

# L'énergétique urbaine et la morphologie des villes

L'analyse du bâti parisien

## Mindjid Maïzia

L'énergétique est aujourd'hui un domaine propre à l'ingénierie. Que ce soit dans le champ scientifique ou dans celui des applications opérationnelles, l'énergétique appartient quasi exclusivement au monde de l'ingénieur. Elle possède une dimension calculatoire qui rebute la recherche en science humaine dont se réclame la morphologie urbaine. Or ce nouveau champ d'application pratique a besoin de la connaissance capitalisée par la morphologie urbaine.

Le bilan énergétique d'un bâtiment, même pris isolément, dépend fortement de la configuration physique du voisinage plus ou moins immédiat. L'ingénierie énergétique, et plus particulièrement l'ingénierie thermique, consiste à estimer les besoins d'énergies à partir de la balance entre des apports gratuits (éclairage naturel, énergies solaires, apports internes dus à l'occupation, etc.) et les déperditions structurelles du bâtiment (pertes de chaleur par l'enveloppe, par la ventilation, etc.). Cette balance n'étant jamais nulle, les dispositifs techniques ont la charge de la combler en produisant, distribuant et diffusant de l'énergie. C'est l'ensemble de ce système (conditions exogènes climatiques, confort, bâtiment et dispositifs) qui consomme de l'énergie et qui émet des gaz à effet de serre.

Le bilan énergétique et son corollaire en termes d'émission de CO<sub>2</sub> dépend fortement des dimensions formelles des bâtiments et des espaces dans lesquels ils s'inscrivent. Quoi de plus approprié que les études de typomorphologie urbaine pour mettre au jour ces caractères spécifiques de l'espace urbain? Lorsqu'il s'agit d'estimer les consommations d'énergie à l'échelle urbaine, le bilan bâtiment par bâtiment devient difficile sinon impossible. Ce bilan, qui dans le champ de la recherche scientifique permet de mesurer le caractère « performantiel » des tissus urbains et dans le champ opératoire de dimensionner les dispositifs de production et de distribution centralisés ou mutualisés, exige d'employer des méthodes de typification des bâtiments et de leur environnement immédiat. Typifier pour décrire et expliquer les paysages permet facilement de typifier pour quantifier les consommations et les émissions

de CO<sub>2</sub>. Mais les données mesurées deviennent quantitatives alors que la typo-morphologie qui décrit le paysage urbain pour le réguler se préoccupe d'effet qualitatif et de dimensions analogiques. Les méthodes d'analyse sont proches. Elles reposent sur la construction de classes d'objets, bâtiments et espaces environnants immédiats, et emploient les mêmes techniques d'information pour automatiser les opérations de calcul. Dans ce cadre là, la voie qu'a entreprise la morphologie urbaine vers l'informatisation (SIG ou outil de type REMUS) conduit facilement à des applications énergétiques directement opérationnelles.

Dans les années 1980, le G.A.M.S.A.U. en France, parallèlement aux travaux d'équipes surtout américaines, a développé une méthode de génération automatique de maquettes typo-morphologiques numérisées en trois dimensions. Ces équipes de recherche partaient du constat qu'un plan typo-morphologique n'est pas assez parlant pour décrire convenablement l'image de la ville et qu'il était difficile, sinon impossible, de constituer une base de données exhaustive de la morphologie urbaine d'une agglomération, vu la lourdeur colossale d'une saisie analogique intégrale des constructions<sup>1</sup>.

En France, l'idée développée par le G.A.M.S.A.U. est donc de concevoir un outil qui permettrait, à partir d'une connaissance de la typo-morphologie de l'ensemble urbain (en d'autres termes, après la définition des différents types de construction et l'élaboration de la cartographie de leur localisation), de produire automatiquement une maquette numérisée approchée de la ville en 3D. C'est ainsi que REMUS, développé par Quintrand et Zoller, a vu le jour

1. Idée reprise par le C.E.R.M.A. à travers le travail de D.E.A. de P. Pienot (P. Pienot, Application des procédures de l'intelligence artificielle à la morphologie urbaine, Rapport multigraphié, D.E.A., E.N.S.M., C.E.R.M.A., Nantes, 1989).

au G.A.M.S.A.U. en 1985<sup>2</sup>. Cette maquette n'a pas une vocation de représentation exacte ; il s'agit d'un outil d'aide à la décision de rénovation et de réhabilitation. Le logiciel est pourvu d'une option de visualisation permettant d'évaluer l'impact d'un projet sur la qualité de son environnement.

