

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 136 (2010)
Heft: 11: Écologie urbaine

Artikel: Modéliser les flux d'énergie de la ville durable
Autor: Robison, Darren
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-109677>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Modéliser les flux d'énergie de la ville durable

Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, plus de la moitié de la population mondiale réside en milieu urbain qui, lui, est à l'origine de plus des trois quarts de la consommation globale des ressources. En outre, sous l'effet d'une forte croissance de la population et des migrations accrues de la campagne vers la ville, on prévoit une augmentation de l'impact environnemental de l'urbanisation au cours des prochaines années. Pour faire face à ces défis, il est important d'approfondir la compréhension des moyens d'améliorer l'efficacité avec laquelle les ressources, énergétiques avant tout, sont utilisées en milieu urbain.

Alors, comment s'y prendre ? Comment procéder pour améliorer la performance énergétique des éléments urbains, qu'ils soient nouveaux ou existants ? Afin de pouvoir faire des choix en connaissance de cause, nous avons besoin d'un logiciel permettant de modéliser efficacement un élément urbain projeté ou déjà construit, de simuler sa performance énergétique et de tester des hypothèses d'amélioration. Idéalement, un tel logiciel doit être capable d'identifier la combinaison optimale de paramètres minimisant la consommation nette d'énergie primaire, en fonction de contraintes comme le coût total. C'est là l'objectif ambitieux poursuivi dans le développement du programme CitySim.

Le fonctionnement de CitySim

CitySim est une initiative à long terme pour la modélisation et l'optimisation des flux de ressources en milieu urbain, basée sur une approche ascendante de type *bottom-up* dans laquelle la modélisation explicite d'éléments individuels conduit à des résultats à plus large échelle. Dans sa forme actuelle, l'accent porte sur la modélisation des besoins en énergie des bâtiments, et sur le stockage et l'approvisionnement visant à satisfaire ces besoins.

L'utilisateur conçoit d'abord un modèle tridimensionnel simplifié décrivant la scène urbaine à modéliser (fig. 1). Pour cela, il est possible d'utiliser notre propre outil de dessin

technique, dans lequel des formes relativement complexes sont définies en utilisant un petit nombre d'opérations géométriques. L'utilisateur peut également importer un fichier DXF dans lequel chaque bâtiment est associé à son propre calque. Les caractéristiques des bâtiments sont ensuite définies en fonction des propriétés de l'enveloppe, comme la fraction vitrée de chaque surface et les propriétés physiques des parties vitrées et opaques. Il faut également décrire la façon dont le bâtiment est habité : quand les occupants sont-ils présents et à quelle densité ? Comment les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) sont-ils utilisés, et pour obtenir quelles conditions thermiques ? Ensuite, il s'agit de définir les caractéristiques physiques de ces systèmes CVC, tout comme les systèmes de conversion (SCE) visant à satisfaire leurs besoins en énergie. Afin de faire en sorte que ce processus reste raisonnablement productif, nous développons actuellement des bases de données (iDefaults) à partir desquelles l'utilisateur est en mesure de simplement associer la géométrie d'un bâti à un type approprié de bâtiment pour une période de construction donnée, par exemple un immeuble suisse de logements construit entre 1990 et 2000. Les types de construction, la présence et l'utilisation

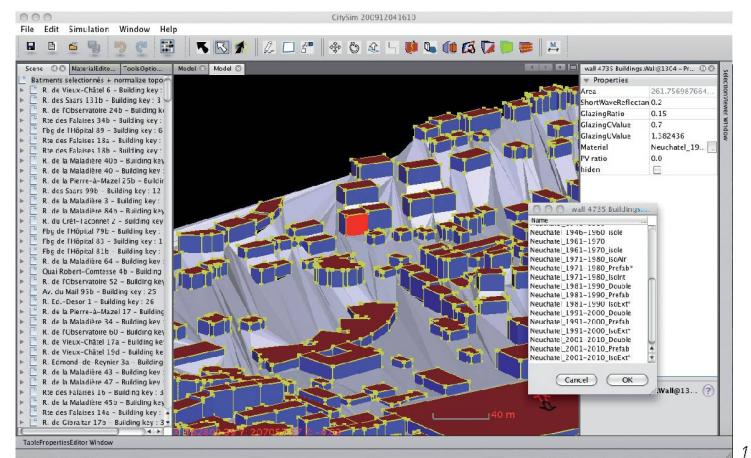
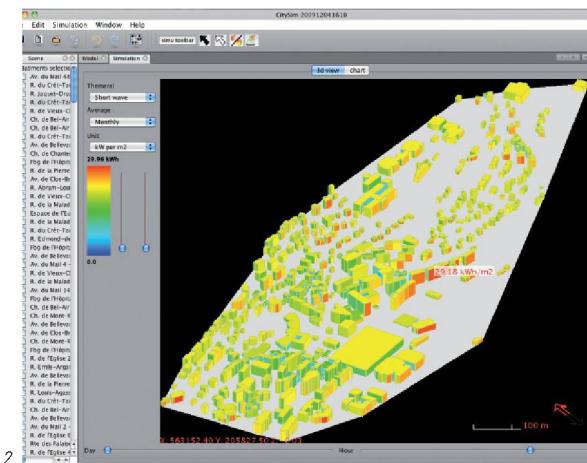


