suit les étapes suivantes :

1. En fonction du vecteur \vec{x} des hauteurs des bâtiments de la cellule, une matrice M de dimensions $(n_x + 2(R_{calc} - 1))$, $(n_y + 2(R_{calc} - 1))$ est créée. Cette matrice reprend les valeurs de hauteurs, disposées en fonction de leur position dans la grille, et périodiquement jusqu'à ce que la matrice soit remplie.
2. Pour chaque sous-matrice de dimensions $(2R_{calc} - 1)$, $(2R_{calc} - 1)$ d'éléments contigus de M , un quartier est créé. Les bâtiments sont générés dans la même disposition que les nombres de blocs référencés dans la sous-matrice extraite. De cette manière, un quartier est généré par bâtiment de la cellule.
3. Pour chaque géométrie urbaine créée, la fonction souhaitée (exposition au soleil, visibilité du ciel, etc.) est calculée sur le bâtiment central. Tous les autres bâtiments sont pris en compte dans le calcul en tant que masques.

A noter que la génération de ces géométries prend un temps négligeable en comparaison du temps de calcul de l'exposition au rayonnement solaire.

2.2 Calcul du rayonnement solaire

Plusieurs programmes existants permettent de calculer le rayonnement solaire à l'échelle du bâtiment ou du quartier. Cependant, pour qui ne les a pas développés, ces programmes restent souvent des "boîtes noires" dont les paramètres et méthodes de calculs peuvent être opaques. Le besoin de contrôler le fonctionnement et la précision du calcul afin de garantir des évaluations de quartiers rapides (maximum 20 secondes) ont été des arguments en faveur de la création d'un code de calcul du rayonnement solaire dans le cadre de ce travail sur l'optimisation. Pour atteindre une rapidité de calcul satisfaisante, il a été nécessaire de ne pas prendre en compte les réflexions entre les surfaces, que l'on considèrera comme secondaires dans la comparaison des formes urbaines par rapport au rayonnement solaire. Cette hypothèse, qui peut être une limitation notamment si l'on s'intéresse à la lumière naturelle, permet un calcul exact des ombres par projections, sans nécessiter un maillage des surfaces.

Dans cette section les modèles et méthodes de calcul utilisés dans l'évaluation du rayonnement solaire sur les scènes urbaines sont décrits. Plus précisément, trois types de grandeurs calculées qui serviront de base aux fonctions objectif dans le cadre de l'optimisation sont présentés :

1. le rayonnement direct par ciel clair ;
2. le facteur de vue du ciel ; et
3. le rayonnement direct et diffus reposant sur l'utilisation de données météorologiques.

Afin de calculer ces différentes grandeurs, des étapes intermédiaires sont nécessaires. Tout d'abord, la position du soleil doit être calculée. Sa connaissance permet de déterminer le rayonnement solaire par ciel clair. Ensuite, la voûte céleste est décomposée en un ensemble de tuiles, utilisées dans le calcul des facteurs de vue du ciel. Enfin, le rayonnement solaire est réparti sur la voûte céleste et cumulé sur une période de temps. Ces ciels cumulés, combinés aux facteurs de vue du ciel, donnent une évaluation des rayonnements solaires direct et diffus.

2.2.1 Position du soleil

La position du soleil dans le ciel est caractérisée par l'angle zénithal θ_z , angle que fait le soleil par rapport au zénith, et par l'azimut solaire γ_z , angle que fait le rayon de soleil rapporté sur le plan horizontal avec le sud (tel quel $\gamma_z < 0$ à l'est et $\gamma_z > 0$ à l'ouest) (figure 2.7). La position du soleil dépend du jour j de l'année et de l'heure h considérés, ainsi que de la latitude ϕ à laquelle est situé le modèle.

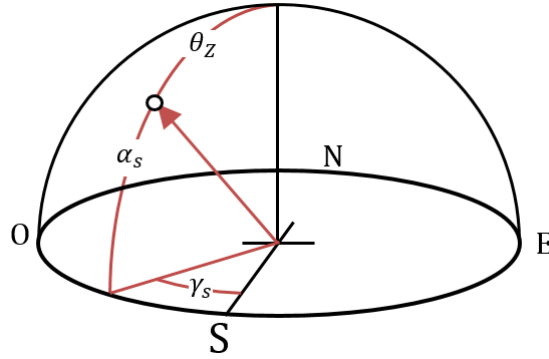


FIGURE 2.7: Angles liés à la position du soleil dans le ciel

Afin de calculer la position du soleil dans le ciel à un lieu donné, il est nécessaire de connaître les positions relatives du soleil et de la Terre.

La déclinaison solaire, δ , correspond à l'angle en degrés que font les rayons du soleil avec le plan équatorial. Cette déclinaison varie tout au long de l'année entre les valeurs $-23,4^\circ$ et $+23,4^\circ$. La variation de déclinaison maximale au cours d'une journée est de l'ordre de $0,5^\circ$ (Merino, 2013), et on considèrera par la suite que cette déclinaison est constante sur une période de temps d'une journée. Le calcul exact de la position du soleil en considérant l'orbite elliptique de la Terre autour du soleil nécessite de résoudre l'équation de Kepler (Beckers et Beckers, 2010). Cependant, la solution de cette équation ne peut être obtenue de manière directe. Différentes formules approchées ont été développées pour calculer la déclinaison du soleil en fonction de la date (Merino, 2013). La formule que nous avons utilisée (formule 2.12)) simplifie l'orbite de la Terre en la considérant circulaire.

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360(284 + j)}{365} \right) \quad (2.12)$$

L'erreur commise par l'utilisation de la formule 2.12 dépend du jour et de l'année considérés. Merino (2013) a relevé dans sa comparaison avec la formule de Bourges (1985) (dont l'erreur maximale est de $0,02^\circ$) une différence maximale de $-1,1^\circ$ sur une période de quatre ans (2010-2013). Cette erreur est faible au regard de l'usage de cette formule dans le présent contexte de l'évaluation d'une scène urbaine, avec des pas de temps de l'ordre de l'heure.

La rotation de la Terre sur elle-même s'effectue en 24 h. L'angle solaire horaire ω correspond au déplacement angulaire du méridien local, exprimé en degrés.

$$\omega = 15(h - 12) \quad (2.13)$$

La déclinaison solaire et l'angle solaire horaire permettent enfin de calculer l'angle zénithal θ_z (degrés) et la hauteur solaire α_s (angle complémentaire de θ_z), ainsi que l'azimut solaire γ_s (degrés) :

$$\theta_z = \arccos(\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) \quad (2.14)$$

$$\alpha_s = \frac{\pi}{2} - \theta_z \quad (2.15)$$

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \arccos \left(\frac{\cos(\theta_z) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) \cos(\phi)} \right) \right| \quad (2.16)$$

2.2.2 Rayonnement sur la scène urbaine par ciel clair

Différents modèles existent pour simuler le rayonnement par ciel clair, sans nuages. Ces modèles ont l'avantage de donner une valeur du rayonnement solaire direct qui ne dépend que de la latitude et de l'altitude du lieu considéré. L'utilisation de modèles de ciel clair permet ainsi de décrire un cas idéal de rayonnement, indépendamment des conditions climatiques locales. Dans le présent travail, le modèle de [Liu et Jordan \(1960\)](#) tel qu'adapté par [Campbell et Norman \(1998\)](#) a été choisi. Le rayonnement reçu sur la scène urbaine est la composition du modèle de rayonnement direct et d'un calcul des ombres entre les éléments de la géométrie.

2.2.2.1 Modèle de rayonnement direct par ciel clair

Dans les conditions particulières de ciel clair, le rayonnement solaire au niveau de la surface de la Terre est une fraction du rayonnement solaire hors de l'atmosphère qui dépend principalement de la couche d'atmosphère traversée. On appelle transmittance atmosphérique la grandeur adimensionnelle correspondant à cette fraction. La constante τ correspond à la transmittance atmosphérique pour un soleil au zénith. L'expression de l'irradiance sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil au niveau de la Terre, appelée irradiance directe normale, est de la forme :

$$I_{bn} = G_{sc} \cdot \tau^m \quad (2.17)$$

où m est le nombre de masse optique et G_{sc} la constante solaire. Les valeurs de τ relevées par [Liu et Jordan \(1960\)](#) pour des ciels clairs, avec $m < 1,5$ sont comprises entre 0,60 et 0,75. Par la suite, la valeur $\tau = 0,7$ sera considérée dans l'ensemble des calculs utilisant ce modèle.

La formule qui a été utilisée pour le nombre de masse optique est reprise de [Campbell et Norman \(1998\)](#) et dépend de l'altitude ψ du lieu considéré :

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \cdot e^{-\frac{\psi}{8200}} \quad (2.18)$$

Le nombre de masse optique augmente avec l'angle zénithal. De cette façon, la valeur de τ^m ainsi que de l'irradiance directe normale diminue comme attendu à mesure que la couche d'atmosphère à traverser augmente.

Une fois la position du soleil et la puissance du rayonnement déterminées, un calcul des parties visibles depuis le soleil doit être effectué.

2.2.2.2 Calcul des ombres

Une méthode intuitive de calcul des ombres consiste à prendre le point de vue du soleil (situé à l'infini), et à observer la scène urbaine. Tout ce qui est vu correspond à des surfaces éclairées, le reste est à l'ombre. Il existe deux types d'ombres :

- Les **ombres propres** correspondent aux surfaces d'un objet qui ne voient pas la source lumineuse car leur orientation lui est opposée. Par exemple, un cube a toujours entre une et trois faces éclairées par une source ponctuelle, les autres sont dans leur ombre propre. Ces surfaces peuvent être repérées par simple comparaison de leur normale avec la direction des rayons lumineux ;
- Les **ombres portées** correspondent aux ombres générées par un objet sur d'autres surfaces. Un calcul est alors nécessaire afin de déterminer les frontières entre les surfaces éclairées et celles à l'ombre.

Dans les géométries urbaines que l'on considère, les surfaces sont nécessairement des polygones, qui vont générer des ombres polygonales (figure 2.8). Un calcul de projections, puis d'intersections de polygones doit ainsi permettre de déterminer les surfaces à l'ombre et les surfaces au soleil. La procédure permettant d'effectuer le calcul des ombres est détaillée ci-dessous. A noter que de telles méthodes basées sur l'utilisation de projections ont été définies dès les années 1970 dans le secteur de l'infographie ([Atherton et al., 1978](#)) et ont notamment été utilisées par la suite dans le cadre du développement du logiciel de simulation urbaine Solène ([Siret](#)).

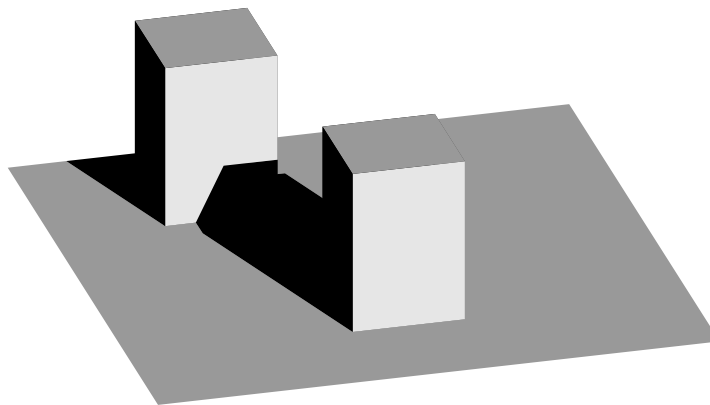


FIGURE 2.8: Projection des ombres pour une position du soleil

On souhaite calculer l'ombre d'une surface S_i sur une surface S_1 incluse dans le plan P_1 . Cette ombre, notée $O(S_i \rightarrow S_1)$, correspond à l'intersection de S_1 et de l'ombre de S_i sur le plan P_1 :

$$O(S_i \rightarrow S_1) = S_1 \cap O(S_i \rightarrow P_1) \quad (2.19)$$

Si l'intersection est nulle, S_i n'ombrage pas S_1 pour cette position du soleil.

L'ombre sur S_1 , notée $O(S_1)$ de l'ensemble des autres surfaces $S_i, i = 2, \dots, n$ est l'union des ombres sur S_1 :

$$O(S_1) = \cup_{i=2}^n O(S_i \rightarrow S_1) \quad (2.20)$$

On déduit de cela la surface ensoleillée de S_1 , $E(S_1)$:

$$E(S_1) = S_1 - O(S_1) = S_1 - \cup_{i=2}^n O(S_i \rightarrow S_1) \quad (2.21)$$

L'ensemble de ces opérations se fait dans un repère en deux dimensions. Pour cela, les polygones projetés, ainsi que le polygone correspondant à la surface sur laquelle l'ombre est calculée, sont placés dans le plan xOy. Les intersections de polygones sont ensuite calculées en utilisant le code Clipper développé par Angus Johnson ([Johnson, 2014](#)), basé sur l'algorithme de Vatti ([Vatti, 1992](#)). Cette bibliothèque a l'avantage d'être en mesure d'effectuer des opérations sur des polygones dont les entrées ou les sorties peuvent être des polygones non connexes ou troués. L'adaptation en MATLAB utilise l'interface MEX développée par l'utilisateur Emmett sur le site communautaire de Mathworks¹.

Le temps de calcul étant directement lié au nombre de surfaces à projeter, deux accélérations sont considérées :

- Les géométries urbaines utilisées sont composées de volumes fermés. Il est dans ce cas possible de considérer que seules les surfaces ne faisant pas face au soleil (ou l'inverse) sont des masques potentiels. Ce tri est notamment décrit dans les méthodes de calcul du logiciel EnergyPlus ([EnergyPlus, 2009](#)).
- Les surfaces sont triées de manière à ne considérer que celles qui sont "devant" la surface sur laquelle l'ombre est calculée par rapport aux rayons du soleil.

Une fois établie la méthode de calcul des ombres pour une position du soleil, le calcul de l'énergie du rayonnement solaire sur les surfaces de la scène consiste à intégrer sur la période de temps d'intérêt le flux reçu multiplié par la surface éclairée de la paroi (figure 2.9) :

$$E_i = \int_{T_1}^{T_2} A_E \cdot I_{bn} \cdot \cos(\theta) \cdot dt \quad (2.22)$$

où A_E est l'aire éclairée de la surface i à l'instant t , I_{bn} l'irradiance directe normale et θ l'angle d'incidence des rayons solaires.

1. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36241-polygon-clipping-and-offsetting>

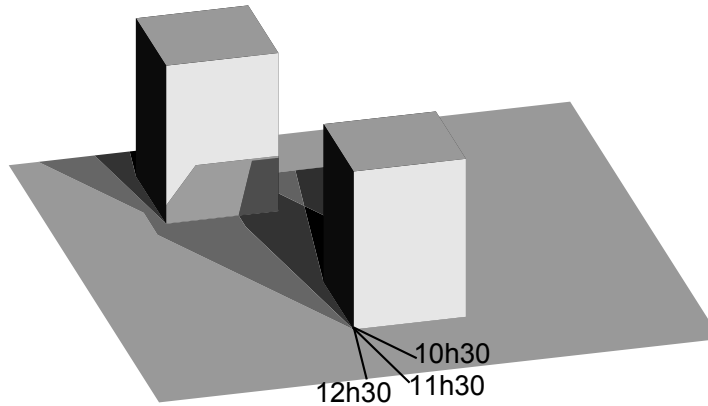


FIGURE 2.9: Les ombres sont projetées pour chaque pas de temps

2.2.3 Discrétisation du ciel

Jusqu'à maintenant, on ne s'est intéressé qu'au rayonnement solaire direct et non au rayonnement solaire diffus. Celui-ci peut pourtant avoir de l'intérêt dans les zones où le ciel est majoritairement couvert, ou en tant que source de lumière naturelle.

Des maillages du ciel ou tuilages du ciel ont été définis pour prendre en compte des ciels non-isotropes, c'est à dire dont la radiance n'est pas constante selon l'angle solide de la voûte céleste considéré. La radiance d'un ciel peut être mesurée en utilisant un dispositif expérimental appelé scanner de ciel. Une décomposition du ciel en 151 tuiles circulaires, compatible avec ce dispositif, a été proposée par [Tregenza \(1987\)](#). Celui-ci a également proposé un ciel de 145 patches, compatible avec les distributions de luminance de la CIE¹ ([Tregenza, 2004](#); [Commission internationale de l'éclairage, 1994](#)). Cette décomposition a largement été reprise par la suite ([Compagnon, 2000](#); [Robinson et Stone, 2004](#); [Mardaljevic et Rylatt, 2003](#)).

Une méthode pour réaliser une subdivision du ciel en tuiles ayant un rapport d'aspect (rapport entre l'aire de la tuile et l'aire du plus grand cercle inscrit dans celle-ci) le plus élevé possible est présentée par [Beckers et Beckers \(2012\)](#) (exemples sur la figure 2.10). Cette méthode est adoptée ici pour réaliser le tuilage du ciel pour le calcul des facteurs de vue du ciel.

A noter que d'autres méthodes de tuilage du ciel existent. Ainsi, le logiciel Solène utilise une triangulation géodésique de la voûte céleste, permettant de discrétiser l'hémisphère en triangles sphériques ([Miguet, 2000](#)); dans Ecotect, un tuilage selon des bandes d'égal azimuth est utilisé. Contrairement aux précédents, ce dernier tuilage ne permet pas d'obtenir des tuiles d'angles solides égaux.

1. Commission Internationale de l'Eclairage

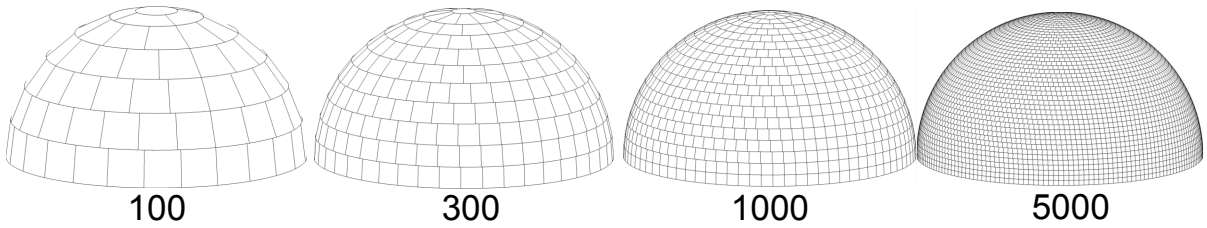


FIGURE 2.10: Discretisation du ciel pour différentes quantités de tuiles (Beckers et Beckers, 2012)

2.2.4 Facteur de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel, noté FVC , est une grandeur adimensionnelle comprise entre 0 et 1, qui correspond à la fraction du ciel vue depuis un point de la géométrie urbaine, pondérée par le cosinus de l'angle d'incidence des rayons (loi de Lambert). Dans le cas d'un ciel considéré isotrope, l'irradiance diffuse d'une surface correspond à l'irradiance diffuse sur un plan horizontal (qui voit tout le ciel), multiplié par le FVC .

Le FVC d'une surface différentielle orientée, centrée sur le point x , dont l'hémisphère visible correspond à l'angle solide Ω , s'écrit :

$$FVC = \frac{1}{\pi} \int_{\omega \in \Omega} \cos(\theta) Vis(x, \omega) d\omega \quad (2.23)$$

où $Vis(x, \omega)$ vaut 1 si le point x voit le ciel dans la direction ω , 0 sinon. L'angle θ correspond à l'angle d'incidence des rayons provenant de la direction portée par $d\omega$.

A supposer que le point est sur une surface horizontale orientée vers le haut, un passage en coordonnées sphériques permet de retrouver un facteur de vue du ciel égal à 1 :

$$FVC_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\phi = 1 \quad (2.24)$$

Le facteur de vue du ciel moyen FVC_m peut être calculé sur une surface. Le calcul combine alors une intégrale sur les points de la face au calcul ponctuel de FVC :

$$\begin{aligned} FVC_m &= \frac{1}{\pi A} \int_{x \in S} FVC(x) dx \\ &= \frac{1}{\pi A} \int_{x \in S} \int_{\omega \in \Omega} \cos(\theta) Vis(x, \omega) d\omega dx \\ &= \frac{1}{\pi A} \int_{\omega \in \Omega} \cos(\theta) A_E(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (2.25)$$

où A est l'aire de la surface S et A_E est l'aire de la surface S vue depuis la direction $d\omega$.

Avec un ciel tuilé de N_{cell} tuiles sur lequel le rayonnement est supposé uniforme, on peut simplifier la formule en considérant N_{cell} projections parallèles dans la direction du centre de

chaque tuile. Le calcul revient à calculer la surface visible de chaque face depuis le centre de chaque tuile du ciel (calcul analogue au calcul des ombres), et s'écrit :

$$FVC_m = \frac{1}{\pi A} \sum_{i=1}^{N_{cell}} \cos(\theta_i) A_{E_i} \omega_i \quad (2.26)$$

où ω_i est l'angle solide porté par la tuile du ciel i .

Si toutes les tuiles du ciel représentent le même angle solide, soit $\omega_i = \omega = 2\pi/N_{cell}$, la formule précédente devient :

$$FVC_m = \frac{2}{A N_{cell}} \sum_{i=1}^{N_{cell}} \cos(\theta_i) A_{E_i} \quad (2.27)$$

L'erreur commise dépend de la disposition des tuiles sur l'hémisphère et de la simplification d'une tuile par son centre dans le calcul des projections. L'erreur maximale en milieu dégagé due à cette dernière a lieu dans le cas d'une surface horizontale. En effet, dans ce cas, toutes les mailles sont visibles, mais la simplification des mailles de l'horizon par leur centre devient sensible. Une quantification de cette erreur a été réalisée en se basant sur quatre discrétisations du ciel (voir figure 2.10), pour lesquelles le facteur de vue du ciel sur une surface horizontale est calculé. Les résultats de ces calculs sont présentés sur la figure 2.11. Le facteur de vue du ciel sur un plan horizontal, égal à 1 en milieu dégagé. L'erreur commise est de l'ordre de +0,75 % avec un ciel discrétisé en 100 tuiles, et descend sous 0,1 % avec un ciel de 1000 tuiles. On considèrera ici un ciel de 145 tuiles, en cohérence avec la discrétisation de [Tregenza \(2004\)](#) largement reprise dans la littérature.

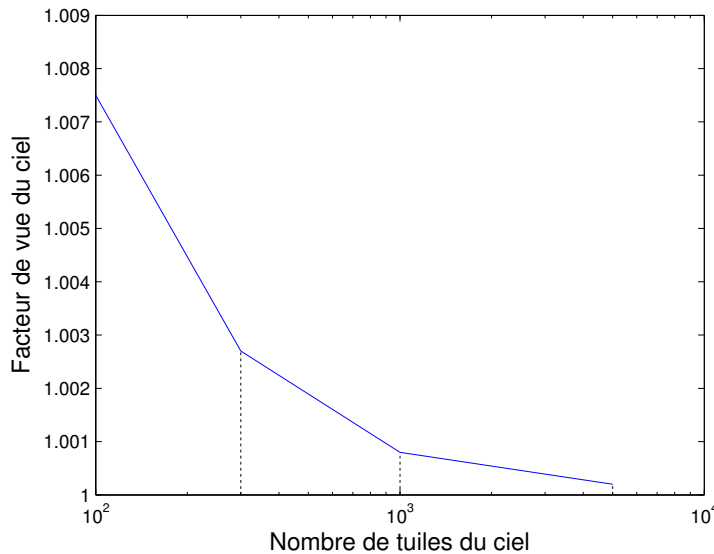


FIGURE 2.11: Facteur de vue du ciel sur une surface horizontale en milieu dégagé en fonction du nombre de tuiles du ciel (évalué pour 100, 300, 1000 et 5000 tuiles)

2.2.5 Ciel cumulé

Le principe du ciel cumulé est de pré-calculer l'énergie émise par chaque tuile du ciel, intégrée sur la période de temps souhaitée (figure 2.12). L'idée d'un ciel cumulé a été proposée par Compagnon (2000) dans le cadre du logiciel PPF-Radiance. Il a également été utilisé par la suite par Mardaljevic et Rylatt (2003) ou par Robinson et Stone (2004), la volonté de calculer le rayonnement solaire à l'échelle urbaine étant un point commun de ces différents travaux.

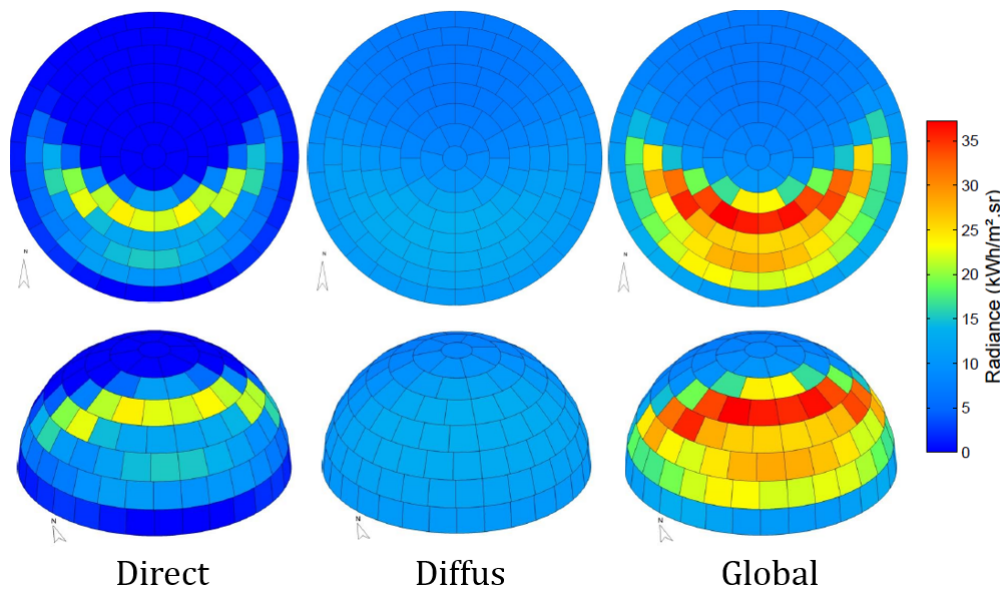


FIGURE 2.12: Ciel cumulé représentant les énergies annuelles directe, diffuse et globale pour la station météo de Paris-Orly

Le ciel cumulé s'applique intuitivement au rayonnement diffus, mais peut aussi être utilisé pour le rayonnement direct, une fois la position du soleil attachée aux tuiles du ciel, comme proposé par Beckers et Beckers (2013). Dans ce travail, plusieurs méthodes ont été essayées pour répartir le rayonnement direct dans les tuiles du ciel : soit le soleil est placé dans plusieurs tuiles (les 2, 3 ou 4 tuiles les plus proches) avec pour chaque tuile une portion du rayonnement du soleil inversement proportionnelle à la distance entre le centre de la tuile et le soleil, soit le soleil est associé à une seule tuile (la plus proche de sa position). Des calculs sur plusieurs jours seuls, ainsi que sur une période annuelle ont montré des erreurs légèrement plus faibles commises avec le soleil attaché à une seule tuile (pour un ciel de 145 tuiles comparé à un ciel de 10 000 tuiles). Cette méthode est conservée par la suite.

Dans le cadre de l'implantation du présent programme, le rayonnement diffus est réparti sur la voûte céleste en utilisant le modèle de Perez et al. (1993) au centre de chaque tuile du ciel. Les données météorologiques utilisées ont été téléchargées sur le site d'EnergyPlus¹.

Le calcul de la visibilité des différentes tuiles du ciel est effectué de la même manière, que l'on calcule les facteurs de vue du ciel ou l'ensoleillement à partir d'un ciel cumulé.

1. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm

2.3 Optimisation

Afin de rechercher les meilleures dispositions de quartiers, une méthode d'optimisation numérique a été utilisée. Un nombre important d'algorithmes existent, avec, pour chacun, des conditions d'application concernant le type de problème ou les variables.

Dans le domaine de l'optimisation numérique, les algorithmes inspirés de mécanismes naturels ne sont pas rares : réseaux de neurones, essaims de particules, colonies de fourmis, sauts de grenouilles (Elbeltagi et al., 2005). La famille des algorithmes évolutionnaires, sur laquelle nous nous concentrerons, repose elle-même sur les mécanismes de l'évolution naturelle des espèces synthétisés par Darwin ainsi que sur certains éléments de génétique.

2.3.1 Introduction aux algorithmes évolutionnaires

2.3.1.1 Bref historique : de la théorie darwinienne...

Les mécanismes de l'évolution naturelle des espèces rapportés en 1859 par Charles Darwin dans son livre « *De l'Origine des Espèces* »² sont multiples et complexes.

Dans le premier chapitre du livre, Darwin décrit la variation des espèces domestiques à partir d'une de ses passions d'alors : l'élevage de pigeons. Selon lui, l'ensemble des pigeons domestiques dérivent d'une espèce de pigeon. Pourtant, de grandes variations existent entre les diverses espèces domestiquées. Certaines ont des gorges proéminentes, d'autres des becs plats, d'autres encore des couleurs particulières. Darwin explique cette diversité par la sélection artificielle de l'homme qui, « par caprice », va choisir chez les pigeons ceux qui ont des caractères particuliers, afin que, par croisements, ces caractères se concentrent par hérédité. Au fil des générations, l'homme formera des pigeons qui n'auront d'apparence plus grand chose en commun.

Si, dans le cas des pigeons, les caractères sélectionnés par l'homme sont directement morphologiques, Darwin évoque aussi une « sélection inconsciente de l'homme » : « *Ainsi, quiconque veut avoir des chiens d'arrêt essaye naturellement de se procurer les meilleurs chiens qu'il peut ; puis, il fait reproduire les meilleurs seulement, sans avoir le désir de modifier la race d'une manière permanente et sans même y songer.* »¹

Finalement, les mécanismes de l'évolution des espèces transparaissent dans ces exemples. Grossièrement simplifiés, ils comprennent :

- un ensemble de variations qui existent au sein d'une même espèce. Ces variations correspondent à des aléas ou mutations du patrimoine génétique ;
- un mécanisme de reproduction qui permet de transmettre certains caractères des individus ;

2. Le titre complet du livre de Charles Darwin sorti en 1859 est « *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie* »

1. Charles Darwin, *L'origine des espèces*, traduction d'Edmond Barbier revue par Daniel Becquemont, édition 2008, Flammarion, p.83

- une sélection qui tend à conserver les individus les mieux adaptés au milieu naturel (ou aux « caprices » de l'homme). La sélection représente dans la nature à la fois la capacité à survivre d'un individu et sa capacité à se reproduire.

2.3.1.2 ... aux algorithmes évolutionnaires

De manière générale, une analogie peut être faite entre l'évolution des espèces et un problème d'optimisation : il s'agit de concentrer au fil de générations les meilleures caractéristiques d'une population vis-à-vis d'un objectif donné. Un individu de la population représente alors une solution candidate au problème d'optimisation, autrement dit, dans notre cas une configuration urbaine. Cette analogie est résumée par le schéma de la figure 2.13.

Evolution	Problème d'optimisation
Environnement	↔ Problème
Individu	↔ Solution candidate
Adaptation	↔ Qualité

FIGURE 2.13: Analogie avec l'évolution. Adapté de (Eiben et Smith, 2003)

Les premiers algorithmes évolutionnaires ont vu le jour dans les années 1960. Presque simultanément, dans trois universités différentes, trois sous-familles d'algorithmes ont été développées (Beyer et Schwefel, 2002) : les algorithmes génétiques (*Genetic Algorithm*, GA) à Ann Arbor (Etats-Unis) (Holland, 1992), la programmation évolutionnaire (*Evolutionary programming*, EP) à San Diego (Etats-Unis) (Fogel et al., 1966), et les stratégies d'évolution (*Evolution Strategy*, ES) à Berlin (Allemagne) (Rechenberg, 1965). Le domaine a depuis évolué, et de nouvelles méthodes s'y sont ajoutées (Beyer et Schwefel, 2002; Eiben et Smith, 2003).

Les algorithmes évolutionnaires ont tous en commun d'être des algorithmes stochastiques basés sur une **population** constituée d'un ensemble d'**individus**. La population est modifiée dans une boucle dont chaque itération correspond à une **génération**. A chaque génération, ces algorithmes utilisent des mécanismes mimant l'évolution des espèces :

- Un opérateur de **sélection** des meilleurs individus de la population, c'est-à-dire ceux qui satisfont le mieux la fonction objectif. Les individus n'ayant pas une bonne évaluation sont considérés comme peu adaptés, et seront écartés sans avoir pris part à la construction de la génération suivante.
- Un opérateur de **croisement** ou de reproduction permet de créer des individus *enfants* en croisant des individus *parents*, préalablement sélectionnés en fonction de leur évaluation. L'objectif de cette étape est de chercher à concentrer les bonnes caractéristiques de la population de la génération précédente dans la nouvelle génération.
- Un opérateur de **mutation** vient modifier aléatoirement certaines variables en fonction d'un certain taux (ou probabilité) de mutation. La mutation doit permettre d'apporter une diversité dans la population qu'elle ne peut obtenir par l'opérateur de croisement.

