

Optimisation de la forme urbaine pour une meilleure utilisation de l'énergie solaire

Jérôme Henri Kämpf et Darren Robinson

Laboratoire d'Énergie Solaire et Physique du Bâtiment (LESO-PB), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Bâtiment LE, Station 18, 1015 Lausanne, Suisse

Résumé

Ce travail prend son inspiration d'un projet qui a pour objectifs la prédiction et l'optimisation de la performance environnementale de districts urbains. L'optimisation passe par la mise en œuvre d'Algorithmes Evolutionnaires (EA) dont le but est de trouver la configuration urbaine qui extrême la performance environnementale déterminée par un logiciel de prédiction. Notre logiciel de prédiction LESO-SUNtool (LESO Sustainable Urban Neighbourhood modelling tool) sera capable au terme de son développement de déterminer plusieurs indicateurs de performance tels que, par exemple, la consommation d'énergie, la production de CO₂ et l'utilisation de ressources renouvelables d'un district urbain. En attendant sa finalisation, nous avons testé l'optimisation par Algorithme Evolutionnaire d'un cas en apparence plus anodin : la forme urbaine paramétrée par des séries de Fourier, l'objectif étant la maximisation du potentiel solaire. Nous présentons dans ce papier la méthodologie de l'optimisation, la détermination du potentiel solaire, la paramétrisation de la forme urbaine en séries de Fourier, et finalement les résultats obtenus.

Introduction

D'après de récentes estimations (UN, 2004) plus de la moitié de la population globale habite dans un environnement urbain, dans lequel les trois-quarts des ressources mondiales sont consommées (Girardet, 1999). L'énergie d'origine fossile étant la plus importante de ces ressources, l'environnement urbain est responsable de la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre et des désordres climatiques qui y sont associés. Bien que cet environnement urbain couvre à peine 2% de la surface de la planète (Girardet, 1999), ses habitants sont potentiellement très vulnérables aux mauvaises conséquences du changement climatique. Toutes ces considérations nous amènent à impérativement considérer les façons d'améliorer la durabilité de notre environnement actuel et en devenir, et ainsi réduire sa vulnérabilité.

Bien que nous puissions beaucoup apprendre des analyses rétrospectives des environnements urbains plutôt réussis, nous avons aussi besoin d'une base pour la prédiction de la performance des propositions de réalisations urbaines. Plus précisément une base pour la modélisation et l'optimisation de la durabilité des développements urbains. Avec cet objectif en point de mire, le développement est en cours au Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment à l'EPFL d'un nouveau logiciel de simulation et d'optimisation des ressources urbaines (énergie, eau et déchets) valable de l'échelle du quartier à celle du district. Dans ce papier, nous restreignons notre présentation aux travaux effectués en relation avec l'optimisation des flux de ressources. Nous nous sommes concentrés sur des problèmes relativement simples d'optimisation de la forme urbaine pour l'utilisation de la radiation solaire.

Méthodologie

L'idée de cette étude est de proposer une forme urbaine qui maximise le potentiel solaire, celui-ci étant déterminé à l'aide du logiciel RADIANCE (Ward, 1998). La première sous-section de la méthodologie est consacrée aux détails concernant la détermination du potentiel solaire avec RADIANCE. La maximisation de ce même potentiel solaire est réalisée par un Algorithme Evolutionnaire hybride sous la dénomination CMA-ES/HDE (Kämpf, 2008). La deuxième sous-section a pour but de donner plus de détails concernant cet algorithme d'optimisation. La méthodologie se termine par l'exposition du problème de la paramétrisation de la forme urbaine et son optimisation.