Fig. 1 : Modèle à 2,5 dimensions (les plans sont extrudés en 3 dimensions jusqu'à leurs hauteurs moyennes) d'un quartier de Neuchâtel. Fenêtre de gauche : référence du bâtiment et son adresse ; fenêtre de droite : caractéristiques de la surface sélectionnée ; la boîte de dialogue réfère aux types de constructions disponibles pour attribution par l'éditeur de matériaux.

Fig. 2 : Rayonnement solaire incident (kWh/m²) pour le mois de janvier, à l'échelle d'un quartier de Neuchâtel (Documents Darren Robinson (EPFL/LESO-PB)/FNS)

Fig. 3 : Carte des interventions dans le cadre du projet Holistic à Neuchâtel. Objectif : réduire la consommation d'énergies non renouvelables (Document Ecoparc)



2



3

des systèmes CVC habituellement rencontrées pour tel genre de construction seront ainsi attribuées à ce bâtiment, avec la possibilité pour l'utilisateur de les affiner, si nécessaire.

La description de la scène urbaine résultant de ce processus est alors transmise à un programme spécialisé capable de modéliser les flux d'énergie (voir encadré p. 14). Dans un premier temps, on modélise la radiation solaire incidente sur et à travers les surfaces définissant l'enveloppe des bâtiments. Cette radiation, combinée avec la prise en compte des profils de présence des occupants et de leurs interactions avec l'éclairage ou les appareils électriques, influence les gains internes du bâtiment, à l'instar des pertes d'infiltration et de ventilation. Un modèle dynamique thermique prédit l'énergie requise pour atteindre une température désirée à l'intérieur de chaque bâtiment. En présence d'un système CVC, les besoins en énergie peuvent être accrus par le traitement de l'air extérieur afin de satisfaire les besoins thermiques des bâtiments. Finalement, on peut avoir recours à un ensemble de modèles pour les systèmes de conversion d'énergie (par exemple chaudière, pompe à chaleur, système de cogénération, centrale éolienne, panneau photovoltaïque, chauffage solaire de l'eau), afin de satisfaire les demandes en énergie thermique et électrique des bâtiments (systèmes CVC, éclairage et appareils électriques). Cette demande en énergie peut ensuite être exprimée comme une consommation d'énergie primaire, par le biais de facteurs de conversion correspondants. Ce processus est répété chaque heure pour chaque bâtiment dans tout le domaine du quartier simulé. Le contenu énergétique des matériaux de construction peut être évalué comme post-processeur, afin d'obtenir une vision plus complète des besoins en énergie primaire du quartier.

Pour un quartier comptant environ cinq cents bâtiments, de telles simulations prennent moins de deux heures, avec un unique micro-processeur standard.

Les résultats des simulations peuvent ensuite être visualisés par le biais d'une interface graphique. Les surfaces des bâtiments peuvent être affichées en fausses couleurs en proportion, par exemple, de l'irradiation solaire incidente annuelle (fig. 2) ou de la consommation d'énergie primaire, afin de distinguer les bâtiments offrant les meilleurs ou les moins bons résultats, ou d'identifier les zones à fort potentiel pour des systèmes de conversion d'énergie solaire.

Le développement durable en milieu urbain

CitySim a déjà été utilisé pour modéliser le développement de certains quartier à Lausanne, Neuchâtel et Zurich.

A Lausanne, un concours international a été lancé en mars 2010 pour la création d'un nouvel éco-quartier sur le site de l'ancien stade olympique de la Pontaise. Ce projet ambitieux, qui fait partie de l'initiative municipale Métamorphose, est un exemple de l'engagement de la municipalité visant à positionner Lausanne en tant que ville soucieuse du développement durable. CitySim y sera utilisé pour calculer le cycle de vie et la consommation d'énergie primaire de chacun des projets de concours, dans le cadre d'une procédure de sélection dont les résultats seront annoncés en septembre 2010.