Cet opérateur doit notamment rendre possible l'accès à n'importe quel point de l'espace de paramètres en un nombre fini de mutations sur un point initial.

Les caractéristiques principales permettant de distinguer entre eux les algorithmes évolutionnaires sont (Eiben et Smith, 2003) :

- la représentation ou définition des individus ;
- la fonction objectif ;
- la population ;
- le mécanisme de sélection des parents ;
- les opérateurs de variation : mutation et croisement ;
- le mécanisme de remplacement des individus dans la population.

Dans la section suivante, les spécificités de l'algorithme mis en place dans le cadre de l'optimisation de formes urbaines sont décrites.

2.3.2 Caractéristiques de l'algorithme utilisé

La structure générale de l'algorithme utilisé est présentée sur la figure 2.14. La population initiale est générée de manière uniforme.

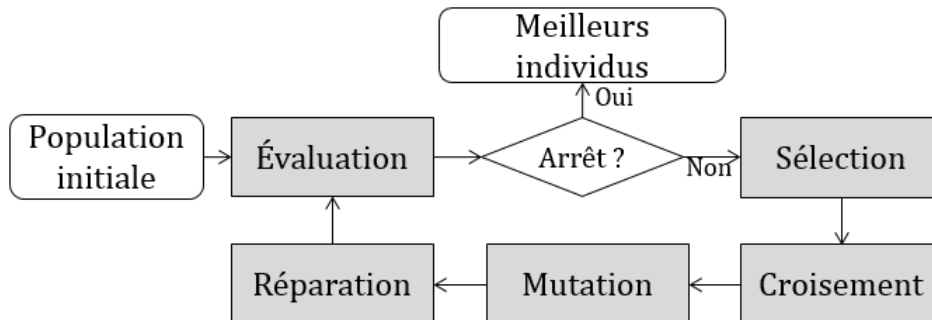


FIGURE 2.14: Procédure générale de l'algorithme utilisé

2.3.2.1 Opérateur de sélection

L'algorithme d'optimisation que nous utilisons repose sur le modèle $(\mu + \lambda)$ -ES c'est à dire que μ parents sont sélectionnés à chaque génération pour créer λ enfants. Les parents sont également conservés dans la génération suivante. La taille de population est ainsi de $\mu + \lambda$ individus. Le ratio de λ/μ est fixé à 1/2.

2.3.2.2 Opérateur de croisement

Le croisement utilise deux individus parents pour générer deux individus enfants. Chaque parent sélectionné est impliqué dans deux croisements (et donc dans la génération de 4 enfants).

Dans le cadre de l'optimisation d'un quartier par rapport au rayonnement solaire, plus deux bâtiments sont proches, plus ils sont susceptibles d'avoir de l'influence l'un sur l'autre. Le croisement de bonnes configurations vise à échanger des caractéristiques des quartiers en espérant combiner dans les enfants les bonnes caractéristiques des parents.

Deux types d'opérateurs de croisement sont utilisés dans l'algorithme implanté.

Le premier opérateur de croisement échange des sous-chaînes de paramètres dans le vecteur de variables, ce qui revient à échanger des sous-quartiers. Pour le cas de l'optimisation utilisant également des paramètres de forme (jusqu'à 6 paramètres par bâtiment), la séparation en sous-chaîne préserve l'ensemble des paramètres par bâtiment. Ce type de croisement est caractérisé par la manière d'échanger les sous-chaînes. Dans notre cas, un croisement *un point* est utilisé dans la majeure partie des cas. Cela signifie que les deux chaînes de paramètres des parents sont coupées en deux morceaux, qui sont ensuite échangés pour produire les enfants (un exemple est présenté sur la figure 2.15). Le point du croisement (où la découpe se fait) est déterminé aléatoirement, éventuellement de manière à respecter des bandes nord-sud de bâtiments, partant du principe que, le rayonnement solaire provenant en France majoritairement du sud en hiver, les interactions entre bâtiments se font préférablement selon cet axe.

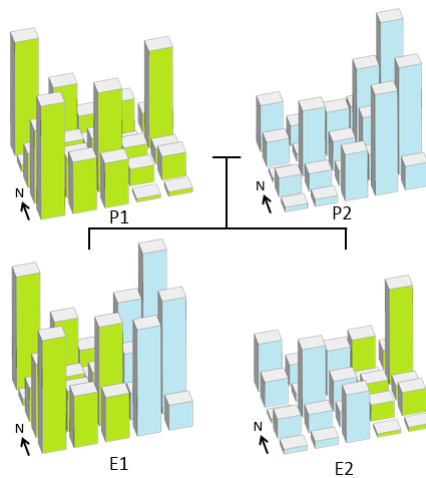


FIGURE 2.15: Croisement *un point* de deux quartiers selon des bandes nord-sud

Le second opérateur de croisement utilise une méthode barycentrique. Il a été utilisé pour les variables de formes continues. Dans ce croisement, un paramètre α est tiré aléatoirement pour combiner les paramètres des parents P_1 et P_2 et créer deux enfants E_1 et E_2

$$\begin{cases} E_1 = \alpha.P_1 + (1 - \alpha).P_2 \\ E_2 = (1 - \alpha).P_1 + \alpha.P_2 \end{cases} \quad (2.28)$$

On prend généralement $-0,5 < \alpha < 1,5$ afin de ne pas resserrer le sous-espace contenant la population. Pour les paramètres de rotation, le croisement barycentrique est toujours effectué

dans le petit angle. Enfin, si les paramètres de forme sont considérés discrets, le croisement barycentrique peut être utilisé en arrondissant les paramètres à la valeur discrète la plus proche.

2.3.2.3 Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation est appliqué à la population des enfants, après croisement. Un paramètre de probabilité de mutation (généralement $p_{mut} = 0,5$) permet d'ajuster la quantité d'individus soumis à l'opérateur de mutation

La mutation est gérée différemment selon le type de géométrie. Dans le cas de la répartition en blocs, la mutation consiste soit à échanger la valeurs du nombre de blocs en pile de deux emplacements, soit à détruire une pile de blocs pour les répartir sur l'ensemble des emplacements.

Dans le cas des paramètres de forme, une simple variation d'un paramètre tiré au hasard est effectuée. Un paramètre d'amplitude a_{mut} de mutation permet de borner cette mutation :

$$x' = x + a_{mut} (r - 0,5) (x_{max} - x_{min}) \quad (2.29)$$

où r est un nombre tiré aléatoirement entre 0 et 1.

2.3.2.4 Opérateur de réparation

Les géométries de quartiers que nous utilisons sont globalement soumises à trois types de contraintes :

- Des contraintes de type “bornes” sur tous les paramètres.
- Une contrainte sur le volume à construire, qui correspond dans le cas de la représentation de quartiers en blocs à une équation linéaire.
- Des contraintes stériques, qui constituent un système de contraintes sous formes d'inégalités non-linéaires (linéaires si les angles ne sont pas pris en compte).

Une des méthodes permettant de gérer les individus violant les contraintes consiste à pénaliser leur fonction objectif ([Michalewicz et Janikow, 1991](#)). Dans le cadre des paramétrisations que nous utilisons, il a été observé que peu d'individus parvenaient à respecter spontanément ces contraintes. L'utilisation d'une pénalisation de la fonction objectif devient dès lors délicat :

- pénaliser fortement en fonction de la violation de contraintes ne laisserait que peu d'individus “utiles” dans la population ;
- pénaliser faiblement permettrait à certains individus d'être considérés malgré leur violation de contrainte. Ces individus ne sont cependant pas comparables avec la population admissible puisque, par exemple, un volume de bâtiment plus important (non respect de la contrainte de volume) permettrait de capter davantage de rayonnement solaire tandis que des bâtiments se superposant (non respect des contraintes stériques) reviendrait à supprimer des masques.

Afin de pallier ce problème, un opérateur de réparation *ad hoc* des individus non-admissibles a été mis en place. Les individus nouvellement créés par les opérateurs de croisement et de mutation sont systématiquement réparés.

En modifiant les individus, la réparation participe en plus de l'opérateur de mutation à accroître la diversité de la population. À noter cependant que les dernières générations des processus d'optimisation présentent généralement peu de variations et ont tendance à respecter quasi systématiquement les contraintes. L'opérateur de réparation ne représente dès lors plus un moteur de la diversité efficace.

Deux mécanismes de réparation sont utilisés. Le premier permet de gérer la contrainte de volume, notamment dans le cadre de la représentation en blocs. Le second concerne les contraintes stériques des bâtiments mobiles sur leur parcelle.

Gestion de la contrainte de volume

La réparation s'opère dans la représentation en blocs lorsque le nombre de blocs à construire, n_{blocs} , n'est pas respecté. Dans ce cas, il faut soit ajouter, soit retirer un nombre de blocs r_{blocs} au quartier. Pour l'un comme pour l'autre, deux stratégies sont mises en place :

- Une réparation répartie consiste à retirer/ajouter un bloc tour à tour sur chacune des piles (l'ordre des piles est tiré aléatoirement à chaque fois).
- Une réparation localisée consiste à retirer/ajouter les r_{blocs} sur un emplacement jusqu'à ce que celui-ci soit à hauteur minimale/maximale, avant de passer à un emplacement suivant.

Le choix entre ces deux stratégies est effectué aléatoirement à chaque fois, avec une probabilité de 0,5.

Gestion des contraintes stériques

Dans la représentation du modèle par des paramètres de forme, la gestion des contraintes stériques s'opère en déplaçant le bâtiment à l'intérieur de la parcelle. L'expression mathématique de ces contraintes est présentée dans la partie 2.1. La procédure de réparation qui y est associée est résumée sur la figure 2.16. Cette procédure consiste à déplacer les bâtiments ne respectant pas les contraintes à l'intérieur de leur parcelle. Seuls les paramètres de translation sont de ce fait modifiés. Afin d'éviter les boucles infinies dans cette procédure, les parcelles doivent être d'une taille suffisante pour contenir toutes les formes de bâtiments pouvant être générées avec les paramètres de rotation et de déformation.

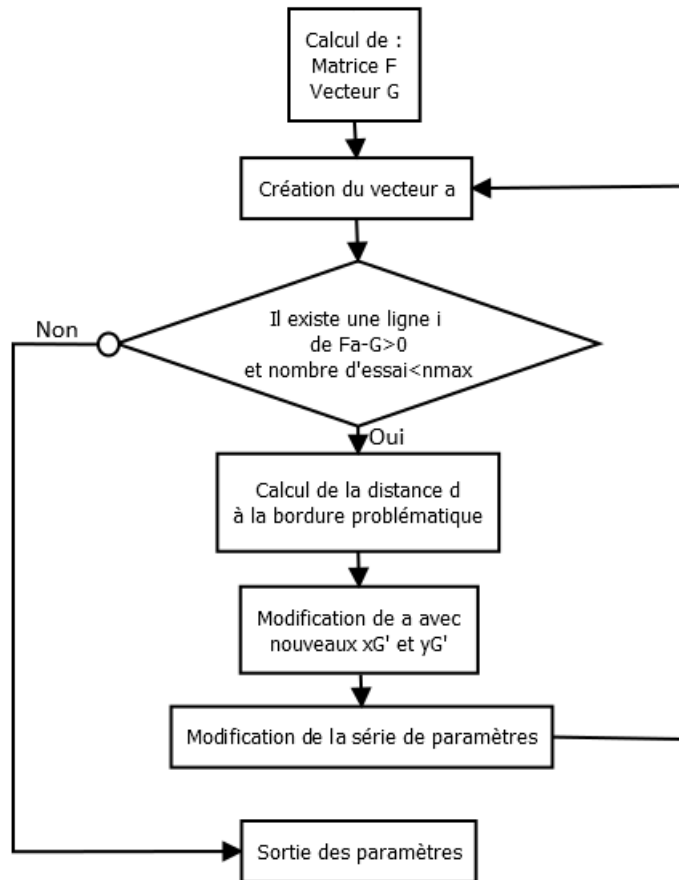


FIGURE 2.16: Procédure de correction de la position d'un bâtiment pour le respect des contraintes stériques

Chapitre 3

Application à l'optimisation du potentiel solaire de quartiers

Dans ce chapitre, l'outil d'optimisation décrit dans le chapitre précédent est employé pour étudier les formes optimales d'un quartier par rapport au rayonnement solaire. Diverses conditions d'ensoleillement sont explorées afin de calculer le potentiel solaire sur le quartier, principal critère d'optimisation considéré dans ce travail. Le potentiel solaire se définit comme le rayonnement solaire incident sur les surfaces du quartier, en amont de toute utilisation de ce rayonnement. Ainsi, ni la transmission par les fenêtres et les murs dans le cas de façades, ni la conversion énergétique par des panneaux solaires en toiture de ce rayonnement ne sont considérées. En cela, le potentiel solaire est une grandeur qui évalue l'interaction de la géométrie urbaine avec les caractéristiques géométriques du rayonnement solaire.

Après une étape de validation du code d'optimisation sur un cas test repris dans la littérature, plusieurs cas d'étude sont mis en place, décrivant le cheminement des questionnements qui ont jalonné ce travail. Le cas test repris de la littérature, qui représente un quartier en milieu ouvert (sans contexte urbain), constitue le point de départ à partir duquel les cas d'étude se sont complexifiés en modifiant la forme des bâtiments, les variables d'optimisation, et le contexte urbain. A chaque fois, l'impact de ces ajouts est observé dans les résultats.

3.1 Fonction objectif liée au potentiel solaire sur le quartier

Définir un critère pertinent pour l'optimisation de formes urbaines n'est pas une tâche facile puisque l'enjeu est à la fois énergétique et lumineux, avec une relation au confort, comme on a pu le voir dans le premier chapitre. Maximiser le rayonnement solaire cumulé à l'échelle du quartier revient à dire que l'on souhaite que le quartier reçoive un maximum d'énergie sur une période de temps choisie. Dans cette conception, on ne se préoccupe pas de savoir quelles surfaces reçoivent le rayonnement solaire. C'est donc une première étape dans l'optimisation de

l'accès au rayonnement solaire, basée sur l'idée qu'une fois que l'ensemble des quartiers maximisant le rayonnement solaire cumulé est obtenu, la recherche des configurations répartissant ce rayonnement entre les bâtiments peut être entreprise dans un second temps.

La fonction objectif correspondant à ce critère de potentiel solaire à l'échelle du quartier – ou autrement dit de rayonnement cumulé sur les surfaces urbaines – est de la forme :

$$f(X) = \int_{T_1}^{T_2} \sum_{i=1}^{N_{faces}} \cos(\theta_i(t)) I_{bn}(t) \int_{S_i} Vis(y, t) dy dt \quad (3.1)$$

où $I_{bn}(t)$ est l'irradiance directe normale à l'instant t , $\theta_i(t)$ est l'angle d'incidence des rayons du soleil sur la surface S_i , et $Vis(y, t)$ la fonction de visibilité valant 1 si le point y voit le soleil à l'instant t , 0 sinon.

Dans l'ensemble des exemples d'optimisation présentés dans cette partie, les bâtiments ne sont pas mitoyens et une contrainte impose que le volume bâti soit constant. De ce fait, la fonction objectif définie ci-dessus est équivalente à l'énergie du rayonnement solaire par unité d'habitation.

De plus, les variations de l'aire cumulée de toutes les surfaces du quartier sont relativement faibles avec les paramètres considérés. Celles-ci sont en effet dues à deux causes :

- la création d'un bâtiment sur une parcelle (à partir d'un bloc), ce qui ajoute l'aire d'une toiture à l'aire globale (dans le cas où les toitures entrent dans le calcul) ;
- dans le cadre de la représentation de bâtiments sur parcelles, les paramètres de déformation par affinités des bâtiments peuvent modifier le périmètre au sol d'un bâtiment, et par là l'aire de ses façades. Ces variations restent cependant relativement faibles dans les conditions de calcul mises en place par la suite.

Le fait que l'aire cumulée de l'enveloppe de chaque bâtiment reste quasiment constante permet de considérer une relation de quasi proportionnalité entre la fonction f et le rayonnement solaire moyen par unité de surface. Cette relation est importante car les déperditions énergétiques par l'enveloppe des bâtiments, laquelle dépend de cette aire, doivent être équivalentes entre les différents quartiers évalués afin que la comparaison des apports solaires entre ceux-ci ait un sens.

Enfin, un autre critère, très lié à la lumière naturelle dans le quartier est également utilisé dans ce chapitre : le facteur de vue du ciel moyen sur les façades du quartier. Ce critère est analogue à un calcul de rayonnement moyen par unité de surface. Ce facteur de vue du ciel moyen à l'échelle du quartier est calculé à partir du facteur de vue du ciel moyen sur chaque surface, FVC_m :

$$f_{FVC} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{surf}} FVC_{mi} A_i}{\sum_{i=1}^{N_{surf}} A_i}$$

Dans la suite de cette partie, un cas-test est utilisé pour la validation du module d’optimisation. Puis quelques résultats d’applications du code d’optimisation sont présentés, appliqués à plusieurs paramétrisations urbaines.

3.2 Validation sur un cas test de grille orthogonale

3.2.1 Le cas “Manhattan” dans la littérature

Un cas d’optimisation du potentiel solaire en milieu urbain a été réalisé par Jérôme Kämpf dans sa thèse (Kämpf, 2009), le cas “Manhattan” (“*Manhattan style grid*”). En tant que rare point de référence dans cette thématique, le problème a été répliqué afin de mettre à l’épreuve la méthode d’optimisation que nous avons développée.

La géométrie de ce cas test consiste en un ensemble de 25 bâtiments répartis sur une grille de 5x5 emplacements rectangulaires qui représente un quartier théorique. Chaque bâtiment est défini par son nombre d’étages, compris entre 0 et 123. Ce cas correspond donc à un cas de géométrie en blocs. Une contrainte est imposée sur le volume qui devait être compris entre 90% et 110% de la moitié du volume maximal (le volume maximal se définit comme le volume cumulé de tous les bâtiments à 123 étages).

La fonction objectif utilisée par Kämpf (2009) correspond à l’énergie du rayonnement solaire global annuel sur les façades et toits du quartier. Les données météorologiques utilisées sont celles de la ville de Bâle. Un modèle de ciel de Perez est utilisé pour répartir puis cumuler le rayonnement sur la voûte céleste. Les résultats sont calculés avec le logiciel de lancer de rayon Radiance (sans réflexions pour limiter le temps de calcul). Le résultat optimal présenté dans ces travaux (voir figure 3.2) a été obtenu après 12000 évaluations de la fonction objectif, utilisant un code d’optimisation évolutionnaire CMA-ES/HDE (Kämpf et Robinson, 2009).

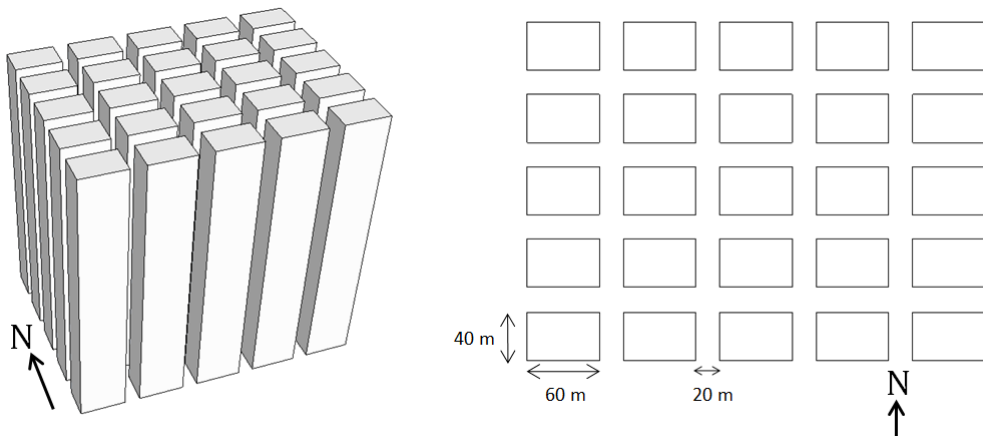


FIGURE 3.1: Dimensions de la grille orthogonale utilisée par Kämpf (2009)

Le résultat optimal obtenu prend la forme d'une cour, maximisant l'énergie venant de toutes les directions (figure 3.2). Le cas d'étude a été comparé par Kämpf (2009) aux performances de quartiers définis manuellement en forme d'escaliers ou d'une couronne de bâtiments de hauteur presque maximale, et s'est avéré plus performant. A noter également que la forme optimale correspond à un volume construit maximum au regard des contraintes, c'est-à-dire $V = 110\%.50\%.V_{max}$.

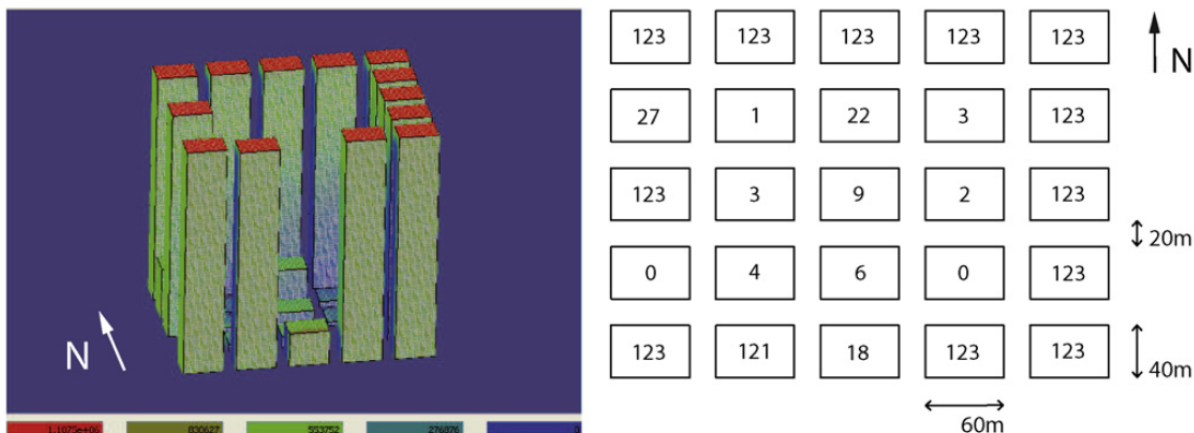


FIGURE 3.2: Configuration optimale maximisant le potentiel solaire annuel cumulé à Bâle d'après Kämpf (2009)

3.2.2 Validation sur le cas d'étude

L'objectif de la validation est d'une part de vérifier que l'algorithme évolutionnaire mis en place dans ce travail de thèse converge vers une solution similaire à celle de la littérature, éventuellement entre autres configurations équivalentes. Cette configuration optimale doit dans la mesure du possible être obtenue rapidement (c'est à dire avec un nombre réduit d'évaluations).

Les conditions de calcul considérées pour la validation sont légèrement différentes du cas de référence. La fonction objectif concerne toujours le rayonnement global annuel (sans réflexions) sur toutes les façades et toitures du quartier, mais les données météorologiques considérées sont celles de la station de Paris-Orly. La faible différence de latitude entre Bâle et Paris (moins de 2°) permet de considérer les trajets solaires comme équivalents. De plus, bien que les climats soient différents entre les deux villes, les durées annuelles moyennes d'ensoleillement sont proches (autour de 1650 h/an).

Dans notre cas, l'opérateur de réparation ajouté à l'algorithme évolutionnaire permet de garantir un nombre exact de blocs, qui est fixé ici à la moitié du volume maximal $50\%.V_{max}$, ce qui correspond à un nombre de blocs $N_{blocs} = 50\%.N_{blocs,max}$. L'ensemble des conditions de calcul sont résumées dans le tableau 3.1.

TABLEAU 3.1: Récapitulatif des conditions de calcul pour la validation du module d'optimisation

Géométrie	
Représentation : blocs (base rectangulaire)	Dimensions : cas "Manhattan"
N_{blocs} : $50\% \cdot N_{blocs,max}$	Contexte : aucun
Simulation	
Modèle : rayonnement global cumulé	Données : Paris-Orly (48,72°N — 2,38°E)
Jours : annuel	Heures : 1-24h
Fonction objectif : énergie cumulée sur façades et toits	
Optimisation	
Population : 60 ($\mu + \lambda = 20 + 40$)	Génération max : 150

Quatre essais d'optimisation ont été lancés. Les configurations urbaines optimales obtenues dans chacun des cas sont présentées sur la figure 3.3 avec le potentiel solaire correspondant, le nombre de générations avant convergence (ou arrêt) et le nombre d'évaluations uniques de la fonction objectif. Les configurations urbaines obtenues sont à la fois proches entre elles, et proches de la configuration optimale présentée dans les travaux de référence (Kämpf, 2009). Les bâtiments en moins par rapport à cette dernière peuvent être expliqués par la différence du nombre total de blocs du quartier; la solution de la littérature est en effet constitué de 10 % de blocs en plus. La moins bonne configuration repérée au cours des cas d'optimisation est de $f^- = 238,1$ GWh. La différence dans l'évaluation de la fonction objectif entre la moins bonne configuration repérée et les configurations optimales est de l'ordre de +50 %.

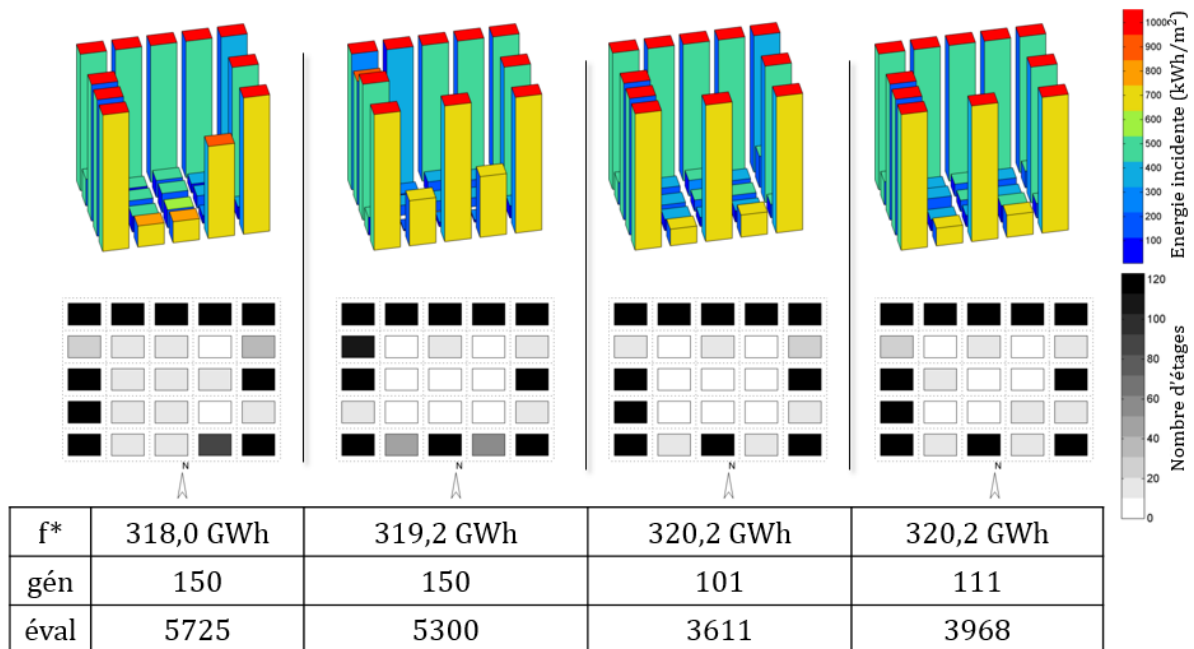


FIGURE 3.3: Solutions optimales trouvées lors de 4 essais d'optimisation, avec l'évaluation de leur fonction objectif ainsi que le nombre de générations et d'évaluations uniques de chaque essai.

Sur les quatre essais d’optimisation réalisés, deux se sont arrêtés avant la limite du nombre de générations. Ceux-ci avaient déjà atteint la convergence, considérée après 10 générations successives sans amélioration de la fonction-objective. Les deux essais concernés sont ceux qui montrent par ailleurs les meilleures valeurs d’évaluation. On peut donc supposer que ces solutions sont proches de l’optimum global.

La courbe de l’évolution de la fonction objectif en fonction des générations dans le cas ayant obtenu la moins bonne solution optimale est présentée sur la figure 3.4. Il peut y être observé que, dès la 20^{ème} génération, la meilleure configuration atteint une valeur de fonction objectif de l’ordre de $f = 315$ GWh, soit à peine 1,6 % de moins que la meilleure configuration trouvée. La première phase qui permet d’améliorer fortement la fonction objectif à partir de la diversité initiale de la population s’avère ainsi efficace. Cette phase est principalement dirigée par l’opérateur de croisement, qui concentre les bonnes composantes de la population de départ. En revanche, la lenteur de convergence vers l’optimum à partir de la 20^{ème} génération peut s’expliquer par une performance moindre des moteurs de diversité de l’algorithme, représentés par les opérateurs de mutation et, dans notre cas, de réparation. Malgré cette piste d’amélioration, l’algorithme d’optimisation a globalement bien fonctionné en proposant à chaque essai une solution optimale proche de l’optimum global. La méthode est ainsi considérée comme valide et est utilisée pour les autres cas de recherche de formes urbaines optimales décrits plus loin.

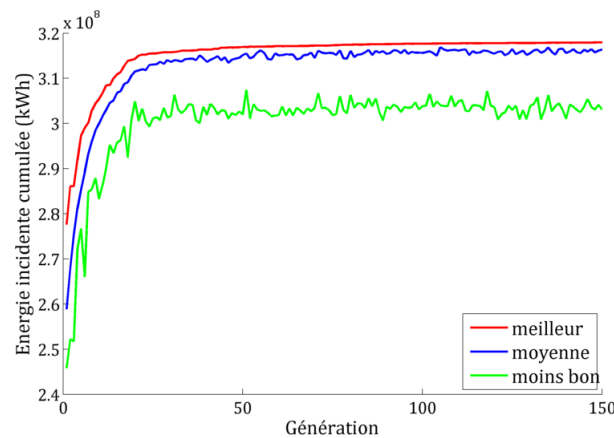


FIGURE 3.4: Évolution de la fonction objectif

Dans la suite de cette partie, le cas “Manhattan” est utilisé dans le cadre d’optimisation d’un quartier en milieu dégagé. La compréhension des configurations optimales en milieu dégagé constitue une première étape avant de se concentrer sur des quartiers inclus dans un contexte urbain, dans un premier temps constitué de bâtiments fixes, puis de cellules urbaines répétées.

3.3 Optimisation de la forme d'un quartier en milieu dégagé

3.3.1 Potentiel maximum sur un quartier

Dans un quartier en milieu dégagé, l'énergie reçue – ou potentiel solaire – du volume englobant le quartier borne la quantité de rayonnement solaire que le quartier reçoit (les réflexions ne sont pas considérées). Une manière de se représenter ce fait est d'observer la scène urbaine depuis la position du soleil. Le rayonnement capté par le quartier est directement lié à la surface de quartier visible depuis cette position. Cette surface est de plus nécessairement inférieure ou égale à la surface du volume englobant du quartier vue depuis ce point. En répétant l'opération depuis chaque position du soleil (voire du ciel, si on considère le rayonnement diffus), l'irradiance cumulée sur les surfaces du volume englobant est à chaque fois au moins égale à celle reçue par le quartier. Les problèmes d'optimisation auxquels on s'intéresse peuvent être vu comme la recherche de la meilleure correspondance entre deux géométries : celle du quartier et celle du rayonnement solaire, qui correspond à l'ensemble des directions d'où vient le rayonnement.

L'optimisation du cas "Manhattan" repose sur une décomposition de l'espace urbain en une grille de bâtiments. Il est possible de décrire le volume englobant contenant tous les quartiers pouvant être générés : ce volume doit englober le quartier composé de tous les bâtiments à hauteur maximale (figure 3.5). L'énergie reçue cumulée sur les surface de ce volume englobant borne le rayonnement solaire direct et diffus (hors réflexions) qu'il est possible de recevoir sur l'ensemble des surfaces des bâtiments du quartier (façades et toits).