L'application des méthodes de la morphologie urbaine à la question énergétique consiste donc à coupler des outils informatiques à partir de l'harmonisation des données de sortie de l'un, la morphologie, et d'entrée de l'autre, le calcul du bilan énergétique.

### L'analyse des consommations et des émissions dues au chauffage des bâtiments parisiens

Cette méthodologie a été adoptée dans une étude commandée par l'APUR (Atelier parisien d'urbanisme). La méthode a consisté à typifier les immeubles collectifs parisiens en 10 classes, selon leur période de construction :

1. Antérieur au XIX<sup>e</sup> siècle : Immeubles datant majoritairement du XVIII<sup>e</sup> siècle (île Saint Louis, place Vendôme...).

2. Première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle : Immeubles restauration (ou Louis Philippe) dits immeubles Rambutéens (9<sup>e</sup> arrondissement...).

3. 1860-1890 : Immeubles Haussmanniens (8<sup>e</sup> arrondissements, grands boulevards).

4. 1890-1914 : Immeuble de la III<sup>e</sup> République (quartier Bastille...).

Typologie des bâtiments parisiens faisant l'objet d'un bilan énergétique



Antérieur à 1800



1800 - 1850



1860 - 1890



1890 - 1914



1918 - 1939



1949 - 1967



1968 - 1975



1976 - 1981



1983 - 1989



1990 - 1999

5. 1918-1939 : majoritairement des Habitats Bon Marché (HBM), logements ouvriers de l'époque (encerclent Paris).

6. 1949-1967 : constructions après-guerre

7. 1968-1975 : constructions de tours de logements sociaux (13<sup>e</sup> arrondissement...).

8. 1976-1981 : première réglementation thermique (RT) de 1974

9. 1982-1989 : seconde RT de 1981

10. 1990-1999 : troisième RT de 1989

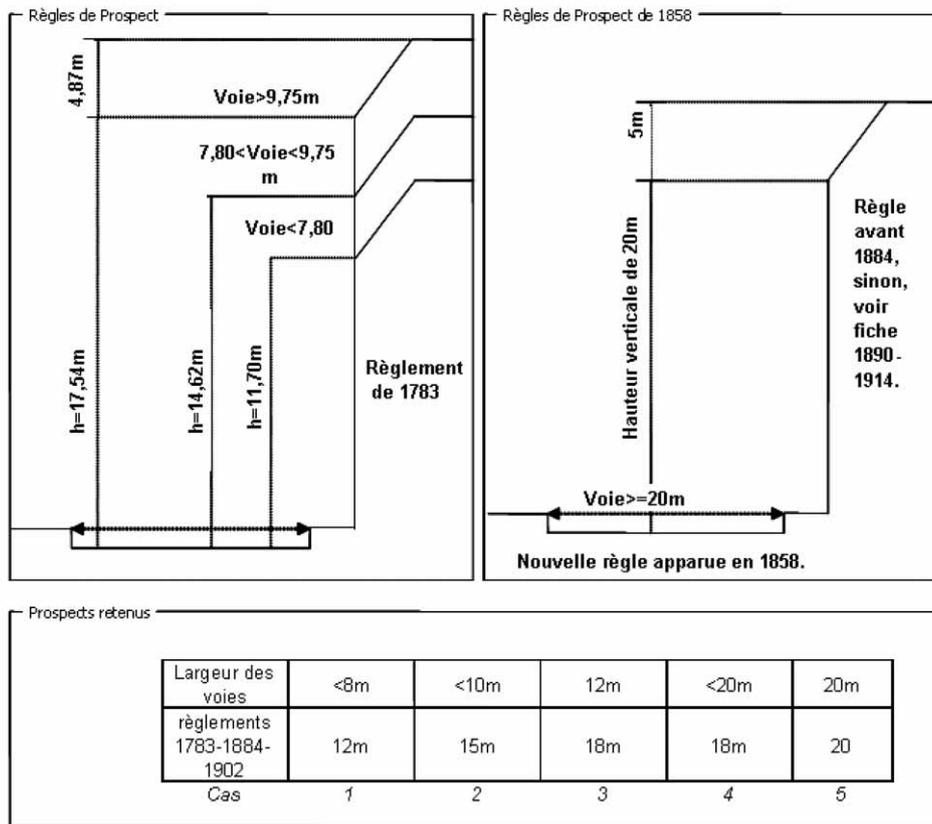
Les classes concernant le XIX<sup>e</sup> et la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle ont été empruntées à l'étude que François Loyer<sup>3</sup> avait réalisée à la fin des années 1970 pour le compte de l'APUR également. Pour les périodes plus récentes son étude a été complétée avec les données du recensement de 1999. L'APUR a décidé d'intégrer désormais la datation des immeubles parisiens au système d'information géographique de la ville.

