

# Le quatre pages

N°20 | novembre 2014

plan urbanisme construction architecture **PUCA**

## Du bon usage de la simulation énergétique des villes

**Faut-il chercher à densifier la ville ? Quelles limites de densités ne pas dépasser ? Quelles problématiques énergétiques auront le plus d'impact dans un futur au climat changeant ?**

Les collectivités connaissent des difficultés pour trancher sur ces questions de densité urbaine et d'énergie. Les leviers d'action restent compliqués à imaginer, à évaluer et à hiérarchiser, d'autant plus qu'ils sont tiraillés par des contraintes autres que climatiques.

De plus, « l'énergétique urbaine » est un champ scientifique encore en structuration. Relativement récente dans l'histoire des sciences, celle-ci s'est largement étendue ces dernières décennies, mais rares sont les travaux qui rendent compte de la complexité des interactions régissant les systèmes urbains. La raison principale en est l'absence de bases de données pluridisciplinaires et la persistance de contraintes liées au cloisonnement des divers outils de modélisation. Le modèle informatique appelé « Genius » tente de remédier à cette défaillance.

Élaboré par Marion Bonhomme dans le cadre d'une thèse de doctorat, l'outil a été conçu pour simuler les évolutions possibles des formes urbaines et leurs conséquences sur le climat urbain. Testée sur Paris et Toulouse dans le cadre de recherches menées avec Météo France, la simulation parvient à considérer des variables spatiales et temporelles étendues, de manière simultanée, avec un haut niveau de précision. Les données produites intègrent en effet la morphologie du bâti, la matérialité, les équipements techniques jusqu'à la présence de végétation.

Si la prise en compte de facteurs sociaux et des typologies locales reste à affiner, l'outil ouvre d'ores et déjà la possibilité de scénarios détaillés d'adaptation au changement climatique. Non pour connaître l'avenir des villes, mais pour rendre visibles, comparables et donc discutables aujourd'hui les incidences des politiques énergétiques envisagées.

## [La démarche]

Ce *Quatre pages* est tiré de la thèse en génie civil de Marion Bonhomme intitulée « Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine ». Soutenu en 2013 à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse sous la direction de Luc Adolphe, ce travail doctoral a obtenu le prix spécial du **Prix de thèse sur la ville 2014** organisé par le PUCA, l'APERAU et la FNAU.

## Une base de données multi-scalaire, multidisciplinaire et évolutive

La thèse a pour objectif la mise au point d'un outil de modélisation énergétique de la ville, nommé Genius pour « GENérateur d'Ilots UrbainS ». Il a été élaboré suivant des méthodes synchronique et diachronique et expérimenté dans le cadre de deux projets de recherche portés par le Centre National de Recherches Météorologiques - Météo France : l'un sur Paris (Muscade), l'autre sur Toulouse (Acclimat). Ces projets visaient à étudier de nos jours à 2100 les interactions entre structure de villes, procédés constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie renouvelable, microclimat urbain et changement climatique.

La première étape a consisté à bâtir sept scénarios combinant hypothèses climatiques, macroéconomiques, urbaines et techniques. Genius a ensuite été couplé à Sledum, un modèle prospectif d'expansion urbaine, qui a produit pour chaque scénario des bases de données urbaines tous les dix ans jusqu'en 2100. La modélisation numérique a ensuite permis de cibler les résultats par thèmes : consommations de chauffage, de climatisation, îlot de chaleur urbain estival, étalement urbain, taux de végétalisation, répartition des types de quartier, distances moyennes parcourues par les ménages, etc.

## Intérêt comparatif des deux villes-tests

En dehors du climat qui les distingue, les densités de population de Paris et Toulouse sont difficilement comparables (5,6 fois plus élevée pour la première). A l'échelle de l'unité urbaine comme à celle de l'aire urbaine, la métropole parisienne est aussi 3,5 fois plus étendue que son homologue toulousaine.

### ► **Le paradoxe énergétique urbain ou la densité revue par les problématiques énergétiques**

Il est impossible de connaître en amont la relation qui va se nouer entre densité construite et efficacité énergétique, car si une forme bâtie compacte peut réduire les consommations énergétiques, elle génère également des contraintes, en particulier en termes d'apports solaires.

Cette difficulté a été qualifiée en 2011 de « paradoxe énergétique urbain » par une équipe de recherche grenobloise. Elle renvoie dos à dos deux objectifs : la nécessité de réduire la surface d'enveloppe afin de limiter les déperditions et celle de l'augmenter pour en maximiser les apports passifs. Ce paradoxe pourrait donc bien remettre en cause des décennies de discours pro-densité. En effet, la ville dense, souvent mise en avant comme un modèle de ville énergétiquement vertueuse, est le plus généralement défendue du fait qu'elle limite les surfaces déperditives en chaleur et les déplacements en nombre et en distance.