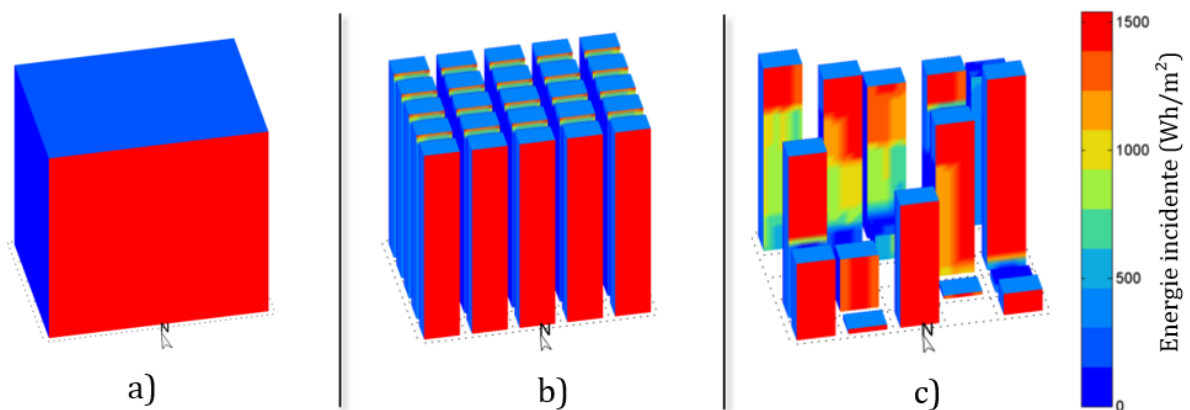


FIGURE 3.5: a) volume englobant du quartier, b) quartier de bâtiments de hauteur maximale c) exemple de quartier possible (21 décembre, 50°N, ciel clair)

Dans le cas de paramètres correspondant aux hauteurs de bâtiments seuls (représentation en blocs), le quartier composé de tous les bâtiments à la hauteur maximale constitue le maximum du rayonnement solaire direct et diffus pouvant être obtenu avec ces paramètres. Partant de ce constat, l'ensemble des valeurs de fonction objectif présentées dans la suite de ce cas d'étude

sont normalisées par rapport à leur valeur maximale :

$$f_n(x) = \frac{f(x)}{f_{max}} \quad (3.2)$$

où $f_{max} = f(k_{max}, \dots, k_{max})$

3.3.2 Relation entre densité et ensoleillement

Si la configuration sous forme de cour permet de capter le rayonnement solaire dans toutes les directions, et est donc *a priori* optimale, ces configurations nécessitent un volume minimum permettant de fermer le périmètre du quartier. La définition géométrique du cas “Manhattan” a été reprise ici pour questionner la relation entre les formes optimales et la densité du quartier, définie par le nombre de blocs dans la contrainte de volume à bâtir.

Quand il est question de rayonnement solaire, l'exposition annuelle du quartier n'est pas un critère souhaitable, car la période estivale appelle davantage l'ombre que le soleil. Pour cela, un critère basé sur le rayonnement solaire direct le 21 décembre est utilisé (représenté sur la figure 3.6). Ce choix est motivé par plusieurs raisons :

- le solstice d'hiver est le trajet solaire le plus bas, générant le plus d'ombres à partir de surfaces verticales ;
- proches des solstices, les trajets solaires présentent peu de différences d'un jour sur l'autre, aussi le trajet solaire du 21 décembre peut être considéré comme représentatif d'une période de temps de plusieurs mois ;
- le 21 décembre correspond à une période de l'année pour laquelle on est sûr que le besoin de chauffage est présent. La difficulté de définir une période de chauffe est ainsi évitée ;
- un critère basé sur un jour permet de prendre en compte un modèle idéal par ciel clair. Les résultats obtenus ne sont dès lors pas nécessairement représentatifs d'une période de l'année (par exemple si l'hiver est majoritairement couvert à l'endroit considéré). En revanche, l'accès au soleil peut être vu comme un bien précieux, particulièrement dans ces périodes hivernales ;
- enfin, le calcul sur une seule journée nécessite un temps de calcul réduit, permettant à un plus grand nombre d'essais d'optimisation d'être réalisés.

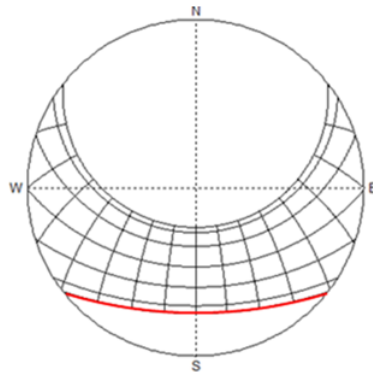


FIGURE 3.6: Trajet solaire le 21 décembre à la latitude de 50° N

Dans la représentation en blocs, le volume des bâtiments à construire s’exprime par un nombre de blocs total sur le quartier. Afin d’étudier les formes urbaines apparaissant avec la densité, trois volumes différents sont considérés :

- $V_1 = 33\%.V_{max}$
- $V_2 = 50\%.V_{max}$
- $V_3 = 66\%.V_{max}$

Ces volumes sont transcrits en un nombre de blocs dans le cadre du module d’optimisation. Les paramètres utilisés pour les calculs d’optimisation sont résumés dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2: Conditions de calcul pour l’étude des configurations optimales en fonction de la densité

Géométrie	
Représentation : blocs (base rectangulaire)	Dimensions : cas “Manhattan”
N_{blocs} : variable	Contexte : aucun
Simulation	
Modèle : direct ciel clair	Latitude : 50°
Jours : 21 décembre	Heures : 1-24h
Fonction objectif : énergie cumulée sur façades et toits	
Optimisation	
Population : 120 ($\mu+\lambda = 40+80$)	Génération max : 140

Quatre configurations optimales ont été sélectionnées à partir d’une quinzaine d’essais d’optimisation pour chacune des trois contraintes de volume. Ces résultats sont présentés respectivement sur les figures 3.7, 3.8 et 3.9. Les différences entre ces configurations nous informent sur les caractéristiques importantes d’un bon quartier par rapport au rayonnement direct au solstice d’hiver. Pour chaque contrainte de volume à construire, l’évaluation des configurations sélectionnées donne des résultats similaires.

Différentes formes ont été obtenues comme solutions optimales. Il est possible de prévoir à partir de la répartition de l’énergie sur les surfaces du volume englobant du quartier (figure 3.5, a) que la direction est-ouest, avec une exposition forte au sud, permettra de capter un maximum de rayonnement (une façade sud en milieu dégagé reçoit plus de 90 % du rayonnement direct normal le 21 décembre). Ce comportement est confirmé par les configurations optimales trouvées, dans lesquelles la rangée la plus au nord présente des bâtiments de hauteur maximale quelle que soit la contrainte de volume.

A basse densité, de hauts bâtiments ont tendance à se positionner – en plus de la rangée nord – sur les côtés de la rangée sud du quartier, afin de récupérer le rayonnement provenant des directions sud-ouest et sud-est, comme on peut le constater dans les configurations a_1 et c_1 (figure 3.7). Dans les configurations à densité intermédiaire, deux rangées de bâtiments de hauteur maximale apparaissent (figure 3.8). A densité élevée, les configurations optimales présentent de fortes similitudes entre elles. Des rangées de bâtiments bas alternent dans ces cas

avec des bâtiments de hauteur maximale. On retrouve certaines caractéristiques des densités moindres : les configurations sont composées de plusieurs rangées de hauteur maximale avec des bâtiments hauts sur les côtés de la rangée sud (figure 3.9). A noter que dans tous les cas de figures, tous les emplacements sont occupés par un bâtiment d'au moins un bloc, proposant de ce fait une surface de toiture supplémentaire aux rayons solaires.

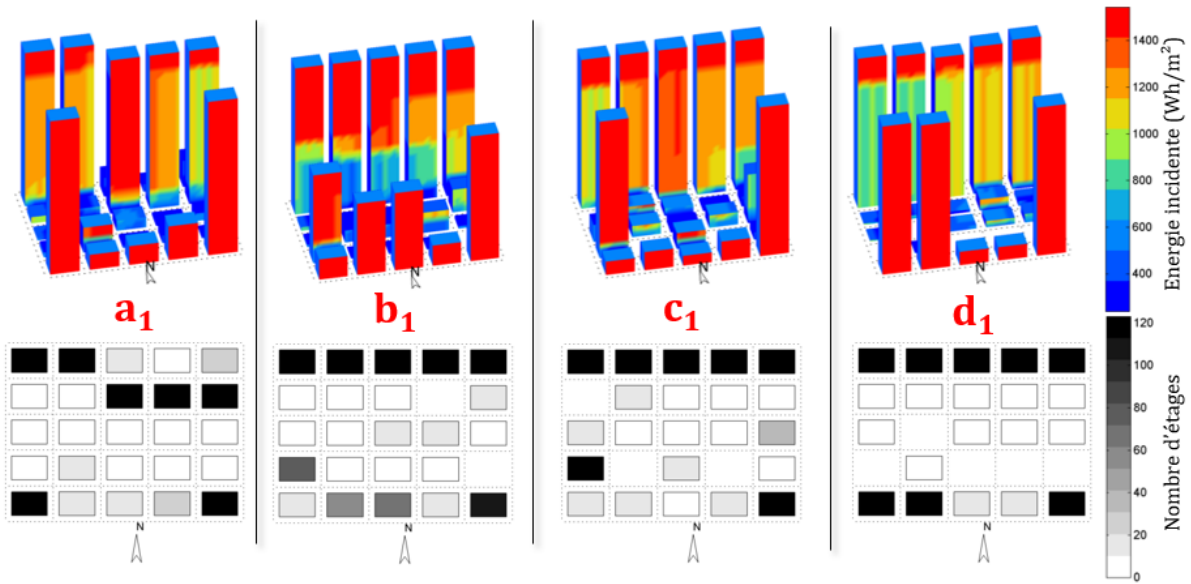


FIGURE 3.7: Configurations optimales pour 33% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

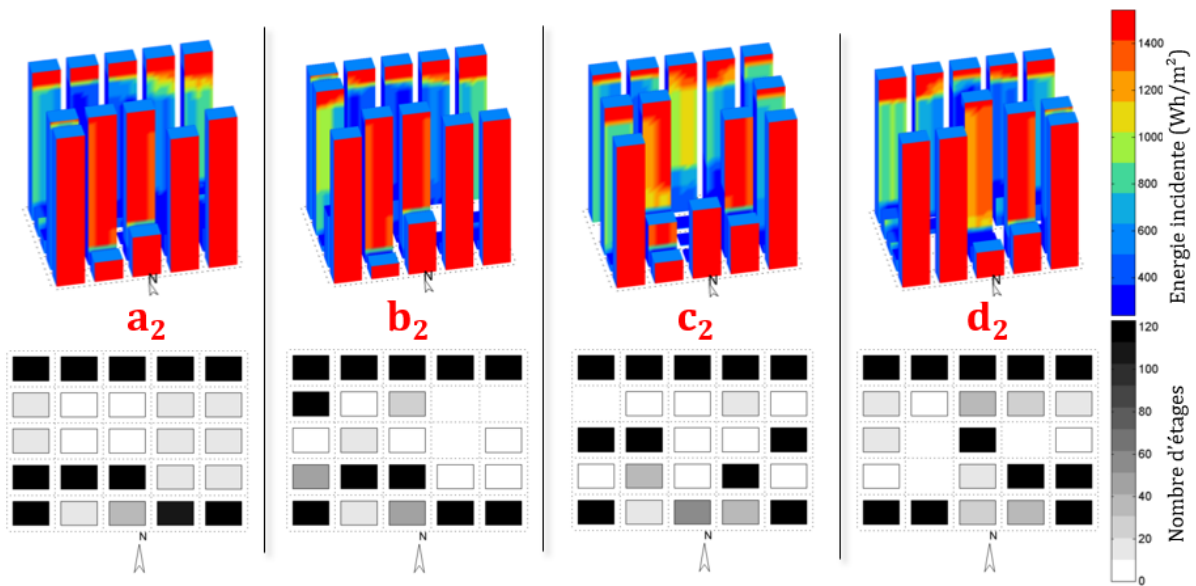


FIGURE 3.8: Configurations optimales pour 50% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

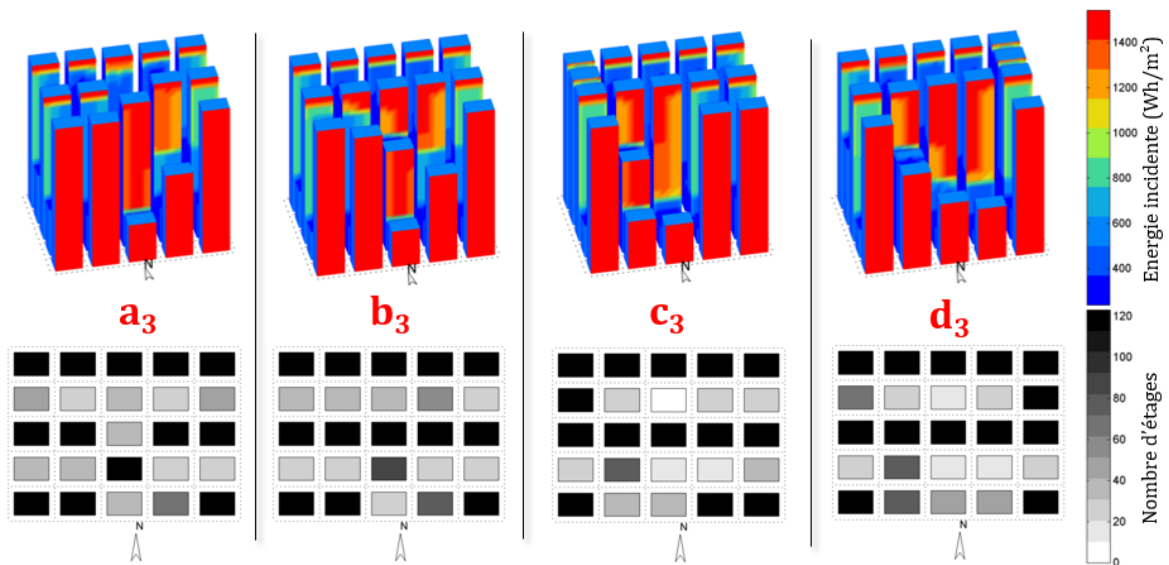


FIGURE 3.9: Configurations optimales pour 66% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

Les fonctions objectif correspondant aux configurations optimales représentées plus haut ainsi qu'aux moins bonnes configurations trouvées en lançant un calcul de minimisation du potentiel solaire figurent dans le tableau 3.3. Il apparaît que l'énergie radiative incidente sur le quartier augmente avec le volume imposé jusqu'à ce que le potentiel maximum, f_{max} , soit atteint. Dès lors, le quartier est en quelque sorte arrivé à un volume de saturation, au delà duquel un ajout de volume ne permet pas d'augmenter le rayonnement sur le quartier. En revanche, puisque la surface de paroi augmente avec le volume, le potentiel solaire surfacique deviendra de moins en moins important.

TABLEAU 3.3: Valeur normalisée de la fonction objectif pour les meilleures et moins bonnes configurations, en fonction de la contrainte de volume

Volume	Configuration				
	a	b	c	d	Moins bonne
V_1	0,90	0,90	0,91	0,92	0,37
V_2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,53
V_3	0,99	0,99	0,99	0,99	0,68

L'évolution des meilleures et des moins bonnes configurations trouvées en fonction du volume à bâtir est présentée sur la figure 3.10. Dans la continuité des commentaires effectués plus haut concernant les résultats pour trois contraintes de volume, il apparaît qu'une fois que le quartier est composé d'une rangée au nord, ainsi que de bâtiments sur la rangée sud, et notamment sur les côtés de cette rangée, le volume de saturation est atteint. Ce volume est, pour ce cas test et cette fonction objectif, légèrement inférieur à la moitié du volume maximum.

En ce qui concerne les moins bonnes configurations observées, les quartiers sont composés de bâtiments de taille moyenne, et une disposition de bâtiments qui ne permet pas de montrer une grande façade au sud.

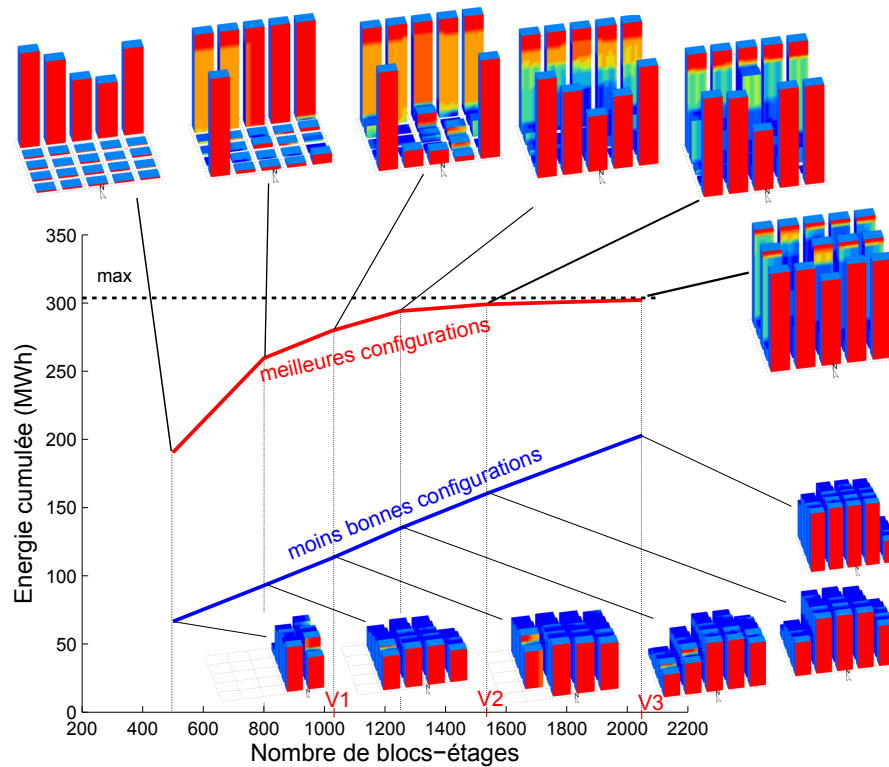


FIGURE 3.10: Evolution de la fonction objectif avec la densité, et représentation de meilleures (haut) et moins bonnes (bas) configurations (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

La fonction objectif de maximisation au 21 décembre présente un rayonnement solaire provenant d'une seule direction majoritaire. Afin d'étendre la discussion, un autre cas de figure en milieu dégagé, composé de bâtiments hexagonaux, est défini et soumis à optimisation selon différents critères.

3.3.3 Quartier hexagonal

La logique consistant à lier la forme optimale aux directions principales des rayons énergétiques ne se cantonne évidemment pas au seul cas d'une grille rectangulaire. Afin d'en donner un second exemple, une paramétrisation de quartier comme une grille hexagonale de bâtiments est définie. Chaque bâtiment est dans ce cas représenté par une pile de blocs de base hexagonale. Les variables de conception sont donc liées aux hauteurs.

L'avantage d'une grille hexagonale de bâtiments hexagonaux est qu'elle présente six orientations au rayonnement solaire, ce qui permet une analyse plus visuelle de la réponse géométrique du quartier aux trajets solaires. Le quartier hexagonal est inscrit dans un cercle, et on le définit par

le nombre d’emplacements constituant son rayon R_{quartier} . Le nombre total d’emplacements en fonction de ce rayon est de $n = 3R_{\text{quartier}}(R_{\text{quartier}} - 1) + 1$. Chaque bâtiment est défini par le rayon de son cercle circonscrit $R_{\text{bâtiment}}$. Celui-ci se trouve au centre d’une parcelle dont le cercle circonscrit a pour rayon $R_{\text{emplacement}}$. Dans les exemples d’optimisation sur quartier hexagonal, la densité du quartier est choisie moins élevée que celle du cas “Manhattan”. La limite du nombre de blocs-étages par bâtiment est limitée à 20 étages de 3 m.

Toujours dans le cadre des critères représentant une fonction cumulée sur l’ensemble des surfaces de la géométrie, deux périodes de temps sont sélectionnées : le 21 décembre et le 21 juin. Dans le second cas, chercher à maximiser le rayonnement solaire n’est en réalité pas souhaitable. Les résultats sont à considérer d’un point de vue purement théorique pour illustrer l’adaptation du quartier à la géométrie du trajet solaire.

Les conditions du calcul d’optimisation sont consignées dans le tableau 3.4.

TABLEAU 3.4: Conditions de calcul pour l’optimisation du quartier hexagonal

Géométrie	
Représentation : blocs (base hexagonale)	R_{quartier} : 3 ou 4
$R_{\text{bâtiment}}$: 10	$R_{\text{emplacement}}$: 20
Limite hauteur : 20 x 3 m	
N_{blocs} : 50 % $N_{\text{blocs,max}}$	Contexte : aucun
Simulation	
Modèle : direct ciel clair	Latitude : 50°
Jours : 21 décembre/21 juin	Heures : 1-24h
Fonction objectif : énergie cumulée sur façades et toits	
Optimisation	
Population : 60 ($\mu + \lambda = 20 + 40$)	Génération max : 60

Maximisation du potentiel solaire au 21 décembre

Dans le cadre de la grille hexagonale, le volume englobant du quartier possède pour le 21 décembre une face recevant une quantité maximale d’énergie (le sud), et deux faces significatives quoique moins importantes au sud-est et sud-ouest (figure 3.11). Ces trois faces montrent *a priori* quelles sont les directions principales permettant d’améliorer l’exposition au rayonnement solaire du quartier.

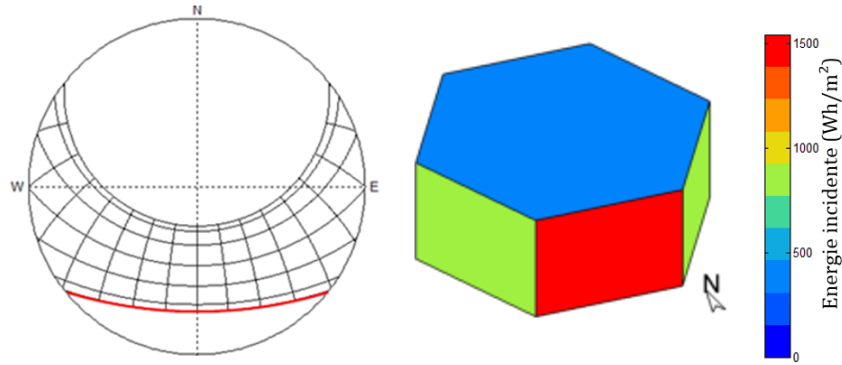


FIGURE 3.11: Volume englobant du quartier hexagonal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

Les configurations optimales pour deux dimensions de quartiers sont présentées sur la figure 3.12. La configuration de gauche, reposant sur un quartier de rayon 3 (19 bâtiments), consiste en un quartier constitué de bâtiments hauts permettant de récupérer le rayonnement solaire dans les trois directions principales évoquées plus haut, tandis que des bâtiments de faible hauteur occupent le reste des emplacements. Dans la configuration de droite, le rayon du quartier est de 4 (37 bâtiments). Le nombre de blocs à disposer (toujours égal à 50 % de $N_{blocs,max}$) permet de réaliser une seconde rangée de bâtiments de hauteur maximale au nord, comblant ainsi les espaces libres entre les tours de la dernière rangée.

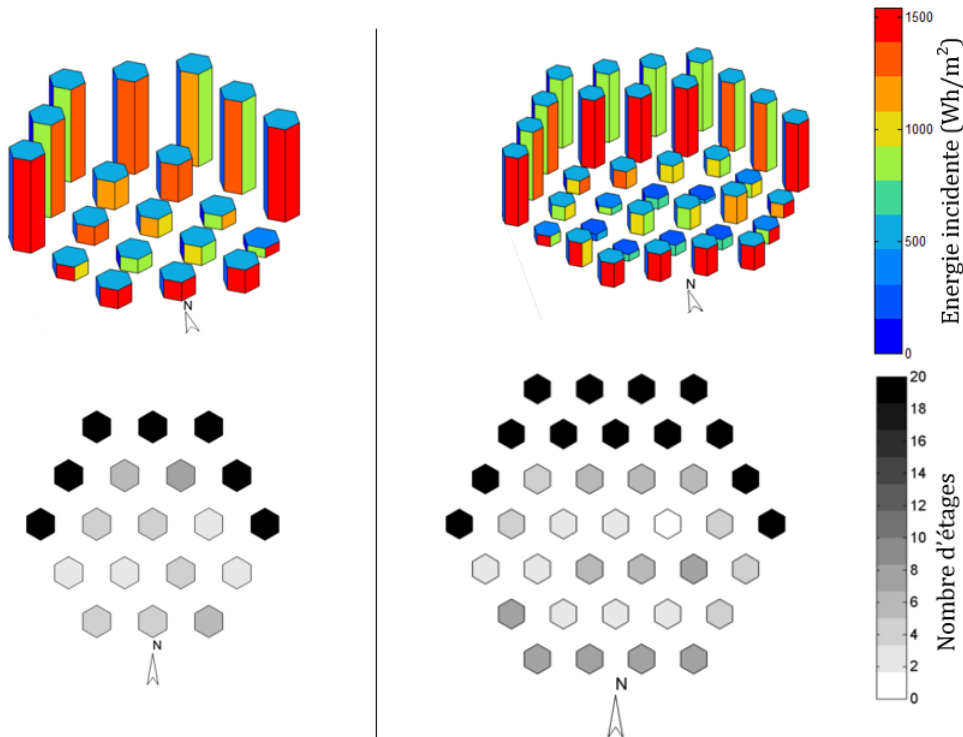


FIGURE 3.12: Configuration hexagonale optimale pour 50% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

Maximisation du potentiel solaire au 21 juin

Pour l'exercice de visualisation, le cas d'optimisation a été lancé sur la date du 21 juin, par ciel clair. Le trajet solaire à cette date part du nord-est pour finir sa course au nord-ouest. Le soleil passe par le sud, mais il est alors haut dans le ciel et ne génère que peu d'ombres entre les bâtiments. Les orientations principales du quartier vis à vis du rayonnement solaire sont dans ce cas premièrement le toit (soleil de midi), puis les surfaces sud-est, sud-ouest, nord-est et nord-ouest (figure 3.13).

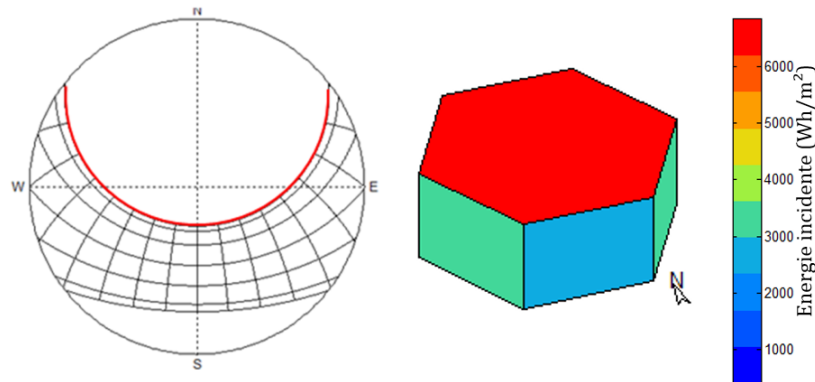


FIGURE 3.13: Volume englobant du quartier hexagonal (21 juin, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

Une solution optimale significative retenue après plusieurs essais d'optimisation est présentée sur la figure 3.14. La configuration consiste en des rangées de bâtiments de hauteur maximale orientées selon les quatre directions permettant de capter le plus de rayonnement solaire, tandis que des trous dans le périmètre du quartier apparaissent au nord et au sud. Dans ces directions, le rayonnement n'est pas ou peu associé à une composante horizontale significative. Au centre du quartier, certains bâtiments sont de hauteur moyenne. Le potentiel solaire sur leur toiture est du même ordre de grandeur que sur les bâtiments de hauteur maximum. De fait, et contrairement au 21 décembre, le soleil haut du solstice d'été limite les ombres occasionnées des bâtiments les uns sur les autres (ce qui est plutôt un problème puisque l'été, l'ombre est bienvenue!).

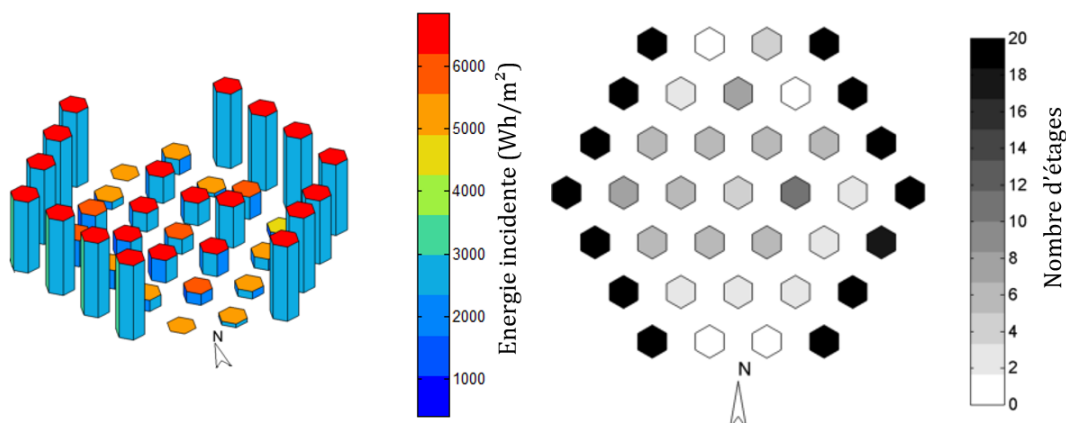


FIGURE 3.14: Configuration hexagonale optimale pour 50% du volume maximal (21 juin, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)

3.3.4 Quartier hexagonal et facteur de vue du ciel

On a pu constater dans les exemples précédents la modification de la forme du quartier en fonction des trajets solaires et la possibilité d'effectuer une première analyse de ce que seront les composantes de ces meilleurs quartiers en observant l'énergie incidente sur les différentes orientations du quartier.

En guise de dernière illustration sur la grille hexagonale, des essais d'optimisation ont été lancés en prenant cette fois comme critère le facteur de vue du ciel moyen sur les façades des bâtiments. Le facteur de vue du ciel est un critère particulièrement important dans des problématiques de lumière naturelle. Pour cette raison, les toitures ne sont pas prises en compte dans le calcul. Le facteur de vue du ciel moyen renseigne sur l'accès au rayonnement diffus qui est, par ciel clair, bien moins énergétique – et donc moins utile pour le chauffage – que le rayonnement solaire direct, bien qu'à l'échelle d'une année ces proportions dépendent fortement des données météorologiques.

Les paramètres d'optimisation utilisés dans ce cas sont les mêmes que pour le cas précédent, hormis les dimensions des bâtiments, modifiées dans certains essais pour obtenir des bâtiments plus petits relativement aux dimensions des parcelles.

Deux résultats ont été choisis parmi les configurations optimales (figure 3.15). Puisqu'aucune direction n'est privilégiée dans la définition des facteurs de vue du ciel, une rangée de bâtiments de hauteur maximale forme systématiquement le périmètre du quartier. Les blocs restants forment des tours au centre du quartier, de manière à éloigner les bâtiments les uns des autres.

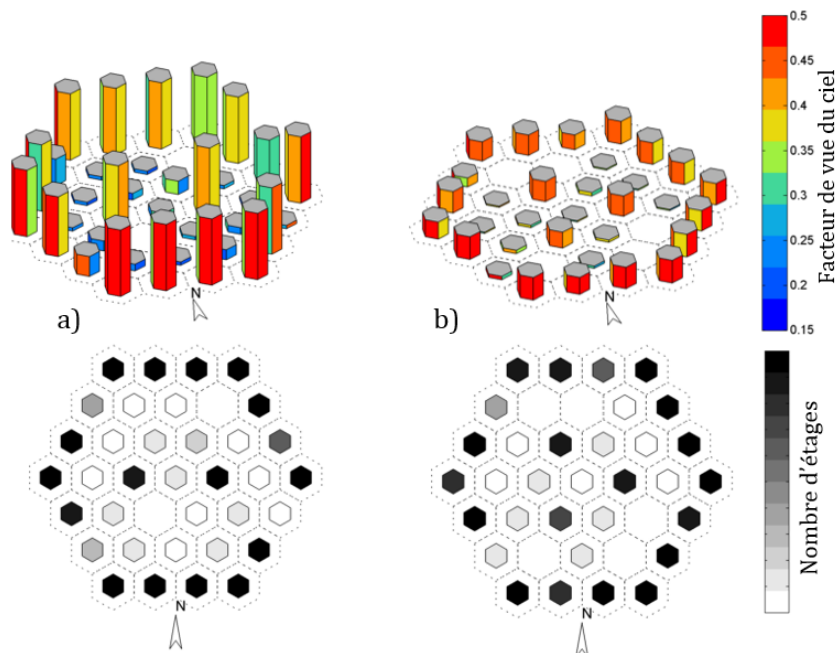


FIGURE 3.15: Configurations optimales par rapport au facteur de vue du ciel moyen. a) hauteur maximale grande relativement aux dimensions des emplacements, b) hauteur maximale petite relativement aux dimensions des emplacements

Les différents résultats présentés, d'une part reprenant un cas de la littérature constitué d'une grille rectangulaire de bâtiments, d'autre part en employant une représentation hexagonale des quartiers, auront permis de valider la méthode d'optimisation et d'exposer quelques résultats de quartiers optimaux en milieu dégagé. Les fonctions objectif considérées, cumulant le rayonnement solaire sur l'ensemble des surfaces du quartier, ne distinguent pas quel bâtiment est éclairé à un instant donné. Ainsi, deux bâtiments l'un derrière l'autre à un instant donné seront équivalents pour la fonction objectif à un unique bâtiment. Plutôt que de se placer du point de vue du bâtiment, il serait plus juste, pour comprendre les résultats d'optimisation, de prendre le point de vue du soleil (ou, dans le cadre du rayonnement diffus, de chaque point de la voûte céleste). La configuration urbaine optimale est celle qui maximise la surface de quartier vue, pondérée par l'énergie en jeu, et ce tout au long de la période de calcul (respectivement, pour tous les points de la voûte céleste).