Les caractéristiques matérielles<sup>4</sup> (épaisseur des parois,

2. P. Quintrand, J. Zoller, M. Benmahbous, « REMUS outil informatique de représentation de la morphologie urbaine - une base de connaissance orientée objet - » in Actes du colloque GRTU « La città interattiva », Milan, 1991. M. Benmahbous, P. Quintrand, J. Zoller, « From cartography to 3D representation of urban morphology » in Actes du colloque ARECDAO, Barcelone, 1993.

3. François Loyer, Paris XIX<sup>e</sup> siècle - l'immeuble et l'espace urbain, APUR.

4. Ce travail a été complété, pour connaître la composition de l'enveloppe, par Jacques Fredet, *Les maisons de Paris*, éditions de l'encyclopédie des nuisances, Paris 2003.



Prospect agissant sur les effets de masse

nombre d'étage, matériaux employés) des bâtiments de cette typologie ainsi que leur insertion dans l'espace urbain ont été enregistrées dans les fiches descriptives de la typologie. En ce qui concerne, les espaces urbains, les classes ont été construites à partir d'une analyse des divers règlements d'urbanisme, facteur primordial de l'édification de l'espace public et privé à Paris.

Enfin, pour compléter la description (en termes de variables pertinentes dans un calcul énergétique), on a discrétisé les diverses orientations possibles des façades principales des immeubles<sup>5</sup> (une rotation par pas de 15° en partant de l'orientation sud).

A partir de cette description typo-morphologique somme toute classique, un bilan énergétique tout aussi classique devenait possible.

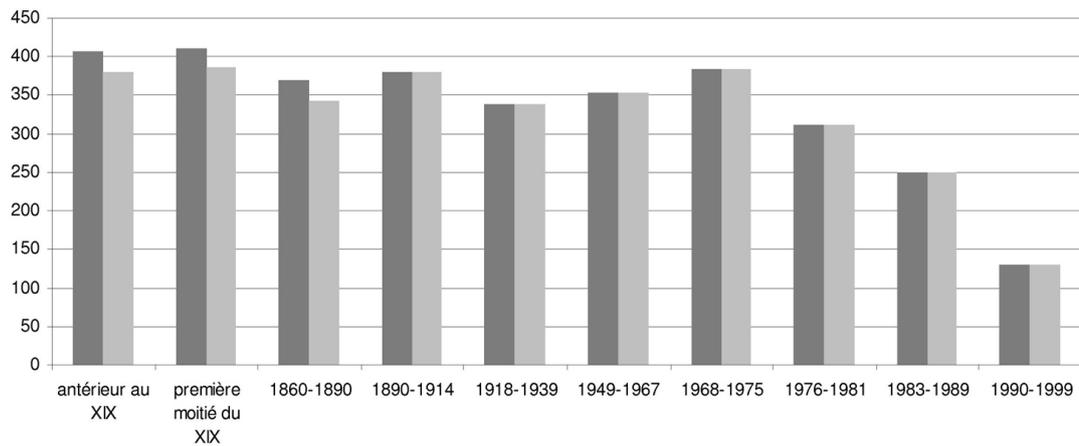
Pour l'étude, ce bilan se limitait aux besoins puis aux consommations de chauffage. On a couplé un module de calcul thermique à la base typo-morphologique afin d'établir une typologie « morpho-énergétique » du bâti parisien.