La détermination du potentiel solaire

Afin de déterminer aussi précisément que possible une mesure du potentiel solaire, nous avons choisi d'utiliser le logiciel bien connu RADIANCE. Ce logiciel de tracé de rayon arrière est un outil pratique pour simuler les flux d'énergie incident sur les façades des bâtiments ainsi qu'à l'intérieur de ceux-ci. Il prend en compte les obstructions du ciel dues au paysage environnant ainsi que les réflexions sur les surfaces des bâtiments environnants. Une scène est décrite par un ciel, des bâtiments de même qu'un sol. De façon à obtenir l'irradiation sur les façades des bâtiments pendant la période d'intérêt d'une année, un ciel cumulé (Robinson, 2004) est produit pour l'endroit voulu de la simulation. Le ciel est constitué de 145 patches de Tregenza qui possèdent chacun une valeur de luminance énergétique cumulée sur l'année ($Wh \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$). La scène décrite par un ensemble de surfaces, qui sont elles-mêmes définies par une liste de points, est compilée par l'utilitaire RADIANCE *oconv* afin de produire un octree. Le programme *rtrace* (le lancé de rayon de RADIANCE) est alors lancé en lui donnant une liste de points et des vecteurs normaux. Les points agissent comme des wattmètres virtuels mesurant l'énergie provenant de l'hémisphère pointé par le vecteur normal. Cette procédure est illustrée dans la Figure 1.

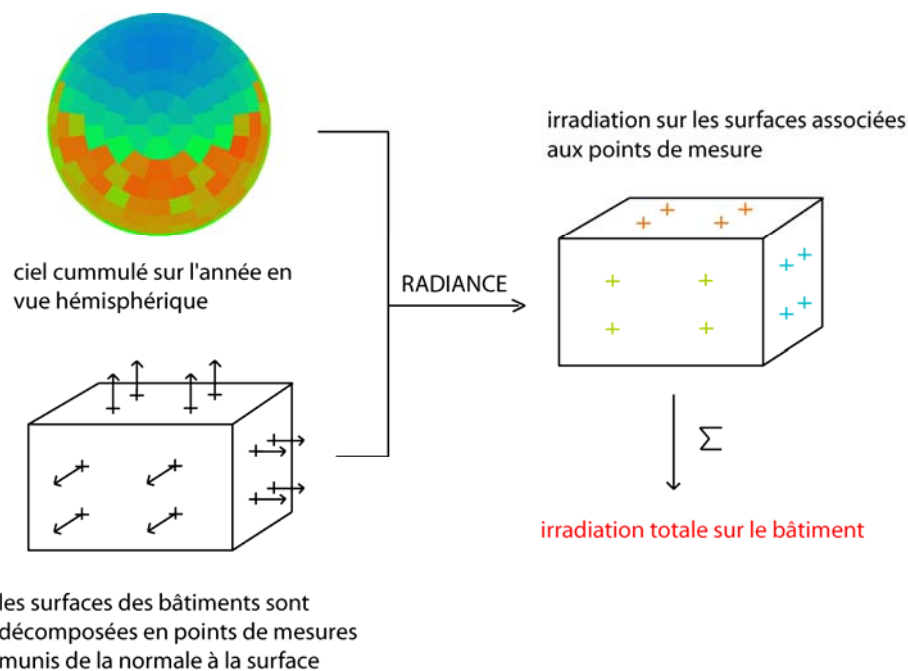


Figure 1 : Procédure de détermination de l'irradiation sur les façades des bâtiments en utilisant RADIANCE et un ciel cumulé

Un compromis doit être trouvé entre précision (avec un grand nombre de points de mesure) et rapidité de calcul. En effet, avec un nombre de points de mesure élevé et des paramètres de RADIANCE détaillés le temps de simulation peut augmenter de façon exponentielle. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer un bon espacement des points de mesure et des paramètres RADIANCE adéquats. Chaque point de mesure correspond à une sous-surface d'une façade, sur laquelle on suppose que l'irradiation est constante. L'irradiation totale sur le bâtiment (le potentiel solaire de celui-ci) est calculée en multipliant l'irradiation de chaque point de mesure avec la sous-surface qui lui correspond, et en faisant la somme de toutes les contributions appartenant au bâtiment.

L'optimisation

Le moyen bien connu de trouver la meilleure forme urbaine est de paramétrer les variables décrivant les bâtiments et de déterminer quelle combinaison de ces variables maximise la mesure du potentiel solaire. Pour quelques variables discrètes, il peut être concevable de tester toute les possibilités et simplement de choisir la meilleure. Toutefois quand l'espace des paramètres devient grand, il devient nécessaire de se tourner vers les algorithmes d'optimisation.

Avec ces algorithmes nous devrions être capables de trouver le supremum d'une fonction définie sur un espace contraint :

$$\sup\{f(\vec{x}) \mid \vec{x} \in M \subseteq \mathbb{R}^n\}$$

Où : la fonction $f(\vec{x})$ est la mesure à améliorer, dans notre cas, le potentiel solaire, \vec{x} est la paramétrisation de la forme urbaine et M est l'espace contraint des paramètres.