En milieu dégagé, il est possible de déterminer les façades qui joueront les rôles principaux dans le potentiel solaire en s'intéressant à ce que reçoit le volume englobant du quartier. Les bons quartiers sont ceux dont les bâtiments iront "chercher" ce rayonnement le plus loin possible en dehors des limites du quartier, ce qui revient à projeter le plus possible leur ombre en dehors du quartier. Les directions principales d'où vient le rayonnement permettent de déterminer quel côté du quartier sera privilégié.

Enfin, il a été observé que, en utilisant le modèle en bloc, il existait, en fonction de la période de temps considérée, un volume de saturation, à partir duquel les ajouts de volumes ne permettent plus d'améliorer l'énergie totale que le quartier est en mesure de capter.

Mais les quartiers en milieu dégagé ne sont qu'un premier pas vers des quartiers plus réalistes, *a fortiori* dans la perspective de l'optimisation d'un milieu urbain dense. Dans les sections suivantes, un contexte urbain sera ajouté aux bâtiments à optimiser, tout d'abord sous la forme d'une série de bâtiments fixes, puis dans une représentation en cellules.

3.4 Optimisation de la forme de bâtiments dans un contexte urbain

3.4.1 Présentation du cas d'étude

Dans cette partie, un cas d'étude basé sur le positionnement de bâtiments sur des parcelles, formalisé dans la section 2.1.2, est proposé. Ses caractéristiques sont définies de manière à étudier simultanément plusieurs questions :

1. Quelle influence ont les différents paramètres des bâtiments sur le potentiel solaire à l'échelle du quartier ?
2. Le contexte urbain a-t-il un impact dans le cadre de l'optimisation par rapport à des fonctions objectif cumulées ?

3. Le climat est un critère déterminant dans la conception architecturale. Quelle influence a une modification de la latitude sur les formes urbaines obtenues et les potentiels solaires par ciel clair correspondants ?

Le cas d'étude se définit comme un quartier de densité moyenne composé de neuf bâtiments sur une grille 3x3. Une couronne de bâtiments de 5 niveaux est ajoutée autour de cette grille afin de représenter un milieu urbain pré-existant jouant le rôle de masques pour le rayonnement solaire (figure 3.16). L'empreinte au sol du quartier (part de la superficie du quartier occupée par des bâtiments) est de 0,25. La hauteur des bâtiments de la grille centrale peut varier entre 0 et 9 étages de 3 m.

L'énergie incidente est calculée sur toutes les surfaces des bâtiments mobiles (toits et façades) ainsi que sur les toits et façades des bâtiments du contexte qui font face à la grille intérieure (surlignées en noir sur la figure 3.16). Les autres surfaces des bâtiments du contexte sont peu ou pas influencées par les variables d'optimisation et ne sont pour cette raison pas considérées dans la fonction objectif.

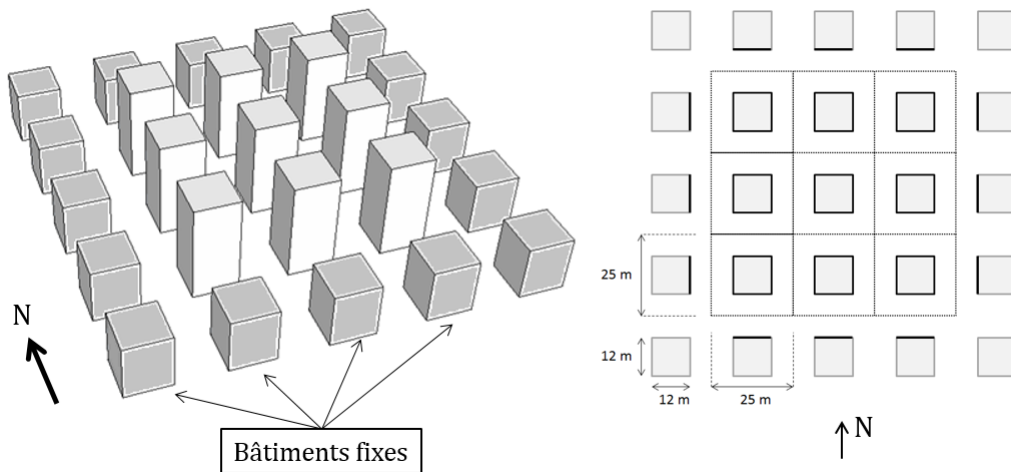


FIGURE 3.16: Définition du cas d'étude avec bâtiments sur parcelles

Dans l'optique d'étudier leur influence, trois jeux de paramètres sont introduits pour décrire un bâtiment :

- (A) Hauteur seule, définie par un nombre d'étages $\{k\}$ (correspond à la représentation en blocs). Ce paramètre est pressenti comme étant l'une des composantes principales gouvernant le potentiel solaire sur le quartier. Dans ce jeu de paramètres, tous les bâtiments sont centrés sur leur parcelle. Les bâtiments sont ainsi régulièrement espacés dans les deux directions nord-sud et est-ouest.
- (B) Jeu de paramètres intermédiaire : hauteur et translation des bâtiments $\{k, x_G, y_G\}$.
- (C) Jeu de paramètres complet : hauteur, translation, affinités et rotation $\{k, x_G, y_G, \lambda, \theta\}$.

Afin de conserver un volume constant à l'échelle du quartier tout en définissant la hauteur des bâtiments par un nombre discret d'étages, il a été nécessaire de contraindre le bâtiment à conserver une empreinte au sol d'aire constante. Pour cela, les deux paramètres normalement

utilisés pour les déformations par affinité, λ_1 et λ_2 , sont réduits à un seul paramètre λ , tel que $\lambda_1 = \lambda$ et $\lambda_2 = 1/\lambda$

L'ensemble des paramètres de tous les bâtiments constituent les variables de conception du problème d'optimisation. Un résumé du nombre de variables correspondant aux différents jeux de paramètres est présenté dans le tableau 3.5.

TABLEAU 3.5: Jeux de paramètres d'optimisation

Jeux de paramètres	Paramètres	Nombre de variables
(A)	{k}	9
(B)	{k, x_G , y_G }	27
(C)	{k, x_G , y_G , λ , θ }	45

La contrainte de volume est fixée à 66 % du volume maximal, soit l'équivalent des 9 bâtiments à 6 étages. Tous les paramètres sont discrets. L'utilisation de variables continues pour la rotation, la translation et les affinités a également été essayée sans amélioration significative des résultats, mais avec une augmentation importante du temps de calcul. L'ensemble des valeurs possibles pour chaque paramètre est présenté dans le tableau 3.6. Les contraintes stériques (chaque bâtiment doit rester dans sa parcelle) sont gérées selon la procédure décrite dans le chapitre 2.

TABLEAU 3.6: Bornes sur les variables d'optimisation

Paramètre	Min	Max	Pas
Hauteur (k)	0	9	1 étage
Translation (x_G , y_G)	(x_{Gmin} , y_{Gmin})	(x_{Gmax} , y_{Gmax})	2 m
Rotation (θ)	0	$3\pi/4$	$\pi/4$
Affinités (λ)	0,8	1,2	0,1

3.4.2 Résultats

Les spécificités climatiques, et notamment les trajets solaires, jouent un rôle premier dans l'établissement des formes urbaines optimales. Les études sur des quartiers dégagés ont permis d'exprimer l'apparition de formes optimales comme une réaction à la géométrie des trajets solaires. Dans la présente étude, trois latitudes sont considérées :

- 40° N, correspondant au sud de l'Europe (Madrid, Naples, Ankara), à Pékin et New-York ;
- 50° N, correspondant à la latitude de Prague, Kiev, Vancouver, entre Paris et Bruxelles ;
- 60° N, correspondant aux capitales du nord de l'Europe (Oslo, Stockholm, Helsinki).

Pour les trois latitudes, la fonction objectif consiste à maximiser le rayonnement solaire direct le 21 décembre. Les caractéristiques des trajets solaires respectifs sont présentées dans le tableau 3.7. A noter que le rayonnement direct du 21 décembre à 60° N est très faible et peu susceptible d'avoir un impact significatif dans la réduction des besoins énergétiques dans le

cadre de climats froids. Cette latitude est malgré tout évaluée, considérant que le rayonnement solaire peut avoir un rôle bénéfique sinon d'un point de vue thermique, du moins pour la lumière naturelle, *a fortiori* dans des régions délaissées par le rayonnement solaire hivernal.

TABLEAU 3.7: Trajets solaires et énergie directe par ciel clair le 21 décembre

Latitude	40° N	50° N	60° N
Hauteur solaire maximale	27°	17°	7°
Durée de la journée	9 h 09	7 h 51	5 h 30
Énergie directe normale (kWh/m ²)	3,49	1,70	0,14
Énergie directe horizontale (kWh/m ²)	1,28	0,41	0,01
Énergie directe sur une façade sud (kWh/m ²)	2,89	1,54	0,13

Le traitement du problème d'optimisation donne un ensemble de configurations quasi-optimales dans lesquelles des tendances géométriques peuvent être identifiées, plutôt qu'une unique configuration optimale. Une sélection parmi ces bonnes solutions pour les différentes latitudes et jeux de paramètres est présentée sur la figure 3.17. Quelques caractéristiques géométriques des trajets solaires peuvent être observées sur ces configurations : les configurations optimales aux plus basses latitudes comportent des bâtiments de hauteur maximale au nord du quartier ainsi que des bâtiments de hauteur intermédiaire sur les parcelles centrales pour capter le rayonnement venant de l'est et de l'ouest, tandis qu'aux latitudes élevées, les meilleures configurations ne montrent que des rangées de bâtiments de hauteur maximale face au sud qui constituent la direction principale pour la radiation solaire.

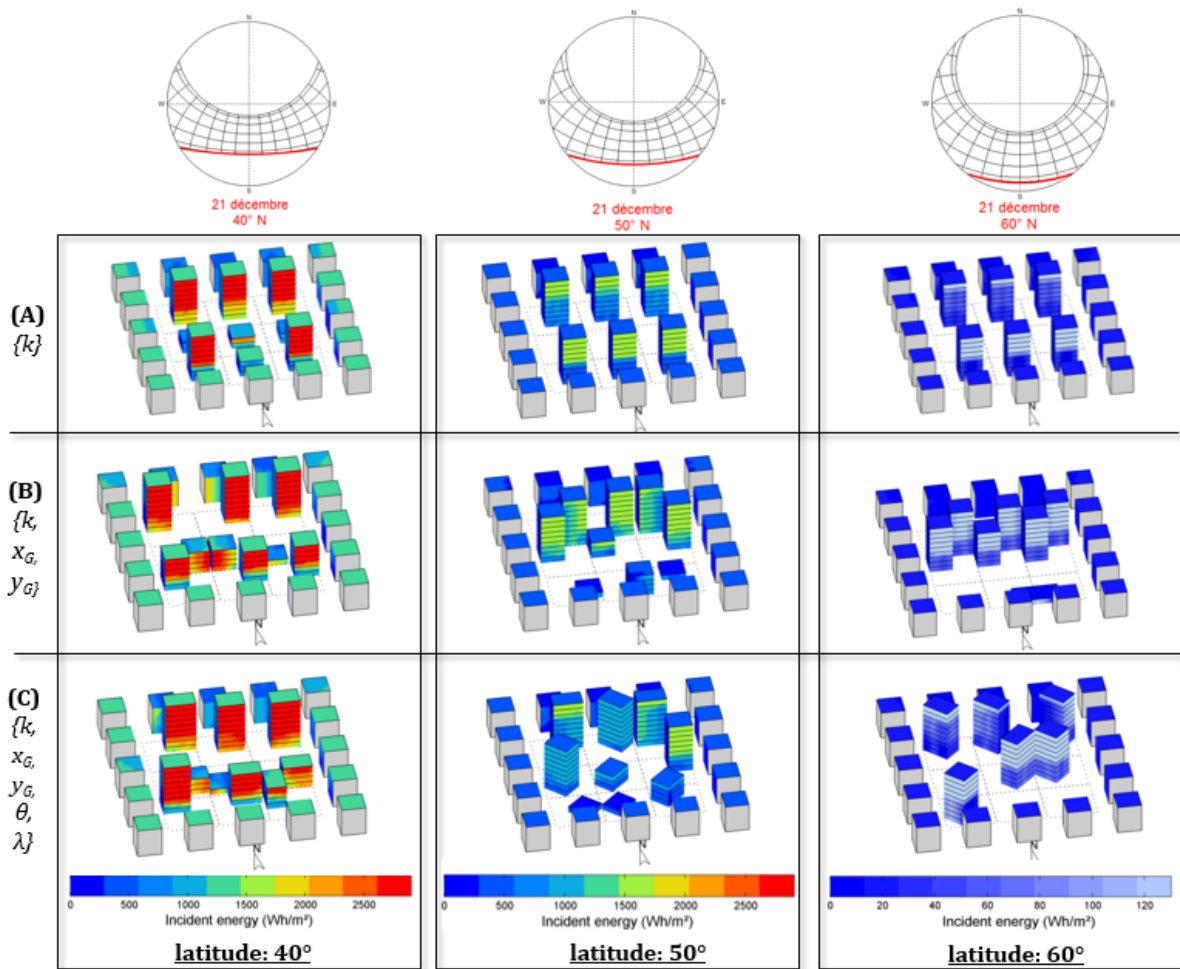


FIGURE 3.17: Formes optimales pour différents ensembles de paramètres et différentes latitudes (21 décembre, ciel clair, Liu & Jordan)

Pour la fonction objectif et le cas géométrique considérés, il apparaît que les paramètres de rotation et d'affinité produisent peu d'amélioration de l'énergie reçue sur le quartier comparé aux paramètres de translation et de hauteur. Ceci peut être expliqué par la taille relative des parcelles et des bâtiments qui, disposés côte à côte dans leur orientation initiale, peuvent montrer une façade continue au sud (voir figure 3.17, (C), 60° N). Avec de plus grandes parcelles, le paramètre de rotation aurait joué un rôle plus important, en particulier aux latitudes les plus au nord où la radiation solaire vient quasi exclusivement du sud le 21 décembre. Un exemple de configuration optimale à 60° N de latitude avec des parcelles plus grandes est présenté sur la figure 3.18. Les bâtiments sont dans cette configuration tournés à 45° sans se masquer les uns les autres, si bien que la surface apparente des bâtiments depuis la direction sud peut être plus grande d'un facteur $\sqrt{2}$ (diagonale du carré) par rapport à des bâtiments dans l'axe de la grille.

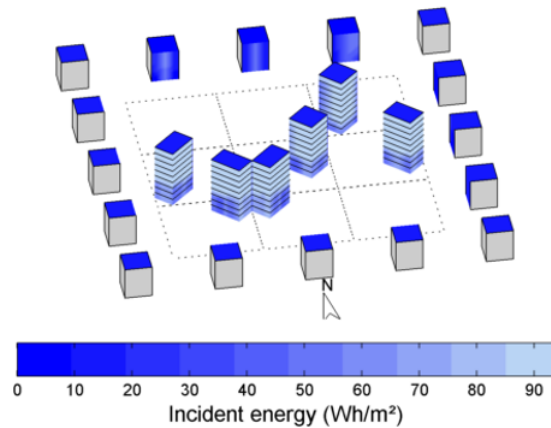


FIGURE 3.18: Configuration optimale de bâtiments sur des grandes parcelles (jeu (C) de paramètres, 21 décembre, 60°N, ciel clair, Liu & Jordan)

Les valeurs numériques correspondant aux résultats d'optimisation sont présentées dans le tableau 3.8. Ces valeurs sont normalisées par rapport à la valeur maximale de la fonction objectif, f_{max} , obtenue pour chaque latitude avec le jeu (A) de paramètres (hauteurs seules), lorsque tous les bâtiments sont à hauteur maximale. f_{max} ne borne cependant pas nécessairement le rayonnement lorsque les autres types de paramètres sont utilisés, aussi est-il possible d'avoir dans ces cas des valeurs supérieures à 1, ce qui signifie que les paramètres de hauteur seuls ne permettent pas d'obtenir le potentiel maximum sur le quartier.

La différence entre les évaluations de la moins bonne configuration repérée et des configurations optimales permet de donner une idée du potentiel d'amélioration en fonction du jeu de paramètres utilisé. En considérant l'ensemble des paramètres, ce potentiel est d'au moins 16 % à 40° N, 27 % à 50° N et 59 % à 60° N. L'analyse des résultats prend en compte à la fois ce potentiel d'amélioration et la valeur absolue de l'énergie en jeu, dont l'ordre de grandeur est donné par f_{max} dans le tableau 3.8.

Aux latitudes méditerranéennes (40° N), le trajet solaire au solstice d'hiver joint le sud-est au sud-ouest, avec un rayonnement solaire à midi possédant une composante solaire verticale significative qui donne de l'importance aux surfaces de toiture (on pourra se reporter au tableau 3.7 pour les caractéristiques du rayonnement solaire). Si le potentiel d'amélioration repéré à cette latitude est relativement faible, la quantité d'énergie en jeu est importante. L'étude du rayonnement solaire dans l'architecture – par ailleurs commune à ces latitudes, notamment pour des problèmes de confort estival – est de ce fait également justifiée en hiver.

A 50° N de latitude, à la fois le potentiel d'amélioration et la quantité d'énergie en jeu sont significatifs pour la période de temps utilisée. A cette latitude, l'analyse du potentiel de rayonnement solaire est donc pertinente dès les phases de conception.

Enfin, à 60° N de latitude, le soleil s'élève peu au dessus de l'horizon (7° de hauteur solaire à midi) et le rayonnement direct vient majoritairement du sud. Dans ce cas, le potentiel solaire à l'échelle du quartier est faible; cependant, il peut avoir un impact positif pour le confort, avec

une grande opportunité d'optimisation. Cette latitude est la limite pour une optimisation par rapport au rayonnement direct au solstice d'hiver : plus haut, d'autres périodes de temps ou d'autres critères devraient être définis pour l'optimisation.

L'influence des différents types de paramètres dans le problème d'optimisation varie avec la latitude, la période de temps et le modèle géométrique du quartier. Il n'est de ce fait pas possible de les soustraire *a priori* de la paramétrisation des bâtiments, sous l'hypothèse qu'ils ne seraient pas significatifs.

TABLEAU 3.8: Meilleures et moins bonnes valeurs de fonction objectif relevées pour différentes latitudes et jeux de paramètres (relativement à f_{max})

Latitude	40° N	50° N	60° N
Pire configuration observée (A)	0,86	0,83	0,75
Meilleure configuration (A)	0,93	0,95	1,00
Meilleure configuration (B)	0,99	1,03	1,19
Meilleure configuration (C)	1,00	1,05	1,19
f_{max} (kWh)	$1,17.10^4$	$4,38.10^3$	$2,24.10^2$

L'effet de masque du contexte urbain est difficile à constater dans l'ensemble des configurations optimales. En effet, toutes disposent une rangée de bâtiments de hauteur maximale au nord de la grille, et le fait que d'autres bâtiments se trouvent derrière n'a pas d'impact. Ce problème est également dû au choix de contexte : les bâtiments sont tous de hauteur fixée à 5 étages, or les bâtiments soumis à optimisation prennent rarement un aspect si régulier. Dans l'optique de prendre en compte un contexte représentatif de la géométrie même du quartier optimisé, une conception en cellules urbaines est présentée dans la section suivante.

3.5 Optimisation de cellules urbaines

3.5.1 Conditions d'optimisation et cas d'étude

Dans cette section, le tissu urbain est représenté par une cellule répétée dans toutes les directions, comme décrit dans la section 2.1.3.

On considère une cellule qui prend la forme d'une grille d'emplacements de 20 x 20 m au centre desquels sont disposés des bâtiments de base carrée de 10 m de côté. Chaque bâtiment peut être constitué de 0 à 10 blocs-étages. La fonction objectif considérée est le rayonnement solaire direct par ciel clair cumulé sur l'ensemble des façades à 50° de latitude nord. Les toitures ne sont pas prises en compte dans cette étude.

La représentation en cellule présuppose la régularité du tissu urbain. Aussi, afin de rechercher s'il existe des cellules urbaines plus performantes que d'autres, différents essais d'optimisation sont réalisés en variant trois paramètres :

- Trois périodes d'intérêt sont considérées : le 21 décembre (solstice d'hiver), le 21 mars qui équivaut au 21 septembre (équinoxes) et le 21 juin (solstice d'été). Le rayonnement solaire au solstice d'été n'est en réalité pas souhaitable, et le rayonnement aux équinoxes, très énergétique pour les bâtiments du fait d'un soleil plus bas dans le ciel, est également associé à des risques de surchauffe. Cependant, ces dates sont prises en compte car elles permettent d'illustrer la réaction du quartier à différentes géométries de rayonnement solaire (trajets solaires).
- Le volume bâti du quartier, qui varie entre 33 %, 50 % et 66 % du volume maximal (respectivement V_1 , V_2 et V_3). Contrairement à l'étude réalisée sur une grille rectangulaire en milieu dégagé, dans laquelle une augmentation de volume impliquait nécessairement une configuration optimale avec une fonction objectif égale sinon meilleure, il est possible dans la représentation en cellules qu'à partir d'une certaine densité la qualité des solutions décroisse. La configuration ayant tous les bâtiments à la même hauteur ne permet en effet pas au rayonnement solaire de pénétrer dans le quartier.
- La taille de la cellule pourra varier d'une grille de 2x2 jusqu'à 6x6.

Pour comparer les cellules entre elles, l'énergie reçue sur le quartier est divisée par le nombre d'emplacements de la cellule.

Les conditions d'optimisation de ce cas d'étude sont résumées dans le tableau 3.9.

TABLEAU 3.9: Récapitulatif des conditions de calcul pour l'optimisation sur cellules

Géométrie	
Représentation : blocs (base rectangulaire)	Dim bâtiment : 10 x 10 m
Dim parcelle : 20 x 20 m	Hauteur max : 10 étages x 3 m
N_{blocs} : 33, 50 et 66 % $\cdot N_{blocs,max}$	Contexte : cellules
Taille cellule : 2 x 2 à 6 x 6	R_{calc} : 7
Simulation	
Modèle : rayonnement direct par ciel clair	latitude : 50° N
Jour : solstice d'hiver, été ou équinoxes	Heures : 1-24h
Fonction objectif : énergie cumulée sur façades	
Optimisation	
Population : $\mu + \lambda = 3(4+6 \cdot \text{taille cellule})$	Génération max : 200

De manière générale, certaines précautions doivent être prises dans l'observation des résultats. En effet, les configurations optimales représentent un sous-ensemble de l'espace de paramètres dont la géométrie dépend de la fonction objectif et des conditions de calcul. Les résultats des parties précédentes ont montré que, dans les problèmes qui nous intéressent, plusieurs solutions proches de l'optimum existent. Ne se fier qu'à l'observation de quelques configurations n'est de ce fait pas suffisant, car, selon le critère retenu, il est également possible que cet ensemble de solutions quasi-optimales soit très étendu (peu de différences dans les valeurs de la fonction objectif). Pour donner une idée du potentiel d'amélioration de la fonction objectif, des

essais d'optimisation de l'opposé de la fonction objectif sont effectués pour trouver la moins bonne configuration pour chaque combinaison de conditions de calcul. De plus, afin d'avoir quelques repères dans l'espace des configurations exploré, un jeu de configurations théoriques est défini manuellement. Ces différentes configurations constituent une typologie présentée sur la figure 3.19.

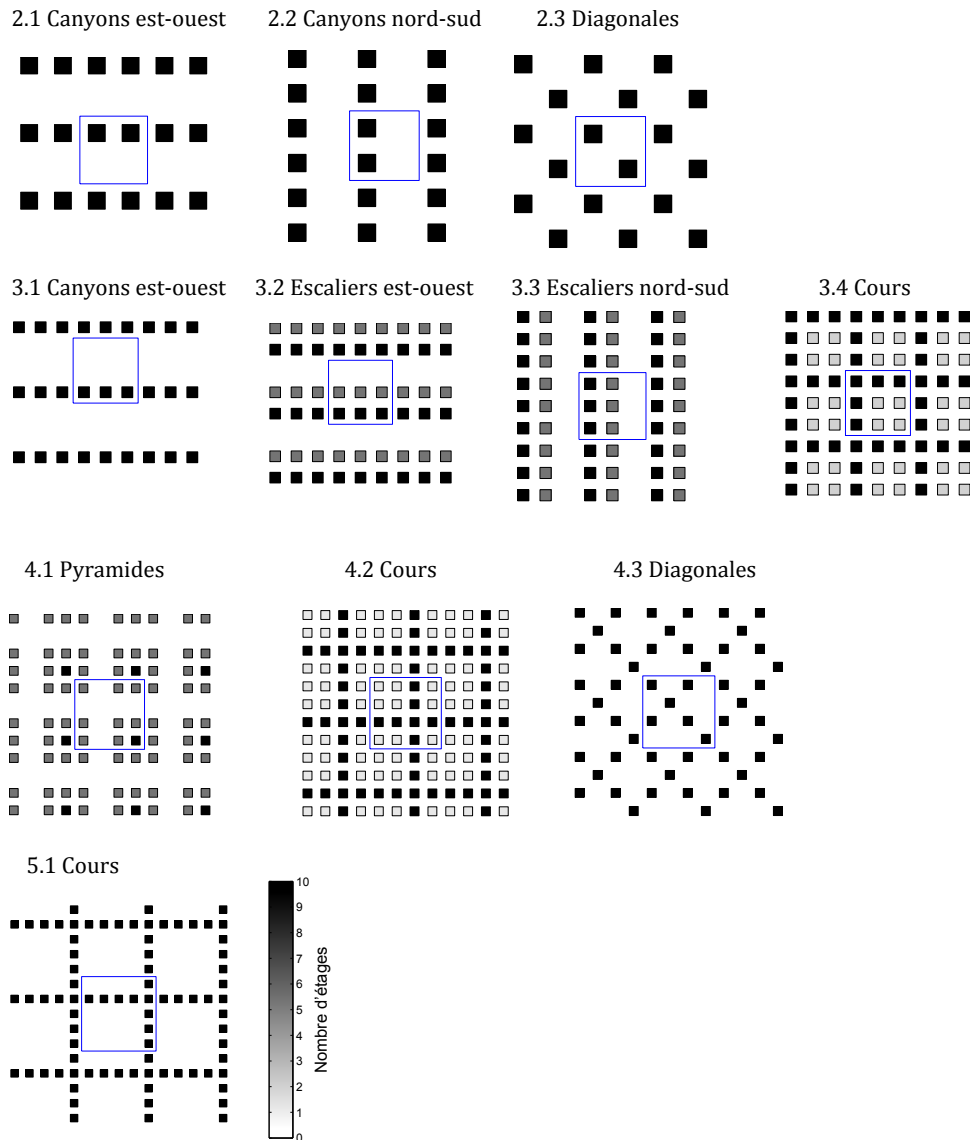


FIGURE 3.19: Typologie de configurations urbaines en cellules

Les configurations de cette typologie ont été construites afin de se rapprocher d'un volume correspondant à 33 %, 50 % ou 66 % du volume maximum afin d'être comparables aux cas d'optimisation. Les densités bâties associées à la typologie sont référencées dans le tableau 3.10.

TABLEAU 3.10: Densité des cellules des la typologie

Taille de cellule	Forme du quartier	Volume (% $\cdot V_{max}$)
2 x 2	[2.1] Canyons est-ouest	50
	[2.2] Canyons nord-sud	50
	[2.3] Diagonales	50
3 x 3	[3.1] Canyons est-ouest	33,3
	[3.2] Escaliers est-ouest	50
	[3.3] Escaliers nord-sud	50
	[3.4] Cours	64,4
4 x 4	[4.1] Pyramides	31,3
	[4.2] Cours	49,4
	[4.3] Diagonales	37,5
5 x 5	[5.1] Cours	36

3.5.2 Résultats d'optimisation des cellules

Trois essais d'optimisation ont été lancés pour chaque densité, taille de cellule et date de calcul. Pour chacune des trois dates considérées, les solutions optimales sont représentées pour permettre une description des points communs qui pourra être nuancée par les résultats sur la typologie de cellules. Les représentations graphiques font figurer à chaque fois la cellule optimale sans contexte, et une vue en plan de la cellule répétée une fois dans chaque direction. Cette représentation est de ce fait différente des quartiers construits pour les besoins du calcul. En effet, un rayon de calcul de 7 est utilisé dans tous les cas, ce qui peut impliquer de répliquer plusieurs fois les cellules dans chaque direction. Enfin, il doit être noté que l'énergie surfacique représentée sur les bâtiments est la moyenne sur chaque façade.

Rayonnement direct par ciel clair au solstice d'hiver

Les cellules optimales obtenues par ciel clair pour le 21 décembre sont présentées sur les figures 3.20 et 3.21. Le rayonnement solaire direct le 21 décembre à 50° de latitude nord vient majoritairement du sud, comme cela a pu être observé dans la partie 3.3.2. L'ensemble des résultats optimaux de cellules urbaines présentent ainsi des bâtiments de hauteur maximale sur chaque colonne. Cependant, si quelques configurations optimales font apparaître des rangées (fig.3.20, 4x4, V_3), d'autres présentent des diagonales, voire des dispositions d'apparence peu ordonnée, notamment pour les cellules de grandes tailles. Il est cependant possible de constater sur l'ensemble des configurations à densité bâtie élevée (V_3) une tendance à disposer les bâtiments en un escalier descendant du sud vers le nord, masquant la série de bâtiments plus petits (et leur toit, qui n'entre pas dans la fonction objectif), mais laissant le rayonnement parvenir sur le bâtiment le plus haut de la série.