### Le principe du calcul thermique d'un bâtiment

Il existe plusieurs manières de mesurer les consommations de chauffage dans le logement. Deux approches sont

toutefois dominantes : d'une part, les consommations sont mesurées (par exemple, à partir d'un relevé de compteur) d'autre part, elles sont calculées (à partir de modèles plus ou moins sophistiqués). La première approche permet de quantifier assez précisément les consommations effectives mais ne peut, d'emblée, identifier les variables expliquant le niveau de ces consommations. Trop agrégées, les mesures, sont obligatoirement complétées par des estimations relevant de la deuxième approche, le recours aux modèles. Ainsi les résultats relatifs au niveau des consommations trouvent une explication théorique dans les variables en jeu du système thermique. Cette méthode de calcul revient à déterminer les besoins de chauffage selon les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment, les données climatiques, les températures conventionnelles recommandées pour le logement (écart de température exprimé en degrés jours) et les apports gratuits (solaires par le vitrage et internes par l'occupation du logement). Cette méthode est décrite dans le détail par la réglementation thermique 1989 (RT89) et permet de rendre indépendantes (à l'inverse d'une méthode basée sur les consommations comme dans les réglementations thermiques

5. Cette discrétisation n'est pas théoriquement indispensable. Elle permet simplement de réduire considérablement les temps de calcul.



Dépense par l'enveloppe des bâtiments par type de périodes de construction, en m<sup>2</sup> de façades. En foncé, les façades sur rue, en clair, les autres façades.

2000 et 2005) les performances du bâti de celles des équipements de chauffage (notamment des rendements des chaudières, des émetteurs et des modes de distribution). Dans le cadre de cette étude, un module de calcul a été livré pour faciliter l'estimation de ces besoins pour divers types de bâtiments parisiens et pour tester, a posteriori, des scénarios d'amélioration des performances des enveloppes et des équipements.

Ce module se compose d'entrées qui correspondent aux attributs morphologiques du bâti que l'on avait identifié dans la première phase du travail. Il s'agit notamment :

- De l'orientation du bâtiment ;
- Des caractéristiques matérielles de l'enveloppe (matériaux, épaisseurs, composition)
- Du type de ventilation

Un dernier volet est consacré aux types d'équipement (utile dans un second temps) afin de traduire les besoins de chauffage en consommations théoriques (à partir des rendements de génération, de distribution et de diffusion des appareils).

Le module produit en sortie les besoins de chauffage pour chaque type de logement, les consommations et les émissions de CO<sub>2</sub> induites. Ces résultats sont pour la plupart ramenés à la surface habitable afin de faciliter les analyses comparatives.

Les consommations théoriques et celles mesurées *in situ* par la première approche sont rarement concordantes. Le différentiel entre les deux méthodes est produit par l'association de plusieurs composantes des calculs : l'imprécision inhérente à la détermination des besoins selon la Réglementation thermique 1989, les variations climatiques entre plusieurs années et les comportements des occupants vis à vis du chauffage. Sur ce dernier point, deux éléments agissent simultanément sur les écarts entre consommations mesurées et théoriques et sont considérés par tous les experts comme prépondérants : d'une part, les effets de l'intermittence et de l'inertie des systèmes de chauffage, d'autre part les effets du coût de l'énergie sur la consommation qui engendrent généralement une adaptation de la part des usagers de la température recommandée. Cela étant dit, le couplage des analyses