Mais on peut tout aussi bien soutenir qu'un bâti compact dans un tissu dense aura tendance à réduire les apports énergétiques gratuits (par ventilation et éclairage naturels) ; à limiter l'utilisation de systèmes de production d'énergie renouvelable (les ombres portées, la rugosité et l'emprise au sol du bâti diminuant le potentiel de production d'énergie solaire, éolienne, biomasse et géothermique) et donc à accentuer l'effet d'îlot de chaleur urbain (par concentration d'activités humaines et de géométries contribuant au piégeage radiatif).

De nombreuses incertitudes demeurent à ce sujet, mais peu de chercheurs ont pu jusqu'alors y apporter des réponses concrètes et générales.

### ► **L'énergétique urbaine : un champ d'études victime du cloisonnement**

L'énergétique urbaine se situe à la confluence de nombreux domaines d'études : les connaissances vont chercher aussi bien du côté de l'architecture, de l'urbanisme, que de la climatologie, de la sociologie ou de l'économie. La recherche inclut aujourd'hui des problématiques liées aux énergies renouvelables, aux économies d'énergie, aux performances des systèmes, à la pollution, etc. qui laissent augurer de tout un faisceau de considérations divergentes.

Mais les travaux existants souffrent d'un manque d'ouverture aux disciplines connexes. Au sujet de la ville dense, par exemple, la plupart des études adopte une vision sectorielle : une entrée par les consommations

liées aux déplacements ou bien au chauffage des bâtiments, mais rarement les deux simultanément. Cet effet de cloisonnement des approches est accru par l'emploi désormais incontournable des outils de modélisation informatique. Les simulations numériques ont beau être nombreuses, les approches ne convoquent pas suffisamment de disciplines pour rendre compte de la complexité des interactions entre systèmes - une carence également liée à la capacité de calcul des machines.

On constate ainsi que les modèles existants ne centralisent pas l'ensemble des données nécessaires à l'énergétique urbaine : la plupart s'appuient sur des critères quantitatifs, peu disposent d'un horizon temporel lointain, le champ de la climatologie urbaine en particulier souffre d'un manque de précision à l'échelle urbaine, et une ville ne se construisant pas sur des critères énergétiques, les facteurs sociaux, économiques et environnementaux en sont les grands oubliés.

### ► **Modéliser avant de simuler : la question délicate de l'échelle**

Les simulations numériques en énergétique urbaine sont fortement contraintes par le choix des échelles à paramétrer en amont. Le manque d'intégration des études actuelles est en grande partie dû aux différences d'échelles spatiales mobilisées par les diverses disciplines. A titre d'exemple, l'étude du comportement thermique d'un bâtiment nécessite la connaissance d'informations détaillées comme la géométrie de l'édifice, les matériaux qui le composent, alors que pour l'étude du micro-climat urbain, les données nécessaires sont tout aussi vastes mais concernent plutôt l'échelle du quartier, voire de la ville.

Ainsi, bien que ces disciplines partagent un savoir commun sur les bilans énergétiques, leurs échelles d'appréhension se révèlent très différentes. La diversité des échelles temporelles impliquées complique tout autant la communication entre les différents modèles. Là où le confort à l'intérieur d'un bâtiment induit une simulation thermique dynamique sur une année complète (avec un pas de temps inférieur ou égal à l'heure), la simulation des effets des changements climatiques s'envisage sur le siècle (avec un pas de temps qui dépasse souvent l'année).

Sans compter que cet horizon temporel séculaire constitue en lui-même un défi scientifique. Autrement dit, aujourd'hui, un vide méthodologique ne permet pas de faire le lien entre les résultats des différentes disciplines, ni entre l'échelle du bâtiment et celle de la ville.

### ► Vers une évaluation énergétique prospective détaillée : apports et limites de Genius

Genius apporte d'ores et déjà des informations compatibles avec les différentes échelles et niveaux de détail de l'énergétique urbaine : il intègre les équipements, les matériaux, la géométrie des édifices pour tout ce qui touche au bilan énergétique du bâtiment ; mais aussi les types de surface et la géométrie des quartiers pour l'étude du microclimat urbain ; et enfin, la typologie et l'âge des quartiers, le nombre d'habitants et la surface bâtie pour les modèles socio-économiques d'expansion urbaine. Par ailleurs, étant couplé avec un modèle d'expansion urbaine, il peut faire évoluer ces informations dans le temps : les agglomérations parisiennes et toulousaines ont été projetées à l'échelle du siècle (avec un pas de temps allant d'un à dix ans et sur une durée variant de l'année au siècle). Le modèle a été validé sur le passé puisque 93% des constructions simulées par Genius entre 1962 et 2008 correspondent aux types de quartiers réellement existant en 2008.