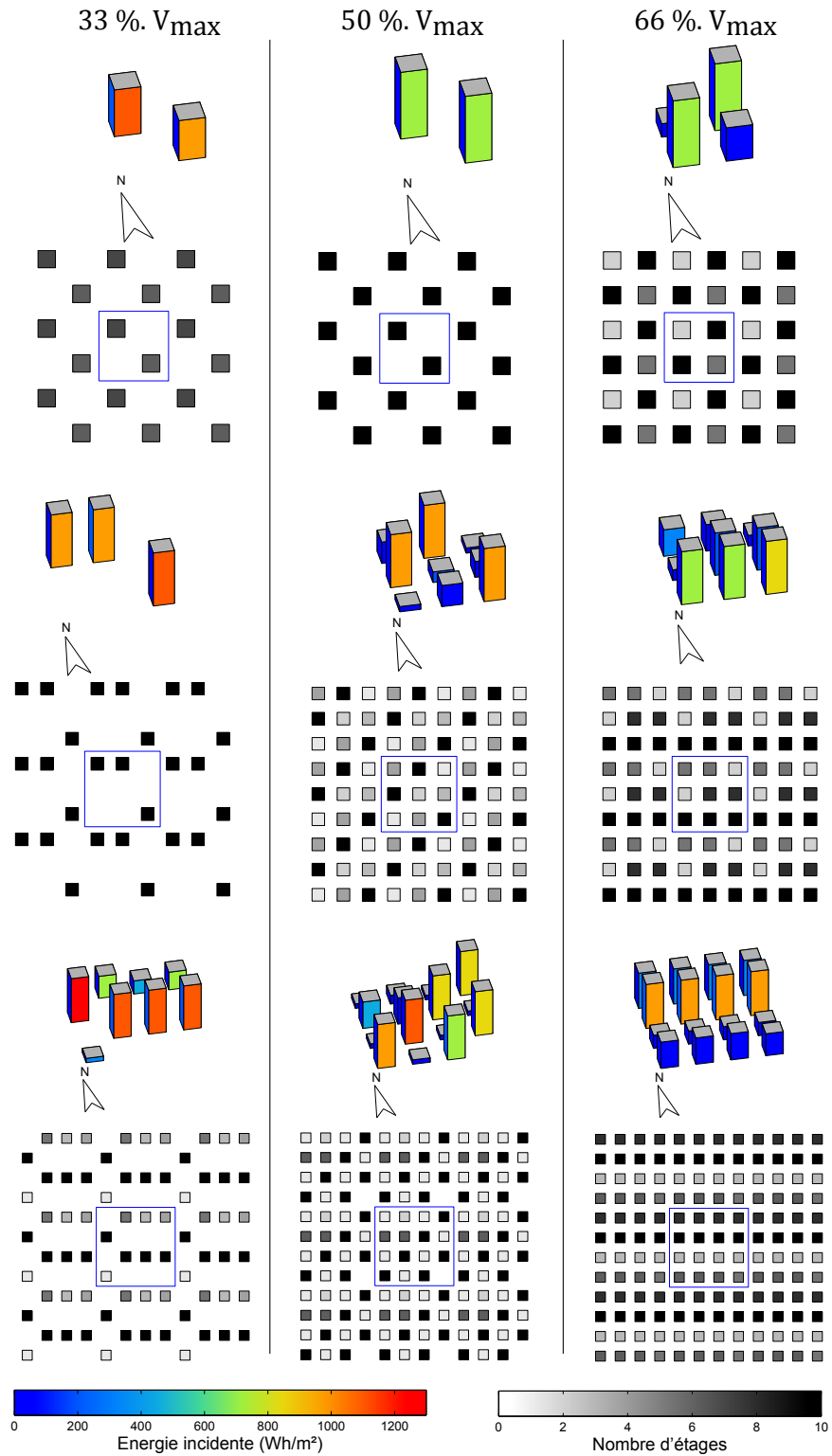


FIGURE 3.20: Formes optimales de cellules 2x2, 3x3 et 4x4 (21 décembre, 50°N, ciel clair)

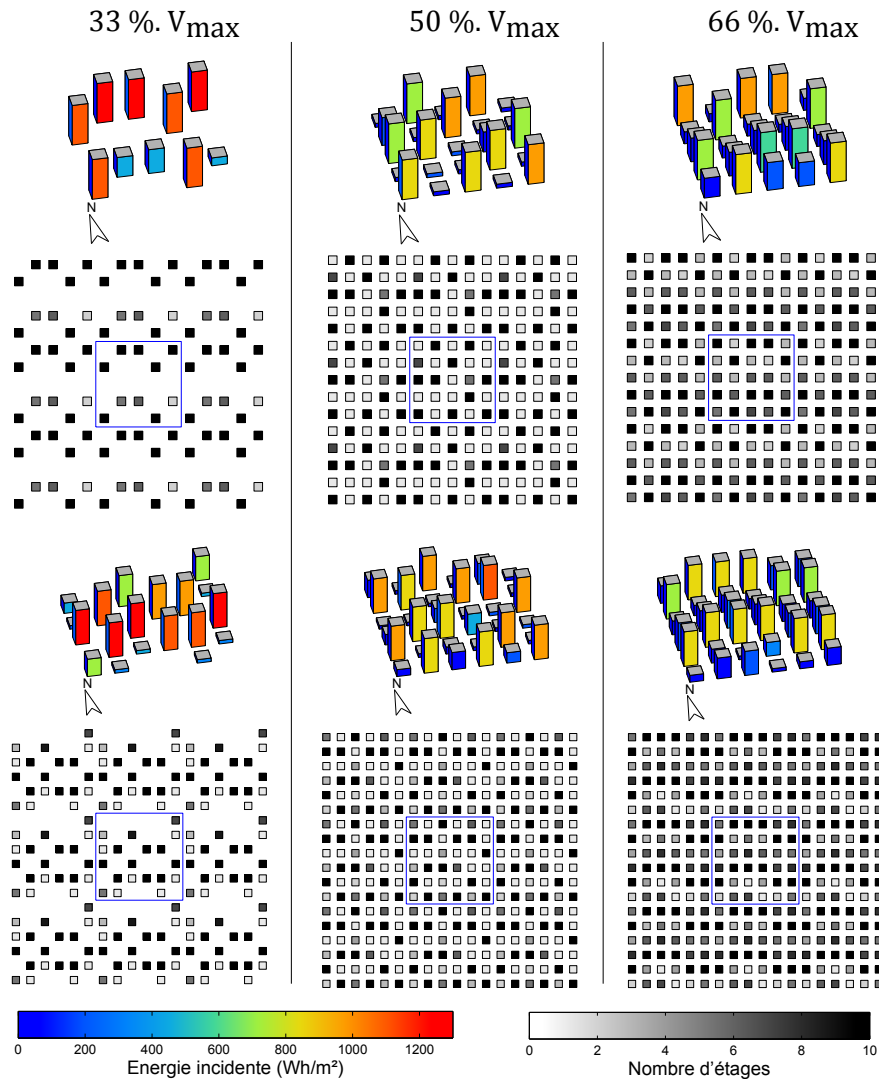


FIGURE 3.21: Formes optimales de cellules 5x5 et 6x6 (21 décembre, 50°N, ciel clair)

La figure 3.22 présente les valeurs minimale et maximale obtenues pour chaque taille de cellule et densité en minimisant ou maximisant la fonction objectif.

Résultats sur la typologie : les évaluations des configurations de la typologie (figurant également sur la figure 3.22) montrent que toutes les configurations présentant des bâtiments hauts dans chaque rangée nord-sud donnent de bons résultats, que les bâtiments soient disposés en rangées (2.1, 3.1, 3.2), en diagonales (2.3, 4.3) ou en cours (3.4, 4.2). A noter que la taille de la cour dans la configuration 5.1 est cependant trop grande pour capter l'ensemble du rayonnement incident sur le quartier. En effet, celle-ci est constituée d'une rangée de bâtiments toutes les cinq rangées, tandis que dans l'ensemble des configurations optimales obtenues, les bâtiments hauts sont sur chaque axe nord-sud espacés d'au plus trois emplacements. Il est ainsi possible qu'une période maximale existe dans l'occurrence des bâtiments selon la direction principale du rayonnement pour permettre de construire une bonne configuration. L'évaluation de la configuration 4.3 supérieure à l'optimum pour les conditions correspondantes est due à un volume légèrement supérieur aux configurations auxquelles elle est comparée (37,5 % au lieu

de 33,3 %). Cette différence permet de présenter trois bâtiments de hauteur maximale et ainsi de se rapprocher du maximum qu'il est possible d'obtenir sur le quartier.

Effet de la densité : dès lors que la majeure partie du rayonnement solaire du 21 décembre peut être captée par un quartier en disposant un bâtiment de hauteur maximale dans chaque rangée nord-sud, il est possible, avec un volume faible, de construire des configurations quasiment optimales quelle que soit la taille de la cellule. En effet, dès 33 % du volume maximum bâti, le potentiel solaire maximal dépasse 90 % du potentiel maximum atteint à plus forte densité.

Effet de la taille de la cellule : pour une densité donnée, la taille du volume influence peu l'énergie maximale par emplacement qui peut être récupérée. En revanche, la valeur minimum de la fonction objectif diminue avec la taille de la cellule, et ce principalement à faible densité. A densité élevée, la plupart des rangées nord-sud sont susceptibles d'avoir au moins un bâtiment dans la moins bonne configuration, ce qui peut expliquer l'effet réduit de la taille des cellules sur le minimum de la fonction objectif.

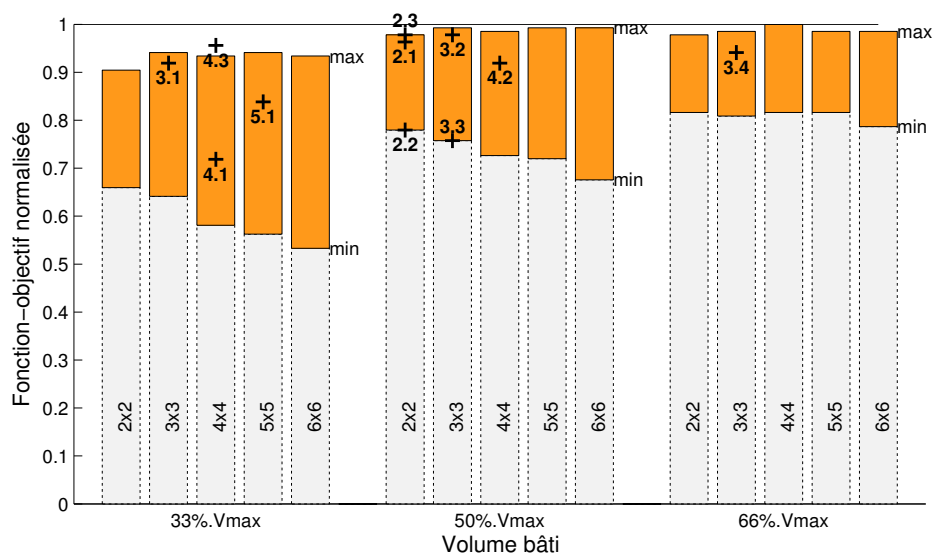


FIGURE 3.22: Minima et maxima de la fonction objectif rapportée au nombre d'emplacements trouvés en fonction de la densité et de la taille de la cellule, et évaluation de la typologie de cellules définie manuellement (21 décembre, 50°N, ciel clair)

Rayonnement direct par ciel clair aux équinoxes

Aux équinoxes, le soleil se lève plein est et se couche plein ouest. Le rayonnement solaire est de ce fait significativement énergétique non seulement depuis le sud, mais dans les directions sud-ouest et sud-est, dans lesquelles l'angle d'incidence des rayons avec des surfaces verticales est plus faible que lorsque le soleil est plein sud, plus haut dans le ciel.

Contrairement aux solutions de l'optimisation au solstice d'hiver, les solutions optimales aux équinoxes présentent des caractéristiques beaucoup plus prononcées, comme le montrent les figures 3.23 et 3.24. En effet, les configurations optimales repérées présentent systématiquement

des rangées de bâtiments de hauteur maximale suivant l'axe est-ouest. La régularité d'apparition de ces motifs en fait une caractéristique forte de l'ensemble des configurations optimales pour cette date.

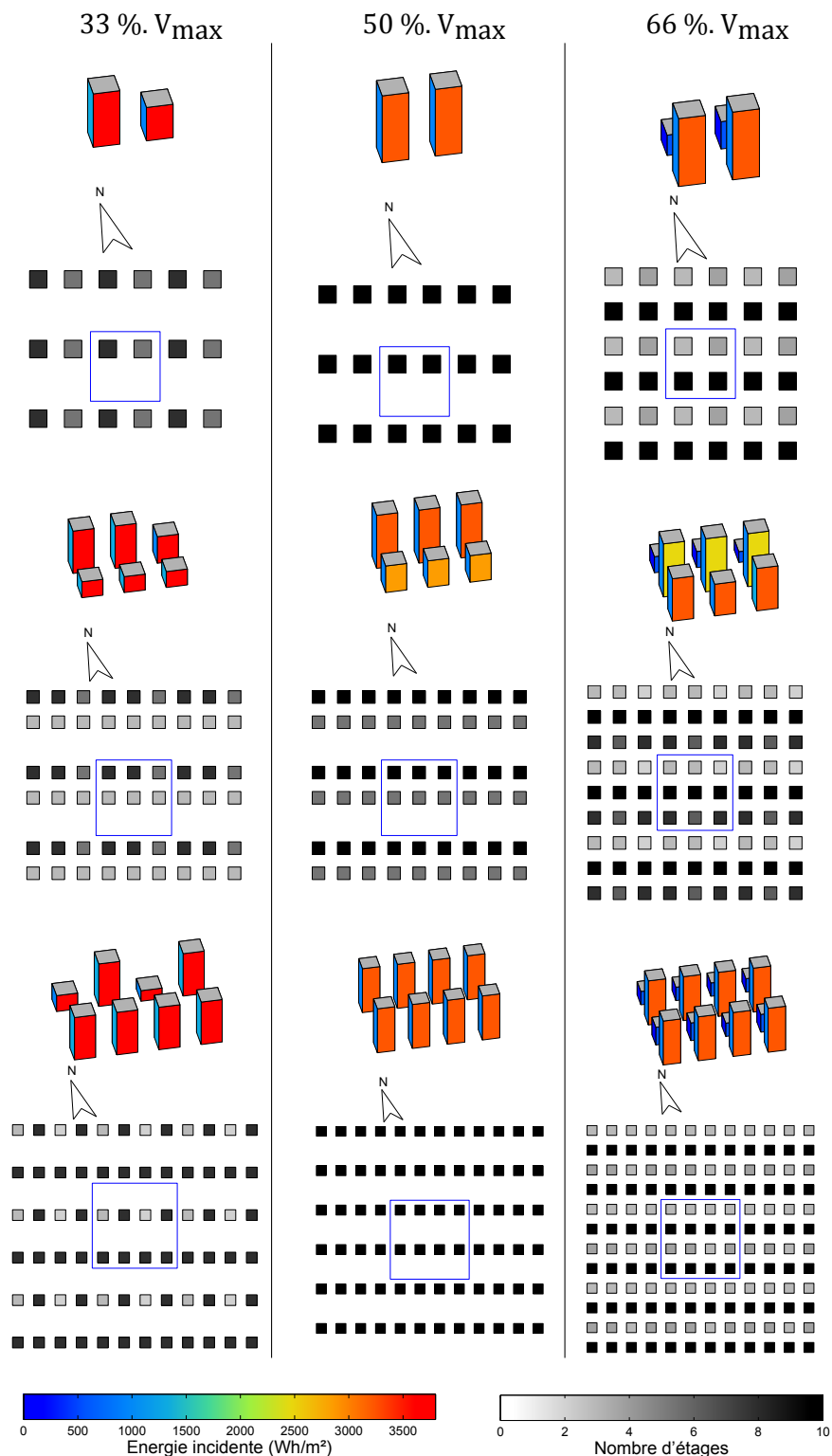


FIGURE 3.23: Formes optimales de cellules 2x2, 3x3 et 4x4 (21 mars/21 septembre, 50°N, ciel clair)

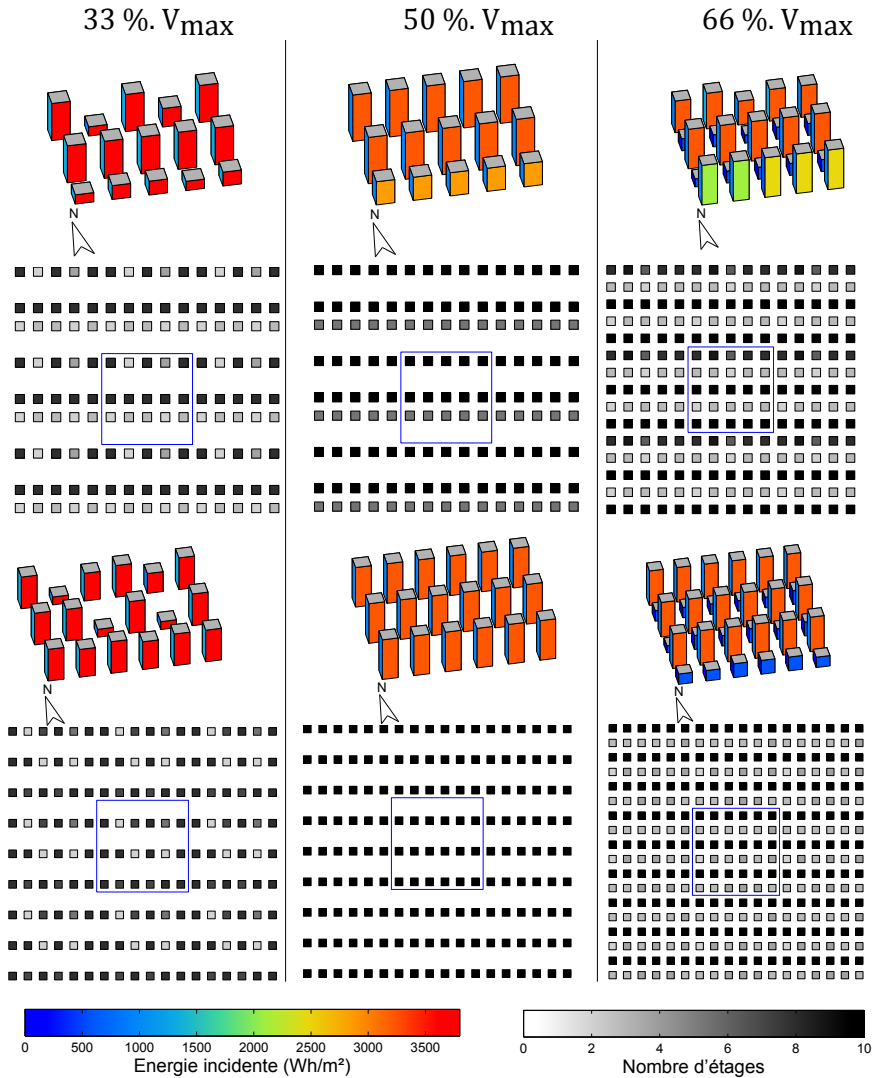


FIGURE 3.24: Formes optimales de cellules 5x5 et 6x6 (21 mars/21 septembre, 50°N, ciel clair)

Résultats sur la typologie : les résultats en matière d'évaluation de la fonction objectif présentés sur la figure 3.25 confirment l'importance des rangées de bâtiments suivant les parallèles. Les deux seules configurations de la typologie atteignant les valeurs maximales d'évaluation selon le volume bâti sont les formes de canyon (2.1, 3.1). La forme d'escalier (3.2) présente une évaluation faible. Cependant, une variante – escaliers montants du sud vers le nord plutôt que l'inverse – constitue la solution optimale trouvée dans le cadre de l'optimisation.

Effet de la densité : une forte augmentation de la fonction objectif peut être observée entre les meilleures solutions ayant un volume bâti faible (V_1) et celles ayant un volume bâti moyen (V_2). Ce comportement, qui n'était pas présent dans le cas de l'optimisation par rapport au solstice d'hiver, peut être expliqué notamment par un soleil culminant plus haut dans le ciel, qui induit des ombres projetées par les bâtiments moins étendues. L'espace entre ceux-ci permettant de récupérer un maximum de rayonnement doit ainsi, en réaction, être plus faible. A partir de 50 % du volume bâti, toutefois, plus de 90 % du maximum d'énergie trouvé à densité maximale peut être obtenu.

Effet de la taille de la cellule : la variation de la taille de la cellule ne modifie pas ou peu la valeur optimale de la fonction objectif rapportée au nombre de bâtiments. En revanche, plus la cellule est grande, plus l'évaluation du moins bon individu est faible. On observe pour des volumes bâtis de 50 % et 66 % des meilleures évaluations légèrement plus faibles pour des cellules de 3x3 ou 5x5 que sur des grilles présentant un nombre pair de bâtiments selon les rangées ou colonnes. Ces différences sont cependant trop faibles pour pouvoir conclure à un véritable effet de la taille de la cellule sans étude complémentaire.

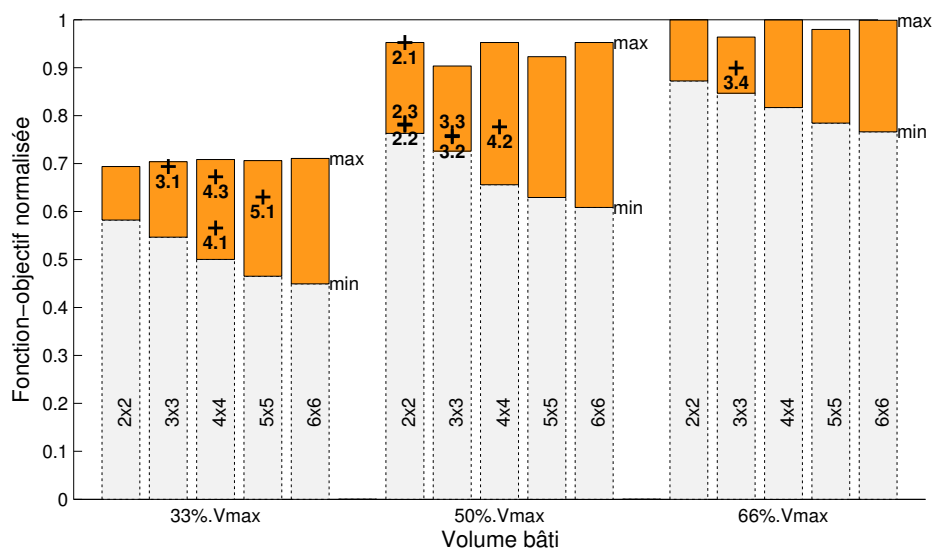


FIGURE 3.25: Minima et maxima de la fonction objectif rapportée au nombre d'emplacements trouvés en fonction de la densité et de la taille de la cellule, et évaluation de la typologie de cellules définie manuellement (21 mars/21 septembre, 50°N, ciel clair)

Rayonnement direct par ciel clair au solstice d'été

Le rayonnement solaire d'été a des composantes depuis le nord-est jusqu'au nord-ouest, en passant par le sud, avec des composantes principales à l'est et à l'ouest. Les configurations urbaines optimales qui ont été trouvées afin de permettre de maximiser le rayonnement solaire au solstice d'été sont présentées sur les figures 3.26 et 3.27. Globalement, les meilleures configurations présentent des bâtiments hauts selon l'axe nord-sud. L'axe est-ouest présente une importance moindre ; ainsi, la configuration optimale trouvée pour une cellule de 5x5 à 33 % de volume bâti ne présente pas de bâtiments sur une des rangées nord-sud, ce qui aurait été rédhibitoire pour les dates précédemment étudiées. De la même manière que dans le cas du solstice d'hiver, une direction principale est privilégiée pour l'orientation des bâtiments, mais la contrainte s'arrête là : les bâtiments se répartissent dans les configurations optimales tantôt en rangées, tantôt en diagonales. Cette diversité peut témoigner d'un large ensemble de configurations quasi optimales.

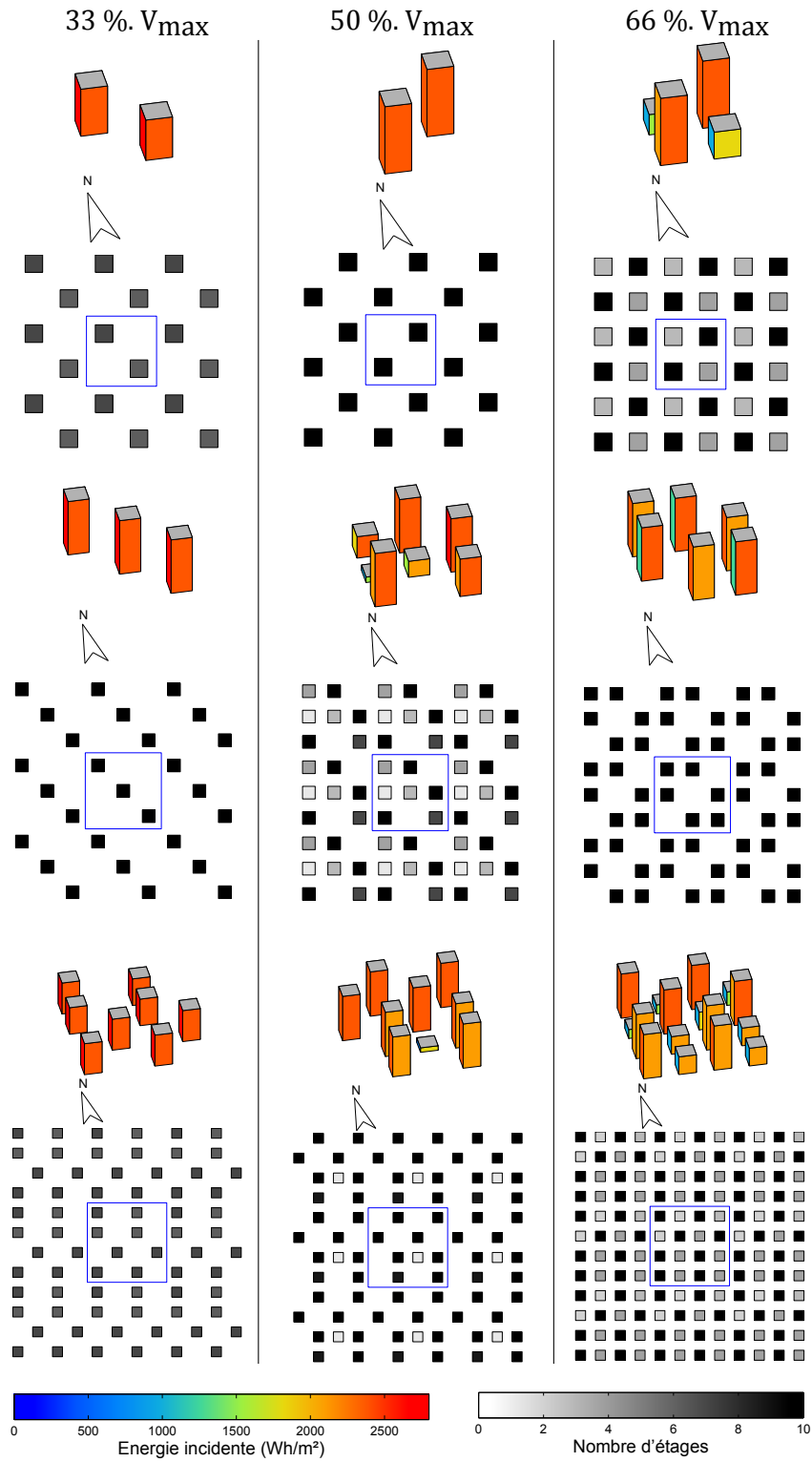


FIGURE 3.26: Formes optimales de cellules 2x2, 3x3 et 4x4 (21 juin, 50°N, ciel clair)

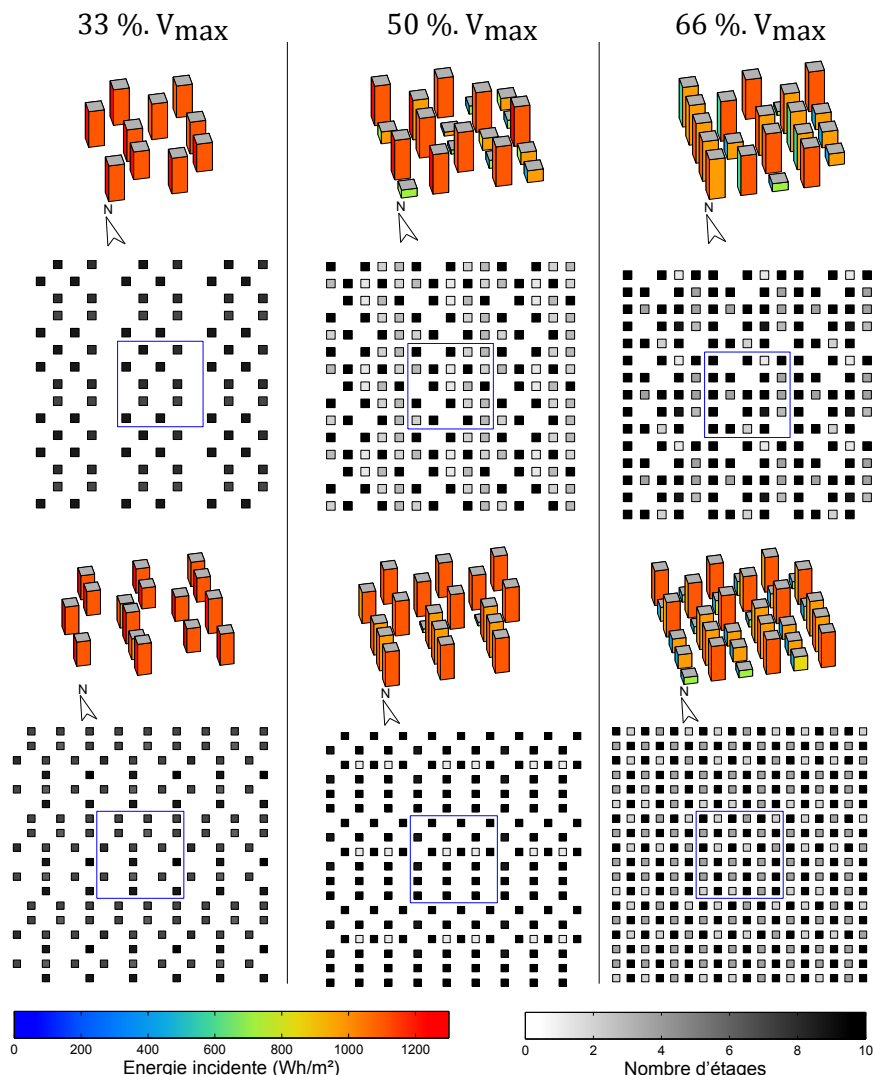


FIGURE 3.27: Formes optimales de cellules 5x5 et 6x6 (21 juin, 50°N, ciel clair)

Résultats sur la typologie : l'analyse des résultats sur la typologie confirme une quasi-équivalence entre les formes de rangées suivant l'axe nord-sud (2.2, 3.3) et les formes en diagonales (2.3, 4.3), présentant toutes deux des bâtiments hauts sur chaque rangée est-ouest. Le comportement est donc pour le solstice d'été inverse à celui du solstice d'hiver dans lequel le critère important était de disposer les bâtiments sur chaque rangée nord-sud.

Effet de la densité : l'importance de la contrainte de volume à bâtir est dans le cadre du rayonnement estival plus importante avec des solutions à faible densité : les solutions optimales sont inférieures à 65 % de l'énergie reçue par le quartier à densité élevée. Dans le cas du solstice d'été, le soleil monte haut dans le ciel, et les ombres que génèrent les bâtiments sont de petite taille. Cela peut être observé sur les meilleures configurations (figure 3.26 et 3.27), dans lesquelles les bâtiments espacés d'un emplacement dans l'orientation est-ouest reçoivent la même énergie moyenne que ceux qui sont davantage espacés. La période d'espacement des bâtiments permettant de recevoir le maximum de rayonnement est dans ce cas de 2, c'est à dire deux fois plus petite que pour le solstice d'hiver. La différence relative entre le moins bon

et le meilleur point est moins importante que dans les cas du solstice d’hiver et des équinoxes, probablement du fait d’une plus grande variété des directions du rayonnement qui assurent un minimum d’énergie quelle que soit la configuration.

Effet de la taille de la cellule : Encore une fois, les valeurs prise par la fonction objectif rapportées au nombre d’emplacements (voir figure 3.28) ne permettent pas de distinguer des tailles de cellules plus intéressantes que d’autres. En revanche, l’énergie par emplacement du moins bon individu est relativement constante avec la taille de la cellule alors qu’elle diminuait pour les études au solstice d’hiver et aux équinoxes.

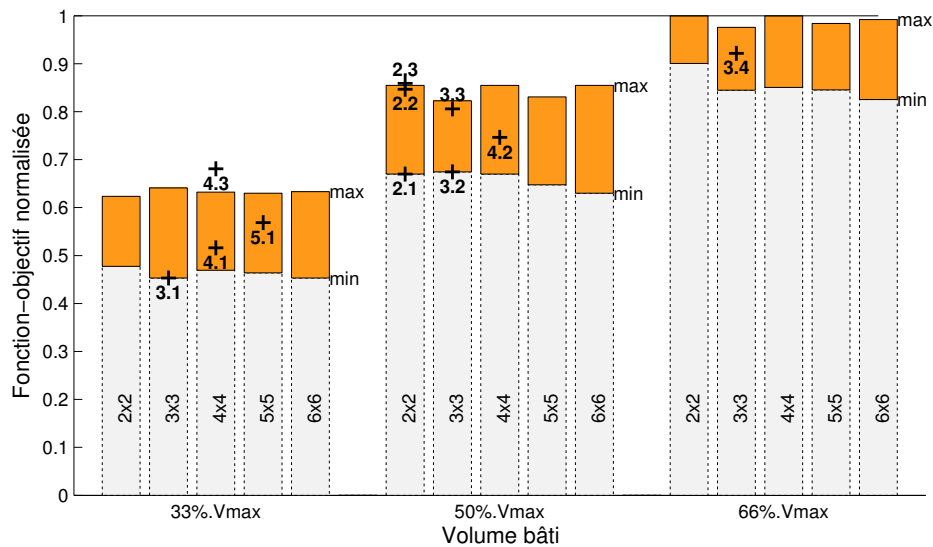


FIGURE 3.28: Minima et maxima de la fonction objectif rapportée au nombre d’emplacements trouvés en fonction de la densité et de la taille de la cellule, et évaluation de la typologie de cellules définie manuellement (21 juin, 50°N, ciel clair)

Certaines configurations urbaines de la typologie présentent de mauvais résultats quelle que soit la date considérée. La forme de pyramide (4.1), en particulier, n’obtient jamais une bonne évaluation, ce qui peut être expliqué par le manque de surface forte dans une des directions de cette configuration, que ce soit selon l’axe est-ouest pour l’optimisation au solstice d’hiver et aux équinoxes, ou nord-sud pour le solstice d’été.