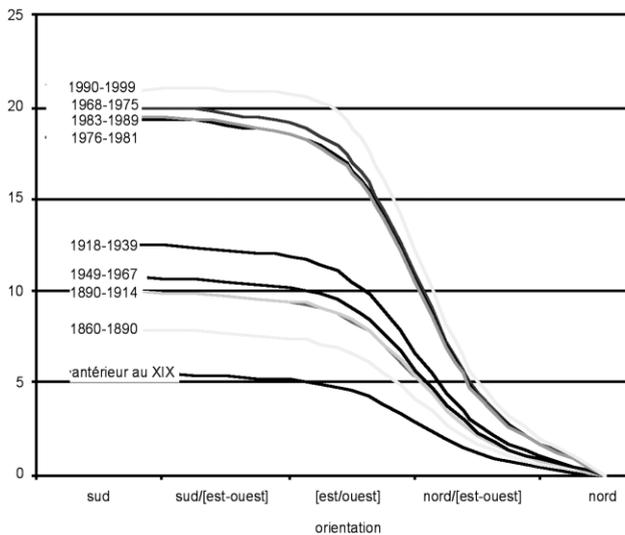
typo-morphologiques et des bilans énergétiques permettent de produire des résultats instructifs dont nous pouvons ici présenter les grandes lignes.

### La typologie morpho-énergétique de Paris

Si l'on considère uniquement les dépenses par l'enveloppe, les niveaux moyens de ces dépenses par m<sup>2</sup> de façade sont relativement élevés. En moyenne (sans pondération d'effectifs), ils sont pour un étage courant de l'ordre de 350 kWh/m<sup>2</sup>/an pour les façades sur rue et de 340 kWh/m<sup>2</sup>/an pour les autres. Les immeubles anciens ont plus de dépenses (390 kWh/m<sup>2</sup>/an) en raison de l'absence d'isolation (pour les immeubles récents les niveaux sont proches de 130 kWh/m<sup>2</sup>/an). Il faut toutefois noter que pour les périodes anciennes, le haut niveau de dépense des façades est compensé par une faiblesse de la surface d'enveloppe due à un fort taux de mitoyenneté. Pour les étages supérieurs (anciennement, les combles), les niveaux sont relativement importants lorsqu'aucune isolation n'est mise en place.

L'examen du rapport entre édifice et environnement immédiat à partir du croisement du type de prospect, du type par période de construction et de l'orientation des façades permet de quantifier les apports solaires en tenant compte des effets de masques. Les niveaux relativement faibles des apports solaires entre les périodes allant jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle compris par rapport à ceux des périodes récentes (2 à 4 fois inférieurs pour les premières) s'expliquent principalement par la relative faiblesse des surfaces de vitrage et des contraintes de prospect (dans une mesure plus faible), ce qui augmente les effets de masques.

La combinaison de ces analyses permet de quantifier les besoins de chauffage par type de bâtiment exprimés par m<sup>2</sup> de surface habitable. Ces besoins varient entre 230 et 100 kWh/m<sup>2</sup>/an selon la typologie. Ces variations s'expliquent principalement par la conjonction de divers paramètres



Apports solaires moyens en kWh/m<sup>2</sup>/an de surface d'enveloppe selon l'orientation du bâti