Pour la détermination du potentiel solaire, RADIANCE est utilisé comme une boîte noire. Sa réponse est non-linéaire et non-continue par rapport aux paramètres définissant la forme urbaine. Ainsi pour s'attaquer à un tel problème, nous devons nous tourner vers des heuristiques, tout en gardant à l'esprit qu'avec de telles méthodes nous ne pouvons jamais être certains d'obtenir le maximum global dans un temps raisonnable. Plus précisément pour cette tâche nous utilisons un algorithme hybride CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) et HDE (Hybrid Differential Evolution). Pour plus de détail concernant l'algorithme, veuillez vous référer à (Kaempf, 2008).

La paramétrisation de la forme urbaine

Dans notre approche de la forme urbaine idéale et hypothétique, l'idée était de sortir de la base traditionnelle de l'espace cartésien qui a déjà été explorée lors de précédentes études (Kämpf, 2007 et Chen, 2008) afin de se pencher sur une base différente qui nous permet d'avoir des formes très rondes et lisses avec peu de paramètres pour les décrire. Nous avons choisi de commencer notre recherche par une base de l'espace de Fourier en deux dimensions. Celle-ci possède l'avantage d'être facilement compréhensible et est l'objet du présent papier. Par la suite notre étude pourrait être complétée par des bases utilisées en transformées

d'ondelettes, qui ont l'avantage de mieux reproduire des formes très localisées à un endroit de l'espace mais aussi de proposer des formes plus réalistes.

Nous avons considéré une surface décrite par quelques premiers termes d'une série de Fourier en deux dimensions au dessus d'un plan à hauteur zéro. La série de Fourier peut s'écrire en termes de sinus et cosinus, en ne gardant que les 5 premiers termes :

$$h(x, y) = \sum_{k=-2}^2 \sum_{l=-2}^2 C_{kl} \cdot \exp\left(2\pi i \cdot \left(\frac{x}{L_x} + \frac{y}{L_y}\right)\right)$$

$$= \sum_{k=-2}^2 \sum_{l=0}^2 A_{kl} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \left(\frac{x}{L_x} + \frac{y}{L_y}\right)\right) + B_{kl} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{x}{L_x} + \frac{y}{L_y}\right)\right)$$

Où : $h(x, y)$ est la hauteur de la surface en fonction de la position dans le plan (x, y) , A_{kl}, B_{kl} nous donnent 25 paramètres distincts pour notre étude à savoir les amplitudes des cosinus et sinus respectivement, et finalement T_x, T_y sont les bornes de notre surface.

L'amplitude A_{00} est l'amplitude de base, elle correspond à une valeur constante sur tout le domaine. Nous la considérons comme étant le sol, et donc nous lui donnons la valeur de zéro. Pour les 24 amplitudes distinctes en valeur absolue restantes (en déduisant B_{00} car celui-ci ne participe jamais), nous les avons limitées à :

$$A_{kl}, B_{kl} \in [-2, 2]$$

Les bornes de notre surface T_x et T_y ont été définies comme étant respectivement 25 mètres et 37.5 mètres. Nous avons choisi comme contrainte sur nos paramètres que le volume sous la surface et au dessus de la hauteur zéro soit compris entre une valeur maximale et une valeur minimale. La valeur moyenne étant 2m de hauteur multiplié par la surface du domaine ($T_x \cdot T_y$), celle-ci pouvant être augmentée ou diminuée de 10%.

La forme urbaine que nous nous proposons d'étudier doit maximiser son irradiation solaire, toutefois il serait incongru que celle-ci provoque trop d'ombre sur les bâtiments environnants. En effet toutes les parcelles urbaines devraient pouvoir jouir du même droit au soleil. Muni de cette idée, nous avons pensé utiliser les propriétés de périodicité des séries de Fourier afin de créer un environnement identique aux alentours. Nous avons donc reproduit la même forme urbaine sur un échiquier de trois sur trois, mesurant l'irradiation sur la forme en son centre. De cette façon une forme créant beaucoup d'ombre aux alentours se pénalise elle-même.