3.6 Synthèse des résultats

Les résultats présentés dans ce chapitre suivent une logique permettant d’illustrer quelques comportements du quartier par rapport au rayonnement solaire. En milieu dégagé, que ce soit sur des grilles rectangulaires ou hexagonales, la répartition des bâtiments permettant de maximiser l’énergie à l’échelle du quartier dépend fortement des directions du rayonnement solaire. Les bâtiments vont dès lors chercher le rayonnement le plus loin possible hors du quartier, à

commencer par les directions principales du rayonnement. Ceci explique que, lorsque le rayonnement est réparti sur l'ensemble de la voûte céleste en prenant en compte sa composante diffuse, la forme de cour devient intéressante.

Cet effet au bord des quartiers en milieu dégagé est une forte limitation de ces cas d'étude. Dans un second temps, une grille de bâtiments pouvant être déplacés, déformés, tournés dans un contexte urbain fixe a été définie. Cette étude a mis en avant une prédominance des paramètres de hauteur et de déplacement des bâtiments dans le cadre de l'optimisation du potentiel solaire, ces paramètres influençant plus directement la répartition du volume bâti. Il a cependant été noté une influence variée des différents types de paramètres en fonction de la latitude considérée, et donc de la géométrie du rayonnement solaire direct. Le contexte fixe étant constitué dans ce cas d'étude de bâtiments de hauteur médiane, les quartiers optimaux présentent, de la même manière que dans les études en milieu dégagé, des bâtiments de hauteur maximale sur la rangée nord de la grille, en réponse à un rayonnement venant du sud. Le choix arbitraire de la hauteur des bâtiments du contexte fixe ne permet donc pas d'observer un impact fort de celui-ci (des bâtiments du contexte plus hauts auraient été tout aussi contestables).

L'optimisation de cellules urbaines a ensuite été mise en place pour obtenir un contexte urbain qui soit consistant avec la géométrie du quartier à optimiser. La représentation en cellule présuppose la régularité du tissu urbain à différentes échelles (en fonction de la taille de la cellule). Dans ce cas encore, la relation entre géométrie du rayonnement et géométrie urbaine optimale peut être identifiée *a posteriori*. Il est par exemple intéressant de constater que le résultat d'optimisation en milieu dégagé qui donnait pour le solstice d'hiver des rangées de bâtiments de hauteur maximale devient, dans le cadre de l'étude sur les cellules, un arrangement de bâtiments moins régulier, pour lequel la seule condition d'optimalité semble être que, sur chaque rangée de bâtiments suivant l'axe nord sud, au moins un bâtiment de hauteur maximale soit présent. C'est finalement pour les équinoxes que la forme en rangées apparaîtra plus clairement. Entre quartiers en milieu dégagé et représentation en cellules, cette analyse combinée des résultats permet d'avancer le plus grand intérêt que présente la seconde possibilité, du fait de la plus grande variété de configurations optimales obtenue.

Du point de vue de la thermique du bâtiment, le rayonnement solaire ne représente qu'une partie de la physique en jeu. Le bilan énergétique du quartier, reposant sur une estimation des besoins des bâtiments à partir de leurs caractéristiques permet de définir un objectif évident : réduire les consommations énergétiques. Dans le chapitre suivant, un travail d'optimisation sur cette base, utilisant le programme de simulation thermique à l'échelle de la ville CitySim (Robinson et al., 2009) est décrit.

Chapitre 4

Optimisation des performances énergétiques d'un îlot urbain avec CitySim

Le rayonnement solaire entre dans le bilan thermique comme un des apports d'énergie pour le bâtiment. La forme des bâtiments et leur disposition dans un ensemble urbain peuvent également intervenir sur d'autres aspects du bilan thermique. La surface de l'enveloppe thermique du bâtiment, un des premiers postes de déperdition d'énergie, dépend par exemple de la compacité du bâtiment et de ses mitoyennetés avec les bâtiments alentour. Dans le chapitre 3, les bâtiments étaient séparés les uns des autres, évitant ces effets. Dans le présent chapitre, un cas d'optimisation de la forme d'un îlot urbain est présenté. Celui-ci est décomposé en plusieurs bâtiments mitoyens. Dans ce cas, il semble plus pertinent de prendre en compte le bilan thermique complet pour chercher l'équilibre optimal entre déperditions et apports. Le cas d'étude utilisé dans ce chapitre repose sur la géométrie d'un îlot situé à Paris. La fonction objectif à minimiser concerne les besoins d'énergie pour le chauffage et est calculée avec le logiciel CitySim.

Dans un premier temps, le problème d'optimisation est posé, puis la méthodologie mise en œuvre est décrite : cas d'étude géométrique, outil de simulation et algorithme d'optimisation. Ensuite, sont présentés quelques résultats d'optimisation avec des paramètres liés aux hauteurs de bâtiments, puis aux hauteurs combinées aux fractions de façade vitrées. L'analyse met l'accent sur la caractérisation d'un ensemble de valeurs associées à chaque variable, qui permettrait de construire des quartiers performants tout en laissant de la liberté à l'aménageur ou à l'architecte. La comparaison de l'influence des différents types de paramètres est également commentée.

Les travaux présentés dans ce chapitre, ont été réalisés dans le cadre d'un stage de deux mois à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) effectué durant la thèse. Les résultats ont fait l'objet d'une présentation à l'occasion du congrès CISBAT2013 ([Vermeulen et al., 2013](#)).

4.1 Problème d'optimisation

L'objectif de ce travail est de réaliser un cas d'optimisation d'un îlot urbain basé sur un quartier réel, afin de minimiser ses besoins en énergie pour le chauffage.

Un quartier de Paris a été choisi comme cas d'étude : le front de parc de Bercy, situé dans le 12^{ème} arrondissement, au sud-est de la ville. Ce quartier a été conçu et construit sur la période 1988-2005, sur le site d'anciens entrepôts de vins. Il est composé d'îlots de bâtiments d'habitation de huit niveaux formant des cours. La zone est bordée au sud-ouest par le parc de Bercy. Bien que les îlots aient été dessinés par des architectes différents, des règles de cohérence ont été imposées par l'architecte responsable de l'aménagement de la zone, Jean-Pierre Buffi. Parmi ces règles, la façade des îlots faisant face au parc devait être composée de deux plots indépendants, reliés entre eux et au reste de l'îlot par des passerelles (voir sur la figure 4.1). Par cette règle, l'accès à la lumière naturelle (et à la visibilité du parc) a été prise en compte dans la conception originale. Puisque l'exposition au soleil (et indirectement la lumière naturelle) joue un rôle certain dans les formes optimales, les îlots optimaux pourront être comparés à l'intuition de l'architecte.

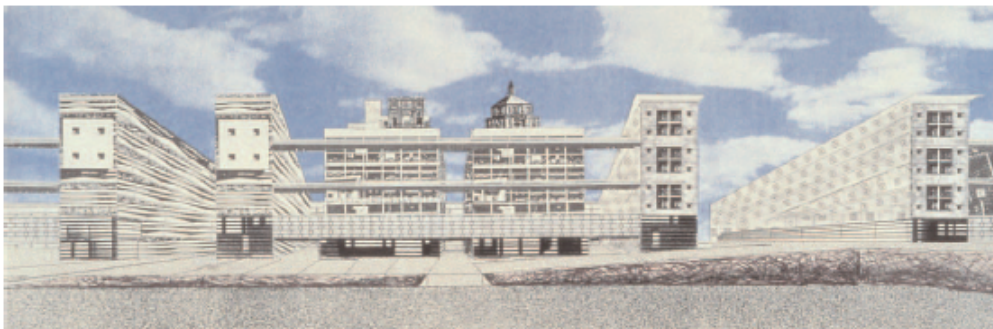


FIGURE 4.1: Représentation de la façade des îlots faisant face au parc (Atelier Buffi, tiré de ([Atelier Parisien d'Urbanisme, 2003](#)))

Pour cette étude, un seul îlot est considéré, ainsi que les bâtiments environnants. L'îlot est simplifié en un ensemble de 14 bâtiments de surface au sol identique (voir figure 4.2, a). Dans le cadre du travail d'optimisation, on considère que les ouvertures de l'îlot sur le parc de Bercy peuvent être comblées. On considère ainsi une décomposition de l'îlot en 16 bâtiments d'empreinte au sol identique (voir figure 4.2, b). Les arbres, balcons et passerelles présents dans le quartier construit ne sont pas pris en compte dans la modélisation, bien qu'ils puissent avoir une influence significative sur l'exposition au rayonnement solaire.

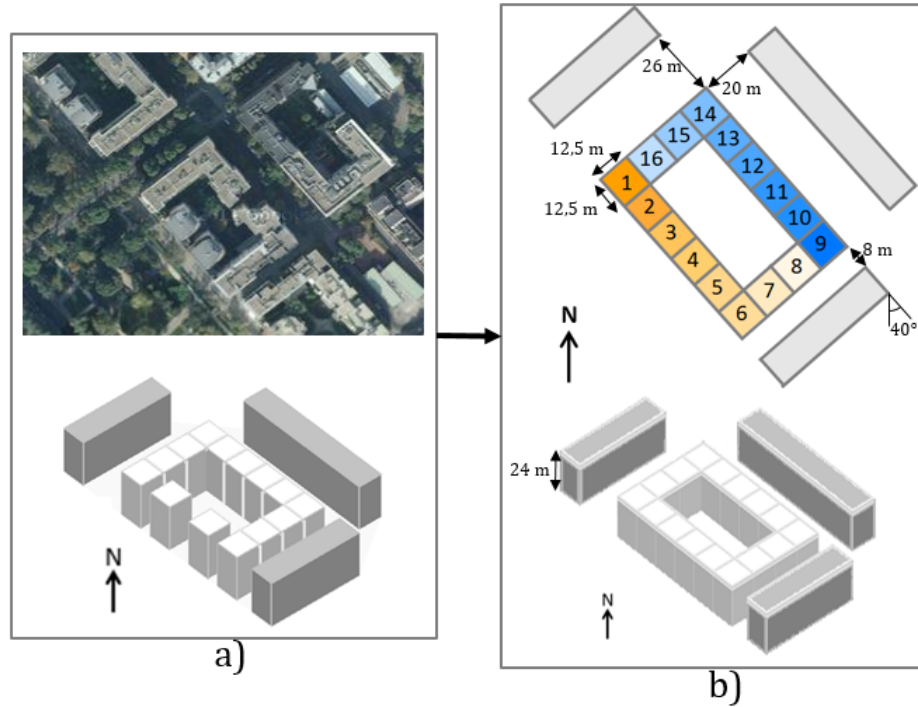


FIGURE 4.2: Définition du cas d'étude. a) vue du quartier réel et représentation géométrique simplifiée, b) décomposition de l'îlot en 16 bâtiments élémentaires

Les hauteurs des 16 bâtiments constituent les paramètres du modèle, représentés par des variables continues h_1, h_2, \dots, h_n . Le vecteur \vec{x} des variables d'optimisation peut être écrit :

$$\vec{x} = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$$

Le problème d'optimisation est séparé en deux étapes. Dans un premier temps, seules les hauteurs des bâtiments sont considérées comme variables. Puis, dans un second temps, quatre paramètres : $r_{SW}, r_{SE}, r_{NE}, r_{NW}$ correspondant au ratio de surface de mur par rapport à la surface de façade pour chacune des quatre orientations de façade sur l'îlot, sont ajoutés aux variables d'optimisation. Tous les murs, même les dépassements au niveau des mitoyennetés, sont concernés.

Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) de la ville de Paris fixe la hauteur maximale autorisée pour la construction. Au droit de l'îlot étudié, la hauteur plafond est de 31 m. En accord avec le règlement, et afin de ne travailler qu'avec des étages de 3 m, chaque variable de hauteur est bornée par :

$$3 \leq h_i \leq 30, \quad i = 1, \dots, 16$$

On souhaite également avoir un volume peu variable entre le cas d'optimisation et la réalité. La hauteur de l'îlot construit est estimée à 24 m pour 8 niveaux. On considère que le volume à bâtir correspond au volume de l'îlot simplifié présenté sur la figure 4.2, autour duquel un intervalle

de manœuvre d'environ $\pm 5\%$ est laissé. La contrainte sur le volume à bâtir s'exprime ainsi par :

$$\sum_{i=1}^{16} A_i \cdot h_i = V_{réel} \pm 5\%$$

où $V_{réel}$ correspond au volume de l'îlot dans le quartier réel, et A_i représente l'aire au sol de chaque bâtiment de l'îlot. Cette aire étant constante sur l'ensemble de la géométrie, cette contrainte est simplifiée par l'expression suivante :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{16} h_i - 320 \leq 0 \\ 350 - \sum_{i=1}^{16} h_i \leq 0 \end{cases}$$

Dans le cas de l'optimisation portant à la fois sur les hauteurs et sur les fractions vitrées, ces dernières sont bornées de manière à garantir que les façades ne soient ni totalement vitrées, ni privées de fenêtres :

$$0,2 \leq r \leq 0,8 \quad r \in \{r_{SW}, r_{SE}, r_{NE}, r_{NW}\}$$

Le climat parisien consiste en une période de chauffage importante et peu de jours de surchauffe potentielle. De ce fait, la fonction objectif à minimiser qui a été prise en compte se limite aux besoins de chauffage. Le problème d'optimisation se pose ainsi :

$$\min_{x \in X} J(x), \quad J(x) = B_{chauffage} \quad (4.1)$$

Dans cette fonction n'entrent en compte que les bâtiments de l'îlot optimisé. Les premiers essais d'optimisation prenaient également les trois bâtiments de la frontière en compte dans le calcul, mais ceux-ci ont été retirés une fois observé que les besoins en chauffage de ceux-ci ne varient pas avec les variables d'optimisation considérées. Ceci est dû à l'éloignement des bâtiments au nord-est et nord-ouest sur lesquels l'îlot optimisé est susceptible d'avoir de l'influence. Le bâtiment au sud-est est plus proche de l'îlot optimisé, mais sa position lui donne un rôle de masque pour l'îlot sans être lui-même impacté par ce dernier.

Les besoins en climatisation et l'accès à la lumière naturelle, qui ne sont pas considérés dans ce travail, pourraient faire l'objet d'études supplémentaires, notamment en prenant des conditions de calcul compatibles avec la réglementation thermique de 2012 qui porte une attention forte au confort d'été.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Conditions de simulation des besoins de chauffage

Les caractéristiques des bâtiments sont définies en accord avec la Réglementation Thermique française de 2005 (RT2005). Pour les différentes parties de l'enveloppe thermique du bâtiment

(murs, toiture, plancher bas), la réglementation prévoit une valeur maximale pour le coefficient de transmission thermique U , ou garde-fou, qui ne doit pas être dépassée pour chacun des postes, ainsi qu'une valeur de référence U_{ref} utilisée pour le calcul des consommations de référence. Dans le calcul réglementaire, les valeurs de coefficients de transmission doivent être inférieures aux garde-fous, et la consommation globale inférieure à la consommation de référence. Dans le cadre de ce travail, les valeurs de référence de la réglementation thermique sont considérées.

Les caractéristiques des surfaces sont décrites dans le tableau 4.1

TABLEAU 4.1: Caractéristiques des surfaces

Composante	Paramètre	Unité	Valeur
Façades	Coef de transmission (U) murs	W/(m ² .K)	0,36
	Réflectance solaire	—	0,4
	Fraction de façade vitrée	—	0,25
	Coef de transmission (U) vitrage	W/(m ² .K)	1,8
	Transmittance du vitrage	—	0,7
Planchers	Coef de transmission (U)	W/(m ² .K)	0,27
Toits plats	Coef de transmission (U)	W/(m ² .K)	0,27
	Réflectance solaire	—	0,2
Sol	Réflectance solaire	—	0,2

L'air est renouvelé du fait de la ventilation et des infiltrations avec un coefficient de 0,4 volume/h. Les ponts thermiques ne sont pas pris en compte dans le calcul, ce qui induit une sous-estimation des besoins de chauffage. Cependant, les pertes correspondantes sont supposées relativement constantes avec les paramètres géométriques considérés dans ce travail (modification des hauteurs), et ne devraient ainsi pas influencer significativement le classement des configurations durant le processus d'optimisation.

Les bâtiments sont considérés comme non occupés, aussi les apports internes dus aux habitants ne sont pas pris en compte. Ce choix est motivé par le besoin d'évaluer les besoins de chauffage dans les pires conditions.

Les besoins de chauffage ont été évalués avec CitySim, un logiciel de calcul dynamique des consommations énergétiques de bâtiments à l'échelle du quartier et de la ville (Robinson et al., 2009; Kämpf, 2009). Successeur de SunTool (Robinson et al., 2003), il a été initié dans le cadre du laboratoire LESO-PB de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

4.2.2 Contenu de la simulation avec CitySim

CitySim utilise en entrées une description de la géométrie et des caractéristiques de la scène urbaine au format XML et un fichier contenant les données météorologiques. La simulation dans CitySim comprend un bilan radiatif sur la scène urbaine en ondes courtes et en ondes

longues, des modèles permettant de représenter le comportement des usagers (présence, utilisation de matériel électrique, ouverture des fenêtres, gestion des stores), une modélisation de systèmes techniques (chauffage, climatisation, lumière) ainsi qu'un modèle thermique qui évalue les échanges de chaleur par conduction et convection et inclut les points précédents pour calculer dynamiquement la température à l'intérieur des bâtiments. La différence entre la température de l'air à l'intérieur des bâtiments, calculée par le modèle thermique, et la température de consigne (minimum et maximum) définit un besoin en chauffage et en refroidissement. A partir de ce besoin, une modélisation de systèmes techniques de chauffage ou de climatisation permet de passer à la consommation en énergie combustible ou électrique. Ces composantes sont décrites plus en précision dans les sections suivantes.

Les informations nécessaires aux calculs sont structurées hiérarchiquement dans CitySim depuis la scène urbaine jusqu'aux surfaces, avec des caractéristiques propres à chaque niveau géométrique (figure 4.3). Les faces décrites dans le fichier XML (*Wall, Roof, ...*) sont directement utilisées dans le modèle radiatif. Il n'y a donc pas de remaillage de la scène urbaine. En plus de la géométrie urbaine, des masques lointains peuvent être définis par des angles d'obstruction verticaux variables avec l'azimut.

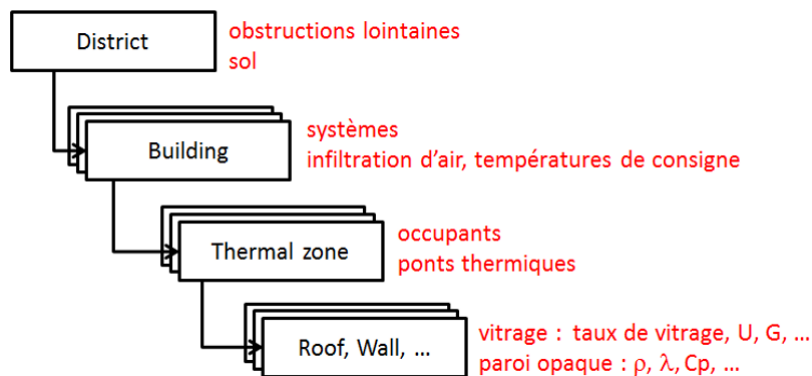


FIGURE 4.3: Structure de la géométrie urbaine et des paramètres associés dans CitySim

4.2.2.1 Échanges radiatifs

Le bilan radiatif à l'échelle urbaine effectué par CitySim comprend le rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi dans les courtes longueurs d'ondes; et les échanges entre surfaces et avec le ciel et le sol dans les grandes longueurs d'ondes. Les flux radiatifs calculés participent dans un second temps aux bilans thermiques des bâtiments. Le bilan radiatif utilise en entrées les données météorologiques de rayonnement direct normal et diffus horizontal telles que peut le fournir un logiciel comme Meteonorm¹.

1. <http://meteonorm.com/>

Visibilité du soleil

La position du soleil est calculée pour chaque heure. L'élimination des parties cachées permettant de distinguer les surfaces ensoleillées de celles à l'ombre est effectuée en calculant une image correspondant à une projection parallèle dans la direction des rayons du soleil. Cette image est discrétisée en un certain nombre de pixels. Tous les pixels constituant cette image portent le même flux radiatif et sont associés par des tests d'intersections aux faces de la scène urbaine. Cette méthode est proche de celle décrite dans la partie 2.2.2.2 puisqu'elle ne nécessite pas de mailler la scène urbaine. Bien que la manière d'attribuer le rayonnement solaire aux surfaces soit différente, toutes deux garantissent que la quantité exacte du flux solaire reçu par le quartier soit bien retrouvée en additionnant le flux reçu par chaque surface.

L'énergie est supposée constante sur chaque face. Ainsi, une surface à moitié à l'ombre aura sur toute sa surface une irradiance égale à la moitié de ce que sa part éclairée reçoit réellement.

Visibilité du ciel et de la scène urbaine

La détermination de la visibilité du ciel et des obstructions depuis chaque face de la scène urbaine est un calcul géométrique indépendant de l'intégration dans le temps, et est donc réalisé en pré-calcul.

Ce calcul fonctionne différemment de la méthode de calcul de visibilité du ciel décrite dans le chapitre 2, dans laquelle on calcule la visibilité des surface depuis le ciel, ce qui ne permet pas de calculer les inter-visibilités entre surfaces. Dans CitySim, la visibilité de la scène urbaine et du ciel est calculée depuis l'isobarycentre de chaque face de la géométrie. Celle-ci est ensuite considérée constante sur la face.

Pour les besoins du calcul, une sphère englobant la scène urbaine est divisée en 290 tuiles (deux hémisphères de 145 mailles suivant la répartition de [Tregenza \(2004\)](#)) et chaque tuile de ce ciel est découpée en 100 éléments pour un calcul plus précis ([Robinson et Stone, 2004](#)). Chaque face de la scène urbaine est associée à une couleur sur l'échelle RGB (maximum 256^3-1 possibilités, une couleur étant associée au ciel).

Au niveau de chaque point de calcul (isobarycentre de chaque face), une image de l'hémisphère visible est calculée. Chaque pixel de cette image est transformé en coordonnées angulaires, afin de pouvoir identifier à quelle tuile de la sphère englobante il est associé. La couleur du pixel permet de déterminer si le ciel ou une face de la scène est visible dans cette direction ([Robinson, 2007](#)). Pour chaque tuile de la sphère englobante, le calcul permet de déterminer la fraction α correspondant au ciel (pour les 145 tuiles de l'hémisphère supérieur) et une fraction $\sigma = 1 - \alpha$ associée à l'obstruction principale sur la tuile, s'il y en a au moins une.

Rayonnement diffus

L'irradiance diffuse sur une face due au rayonnement de la voûte céleste est donnée par (Robinson et Stone, 2004) :

$$I_d = \sum_{i=1}^{145} R_i \omega_i \alpha_i \cos(\zeta_i) \quad (4.2)$$

où R_i est la radiance de la tuile de ciel i d'angle solide ω_i , et ζ_i est l'angle d'incidence moyen entre la tuile du ciel et la surface réceptrice.

Radiosité

Les réflexions entre les surfaces de la scène ainsi qu'avec le sol sont calculées par la méthode « *Simplified Radiosity Algorithm* » (SRA) (Robinson et Stone, 2004, 2005; Robinson, 2007). Cette méthode, basée sur la méthode de la radiosité, suppose les surfaces Lambertiennes (réflexions diffuses seulement). La radiosité des obstructions lointaines est considérée égale à celle du sol en milieu dégagé.

La radiance d'une face avec prise en compte des réflexions est donnée par (Robinson et Stone, 2005) :

$$R = \left(I_{b\zeta} + \sum_{i=1}^{145} (R \omega \alpha \cos(\zeta))_i + \sum_{j=1}^{290} (R^* \omega \sigma \cos(\zeta))_j \right) \rho / \pi \quad (4.3)$$

où ρ correspond au coefficient de réflexion de la surface pour laquelle la radiance est calculée et R_j^* représente la radiance de la face constituant l'obstruction principale de la tuile j . La formule 4.3 permet d'exprimer les réflexions infinies entre surfaces et prend la forme d'un système linéaire de type $A.R=b$, où A est une matrice $n \times n$ avec n le nombre de faces de la scène urbaine. Ce système peut être résolu de manière itérative ou en utilisant une décomposition en une somme infinie (série de Neumann). La seconde méthode est utilisée dans le cadre de CitySim, en considérant par défaut les deux premiers termes de la série, ce qui équivaut à deux inter-réflexions. Pour le calcul des échanges radiatifs sur la scène urbaine, la taille des éléments de faces joue un rôle important, puisque la radiosité est considérée constante sur chaque surface dans le calcul des réflexions. Pour notre cas d'étude de l'îlot de Bercy, une étude de sensibilité a été réalisée afin de calculer la différence au niveau du bilan radiatif et des besoins de chauffage entre un cas où les faces correspondent aux façades, et un cas où elles correspondent aux étages des bâtiments (subdivision des façades). La différence entre les deux cas est au maximum de l'ordre de 10 % en ce qui concerne l'énergie radiative en surface. Cependant, cette différence est davantage présente durant les mois estivaux, si bien que les besoins de chauffage ne sont quasiment pas impactés par le fait d'avoir de grandes surfaces. Les besoins d'énergie pour le refroidissement n'étant pas considérés dans la fonction objectif, les surfaces sont par la suite considérées comme étant de la taille des façades afin de limiter le temps de calcul.

Rayonnement infrarouge

La visibilité du ciel et des surfaces calculée pour les réflexions est utilisée pour les échanges

infrarouges. Les températures des surfaces sont déterminées par le modèle thermique décrit plus bas et une température de rayonnement infrarouge est donnée au ciel, considéré isotrope, en fonction de la nébulosité et de la température du point de rosée (Robinson et Stone, 2005).

Lumière naturelle

La lumière naturelle peut être calculée à l'intérieur d'une pièce type. Le calcul des réflexions est alors séparé en une étape à l'extérieur, qui permet de définir la source de rayonnement à l'intérieur, puis en un calcul des réflexions à l'intérieur de la pièce (Robinson et Stone, 2006). Cette fonctionnalité n'est pas utilisée dans les simulations effectuées durant cette thèse.

4.2.2.2 Modèles d'occupation

Plusieurs aspects liés à l'occupation des bâtiments sont pris en compte par différents modèles :

- la présence : des profils horaires de présence des occupants peuvent être définis, chaque occupant étant alors associé par défaut à une production d'énergie interne de 90 W (Kämpf, 2009) ;
- l'ouverture des fenêtres ;
- l'ouverture/fermeture des stores.

Ces modèles sont décrits dans Kämpf (2009). Il ne sont pas utilisés dans les études d'optimisation présentées dans ce chapitre, pour lesquelles on considèrera les bâtiments vides.

4.2.2.3 Modèle thermique

CitySim calcule dynamiquement la température du volume intérieur des bâtiments. Les échanges de flux sont évalués par un modèle nodal pouvant être représenté, par analogie, par un circuit électrique dans lequel les résistances thermiques correspondent à des résistances électriques et les effets inertiels à des capacités (Kämpf et Robinson, 2007; Kämpf, 2009). Le bilan thermique est appliqué à chaque zone thermique dans laquelle la température T_a du volume intérieur est supposée uniforme. Le modèle considère cinq nœuds associés à des températures, dont deux, liés à des capacités (intérieur du mur, et volume intérieur de la zone), sont les inconnues d'un système différentiel (Kämpf, 2009). Le schéma du modèle nodal est présenté sur la figure 4.4.

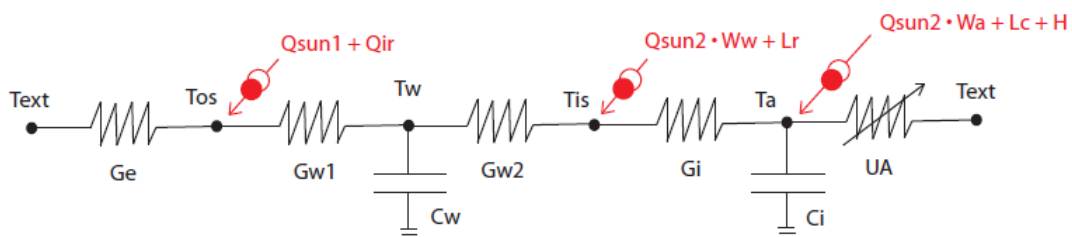


FIGURE 4.4: Modèle thermique nodal utilisé dans CitySim. Source : (Kämpf, 2009)

Pour une description complète du modèle et de sa résolution, le lecteur pourra se référer aux articles le décrivant (Kämpf et Robinson, 2007; Kämpf, 2009). On en souligne ici quelques caractéristiques :

- La température extérieure T_{ext} est une entrée du modèle, qui provient des données météorologiques ;
- Les capacités thermiques de toutes les parois opaques en contact avec l'extérieur sont additionnées dans la capacité C_w (J/K). De la même manière, les conductances (W/K) associées aux parois (G_{w1} et G_{w2}) et aux interfaces avec l'air extérieur (G_e) et intérieur (G_i) sont agrégées.
- Les déperditions par les fenêtres et par le renouvellement d'air par ventilation et infiltration sont assimilées à une conductance UA (W/K). L'ouverture des fenêtres par les occupants augmente sa valeur.
- Le calcul du rayonnement en ondes courtes est instantané, il est considéré comme une entrée au modèle. Une partie de ce rayonnement est absorbée par la surface extérieure des parois opaques (Q_{sun1}), le reste (Q_{sun2}) est transmis à l'intérieur du local par les fenêtres et est réparti sur le nœud des surfaces intérieures (fraction W_w) et le nœud du volume intérieur (fraction W_a). L'action des occupants sur les stores modifie la valeur de Q_{sun2} .
- Les apports en grandes longueurs d'ondes Q_{ir} sont associés au nœud de la surface extérieure des murs, à partir de la température de surface du mur.
- Les apports internes dus aux occupants et à leur utilisation de matériel électrique sont répartis entre le nœud du volume intérieur (part convective des apports, L_C) et le nœud des surfaces intérieures des parois opaques (part radiative des apports, L_r).

4.2.3 Méthode d'optimisation

La méthode d'optimisation numérique utilisée pour résoudre ce problème a été développée par Kämpf (2009) dans le cadre de travaux sur l'optimisation de formes urbaines. Il s'agit d'un algorithme évolutionnaire hybride, alternant entre un algorithme du type « *Covariance Matrix Adaptation - Evolution Strategy* » (CMA-ES) (Hansen et Ostermeier, 2001), et un autre du type « *Hybrid Differential Algorithm* » (HDE), dérivé de la famille des algorithmes à évolution différentielle (Storn et Price, 1996). Puisque les problèmes posés par l'optimisation à l'échelle urbaine ne sont pas bien connus (dépendance des variables, nombre d'optima), cet algorithme permet de combiner la robustesse du HDE dans la recherche de l'optimum global et la rapidité de convergence du CMA-ES (Kämpf, 2009).

Dans la pratique, l'algorithme d'optimisation génère les vecteurs de paramètres qui sont utilisés pour produire un fichier XML, qui sert d'entrée au logiciel CitySim. Les résultats de CitySim (besoins de chauffage par bâtiment) sont ensuite agrégés en une valeur, constituant l'évaluation de la fonction objectif. L'organisation de l'optimisation est résumée sur la figure 4.5.