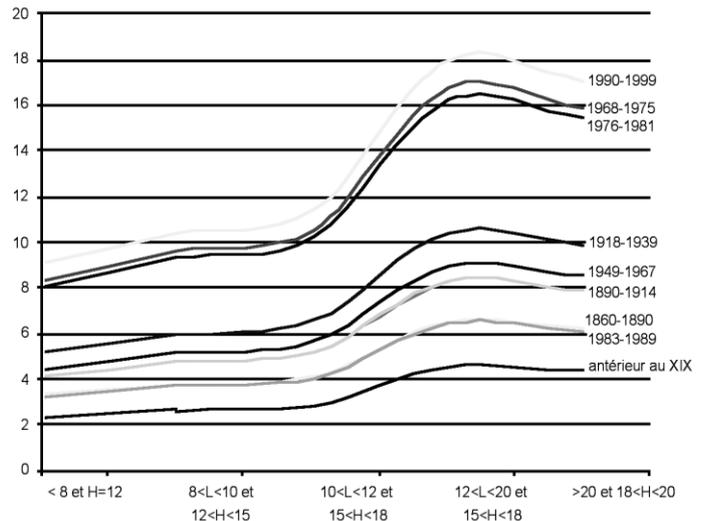
dont les effets sont extrêmement imbriqués. De manière caricaturale, les bâtiments très anciens (antérieurs à 1900) ont des besoins de chauffage élevés à cause de la faiblesse de leur niveau d'isolation et de leur taux de vitrage (inférieur à 25%), les apports solaires sont d'autant réduits que ce sont ces bâtiments qui subissent le plus les contraintes de prospect et les effets de masques afférents. Néanmoins, leur niveau d'efficacité est relativement bon, malgré ces caractéristiques, car ces immeubles profitent grandement de murs de refend mitoyens.

A l'opposé, les bâtiments récents montrent des besoins de chauffage bien inférieurs dans l'ensemble car ils ont tous joui de l'isolation imposée par la réglementation thermique à partir de 1974. Ils bénéficient plus des apports solaires car leur vitrage représente une bonne part de la surface des façades (environ 50%).

Cet atout devient un inconvénient lorsque les façades sont moins bien orientées. Ils « profitent » de prospects moins contraignants bien que lorsque ces derniers s'imposent, le taux élevé de leur vitrage se transforme en inconvénient majeur du point de vue du chauffage car ces façades se transforment en lieux de concentration des déperditions. A l'inverse de ce qui se passe pour les bâtiments anciens, le niveau d'efficacité thermique des bâtiments récents aurait pu être meilleur si la proportion de mitoyenneté avait été plus forte.

### Pour une typo-morphologie des organes techniques des bâtiments et des espaces urbains

Ces comparaisons ont le mérite de classer les bâtiments par types de besoins de chauffage sans anticipation aucune sur les niveaux des consommations et encore moins des émissions

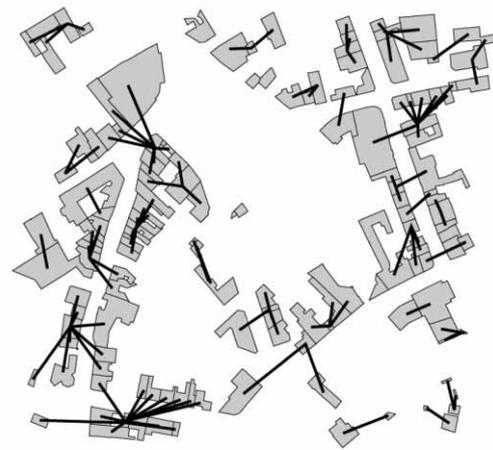
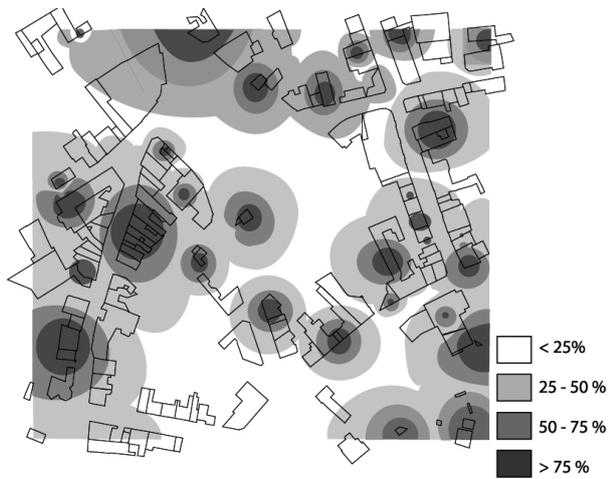