Résultats

Les simulations ont été lancées avec une limite de l'algorithme d'optimisation de 12'000 évaluations de formes urbaines. Les valeurs des amplitudes ne sont pas montrées ici car elles n'apportent aucune information visuelle, par contre la figure 2 représente le meilleur candidat trouvé sous forme graphique. Dans la figure de gauche, les couleurs représentent le niveau d'irradiation reçue par les surfaces décomposant la forme urbaine. La figure de droite quand à elle nous montre les courbes de niveau.

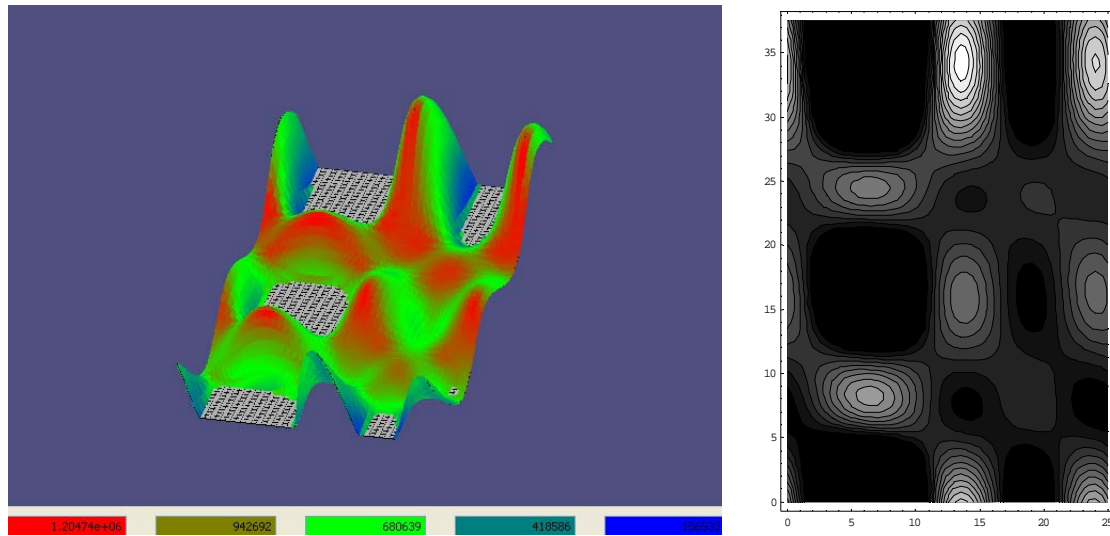


Figure 2 : Le meilleur candidat trouvé après 12'000 évaluations, à gauche recouvert d'une carte représentant l'irradiation annuelle reçue, à droite un graphique en contours

La figure 3 représente une image RADIANCE des neuf formes urbaines identiques répétées en pavage du plan. L'orientation des volumes principaux est Nord-Sud, suivie de blocs transverses (Est-Ouest) de plus faible dimensions, et répétées à l'infini.