A Neuchâtel, nous travaillons en collaboration avec la ville et le fournisseur d'énergie Viteos dans le cadre d'un grand projet européen de recherche et de démonstration¹. CitySim y est utilisé pour modéliser un district d'environ 440

¹ <<http://www.holistic-ne.ch/>>

Fig. 4 : Entrée d'immeuble d'un quartier durable (Image Verena Schäffer)

Fig. 5 : Modélisation du quartier de Matthäus, à Bâle. Le dégradé de couleurs indique l'irradiation solaire annuelle. (Document Darren Robinson (EPFL/LESO-PB)/FNS)

bâtiments, afin d'identifier les possibilités de réduction des besoins en énergie et d'augmenter l'utilisation d'énergies renouvelables.

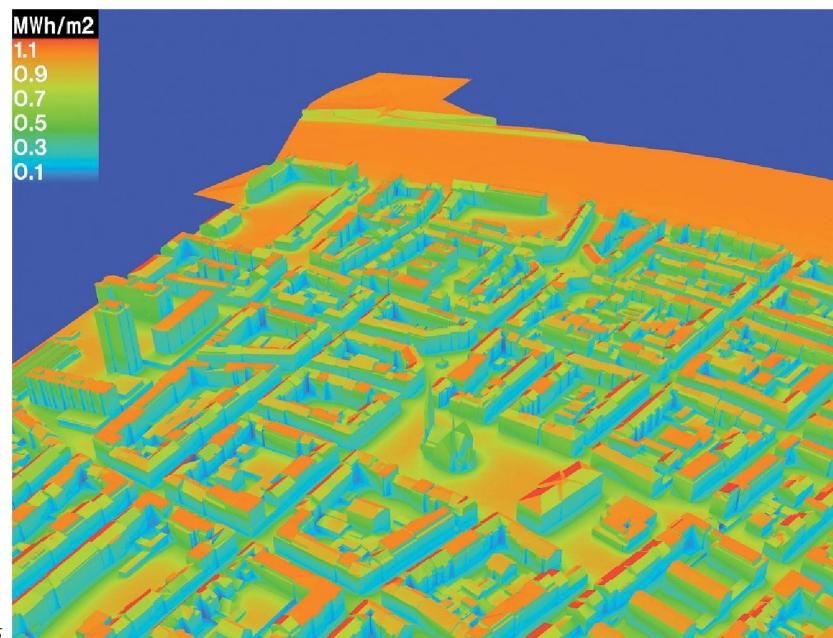
Finalement, notre projet le plus ambitieux consiste à modéliser la ville de Zurich, en collaboration avec le Professeur Kay Axhausen de l'EPFZ. L'objectif est ici de comprendre comment réduire la consommation moyenne par habitant à seulement 2 kW d'ici à 2050 (comparé à 6 kW aujourd'hui). Bien que nous nous limitions à la modélisation du transport et de la consommation des bâtiments non-industriels, nous espérons apporter un nouvel éclairage sur plusieurs questions importantes. Par exemple, dans quelle mesure est-il nécessaire d'améliorer la performance énergétique du parc immobilier existant, et de quelle manière procéder ? Quel est le potentiel de réduction de la consommation d'énergie primaire à partir d'une production décentralisée d'énergie ? Quel est le potentiel de réduction de la consommation d'énergie de transport offerte par le transfert modal ou l'utilisation de technologies plus efficaces ? Dans quelle mesure les changements d'aménagement du territoire peuvent-ils réduire les besoins en transport ? Nous prévoyons d'en débattre avec les personnes responsables en ville de Zurich au cours de 2010, pour retenir les scénarios à tester dans le cadre de ce projet.

Prédire le comportement des occupants

Le plus grand défi réside sans doute dans le développement de modèles prédisant la présence et le comportement des occupants. Il s'agit de modèles stochastiques qui incluent des réponses aussi bien déterministes qu'aléatoires à des variables d'entrée, et qui traduisent ainsi les variations du comportement entre différentes personnes et pour une même personne à différents moments, y compris dans des circonstances similaires. Nous avons accompli des progrès importants ces sept dernières années dans le développement de modèles stochastiques pour la prédiction de la présence des occupants et de leurs usages des fenêtres, des protections solaires ou de l'éclairage. La prise en compte de l'usage des appareils électriques est plus délicate, même si nous disposons déjà d'un modèle prototype prometteur. Le travail d'intégration de ces modèles dans le solveur de CitySim est en cours. Il s'agit là d'une thématique centrale, car c'est par l'échange d'une population virtuelle que nous envisageons de coupler CitySim avec le programme MATSim (Multi-Agent Transport Simulation), qui est utilisé pour la prédiction de l'utilisation des réseaux de transport à Zurich. Chaque personne, modélisée en tant qu'agent, sera transportée entre les bâtiments, accompagnée de ses attributs personnels



4



5

(âge, genre, revenu, emplacement de son domicile et de son lieu de travail) et de ses préférences (par exemple température et luminance).