Apports solaires moyens en kWh/m<sup>2</sup>/an de surface d'enveloppe selon le prospect

de CO<sub>2</sub>. Or consommations et émissions dépendent fortement des dispositifs techniques de production, de distribution et de diffusion de la chaleur. Ces dispositifs ne sont pas totalement indépendants de la morphologie des bâtiments et des espaces urbains, en particulier en ce qui concerne les modalités de distribution de l'énergie. A titre d'exemple, certains types tolèrent mieux que d'autres les systèmes de distribution centralisée à l'échelle du bâtiment (chauffage central collectif) ou à l'échelle urbaine (réseau de chaleur). Ces dispositifs collectifs ne sont mis en place que lorsque la morphologie urbaine le permet, ce qui est le cas à Paris à cause (ou grâce) à la forte contiguïté du bâti.

Du point de vue récent d'un développement durable, on constate que les gisements d'économies d'énergie fossile, venant notamment de la production de systèmes d'énergies renouvelables, sont totalement tributaires des configurations de l'espace urbain. Cela est évident de l'énergie solaire qui peut être introduite par les ouvertures mais aussi être exploitée par d'autres biais – panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques, façade en double peau, etc.) mais aussi pour des systèmes moins visibles comme la géothermie, les dispositifs de ventilation, etc.

Ces remarques nous conduisent à défendre l'idée que la morphologie urbaine (en tant que discipline) doit également s'intéresser aux dispositifs techniques qui se logent dans les bâtiments ou dans (ou sous) l'espace public pour ne plus se limiter à regarder uniquement l'organisation spatiale et les façades. Il est peu probable que l'introduction de la question des organes techniques des bâtiments dans la typo-morphologie puisse se réaliser avec autant de facilité que l'articulation des analyses typo-morphologiques (surtout lorsque ces dernières sont fortement automatisées) aux recherches relatives à l'énergétiques des tissus urbains. Les composantes techniques étant toujours considérées comme étrangères aux problématiques des architectes et des



Exploitation des gisements solaires urbains par l'intermédiaire de mini réseaux

géographes, leur prise en compte nécessiterait un réel changement culturel de ces disciplines.

### La connaissance de la forme des villes : un enjeu environnemental majeur

D'autres raisons devraient encourager la morphologie urbaine à intégrer les questionnements de l'énergétique. En effet, la morphologie s'est toujours occupé à décrire (et, lorsqu'elle était rigoureuse, à expliquer) la forme des villes dans leur état actuel à partir d'une connaissance de leur passé. Or, chacun sait que pour répondre aux enjeux énergétiques et d'émission de gaz à effet de serre aux horizons fixés respectivement par l'épuisement attendu des ressources fossiles et par les accords internationaux sur le climat (au moins à 2050), on devra d'abord agir sur le parc bâti hérité de l'histoire des villes. A titre d'exemple, en France, si le taux de renouvellement du parc de logements demeure à son rythme actuel, soit environ 1% par an, le parc construit aujourd'hui et hérité du passé représentera plus des deux tiers de celui de 2050.

A Paris, d'après le recensement général de la population, sur les 1 110 912 logements qui composent le parc parisien en 1999, 46,5% ont été construits avant 1915 et constituent 62% des immeubles (alors qu'à l'échelle nationale, ce segment ne représente « que » 25% du parc). Ces logements sont quasiment tous situés dans des immeubles collectifs, puisqu'à Paris les maisons individuelles ne représentent que 1,2% du parc. Les logements chauffés au gaz (en réseau) et à l'électricité représentent respectivement 39 et 32% des résidences principales parisiennes et jusqu'à 11% du total sont connectés à un réseau de chaleur urbain.