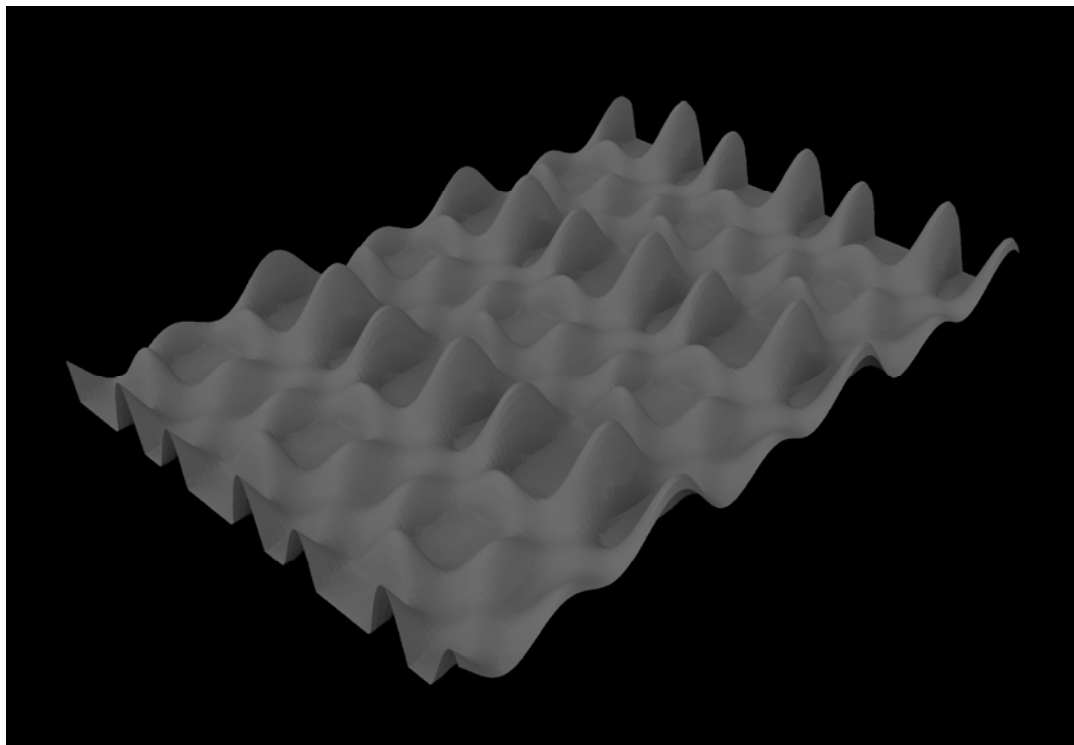


Figure 3 : Une image synthétique générée par le logiciel RADIANCE du meilleur candidat après 12'000 évaluations de formes différentes

Ces simulations qui ont été réalisées avec RADIANCE prennent en compte une contribution du ciel et du soleil à partir d'une voûte céleste considérée à l'infini de la scène. Ainsi les résultats obtenus peuvent être considérés sans échelle de dimensions tant que l'hypothèse de

base de la simulation est satisfaite. Par conséquent, pour une scène dégagée, la forme trouvée peut s'appliquer à un ensemble de bâtiments de taille proportionnelle.

Conclusion

La forme urbaine a été paramétrée à l'aide de séries de Fourier afin de reproduire des formes plus rondes et plus lisses qu'avec une base cartésienne. La propriété de périodicité de la représentation choisie a permis la construction d'un voisinage identique à la forme étudiée. Avec ce voisinage la forme urbaine peut se faire de l'ombre à elle-même; ainsi à travers son optimisation, un droit au soleil identique et maximal est apporté à toutes ses répliques. Les volumes se sont orientés au fur et à mesure de l'optimisation selon les points cardinaux, avec une hauteur plus importante pour les volumes Nord-Sud. Au final, comme la simulation RADIANCE peut être considérée sans échelle, les résultats peuvent s'appliquer à toute forme urbaine proportionnelle. Par la suite, cette étude pourrait être complétée par un choix de base d'ondelettes, de même que par une comparaison avec les résultats déjà obtenus avec une base cartésienne où les bâtiments sont sur une grille.

A l'avenir, l'optimisation sera appliquée à tout un district urbain simulé à l'aide du logiciel LESO-SUNtool. Ce logiciel permettra de tenir compte non seulement de l'aspect radiatif, mais aussi de l'aspect énergétique (opérationnelle et énergie grise) des bâtiments en général ainsi que de leur coût de manière multicritère.

Références

- Girardet, H. (1999), *Creating sustainable cities*, Schumacher Briefing 2, Green Books, 1999.
- GHG (2008): <http://www2.ghf-ge.org/>
- United Nations (2003). Department of Economic and Social Affairs / Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2003 Revision*. New York: United Nations, p.3.
- Ward Larson, G. and R. Shakespeare (1998), *Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization* San Francisco, Morgan-Kaufmann.
- J.H. Kämpf, M. Montavon, J. Bunyesc, R. Bolliger, and D. Robinson, *Optimisation of Buildings Daylight Availability*. In *CISBAT 2007*, pages 469-473, Lausanne, 2007.
- Kämpf, J.H. and Robinson D. (2008), *A hybrid CMA-ES and HDE optimisation algorithm with application to solar energy potential*, accepté pour publication dans *Applied Soft Computing*.
- Robinson, D. and A. Stone (2004), *Irradiation modelling made simple: the cumulative sky approach and its applications*, Plea2004, Eindhoven, The Netherlands.
- Chen, H. Ooka, R. and Kato, S. (2008), *Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction*, *Building and Environment*, 43: p. 18–30.