Quelques limites demeurent dans la version expérimentée lors de la thèse : la prise en compte des typologies locales, notamment la complexité géométrique des tissus urbains traditionnels, les critères socio-culturels, les énergies renouvelables, l'énergie grise, les consommations liées aux déplacements ne sont pas ou peu intégrés au modèle. Ces thèmes devraient constituer autant d'entrées pour ses évolutions futures.

### ► Des solutions urbaines confirmées mais à enclencher au plus tôt

L'application de Genius sur la ville de Toulouse confirme des idées ayant déjà cours en énergétique urbaine. En premier lieu, elle souligne la nécessité d'une intervention sur l'existant pour endiguer le réchauffement du climat urbain. En l'absence de rénovation, les nouvelles constructions seules, même très performantes, ne permettraient pas de réduire significativement les consommations énergétiques, alors qu'enclencher une rénovation annuelle de 1 % du parc immobilier pour le logement et 3 % pour le tertiaire économiserait 50 % des consommations de chauffage.

Le modèle révèle aussi qu'une expansion urbaine multipolaire serait préférable au recours à une ceinture verte. Si la mise en place d'une zone tampon non constructible pourrait freiner l'étalement urbain, le développement de la ville finirait par la franchir, ce qui induirait une augmentation des distances de transports.

Enfin, Genius fait apparaître des formes compactes, denses intégrant des éléments végétaux, comme des stratégies

efficaces dans la maîtrise du climat urbain. Ce résultat, sans être innovant, offre une réponse au paradoxe énergétique urbain : une densité et une compacité raisonnables ne semblent en effet pas incompatibles avec une atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Par contre, ces dispositions ne sauraient se passer de prises de décisions rapides. Une mise en œuvre de politiques de rénovation volontariste, de contrôle de l'étalement urbain et de maîtrise des formes architecturales après 2040 pourrait n'avoir que très peu d'effets en raison de l'inertie de la ville. Genius montre enfin que le facteur 4 serait difficilement atteint en 2050 en l'absence d'efforts supplémentaires sur la production d'énergies décarbonées.

### ► Pour une prise en compte raisonnée de l'énergétique urbaine dans l'urbanisme

Genius ne délivre aucune « solution miracle » valable en tout lieu. Les projections sont contextuelles et les scénarios, volontairement caricaturaux pour comparer des résultats contrastés. Le modèle est davantage pensé comme un outil de diagnostic et d'aide à la décision collective.

Les bases de données peuvent ainsi contribuer à cibler des quartiers vulnérables au changement climatique (qu'ils soient mal isolés, peu végétalisés, à forte densité de population ou qu'ils concentrent des ménages à faibles revenus). Le modèle peut également servir à évaluer les effets de différents leviers d'action en fonction d'objectifs donnés. Aussi, plus que prédire l'avenir des villes, l'outil met-il plutôt en évidence des paramètres qui restent à recouper et à interpréter.

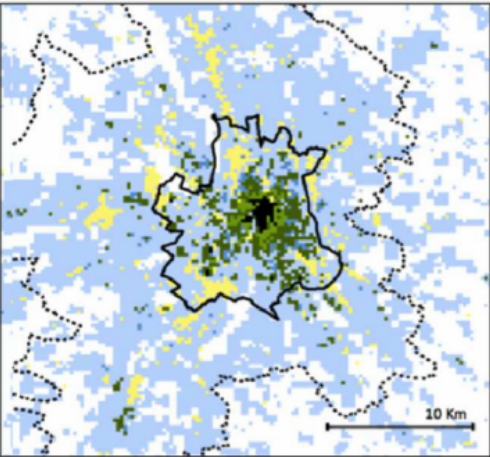
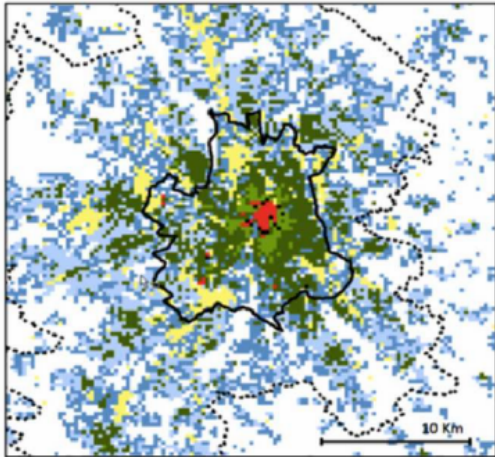
Prenons deux exemples. Les simulations sur Toulouse ont révélé que les consommations de climatisation semblaient dépendre du comportement des usagers, seule variable réussissant à les contenir dans le temps. Elles ont aussi montré que la seule libération des sols ne suffirait pas à un verdissement de la ville capable de réguler le microclimat urbain. De ces observations, la chercheuse déduit des préconisations d'actions publiques réglementaires dans le premier cas (une température de climatisation fixée à 26°C plutôt qu'à 23°C permettrait d'économiser plus de 2/3 des consommations) ou techniques dans le second (des végétaux spécifiques et un arrosage ciblé pourraient soutenir une végétalisation efficace). Ces exemples interpellent sur le fait que ces orientations sont tirées d'une lecture experte.