Nous avons mentionné en début d’article qu’il serait idéalement possible d’identifier avec CitySim la combinaison des paramètres minimisant la consommation nette d’énergie primaire sur la base du coût total. Nous avons ainsi effectué avec succès une première expérience pour optimiser la stratégie de rénovation d’un groupe de 26 bâtiments du district de Matthäus à Bâle (fig. 5). Pour ce faire, le processus commence avec une population aléatoire dont chaque membre correspond à une combinaison de paramètres (type de bâtiments avec leurs équipements et système de conversion d’énergie) qui décrivent la scène urbaine considérée. Notre nouvel algorithme évolutionniste fait ensuite appel à CitySim, qui calcule la consommation d’énergie primaire et une estimation du coût total des mesures possibles de rénovation pour chacune des combinaisons envisagées. Les membres de cette première population qui offrent la meilleure performance (ceux qui répondent à nos contraintes de coût et qui ont de faibles besoins en énergie) sont ensuite sélectionnés afin de générer une nouvelle population avec des opérateurs de croisement et de mutation, imitant ainsi les principes de l’évolution selon Darwin. Le processus d’optimisation s’interrompt après que CitySim a effectué un nombre prédefini d’itérations qui soit suffisant pour assurer la convergence vers une solution optimale.

Les principaux modèles utilisés

Modèle radiation: Un algorithme simplifié de radiosité est utilisé pour calculer les contributions directes du soleil, du ciel et des réflexions à la radiation solaire, sur toutes les surfaces urbaines. Cet algorithme est 100 000 fois plus rapide qu'un programme standard de tracé de rayon (ou raytracing, l'alternative usuelle), et offre une précision similaire pour les applications à l'échelle urbaine.

Modèle thermique: Le transfert de chaleur entre le bâtiment et l'environnement extérieur est modélisé à l'aide de l'analogie avec un réseau électrique : les résistances électriques représentent les résistances advectives, convectives et conductrices, les capacités représentent le stockage de chaleur dans les murs et à l'intérieur du bâtiment (air et mobilier).

Modèles CVC: Le changement d'enthalpie de l'air extérieur est modélisé à chaque stade de son traitement et de sa distribution aux zones internes modélisées (récupération de chaleur, (dés)humidification, chauffage, refroidissement et distribution), en se basant sur les processus psychrométriques standards.

Modèles SCE: Une famille de modèles simplifiés empiriques simule la conversion d'énergie : du vent à l'électricité (centrales éoliennes), du soleil à la chaleur ou à l'électricité (collecteurs solaires thermiques, panneaux photovoltaïques), de l'énergie chimique à la chaleur et à l'électricité (chaudières et systèmes de cogénération) ou de l'électricité à la chaleur (pompes à chaleur).

Autres: Profils de présence (avec des modèles stochastiques en cours d'intégration); contenu énergétique associé des matériaux.

Bien que le développement de CitySim fut et continue d'être un défi de recherche passionnant, nous ne souhaitons pas que le projet reste une initiative purement académique. Nous prévoyons donc de produire une version commerciale de CitySim début 2011. Le public concerné par ce logiciel est composé aussi bien d'étudiants que de professionnels, du domaine public comme privé. Plus généralement, nous souhaitons que CitySim puisse aider le grand public à contribuer à des avancées positives vers une plus grande durabilité de nos collectivités urbaines. C'est là notre motivation principale !

Darren Robinson, Dr en physique du bâtiment
LESO-PB ENAC EPFL
Station 18
CH – 1015 Lausanne

Nous remercions le Fonds National de la Recherche Scientifique et la Commission européenne pour leur soutien financier

Références

- KÄMPF, J., ROBINSON, D., *Optimisation of urban energy demand using an evolutionary algorithm*, Proc. Eleventh Int. IBPSA Conf: Building Simulation 2009, Glasgow, UK

ROBINSON, D., HALDI, F., KÄMPF, J., LEROUX, P., PEREZ, D., RASHEED, A., WILKE, U., *From the neighbourhood to the city: resource flow modelling for urban sustainability*, Proc. CISBAT 2009, Lausanne, Switzerland

ROBINSON, D., HALDI, F., KÄMPF, J., LEROUX, P., PEREZ, D., RASHEED, A., WILKE, U., *City-Sim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning*, Proc. Eleventh Int. IBPSA Conf: Building Simulation 2009, Glasgow, UK