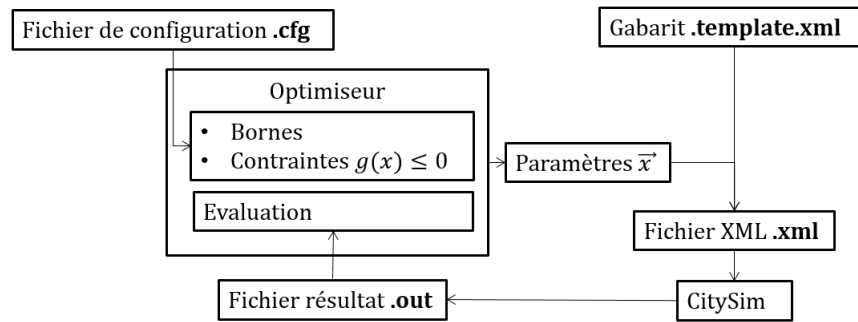


FIGURE 4.5: Organigramme du processus d'optimisation

4.3 Résultats et analyses

Les résultats se focalisent sur plusieurs jeux de paramètres. Dans un premier temps, les paramètres sont purement géométriques, puis les fractions vitrées sont introduites. Enfin, l'optimisation des fractions vitrées seules est effectuée pour différentes géométries de l'îlot, afin de commenter l'influence de cette géométrie sur les fractions vitrées optimales.

4.3.1 Optimisation avec les hauteurs seules

Dans une première étape, seules les hauteurs de bâtiments sont considérées comme variables d'optimisation. Environ 5000 évaluations de la fonction objectif sont réalisées durant le processus d'optimisation.

La meilleure configuration obtenue est présentée sur la figure 4.6. Les besoins de chauffage de celle-ci sont inférieurs de 16,5 % à ceux de la moins bonne configuration repérée dans le processus d'optimisation, et de 12 % à ceux de la configuration originale simplifiée (figure 4.2, a).

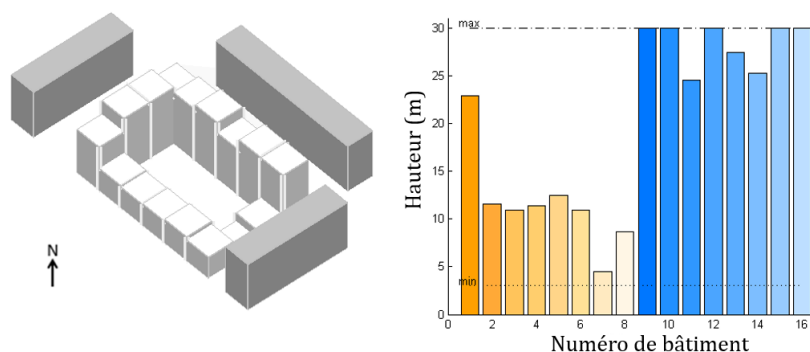


FIGURE 4.6: Meilleure configuration trouvée (variables : hauteurs des bâtiments)

Sur la configuration optimale, on peut remarquer une tendance du quartier à positionner des bâtiments de hauteur maximale sur les côtés nord-est et nord-ouest de l'îlot, tandis que des

bâtiments plus bas (de l'ordre de 10 m de haut) sont placés au sud. Les hauteurs des bâtiments ne présentent cependant pas un caractère régulier. En modifiant légèrement la configuration, soit de manière aléatoire, soit de manière à la rendre plus régulière d'apparence, il est possible de construire des configurations qui dégradent peu ou pas la fonction objectif. Deux exemples de telles configurations sont présentés sur la figure 4.7. Les variables d'optimisation considérées dans ce travail étant continues, il a aussi été observé que le fait d'arrondir la hauteur de chaque bâtiment à un multiple de 3 m (étages) ne modifiait pas fortement la fonction objectif.

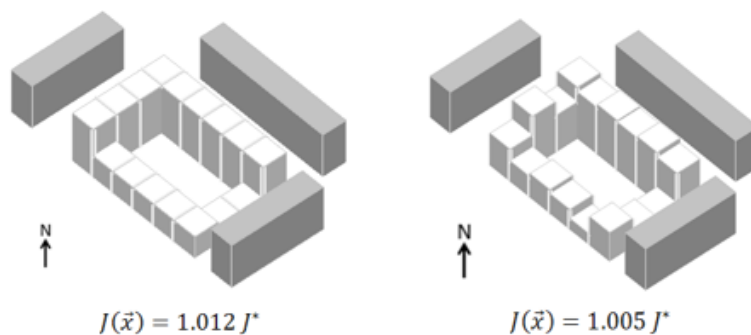


FIGURE 4.7: Solutions quasi optimales (variables : hauteurs des bâtiments)

De manière plus générale, il peut sembler intéressant de s'intéresser à caractériser le sous-ensemble de paramètres retrouvés dans les configurations quasi-optimales. Pour ce faire, un ensemble de bonnes configurations est analysé, utilisant pour cela environ 250 individus, correspondant aux meilleures configurations évaluées durant le processus d'optimisation (soit 5 % de l'ensemble des configurations évaluées). Ces individus ont tous une fonction objectif proche à 2 % près du meilleur individu. Pour chaque paramètre, un intervalle de valeurs semble rassembler un grand nombre des configurations considérées (figure 4.8, a). La valeur moyenne et l'écart-type pour chaque paramètre sont présentés sur la figure 4.8, b. Ce graphique informe du sous-espace de paramètres permettant de construire de bonnes configurations par rapport à la fonction objectif, tout en laissant de la liberté à un éventuel aménageur à l'intérieur de cet espace réduit. Il est cependant nécessaire de noter que cette représentation ne prouve ni qu'il n'y a pas de bonnes configurations ailleurs dans l'espace de paramètres, ni qu'il n'existe pas des "trous" dans le sous-espace de paramètres, c'est à dire des combinaisons *a priori* acceptables de paramètres qui donneraient une mauvaise évaluation.

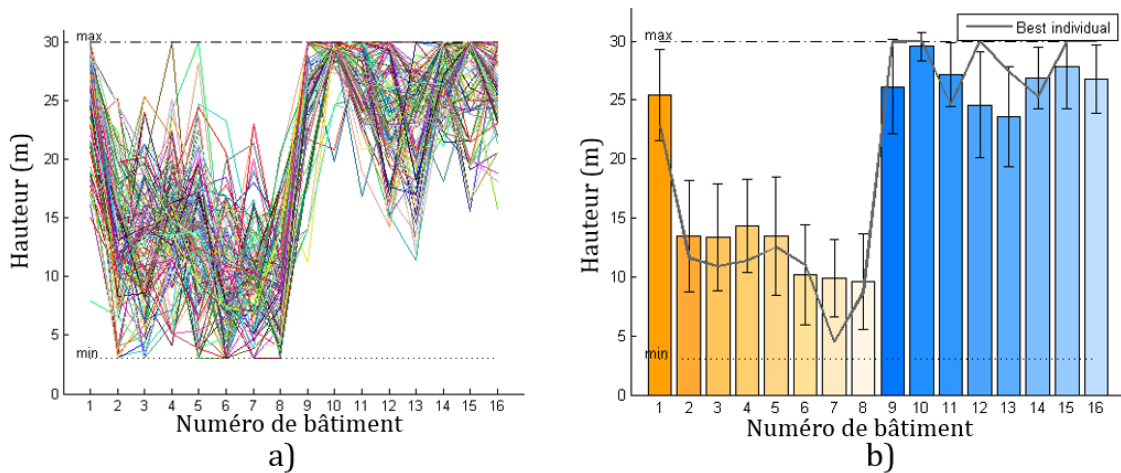


FIGURE 4.8: Analyse des 5 % meilleures configurations. a) variables des individus (une ligne = une configuration), b) valeurs moyennes et écart-type de chaque variable dans le sous-ensemble de bonnes configurations

L'observation du sous-ensemble de bonnes configurations montre enfin que tous ses individus possèdent un volume construit égal au minimum acceptable, c'est à dire au volume de l'îlot original -5 %. Une relation nette, d'apparence linéaire, existe entre le volume total bâti et le besoin de chauffage minimal pour chaque volume de l'îlot (figure 4.9). Cette observation implique qu'une propriété commune aux configurations optimales est d'avoir un volume minimum dans les bornes admises.

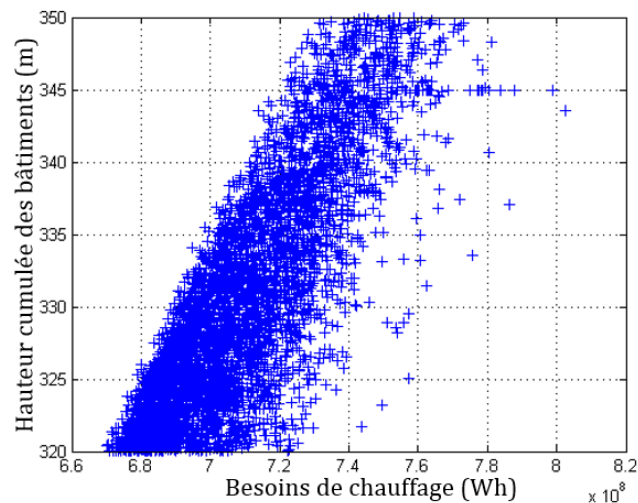


FIGURE 4.9: Relation entre le volume des configurations et les besoins en chauffage. Chaque point représente un quartier évalué durant le processus d'optimisation

4.3.2 Optimisation avec les hauteurs et les fractions de façade vitrées

L'optimisation combinée des hauteurs de bâtiments et des fractions vitrées a également été réalisée sur 5000 évaluations de la fonction objectif. Les valeurs moyennes et les écarts-types des différentes variables, basés sur l'analyse de 5 % des configurations, qui ont eu les meilleures

évaluations par rapport à la fonction objectif, sont présentés sur la figure 4.10. Il apparaît que, sur l'ensemble des individus considérés, l'écart-type des fractions vitrées est faible relativement aux paramètres de hauteur. Pour les murs orientés au nord-est et nord-ouest, et pour ceux du sud obstrués par le contexte urbain (au sud-est), la fraction vitrée optimale correspond à la borne inférieure des paramètres. Les gains solaires parviennent à compenser les déperditions énergétiques accrues au niveau des fenêtres, seulement dans le cas des murs orientés au sud-ouest qui ne sont pas obstrués. Une explication possible pour les valeurs faibles obtenues pour les fractions vitrées est le manque de critères contradictoires, tels que l'accès à la lumière naturelle en intérieur, qui tendrait à augmenter la surface vitrée.

Le meilleur individu dans cette étude combinant hauteurs et fractions vitrées présente des besoins énergétiques 2 % inférieurs à ceux de l'individu optimal pour les hauteurs seules. Cette faible différence peut être expliquée par une fraction vitrée par défaut choisie pour le premier cas d'optimisation proche de la borne inférieure de ces paramètres (0,25). Les hauteurs de bâtiments présentent dans les deux cas d'optimisation des hauteurs similaires, et le meilleur individu entre pour la plupart de ces paramètres dans l'écart-type de l'ensemble des bonnes configurations.

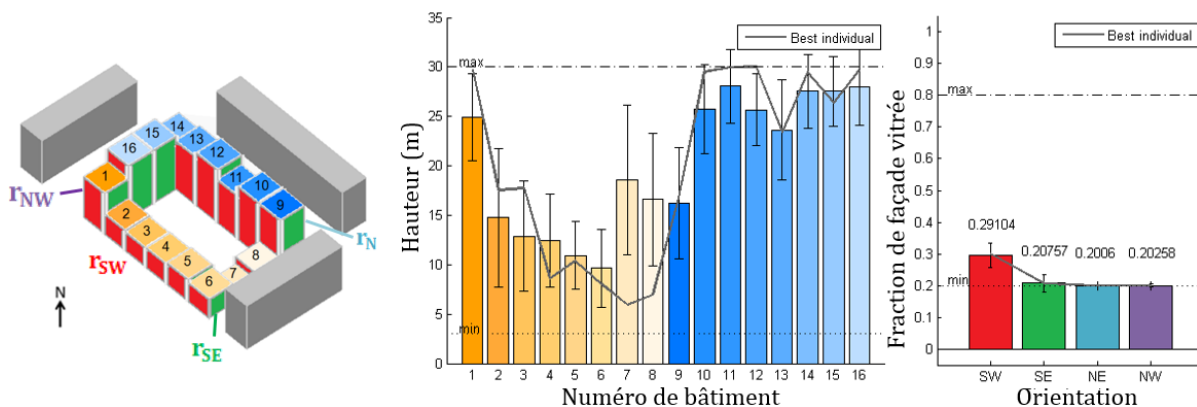


FIGURE 4.10: Analyse des 5 % meilleures configurations (hauteurs et fractions vitrées).
(l'exemple à gauche ne correspond pas à la configuration optimale)

4.3.3 Optimisation avec les fractions vitrées seules

Les combinaisons de hauteurs optimales sont proches, que les fractions vitrées entrent dans les paramètres du modèle ou non. Afin de voir si les fractions vitrées optimales sont ou non liées aux combinaisons de hauteurs, un cas d'optimisation sur ces paramètres seuls a été entrepris.

Pour cela, quatre géométries de l'îlot ont été considérées. Le processus d'optimisation a été réalisé dans des conditions similaires aux cas d'études précédents. L'analyse des résultats se base de la même manière sur un ensemble de bonnes configurations (top 5 %). Les représentations des configurations de hauteurs, et les résultats de l'optimisation (meilleur, moyenne et écart-type) sont représentés sur la figure 4.11.

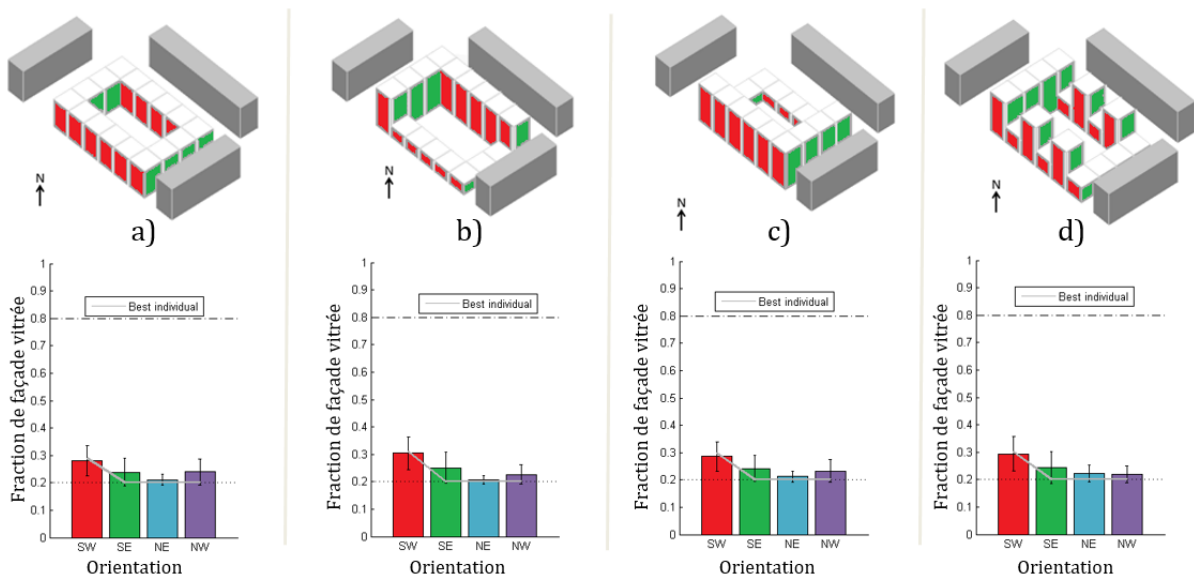


FIGURE 4.11: Valeur moyenne et écart-type des fractions vitrées dans les meilleurs individus (top 5 %), pour quatre configurations géométriques de hauteurs différentes.

Il apparaît que, pour tous les cas géométriques de l'îlot, la combinaison de fractions vitrées pour chaque orientation est quasi identique, avec un ratio à 0,3 pour les parois sud-ouest, et 0,2 (le minimum) pour les trois autres orientations. Le fait que le minimum soit atteint limite l'analyse, car il n'est pas possible de déterminer si, sans ces contraintes, les valeurs optimales auraient été identiques entre les cas d'étude. Les valeurs de moyennes et d'écart-types, par ailleurs, montrent des valeurs proches dans l'ensemble des cas d'étude avec des fractions vitrées plus faibles au nord-est par rapport au sud-est et au nord-ouest (sauf cas d)).

Ces résultats semblent montrer une faible dépendance entre les paramètres de hauteur et les fractions vitrées : quelle que soit la forme de l'îlot, les fractions vitrées se comportent de la même manière. Ce commentaire est une première étape, qui nécessiterait d'autres travaux, pour savoir dans quelle mesure il serait possible de séparer le problème d'optimisation en plusieurs échelles, du quartier à la façade.

4.4 Synthèse des résultats

Dans ce chapitre, un cas d'optimisation de formes urbaines par rapport aux besoins énergétiques pour le chauffage a été relaté. Le cas se base sur un morceau de quartier de Paris. La géométrie d'un îlot a été simplifiée en un ensemble de bâtiments élémentaires dont les hauteurs constituent les variables du problème d'optimisation. Les fractions vitrées des différentes orientations des bâtiments ont ensuite été ajoutées aux variables d'optimisation.

Les résultats ont été analysés en se focalisant sur un ensemble de bonnes configurations. Les résultats du problème d'optimisation montrent qu'un grand nombre de configurations différentes présentent une évaluation des besoins de chauffage similaire. Dès lors, il a été

possible de cerner des sous-ensembles de valeurs pour chaque paramètre qui regroupent les caractéristiques des bonnes configurations. Cette démarche permettrait de laisser davantage de liberté à l'aménageur ou à l'architecte pour choisir les caractéristiques finales de son projet.

Dans le cadre des perspectives de ce travail, plusieurs commentaires peuvent être formulés :

- Le critère d'optimisation ne concerne ici que les besoins de chauffage, et pourrait être enrichi en prenant en compte les besoins de climatisation, et, d'une manière encore à définir, l'accès à la lumière naturelle. Ce dernier critère semble nécessaire lorsque les fractions vitrées font partie des paramètres, de grandes surfaces vitrées étant facilement motivées par le gain de lumière associé, en veillant à éviter les sources d'éblouissement.
- Dans le cadre de cette étude les propriétés des bâtiments ont été fixées en accord avec la réglementation thermique de 2005 afin de s'approcher des pratiques d'usage au moment de la construction du quartier. La reprise de ce cas d'étude avec une réglementation thermique plus récente (par exemple la RT2012), serait intéressante pour comparer les différences de formes optimales causée par un bilan thermique équilibré différemment. En effet, cela permettrait de donner davantage d'importance aux apports solaires, les déperditions par l'enveloppe étant limitées par une isolation performante.
- La géométrie du quartier pourrait être modifiée : prendre en compte des arbres, des bâtiments séparés, etc.

Conclusions et perspectives

Rappel du contexte et problématique

L'évolution actuelle des réglementations thermiques tend vers la construction de bâtiments à faible consommation d'énergie, voire à énergie positive (produisant plus qu'ils ne consomment). Divers engagements de réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre ont vu le jour depuis la fin des années 1990, à l'échelle mondiale, européenne et nationale. Afin de tenir ces engagements et de répondre au fort besoin de logements en France, un nombre important de nouvelles constructions performantes d'un point de vue énergétique devra être mis en place, parallèlement à de grands travaux de rénovation du parc actuel de bâtiments.

L'énergie solaire tient un rôle particulier dans ces nouveaux bâtiments : elle permet en hiver de combler une part non négligeable des besoins de chauffage, tandis qu'il est impératif de s'en protéger l'été. De plus, l'usage de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques en toiture se démocratise. La conception de pavillons en milieu dégagé permettant de prendre au mieux en compte les trajets solaires s'est développée depuis un certain temps déjà, dans le cadre de l'habitat bioclimatique. Mais qu'advient-il des milieux urbains denses ? En effet, ceux-ci seront *a priori* toujours présents au cœur des villes, et seront même susceptibles de prendre une place de plus en plus importante afin de limiter l'étalement urbain. Lorsque la densité bâtie est importante, les bâtiments se masquent le soleil entre eux, réduisent la part du ciel pouvant être vue depuis chaque fenêtre (surtout au rez-de-chaussée), et réfléchissent une part du rayonnement, atteignant ainsi, bien qu'en faible proportion, des façades inaccessibles pour le rayonnement direct (par exemple des façades nord).

L'étude des formes urbaines par rapport au rayonnement solaire est un sujet d'intérêt relativement constant depuis ses débuts au XIX^{ème} siècle dans le cadre des théories hygiénistes. Si l'on s'intéresse alors au rayonnement avant tout pour des raisons de salubrité, les paramètres morphologiques du tissu urbain en jeu tels que l'orientation des façades, la largeur des rues, la forme des bâtiments, sont déjà présents au cœur des préconisations urbaines. Depuis 20 à 30 ans, la recherche de formes urbaines énergétiquement performantes est appuyée par le développement de logiciels de dessins (CAO) et de simulation thermique. L'amélioration constante de ces outils a notamment permis dans la dernière décennie un grand nombre d'études paramétriques,

évaluant et comparant différentes configurations urbaines, la plupart du temps reposant sur des formes type (canyons, cours, blocs).

Par ailleurs, les méthodes d'optimisation, qui permettent de travailler sur un grand nombre de variables simultanément, ont fait leurs débuts dans le cadre de l'amélioration énergétique des bâtiments. Dans un premier temps attachées à des paramètres de dimensionnement de l'enveloppe et des systèmes, elles ont rapidement investi la recherche sur la forme à l'échelle des façades (forme et placement des fenêtres), ou des bâtiments. Cependant, pour l'instant, encore peu d'études se sont intéressées à l'optimisation de formes urbaines.

Dans ce cadre, l'objectif de la présente thèse est de mettre en place une méthode d'optimisation de formes urbaines par rapport au rayonnement solaire. Il sous-tend le développement d'un outil de simulation du rayonnement solaire, l'adaptation d'un algorithme d'optimisation évolutionnaire, et l'implantation d'une méthode de génération de formes urbaines. Le programme créé permet d'explorer de grands ensembles de paramètres afin de ressortir la ou les meilleures configurations urbaines.

Retour sur le travail effectué

Le travail de cette thèse peut être séparé en deux parties, qui correspondent à des approches complémentaires dans l'optimisation de formes urbaines.

Le premier axe d'étude concerne l'optimisation de formes urbaines théoriques par rapport au rayonnement solaire. L'objectif est de pouvoir formuler des règles générales reposant sur une meilleure compréhension des relations entre les formes urbaines et le phénomène physique qu'est le rayonnement solaire. Le programme qui a été créé dans ce cadre comprend :

- Une définition de géométries urbaines paramétrées : chaque bâtiment soit est défini comme une simple pile de blocs élémentaires (un étage par exemple), soit est dérivé de la forme d'un bâtiment initial à laquelle s'appliquent des paramètres de rotation, déformation et déplacement. Dans ce second cas, les bâtiments sont placés sur des parcelles convexes dont ils ne peuvent sortir. L'ensemble des bâtiments optimisés est placé soit en milieu dégagé, soit dans un contexte urbain fixe, soit dans un contexte urbain périodique. Dans ce cas, le quartier optimisé, appelé cellule, est répété dans chaque direction de manière à construire un tissu urbain homogène.
- Un outil de simulation du rayonnement solaire qui permet de calculer le rayonnement direct par ciel clair à l'aide de projections des ombres, les facteurs de vue du ciel, et les rayonnements direct et diffus répartis sur la voûte céleste à partir de données météorologiques.
- Un algorithme d'optimisation évolutionnaire qui a été adapté dans le but d'être efficace dans l'optimisation de quartiers. Une méthode de réparation des quartiers a notamment été développée dans ce cadre afin de s'assurer que le volume corresponde bien à une

valeur prédéfinie et que les bâtiments mobiles ne sortent pas de leur parcelle.

Ce programme a été utilisé pour étudier les meilleures formes urbaines par rapport au potentiel solaire. Dans ce cadre, le potentiel solaire est défini comme l'énergie totale pouvant être récupérée sur le quartier pendant une période de temps, cumulée sur toutes ou une partie des surfaces du quartier. Différents essais d'optimisation ont été lancés pour différents types de quartiers, différentes périodes d'intérêt (période sur laquelle le rayonnement solaire est intégré) et différentes densités bâties.

En milieu dégagé, les résultats ont montré qu'un quartier représenté par une grille rectangulaire ou hexagonale de bâtiments cherchait à récupérer le rayonnement direct dans les directions principales du rayonnement (direction sud le 21 décembre, direction est et ouest le 21 juin). En augmentant la densité bâtie, l'énergie récupérée augmente jusqu'à un maximum qui correspond à l'énergie que récupère l'enveloppe convexe fictive qui engloberait tous les quartiers possibles avec les paramètres considérés. La forme de cour, qui permet de récupérer le rayonnement dans toutes les directions en collant à cette enveloppe, apparaît de ce fait comme une bonne configuration pour la majorité des conditions de rayonnement. Des bâtiments fixes ont ensuite été ajoutés autour du quartier pour représenter un contexte urbain pré-existant. Les essais d'optimisation ont cependant montré que les quartiers optimaux répondent de la même manière que dans le cas d'un quartier en milieu dégagé : des bâtiments hauts se positionnent au nord du quartier pour récupérer le rayonnement venant du sud en hiver, sans se soucier de masquer les bâtiments fixes qui pourtant entrent en compte dans le calcul du potentiel solaire total. Dans ce cas de figure, des paramètres de déplacement, hauteur, rotation et déformation ont été utilisés pour modifier chaque bâtiment. Les deux premiers se sont montrés plus importants que les deux derniers dans leur capacité à améliorer le potentiel solaire. Cependant l'importance des paramètres dépend du cas d'étude et ne peut pas être généralisée à partir de cet unique cadre géométrique. Enfin, la conception en cellules urbaines a été introduite pour représenter un tissu urbain périodique. Les résultats montrent que les variations de densités bâties impliquent des variations de potentiel solaire plus fortes lorsque les trajets solaires sont plus étendus (trajet solaire du solstice d'été par rapport au solstice d'hiver). La taille de la cellule urbaine (nombre de bâtiments constituant l'élément de base du tissu urbain périodique), s'est avérée n'avoir que peu d'influence sur le potentiel solaire maximal par bâtiment quelle que soit la période d'intérêt essayée (solstice d'été, solstice d'hiver ou équinoxes).

Le second axe d'étude se base sur l'optimisation d'un quartier réaliste par rapport aux besoins en énergie pour le chauffage. Pour cela, un îlot simplifiant un morceau de quartier de Paris a été découpé en différents bâtiments dont les hauteurs constituent des variables d'optimisation. Les fractions de façade vitrées des quatre orientations de façades de l'îlot ont ensuite été ajoutées aux variables d'optimisation. Les besoins de chauffage ont été calculés à l'aide du logiciel CitySim. Les résultats montrent qu'il existe un grand nombre de combinaisons de hauteurs qui permettent d'atteindre un même niveau de performance en ce qui concerne le besoins de chauffage, pour un volume bâti donné. Ce constat pourrait permettre de guider l'architecte

ou l'aménageur urbain en donnant les caractères principaux des bons quartiers tout en les laissant libres de la conception finale des bâtiments. Par ailleurs, les résultats de fractions vitrées optimales ont montré que celles-ci sont (dans notre cas de géométrie) peu dépendantes des combinaisons de hauteurs. En effet, des combinaisons de hauteurs différentes présentent la même solution optimale de fraction vitrée. Des études complémentaires, incluant des critères supplémentaires (lumière naturelle, climatisation) seraient cependant nécessaires pour appuyer cette observation.

Limites et perspectives

Avant d'exposer quelques perspectives plus larges, des commentaires sur les limites et pistes d'amélioration du travail effectué dans cette thèse doivent être formulés.

Par rapport au premier axe de travail sur l'étude des formes optimales par rapport au potentiel solaire, une amélioration pourrait porter sur la manière de considérer le rayonnement solaire, et sur les possibilités géométriques dans la génération de quartiers. Sur le premier point, il est à noter que le rayonnement solaire est un argument courant cité parmi les qualités d'un quartier et certains outils, tels que les enveloppes solaires, ont été définis pour créer des géométries urbaines à partir du rayonnement solaire. Conserver le rayonnement solaire comme centre d'intérêt est donc légitime. Cependant, de nombreux critères pourraient être étudiés dans ce cadre. La fonction que nous avons choisi d'utiliser, à savoir le potentiel solaire cumulé sur toutes les façades, a une première limite : elle ne distingue pas les différentes façades touchées. Une fonction s'intéressant au fait que chaque surface ait accès au rayonnement solaire pourrait améliorer la répartition de ce rayonnement. Le rayonnement solaire est associé à plusieurs critères antagonistes. Le rayonnement solaire d'hiver s'oppose ainsi au rayonnement solaire d'été car si dans le premier cas le gain d'énergie permet de réduire les besoins de chauffage, dans le second il est susceptible de générer des surchauffes inconfortables. A cela s'ajoutent l'aspect lumineux du rayonnement solaire et son utilisation avec des panneaux solaires. L'effet sur les formes optimales de ces différents critères peut être une piste intéressante à suivre pour en tirer des règles de conception. On peut également imaginer agréger en un critère ces différentes composantes, en fonction de priorités définies par un projet. Ces études pourraient enfin motiver le recours à des algorithmes d'optimisation multi-objectifs.

D'un point de vue géométrique, l'utilisation de blocs et de paramètres de formes constitue une première étape et d'autres définitions d'un quartier peuvent être imaginées ([Aliaga, 2012](#)). Le recours à des géométries procédurales, générées par un ensemble d'étapes (ou d'instructions) plutôt que par un travail direct sur la géométrie, pourrait notamment représenter une piste intéressante pour proposer davantage de diversité dans les géométries urbaines, tout en restant dans le cadre de quartiers plausibles.

Pour ce qui est du second cas d'étude, la principale limite réside dans la fonction objectif (les besoins de chauffage), qui pourrait être enrichie par les besoins énergétiques pour la climatisation, et éventuellement d'un critère en lien avec la lumière naturelle. Ce dernier point semble d'ailleurs être un critère contradictoire nécessaire dans l'optimisation des fractions vitrées. En effet, la taille des fenêtres est dans la réalité hautement dépendante de l'accès à la lumière et au paysage. Une combinaison de ces critères dans une approche d'optimisation multi-objectifs pourrait là encore être utilisée. Enfin, le cas d'étude pourrait, pour comparaison, être adapté aux dernières réglementations thermiques qui impliquent des niveaux d'isolation du bâtiment bien plus élevés, ce qui serait susceptible de modifier le jeu de balance entre déperditions et apports solaires et internes (si les bâtiments sont considérés occupés).

L'optimisation de formes urbaines peut, en résumé, avoir plusieurs intérêts (liste non exhaustive) :

- rechercher la meilleure configuration pour connaître le quartier le plus performant et être en mesure de comparer toute proposition d'aménagement avec celui-ci au regard d'un critère donné ;
- disposer d'un ensemble de bonnes configurations pour guider des choix d'aménagement ;
- identifier les paramètres significatifs induisant des variations du critère choisi, à partir d'un grand nombre de paramètres initiaux ;
- analyser et recouper les caractéristiques principales des bons quartiers par rapport au critère choisi. En fonction des résultats, des règles ou comportements généraux peuvent éventuellement être tirés afin d'améliorer notre connaissance et notre intuition dans la conception de bonnes formes urbaines

Dans l'ensemble des études réalisées, il a été observé qu'une grande variété de configurations presque optimales pouvaient être qualifiées de "bonnes" vis-à-vis du critère évalué. Dans la réalité du projet urbain, connaître le quartier constituant l'optimum global a certainement moins d'intérêt que d'avoir une idée de l'ensemble des conditions permettant d'appartenir à cet ensemble des "bons" quartiers. Dans ce cadre, et en accord avec les points d'intérêt décrits plus haut, il pourrait être pertinent d'utiliser des méthodes d'optimisation multimodales ou étant capables de trouver les sous-espaces de paramètres propres à ces bons quartiers.

Enfin, il pourrait être judicieux de s'intéresser aux interactions entre les échelles de la ville, du quartier, du bâtiment, et de ses composantes (façades, systèmes). En effet, ces échelles sont souvent traitées séparément dans les travaux d'optimisation ou les études paramétriques. Une réflexion sur ce point pourrait permettre de déterminer dans quelle mesure ces niveaux sont couplés les uns aux autres dans le cadre d'un problème d'évaluation des consommations énergétiques. Le chapitre 4 donne un exemple de problème de ce type : dans quelle mesure les fractions vitrées optimales sont-elles liées à la prise en compte d'un contexte urbain, de l'orientation et de la forme des bâtiments ? Des informations sur les relations entre ces différents niveaux, pourraient permettre de justifier des approches en plusieurs étapes séparées, ou au contraire de développer des méthodes d'optimisation multi-échelles.