Si l'on appliquait la formalisation en typologie « morpho-énergétique » à l'ensemble du tissu d'un arrondissement parisien (par exemple, le 4<sup>e</sup>) dont la quasi-totalité des

bâtiments ont été construits avant 1915, on obtiendrait une consommation globale d'énergie de chauffage de catégories F ou G dans le classement en énergie primaire « étiquette énergie » et une émission moyenne par habitant, uniquement pour le chauffage, de 428 kg de CO<sub>2</sub> par an (soit un classement G). Une connaissance plus précise des qualités architecturales des édifices permettrait de mieux identifier les leviers disponibles pour améliorer les performances énergétiques des bâtiment. Divers scénarios d'amélioration de l'efficacité énergétique, plus riches et/ou plus nuancés, sont envisageables.

La morphologie urbaine pourrait apporter sa pierre dans la formalisation des scénarios prospectifs. En effet, par son inscription historique, elle a produit une quantité non négligeable d'informations sur les modalités d'occupation du sol sur des périodes très lointaines (allant parfois, jusqu'au plus loin des fondations des cités ou sur les prémisses rurales de l'urbanisation). Les enjeux énergétiques s'inscrivent quant à eux dans le futur, ou plus précisément dans la projection, sur l'avenir, d'un possible. Pour orienter les stratégies locales ou nationales, et identifier les tendances lourdes de l'urbanisation, les prospectivistes doivent faire appel à des projections rétrospectives solides.

Or, la plupart du temps, ce travail n'est effectué que sur des périodes tributaires de données quantitatives disponibles et cohérentes avec leurs modèles de calcul, ces périodes étant relativement courtes au regard de la vie des villes. Pour que les analyses morphologiques produites soient directement exploitables dans les études énergétiques il convient que l'on puisse convertir leur caractère très qualitatif en indicateurs mesurables et quantifiables. Cette articulation (transformation des données morphologiques qualitatives vers des descriptions quantitatives) peut à elle seule devenir un champ de recherche appliquée.

Elle participerait à l'intégration des questions de prospective urbaine aux méthodes historiques relativement stabilisées de la morphologie urbaine.

---

**Références bibliographiques**

Benmahbous M., Quintrans P., Zoller J., 1993 « From cartography to 3D representation of urban morphology » in Actes du colloque ARECDAO, Barcelone.

Darin M., 1998, «The study of urban form in France», *Urban Morphology*, 2 (2).

Fredet J., 2003, *Les Maisons de Paris*, Editions des encyclopédies des nuisances, Paris

Loyer F., 1980, *Paris XIX<sup>e</sup> siècle - l'immeuble et l'espace urbain*, APUR, Paris

Quintrans P., Zoller J., Benmahbous M., 1997 « REMUS outil informatique de représentation de la morphologie urbaine - une base de connaissance orientée objet - » in Actes du colloque GRTU « *La città interattiva* », Milan.

Steadman J.P., 1973, « Graph theoretic representation of architectural arrangement » *Architectural Research and Teaching* vol 2, pp161-172;

Steadman J.P., 1983, *Architectural morphology : an introduction to the geometry of building plans*, Pion, Londres,

Traisnel J.-P., Maizia M., Peuportier D., Bornarel A., et alii, 2001, «Habitat et développement durable : étude rétrospective et prospective», *Cahier du CLIP*, n°13

Van Leusen M., 1996, « A typology of dwelling arrangements », *Environment and Planning B : planning and design* vol 23, 1pp143-164.

Vernez-Moudon A., 1997, «Urban Morphology as emerging interdisciplinary field», *Urban Morphology*, 1 (1)

---

**Biographie**

**MINDJID MAIZIA** est maître de conférences au département Génie des systèmes urbains à l'Université de technologie de Compiègne. Ses recherches portent sur les potentiels d'économies d'énergie disponibles à l'échelle du bâtiment comme à l'échelle urbaine. Ses mesures portent sur le potentiel résultant de l'exploitation des diverses ressources d'énergie renouvelable urbaines, des réductions des consommations à partir de la configuration du bâti et/ou de la mise en place de systèmes de production et de distribution mutualisés. Ses derniers articles : (2007) «Mutual supplying of renewable energies in urban context, models and application», Conférence internationale CISBAT ; (2007) «Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur» *Cahier du CLIP*, n°19, IDDRI

mindjid.maizia@utc.fr