La plate-forme fournit à l'heure actuelle un système d'indicateurs compliqués à analyser sans médiation, mais des pistes pour faciliter la compréhension et l'appropriation de ces résultats par les décideurs urbains sont à l'étude.



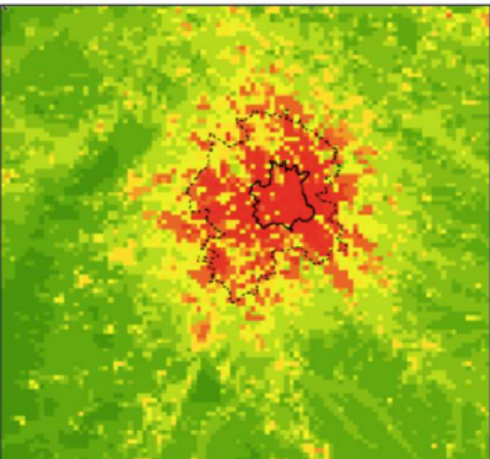
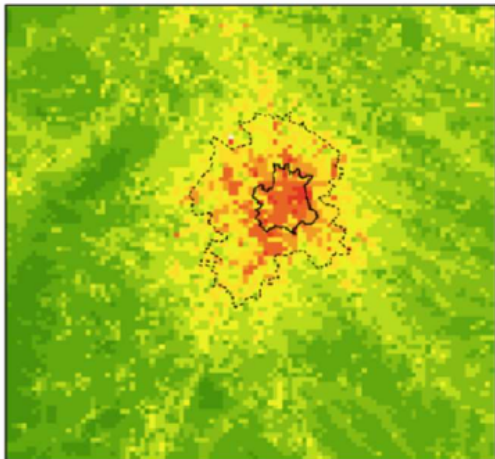
**Scénario « Ville dynamique » :**  
une expansion urbaine contrôlée  
par une ceinture verte, le retour  
aux tours de grande hauteur

**Scénario « Ville passive » :** une  
expansion urbaine incontrôlée et  
diffuse, du pavillonnaire, peu de  
rénovation énergétique



**Type de quartier**

Pavillonnaire discontinu	
Pavillonnaire continu	
Immeuble discontinu	
Immeuble continu	
Immeuble de grande hauteur	
Centre ancien	
Bâtiment d'activité	



**Ilot de chaleur urbain\***

< 0,5 °C	
0,5 à 0,75 °C	
0,75 à 1 °C	
1 à 2 °C	
2 à 2,5 °C	
2,5 à 3 °C	
> 3 °C	

\* différence de température  
entre la campagne et la ville  
(moyenne des valeurs estivales  
nocturnes maximales)

Exemple de scénarios, agglomération toulousaine en 2100 (©Marion Bonhomme)

Ce « quatre pages » est une publication destinée à faire connaître les principaux résultats ou enseignements de travaux de recherche, essentiellement ceux réalisés dans le cadre de programmes incitatifs initiés, financés et pilotés par le Puca, organe dédié à la recherche et à l'expérimentation rattaché à la Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature. Les données et les analyses présentées, sauf mention contraire, proviennent des rapports rédigés par les chercheurs. La sélection de ces éléments et leur mise en perspective n'engagent en revanche que le Puca.

## [Pour en savoir plus]

Marion Bonhomme, 2013, *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine*, thèse de doctorat en génie civil, Université de Toulouse.

Pour plus d'informations concernant le prix de thèse sur la ville, voir sur **le site du Puca**, ou le document de synthèse de l'édition 2014 disponible **ici**.

### Directeur de la publication

Emmanuel Raoul, Secrétaire permanent du Puca

### Coordination

Bertrand Vallet

### Rédaction

Béatrice Durand

### Maquette, mise en page

Christophe Perrocheau

### Chargé de l'action au Puca

Patrice Aubertel

Plan urbanisme construction architecture

Tour Pascal B

92055 La Défense cedex

Tel. : 01 40 81 24 72

<http://www.urbanisme-puca.gov.fr>

ISSN : 2427-8912



MINISTÈRE  
DE L'ÉCOLOGIE,  
DU DÉVELOPPEMENT  
DURABLE  
ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE  
DU LOGEMENT,  
DE L'ÉGALITÉ  
DES TERRITOIRES  
ET DE LA RURALITÉ