Table des figures

1	Consommation d'énergie finale par secteur. Source : (SOeS, 2014b)	1
1.1	Vue en coupe Nord-Sud de la voûte céleste avec trajets solaires aux solstices d'hiver (WW') et d'été (SS'), et aux équinoxes (OE) pour les latitudes de Londres (51° 30' N), Boston (42° 21' N), et la Nouvelle Orléans (29° 58' N). Source : (Atkinson, 1912)	8
1.2	Le soleil fournissant la lumière nécessaire au paysage	9
1.3	Courbes de sensibilité de l'œil $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$. <i>Adapté de Alasjournal, Wikipedia.org</i>	10
1.4	Habitats adaptés au climat a) chaud et aride (Aït Benhaddou , Maroc), b) chaud et humide (habitat Yanomami, Amazonie), c) froid (igloo). Source : Wikipedia	12
1.5	L'Eixample. Plan d'Idelfons Cerdà (1859). Le haut correspond au nord-ouest. .	14
1.6	Angle d'obstruction présenté dans la méthode LT. Source : (Baker et al., 1995)	15
1.7	Quartier de très haute densité à Hong-Kong. L'angle au sommet des immeubles permet de respecter l'obstruction maximale de 71,5° demandée par la règlementation de Hong-Kong. Source : (Ng, 2012)	15
1.8	Forme des protections solaires et projections associées. Source : (Olgyay, 1963)	16
1.9	Quartier à Paris(48,5°N). (a) projection stéréographique, (b) projection orthogonale, (c) projection équivalente. Représentés avec Héliodon2	17
1.10	L'enveloppe solaire définie par Ralph Knowles. Source : (Knowles, 2003)	18
1.11	Volume solaire, encadré par la SRE (bleu) et la SCE (rose). Source : (Capeluto et Shaviv, 1997)	19
1.12	Canyon urbain (Van Esch et al., 2012)	22
1.13	Rose d'orientation définie par Compagnon (2004)	23
1.14	Profil de température de l'îlot de chaleur urbain. Source : <i>US Environmental Protection Agency</i>	24

1.15	Les trois types d'optimisation de forme sur un problème de treillis 2D : a) dimensionnement, b) forme et c) topologie. Les problèmes initiaux sont représentés à gauche, leur solution à droite. Source : (Bendsoe et Sigmund, 2003)	26
1.16	Exemple de solutions optimales au sens de Pareto pour un problème de performances été/hiver. Source : (Radford, 1981)	28
1.17	Formes de fenêtres optimales sur quatre essais d'optimisation pour les villes de Phoenix et Chicago. Source : (Caldas et Norford, 2002)	29
1.18	Exemple de solution de la répartition de d'éléments de fenêtres (en bleu) obtenue par Wright et Mourshed (2009). La flèche rouge pointe vers le barycentre des cellules vitrées. Source : (Wright et Mourshed, 2009)	29
1.19	Formes paramétrées du plan du bâtiment, a) arcs de cercle (Marks, 1997), b) polygone (Jedrzejuk et Marks, 2002), c) ovale (Adamski, 2007)	30
1.20	a) bâtiments composés de 9 éléments sur une grille 3x3 (Jones, 2009) b) bâtiments composés de 8 éléments sur une grille 2x2x2 (Caldas, 2006)	31
1.21	Solutions architecturales équivalentes du point de vue du besoin de chauffage : a) privilégie l'isolation, et b) privilégie les apports solaires (Coley et Schukat, 2002)	32
1.22	Configuration optimale d'un îlot urbain à Bâle (Suisse) en fonction du volume à bâtir (Kämpf et al., 2010)	33
2.1	Représentation en blocs, exemple d'une grille rectangulaire 5x5	39
2.2	Transformations	43
2.3	Bâtiment sur une parcelle. Chaque sommet doit être du bon côté des lignes de bordure	44
2.4	Cellule urbaine (vue en plan, les niveaux de gris représentent des hauteurs de bâtiments)	47
2.5	Représentation sur une grille de 7x7 bâtiments d'une cellule a) 2x2, b) 3x3, c) 4x4	47
2.6	Exemple de quartiers créés pour le calcul du rayonnement solaire avec une cellule de dimensions 3x3 et $R_{calc} = 4$. (vue en plan, les niveaux de gris représentent des hauteurs de bâtiments)	48
2.7	Angles liés à la position du soleil dans le ciel	50
2.8	Projection des ombres pour une position du soleil	52
2.9	Les ombres sont projetées pour chaque pas de temps	54

2.10	Discrétisation du ciel pour différentes quantités de tuiles (Beckers et Beckers, 2012)	55
2.11	Facteur de vue du ciel sur une surface horizontale en milieu dégagé en fonction du nombre de tuiles du ciel (évalué pour 100, 300, 1000 et 5000 tuiles)	56
2.12	Ciels cumulés représentant les énergies annuelles directe, diffuse et globale pour la station météo de Paris-Orly	57
2.13	Analogie avec l'évolution. Adapté de (Eiben et Smith, 2003)	59
2.14	Procédure générale de l'algorithme utilisé	60
2.15	Croisement <i>un point</i> de deux quartiers selon des bandes nord-sud	61
2.16	Procédure de correction de la position d'un bâtiment pour le respect des contraintes stériques	64
3.1	Dimensions de la grille orthogonale utilisée par Kämpf (2009)	67
3.2	Configuration optimale maximisant le potentiel solaire annuel cumulé à Bâle d'après Kämpf (2009)	68
3.3	Solutions optimales trouvées lors de 4 essais d'optimisation, avec l'évaluation de leur fonction objectif ainsi que le nombre de générations et d'évaluations uniques de chaque essai.	69
3.4	Évolution de la fonction objectif	70
3.5	a) volume englobant du quartier, b) quartier de bâtiments de hauteur maximale c) exemple de quartier possible (21 décembre, 50°N, ciel clair)	71
3.6	Trajet solaire le 21 décembre à la latitude de 50° N	72
3.7	Configurations optimales pour 33% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	74
3.8	Configurations optimales pour 50% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	74
3.9	Configurations optimales pour 66% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	75
3.10	Evolution de la fonction objectif avec la densité, et représentation de meilleures (haut) et moins bonnes (bas) configurations (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	76
3.11	Volume englobant du quartier hexagonal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	78

3.12 Configuration hexagonale optimale pour 50% du volume maximal (21 décembre, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	78
3.13 Volume englobant du quartier hexagonal (21 juin, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	79
3.14 Configuration hexagonale optimale pour 50% du volume maximal (21 juin, 50°N, ciel clair, Liu & Jordan)	79
3.15 Configurations optimales par rapport au facteur de vue du ciel moyen. a) hauteur maximale grande relativement aux dimensions des emplacements, b) hauteur maximale petite relativement aux dimensions des emplacements	80
3.16 Définition du cas d'étude avec bâtiments sur parcelles	82
3.17 Formes optimales pour différents ensembles de paramètres et différentes latitudes (21 décembre, ciel clair, Liu & Jordan)	85
3.18 Configuration optimale de bâtiments sur des grandes parcelles (jeu (C) de paramètres, 21 décembre, 60°N, ciel clair, Liu & Jordan)	86
3.19 Typologie de configurations urbaines en cellules	89
3.20 Formes optimales de cellules 2x2, 3x3 et 4x4 (21 décembre, 50°N, ciel clair)	91
3.21 Formes optimales de cellules 5x5 et 6x6 (21 décembre, 50°N, ciel clair)	92
3.22 Minima et maxima de la fonction objectif rapportée au nombre d'emplacements trouvés en fonction de la densité et de la taille de la cellule, et évaluation de la typologie de cellules définie manuellement (21 décembre, 50°N, ciel clair)	93
3.23 Formes optimales de cellules 2x2, 3x3 et 4x4 (21 mars/21 septembre, 50°N, ciel clair)	94
3.24 Formes optimales de cellules 5x5 et 6x6 (21 mars/21 septembre, 50°N, ciel clair)	95
3.25 Minima et maxima de la fonction objectif rapportée au nombre d'emplacements trouvés en fonction de la densité et de la taille de la cellule, et évaluation de la typologie de cellules définie manuellement (21 mars/21 septembre, 50°N, ciel clair)	96
3.26 Formes optimales de cellules 2x2, 3x3 et 4x4 (21 juin, 50°N, ciel clair)	97
3.27 Formes optimales de cellules 5x5 et 6x6 (21 juin, 50°N, ciel clair)	98
3.28 Minima et maxima de la fonction objectif rapportée au nombre d'emplacements trouvés en fonction de la densité et de la taille de la cellule, et évaluation de la typologie de cellules définie manuellement (21 juin, 50°N, ciel clair)	99
4.1 Représentation de la façade des îlots faisant face au parc (Atelier Buffi, tiré de (Atelier Parisien d'Urbanisme, 2003))	102

4.2	Définition du cas d'étude. a) vue du quartier réel et représentation géométrique simplifiée, b) décomposition de l'îlot en 16 bâtiments élémentaires	103
4.3	Structure de la géométrie urbaine et des paramètres associés dans CitySim	106
4.4	Modèle thermique nodal utilisé dans CitySim. Source : (Kämpf, 2009)	109
4.5	Organigramme du processus d'optimisation	111
4.6	Meilleure configuration trouvée (variables : hauteurs des bâtiments)	111
4.7	Solutions quasi optimales (variables : hauteurs des bâtiments)	112
4.8	Analyse des 5 % meilleures configurations. a) variables des individus (une ligne = une configuration), b) valeurs moyennes et écart-type de chaque variable dans le sous-ensemble de bonnes configurations	113
4.9	Relation entre le volume des configurations et les besoins en chauffage. Chaque point représente un quartier évalué durant le processus d'optimisation	113
4.10	Analyse des 5 % meilleures configurations (hauteurs et fractions vitrées). (l'exemple à gauche ne correspond pas à la configuration optimale)	114
4.11	Valeur moyenne et écart-type des fractions vitrées dans les meilleurs individus (top 5 %), pour quatre configurations géométriques de hauteurs différentes.	115

Liste des tableaux

1.1	Nomenclatures française et anglaise des grandeurs radiométriques et photométriques	11
2.1	Paramètres de transformation des bâtiments	43
3.1	Récapitulatif des conditions de calcul pour la validation du module d'optimisation	69
3.2	Conditions de calcul pour l'étude des configurations optimales en fonction de la densité	73
3.3	Valeur normalisée de la fonction objectif pour les meilleures et moins bonnes configurations, en fonction de la contrainte de volume	75
3.4	Conditions de calcul pour l'optimisation du quartier hexagonal	77
3.5	Jeux de paramètres d'optimisation	83
3.6	Bornes sur les variables d'optimisation	83
3.7	Trajets solaires et énergie directe par ciel clair le 21 décembre	84
3.8	Meilleures et moins bonnes valeurs de fonction objectif relevées pour différentes latitudes et jeux de paramètres (relativement à f_{max})	87
3.9	Récapitulatif des conditions de calcul pour l'optimisation sur cellules	88
3.10	Densité des cellules des la typologie	90
4.1	Caractéristiques des surfaces	105

Bibliographie

- Adamski, M. 2007, «Optimization of the form of a building on an oval base», *Building and Environment*, vol. 42, n° 4, doi :10.1016/j.buildenv.2006.02.004, p. 1632–1643,
- ADEME. 2012, «Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050»,
- Aliaga, D. G. 2012, «Geometrical Models of the City», dans *Solar Energy at Urban Scale*, édité par B. Beckers, John Wiley and Sons,
- Asadi, E., M. Gameiro da Silva, C. Henggeler Antunes et L. Dias. 2012, «A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB», *Building and Environment*, vol. 56, doi :10.1016/j.buildenv.2012.04.005, p. 370–378,
- Atelier Parisien d'Urbanisme. 2003, «La loi SRU et la « transition réglementaire » parisienne La question des ZAC (et des secteurs de plan masse)»,
- Atherton, P., K. Weiler et D. Greenberg. 1978, «Polygon shadow generation», dans *Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH'78)*,
- Atkinson, W. 1912, *The orientation of buildings ; or Planning for sunlight*, John Wiley & Sons, New York,
- Baker, N., K. Steemers et D. Hoch. 1995, «The LT Method : An Energy Design Tool for Non Domestic Buildings»,
- Beckers, B. et P. Beckers. 2010, «Les anomalies, l'équation de Kepler, la position du soleil»,
- Beckers, B. et P. Beckers. 2012, «A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells», *Comput. Geom. Theory Appl.*, vol. 45, n° 7, doi :10.1016/j.comgeo.2012.01.011, p. 275–283,
- Beckers, B. et P. Beckers. 2013, «Sky vault partition for computing daylight availability and shortwave energy budget on an urban scale», *Lighting Research and Technology*, doi :10.1177/1477153513502507,

- Beckers, B. et P. Beckers. 2014, *Reconciliation of Geometry and Perception in Radiation Physics*, John Wiley and Sons,
- Beckers, B. et L. Masset. 2011, «Heliodon2, documentation»,
- Bendsoe, M. et O. Sigmund. 2003, *Topology optimization : theory, methods and applications*, Springer,
- Beyer, H.-G. et H.-P. Schwefel. 2002, «Evolution strategies –a comprehensive introduction», vol. 1, n° 1, doi :10.1023/A:1015059928466, p. 3–52,
- Bourges, B. 1985, «Improvement in solar declination computation», *Solar Energy*,
- Bureau International des Poids et Mesures. 1983, «Principes régissant la photométrie»,
- Bureau International des Poids et Mesures. 2006, «Le système international d'unités»,
- Caldas, L. 2006, «Gene_arch : An evolution-based generative design system for sustainable architecture.», dans *EG-ICE, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4200, édité par I. F. C. Smith, Springer, ISBN 3-540-46246-5,
- Caldas, L. 2011, «Generation of Energy-Efficient Patio Houses : Combining GENE_ARCH and a Marrakesh Medina Shape Grammar.», dans *Proceedings of the AAAI Spring Symposium 2011*,
- Caldas, L. G. et L. K. Norford. 2002, «A design optimization tool based on a genetic algorithm», *Automation in Construction*, vol. 11, n° 2, doi :10.1016/S0926-5805(00)00096-0, p. 173–184,
- Campbell, G. S. et J. M. Norman. 1998, *An Introduction to Environmental Biophysics*, 2^e éd., Springer,
- Capeluto, I. et E. Shaviv. 1997, «Modeling the design of urban fabric with solar rights considerations», dans *Proceedings of the ISES 1997 Solar . . .*,
- Chapman, L. et J. Thornes. 2004, «Real-time sky-view factor calculation and approximation», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 21, n° 5,
- Cheng, V., K. Steemers, M. Montavon et R. Compagnon. 2006, «Compact cities in a sustainable manner», dans *2nd International Solar Cities Congress*, vol. 44,
- Christensen, P. W. et A. Klarbring. 2008, *An introduction to structural optimization*, Springer,
- Cifuentes, A. 2012, *Simulation urbaine d'un quartier de logement social à Bogota, Colombie*, mémoire de maîtrise,
- Coccolo, S. 2012, *A Bioclimatic approach to design and optimize a hypothetical Masterplan for the new EPFL Research Centre in Ras al Khaimah*, mémoire de maîtrise,
- Coley, D. et S. Schukat. 2002, «Low-energy design : combining computer-based optimisation and human judgement», *Building and Environment*, vol. 37,

- Commission internationale de l'éclairage. 1994, «Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement»,
- Compagnon, R. 2000, «Solar and daylight availability in urban areas», cahier de recherche,
- Compagnon, R. 2004, «Solar and daylight availability in the urban fabric», *Energy and Buildings*, vol. 36, n° 4,
- Crawley, D. B., J. W. Hand et B. T. Griffith. 2008, «Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs», vol. 43,
- Dorer, V., J. Allegrini, K. Orehounig, P. Moonen, G. Upadhyay, J. Kämpf et J. Carmeliet. 2013, «Modelling the urban microclimate and its impact on the energy demand of buildings and building clusters», dans *Proceedings of BS 2013*,
- Duarte, J., J. Rocha, G. Ducla-Soares et L. Caldas. 2006, «An urban grammar for the medina of marrakesh : Towards a tool for urban design in islamic contexts», dans *Design Computing and Cognition '06*, édité par A. Riitahuhta, Springer,
- Duysinx, P., W. Zhang, H. Zhong, P. Beckers et C. Fleury. 1994, «Structural Shape Optimization with Error Control», dans *Proceedings of the 20th ASME Design Automation Conference*,
- Eiben, A. E. et J. E. Smith. 2003, *Introduction to Evolutionary Computing*, Springer,
- Elbeltagi, E., T. Hegazy et D. Grierson. 2005, «Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms», *Advanced Engineering Informatics*, vol. 19, n° 1, doi :10.1016/j.aei.2005.01.004, p. 43–53,
- EnergyPlus. 2009, «EnergyPlus engineering reference : the reference to EnergyPlus calculations»,
- EPBD. 2013, «Implementing the Energy Performance of Building Directive (EPBD), featuring country reports 2012»,
- Escobedo, J. a. F., E. N. Gomes, A. P. Oliveira et J. Soares. 2011, «Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil», *Renewable Energy*, vol. 36, n° 1, doi :10.1016/j.renene.2010.06.018, p. 169–178,
- Evins, R. 2013, «A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, p. 230– 245,
- Evins, R., P. Pointer et S. Burgess. 2012a, «Multi-objective optimisation of a modular building for different climate types», *First Building Simulation and Optimization Conference*,
- Evins, R., P. Pointer, R. Vaidyanathan et S. Burgess. 2012b, «A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation», *Building and Environment*, vol. 54, doi :10.1016/j.buildenv.2012.02.012, p. 126–136,

- Fogel, L., A. Owens et M. Walsh. 1966, *Artificial intelligence through simulated evolution*, John Wiley & Sons, Chichester, UK,
- Fong, K., V. Hanby et T. Chow. 2009, «System optimization for HVAC energy management using the robust evolutionary algorithm», *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, n° 11-12, doi :10.1016/j.applthermaleng.2008.11.019, p. 2327–2334,
- Freewan, A., L. Shao et S. Riffat. 2008, «Optimizing performance of the lightshelf by modifying ceiling geometry in highly luminous climates», *Solar Energy*, vol. 82, n° 4, doi :10.1016/j.solener.2007.08.003, p. 343–353,
- Gagne, J. et M. Andersen. 2012, «A generative facade design method based on daylighting performance goals», *Journal of Building Performance Simulation*,
- Gueymard, C. a. 2004, «The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models», *Solar Energy*, vol. 76, n° 4, doi :10.1016/j.solener.2003.08.039, p. 423–453,
- Gupta, C. 1970, «A systematic approach to optimum thermal design», *Building Science*, vol. 5, n° 3–4, doi :http://dx.doi.org/10.1016/0007-3628(70)90006-X, p. 165 – 173,
- Hachem, C., A. Athienitis et P. Fazio. 2011a, «Investigation of solar potential of housing units in different neighborhood designs», *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 9, doi :10.1016/j.enbuild.2011.05.008, p. 2262–2273,
- Hachem, C., A. Athienitis et P. Fazio. 2011b, «Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units», *Solar Energy*, vol. 85, n° 9, doi :10.1016/j.solener.2011.04.027, p. 1864–1877,
- Hachem, C., P. Fazio et A. Athienitis. 2013, «Solar optimized residential neighborhoods : Evaluation and design methodology», *Solar Energy*, vol. 95, p. 42–64,
- Hamdy, M., A. Hasan et K. Siren. 2011, «Impact of adaptive thermal comfort criteria on building energy use and cooling equipment size using a multi-objective optimization scheme», *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 9, doi :10.1016/j.enbuild.2011.04.006, p. 2055–2067,
- Hansen, N. et A. Ostermeier. 2001, «Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies», *Evol. Comput.*, vol. 9, n° 2, doi :10.1162/106365601750190398, p. 159–195,
- Harzallah, A. 2007, *Émergence et évolution des préconisations solaires dans les théories architecturales et urbaines en France, de la seconde moitié du XIX^e siècle à la deuxième guerre mondiale*, thèse de doctorat,
- Hellinga, H. et T. Hordijk. 2014, «The D&V analysis method : A method for the analysis of daylight access and view quality», *Building and Environment*, vol. 79, doi :10.1016/j.buildenv.2014.04.032, p. 101–114,

- Hénon, A., P. G. Mestayer, D. Groleau et J. Voogt. 2011, «High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign», *Building and Environment*, vol. 46, n° 9, doi :10.1016/j.buildenv.2011.02.001, p. 1747–1764,
- Holland, J. H. 1992, *Adaptation in Natural and Artificial Systems : An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge, MA, USA,
- Jedrzejuk, H. et W. Marks. 2002, «Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilisation. Partial problems solution», *Building and Environment*, vol. 37, n° 11, doi :10.1016/S0360-1323(01)00099-3, p. 1037–1043,
- Johnson, A. 2014, «Clipper - an open source freeware library for clipping and offsetting lines and polygons.»,
- Jones, N. L. 2009, *Architecture as a complex adaptative system*, thèse de doctorat,
- Juyal, M., K. Kensek et R. Knowles. 2003, «SolCAD : 3D Spatial Design Tool to Generate Solar Envelope», dans *Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture*,
- Kämpf, J. H. 2009, *On the modelling and optimisation of urban energy fluxes*, thèse de doctorat,
- Kämpf, J. H., M. Montavon, J. Bunyesc, R. Bolliger et D. Robinson. 2010, «Optimisation of buildings' solar irradiation availability», *Solar Energy*, vol. 84, n° 4, p. 596–603,
- Kämpf, J. H. et D. Robinson. 2007, «A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows», *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 4, doi :10.1016/j.enbuild.2006.09.002, p. 445–453,
- Kämpf, J. H. et D. Robinson. 2009, «A hybrid CMA-ES and HDE optimisation algorithm with application to solar energy potential», *Applied Soft Computing*, vol. 9, n° 2, doi : 10.1016/j.asoc.2008.09.009, p. 738–745,
- Kämpf, J. H. et D. Robinson. 2010, «Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms», *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 6, p. 807– 814,
- Kanters, J. et M. Horvat. 2012, «Solar Energy as a Design Parameter in Urban Planning», *Energy Procedia*, vol. 30, doi :10.1016/j.egypro.2012.11.127, p. 1143–1152,
- Knowles, R. 2003, «The solar envelope : its meaning for energy and buildings», *Energy and buildings*, vol. 35,
- Knowles, R. L. 1980, *Solar Envelope Concepts*, Solar Energy Research Institute,
- Kornelakis, A. et Y. Marinakis. 2010, «Contribution for optimal sizing of grid-connected PV-systems using PSO», *Renewable Energy*, vol. 35, n° 6, doi :10.1016/j.renene.2009.10.014, p. 1333–1341,

- Kotelnikova-Weiler, N. 2012, *Optimisation mécanique et énergétique d'enveloppes en matériaux composites pour les bâtiments*, thèse de doctorat,
- Krüger, E., D. Pearlmutter et F. Rasia. 2010, «Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment», *Applied Energy*, vol. 87, n° 6, doi :10.1016/j.apenergy.2009.11.034, p. 2068–2078,
- Lagouarde, J.-P., a. Hénon, M. Irvine, J. Voogt, G. Pigeon, P. Moreau, V. Masson et P. Mestayer. 2012, «Experimental characterization and modelling of the nighttime directional anisotropy of thermal infrared measurements over an urban area : Case study of Toulouse (France)», *Remote Sensing of Environment*, vol. 117, doi :10.1016/j.rse.2011.06.022, p. 19–33,
- Littlefair, P. 1985, «The luminous efficacy of daylight : a review», *Lighting Research and Technology*, vol. 17, n° 4,
- Littlefair, P. 1998, «Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2, n° 3,
- Liu, B. et R. Jordan. 1960, «The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation», *Solar Energy*,
- Machairas, V., A. Tsangrassoulis et K. Axarli. 2014, «Algorithms for optimization of building design : A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, p. 101– 112,
- Magnier, L. et F. Haghghat. 2010, «Multiobjective optimization of building design using TRN-SYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network», *Building and Environment*, vol. 45, n° 3, doi :10.1016/j.buildenv.2009.08.016, p. 739–746,
- Mardaljevic, J. et M. Rylatt. 2003, «Irradiation mapping of complex urban environments : an image-based approach», *Energy and Buildings*, vol. 35,
- Marks, W. 1997, «Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings», *Building and Environment*, vol. 32, n° 4,
- Merino, L. 2013, *Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain*, thèse de doctorat,
- Michalewicz, Z. et C. Z. Janikow. 1991, «Handling Constraints in Genetic Algorithms», dans *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*,
- Miguet, F. 2000, *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*, thèse de doctorat,
- Montavon, M. 2010, *Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential*, thèse de doctorat,

- Morello, E., V. Gori, C. Balocco et C. Ratti. 2009, «Sustainable Urban Block Design through Passive Architecture, A tool that uses urban geometry optimization to compute energy savings»,
- Morello, E. et C. Ratti. 2009, «Sunscapes : 'Solar envelopes' and the analysis of urban DEMs», *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 33, n° 1, p. 26–34,
- Muhaisen, A. S. 2006, «Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions», *Building and Environment*, vol. 41,
- Nassif, N., S. Kajl et R. Sabourin. 2005, «Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm», *HVAC&R Research*, vol. 11, n° 3,
- Ng, E. 2012, *Dense cities in the tropical zone*, John Wiley and Sons,
- Nguyen, A., S. Reiter et P. Rigo. 2014, «A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis», *Applied Energy*, vol. 113, p. 1043–1058,
- Nocedal, J. et S. Wright. 2006, *Numerical optimization*, 2^e éd., Springer series in operations research and financial engineering, Springer, New York, NY,
- Oke, T. R. 1973, «City size and the urban heat island», *Atmospheric Environment*, vol. 7,
- Olgay, V. 1963, *Design with climate : Bioclimatic approach to architectural regionalism*, Princeton University Press,
- Pacheco, R., J. Ordóñez et G. Martínez. 2012, «Energy efficient design of building : A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16,
- Peippo, K., P. Lund et E. Vartiainen. «Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings», *Energy and Buildings*,
- Perez, R., R. Seals et J. Michalsky. 1993, «All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation», *Solar energy*, vol. 50, n° 3,
- Peterson, T. C. 2003, «Assessment of Urban Versus Rural In Situ Surface Temperatures in the Contiguous United States : No Difference Found»,
- Radford, A. D. 1981, «Optimization, simulation and multiple criteria in window design», *Computer-Aided Design*, vol. 13, n° 6, doi :10.1016/0010-4485(81)90210-4, p. 345–350,
- Ralegaonkar, R. et R. Gupta. 2010, «Review of intelligent building construction : A passive solar architecture approach», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 8, doi : 10.1016/j.rser.2010.04.016, p. 2238–2242,
- Rechenberg, I. 1965, «Cybernetic solution path of an experimental problem», *Royal Aircraft Establishment Library Translation*,

- Robinson, D. 2007, «SUNtool – A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability», *Solar Energy*, vol. 81,
- Robinson, D., F. Haldi, J. Kämpf, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed et U. Wilke. 2009, «CitySim Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning», dans *Eleventh International IBPSA Conference*,
- Robinson, D., S. Stankovic, N. Morel, F. Deque, M. Rylatt, K. Kabele, E. Manolakaki et J. Nieminen. 2003, «Integrated resource flow modelling of urban neighbourhoods : project SunTool»,
- Robinson, D. et A. Stone. 2004, «Solar radiation modelling in the urban context», *Solar Energy*, vol. 77,
- Robinson, D. et A. Stone. 2005, «A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange», *Building Services Engineering Research & Technology*, vol. 4,
- Robinson, D. et A. Stone. 2006, «Internal illumination prediction based on a simplified radiosity algorithm», *Solar Energy*, vol. 80,
- Santamouris, M. 2014, «Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments», *Solar Energy*, vol. 103, doi :10.1016/j.solener.2012.07.003, p. 682–703,
- Sarralde, J. J., D. J. Quinn, D. Wiesmann et K. Steemers. 2014, «Solar energy and urban morphology : Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London», *Renewable Energy*, doi :10.1016/j.renene.2014.06.028, p. 1–8,
- Seo, J., R. Ooka, J. T. Kim et Y. Nam. 2014, «Optimization of the HVAC system design to minimize primary energy demand», *Energy & Buildings*, vol. 76, doi :10.1016/j.enbuild.2014.02.034, p. 102–108,
- Siddharth, V., P. V. Ramakrishna, T. Geetha et A. Sivasubramaniam. 2011, «Automatic generation of energy conservation measures in buildings using genetic algorithms», *Energy & Buildings*, vol. 43, n° 10, doi :10.1016/j.enbuild.2011.06.028, p. 2718–2726,
- Siret, D. *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural Application à l'ensoleillement*, thèse de doctorat,
- Siret, D. 2011, «Les enveloppes solaires de Ralph Knowles, ou les ambivalences d'un modèle de régulation des formes urbaines», *Lieux Communs, Cahiers du LAUA*,
- Siret, D. 2013, «Rayonnement solaire et environnement urbain : De l'héliotropisme au désenchantement, histoire et enjeux d'une relation complexe»,
- Siret, D. et S. Houpert. 2004, «A geometrical framework for solving sunlighting problems within CAD systems», *Energy and Buildings*, vol. 36, n° 4, doi :10.1016/j.enbuild.2004.01.010, p. 343–351,

- SOeS. 2013, «Chiffres clés du climat, France et Monde, édition 2013»,
- SOeS. 2014a, «Bilan énergétique de la France pour 2013»,
- SOeS. 2014b, «Chiffres clés de l'énergie, édition 2013»,
- Souch, C. et S. Grimmond. 2006, «Applied climatology : urban climate», *International Journal of Climatology*,
- Stephan, L., A. Bastide, E. Wurtz, B. Souyri et D. Savoie. 2009, «Ensuring Desired Natural Ventilation Rate by Means of Optimized Openings», dans *Eleventh International IBPSA Conference*,
- Stevanović, S. 2013, «Optimization of passive solar design strategies : A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, p. 177– 196,
- Stone, B. et M. Rodgers. 2001, «How the design of cities influences the urban heat island effect», *APA Journal*, vol. 67, n° 2,
- Storn, R. et K. Price. 1996, «Minimizing the real functions of the icec'96 contest by differential evolution», dans *In : IEEE Conference on Evolutionary Computation*, IEEE,
- Strømmand-Andersen, J. et P. Sattrup. 2011, «The urban canyon and building energy use : Urban density versus daylight and passive solar gains», *Energy and Buildings*, vol. 43,
- Teller, J. et S. Azar. 2001, «Townscope II - A computer system to support solar access decision-making», *Solar Energy*, vol. 70, n° 3,
- Tregenza, P. 1987, «Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements», *Lighting Research and Technology*, vol. 19, n° 1, doi :10.1177/096032718701900103, p. 13–14,
- Tregenza, P. 2004, «Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies», *Lighting Research and Technology*, vol. 36, n° 4, doi :10.1191/1477153504li1170a, p. 271–281,
- Tuhus-dubrow, D. et M. Krarti. 2010, «Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings», *Building and Environment*, vol. 45, n° 7, doi : 10.1016/j.buildenv.2010.01.005, p. 1574–1581,
- Van Esch, M., R. Looman et G. de Bruin-Hordijk. 2012, «The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies», *Energy and Buildings*, vol. 47,
- Vatti, B. R. 1992, «A generic solution to polygon clipping», *Commun. ACM*, vol. 35, n° 7, doi :10.1145/129902.129906, p. 56–63,
- Vermeulen, T., J. Kämpf et B. Beckers. 2013, «Urban Form Optimization for the Energy Performance of Buildings Using Citysim», dans *Proceedings of CISBAT 2013 Cleantech for Smart Cities and Buildings*, vol. 2,

- Voogt, J. A. et T. R. Oke. 2003, «Thermal remote sensing of urban climates», *Remote Sensing of Environment*, vol. 86,
- Wang, W., H. Rivard et R. Zmeureanu. 2006, «Floor shape optimization for green building design», *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20,
- Wright, J. et M. Mourshed. 2009, «Geometric optimization of fenestration», dans *Eleventh International IBPSA Conference*,
- Yi, Y. et A. Malkawi. 2009, «Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation», *Automation in Construction*, vol. 18, n° 6, p. 825– 833,
- Yi, Y. K. et A. M. Malkawi. 2012, «Site-specific optimal energy form generation based on hierarchical geometry relation», *Automation in Construction*, vol. 26, doi :10.1016/j.autcon.2012.05.004, p. 77– 91,
- Young, J. et O. Potchter. 2013, «Climatic planning according to vitruvius and its application in the holy land», *Urban Climate News, Quarterly Newsletter of the IAUC*,
- Zhou, G., C. Song, J. Simmers et P. Cheng. 2004, «Urban 3D GIS From LiDAR and digital aerial images», *Computers & Geosciences*, vol. 30, n° 4, doi :10.1016/j.cageo.2003.08.012, p. 345–353,